
AKADEMIA SZTUK PIĘKNYCH
im. Władysława Strzemińskiego w Łodzi

PROJEKT URZĄDZENIA MULTIFUNKCYJNEGO
JAKO CZĘŚCI CHWYTAJĄCEJ ROBOTYCZNEGO RAMIENIA
Z PRZEZNACZENIEM DO MONTAŻU NA WÓZKACH
UŻYWANYCH PRZEZ OSOBY Z NIEDOWŁADEM
I DYSFUNKCJAMI KOŃCZYN

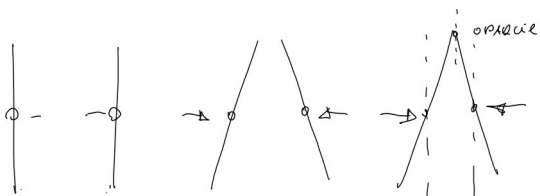
Promotor:
prof. Mariusz Włodarczyk

Autor:
mgr Michał Romaniuk

Łódź
16.09.2024r.

Spis treści

WSTĘP	5
ROZDZIAŁ 1	11
ANALIZA	
1.1 Charakterystyka ramion robotycznych	12
1.2 Interfejs użytkownika	15
1.3 Nawigowanie chwytkiem	18
1.4 Chwywanie przedmiotów	21
1.5 Test porównawczy ramion	24
1.6 Wnioski	28
ROZDZIAŁ 2	29
BADANIA	
2.1 Cel, zakres, metody	30
2.2 Badania z użytkownikami	31
2.3 Analiza filmów z użytkownikami ramienia JACO	34
2.4 Analiza uszkodzeń i śladów eksploatacji chwybaka JACO	40
2.5 Wywiad wśród inżynierów	41
2.6 Testy z udziałem dystrybutora	41
2.7 Podsumowanie badań i wnioski	42
ROZDZIAŁ 3	45
ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE	
3.1 Założenia funkcjonalne	46
3.2 Założenia techniczne	47
3.3 Założenia stylistyczne	48
3.4 Ograniczenia	49
3.5 Nowa architektura systemu	49
3.6 Synteza	50
ROZDZIAŁ 4	55
PROJEKT KONCEPCYJNY	
4.1 Przegląd istniejących rozwiązań chwybaków	56
4.2 Projekt chwybaka	59
4.3 Projekt funkcjonalno użytkowy	92
4.4 Koncepcja mapowania kierunków ruchu	98
4.5 Podsumowanie	99
ROZDZIAŁ 5	101
PROJEKT WZORNICZY	
LITERATURA	106
ENGLISH VERSION	107



*„Wszystko powinno się robić tak prosto,
jak tylko to jest możliwe - ale nie prościej.”*
Albert Einstein

Wstęp

Technologie asystujące to termin określający klasę technologii umożliwiających zwiększenie niezależności osób niepełnosprawnych. Termin ten jest bardzo pojemny i mieszczą się w nim takie proste przyrządy jak chodzik, kula, wózek, okulary, protezy, urządzenia bardziej skomplikowane jak aparaty słuchowe, urządzenia wspomagające pamięć, aż po złożone systemy teleinformatyczne. Do technologii asystujących niekiedy zalicza się też rozwiązania infrastrukturalne ułatwiające poruszenie się w miastach osobom na wózkach lub osobom niewidomym. Technologie asystujące towarzyszą człowiekowi od dawna. Z niektórymi z nich oswoiliśmy się na tyle, że postrzegamy je jako coś zupełnie naturalnego. Przez długi czas były to rozwiązania oparte na prostej mechanice. Dzisiejszy rozwój nauki i uproszczony dostęp do coraz bardziej zaawansowanych materiałów oraz narzędzi projektowych i wytwórczych spowodował powstanie gałęzi technologii asystujących, gdzie wykorzystuje się rozwiązania robotyczne, wymagające dużych mocy obliczeniowych i dorównujące technologicznie rozwiązaniom przemysłowym.



Rys.1: Użytkownik ramienia Jaco, Źródło: <https://www.online-wohn-beratung.de>

Relatywnie niszową, ale rozwijającą się gałęzią są robotyczne ramiona asystujące. Są to urządzenia montowane do wózków z napędem elektrycznym. Mogą być z nimi zintegrowane pod względem wspólnych systemów sterowania i zasilania, lub funkcjonować niezależnie od nich. Robotyczne ramie asystujące daje ludziom z ograniczeniami ruchowymi, porażeniem mózgowym lub paraliżem szansę na częściową samodzielność w codziennym życiu. Jest to urządzenie, dzięki któremu można też odciążyć w pracy opiekunów zajmujących się takimi osobami. Dzięki temu wynalazkowi ich użytkownicy mogą samodzielnie wykonywać proste codzienne czynności takie jak picie, jedzenie, otwieranie sobie drzwi, przenoszenie przedmiotów, czy nawet czesanie lub mycie zębów. Jest to jednak wciąż wąska i niezbyt rozwinięta dziedzina, a urządzenia i ich oprogramowanie będą zapewne podlegać systematycznemu udoskonalaniu.

Opracowanie to jest wynikiem własnych doświadczeń autora ze współpracy przy projekcie robotycznego ramienia asystującego oraz obserwacji doświadczeń użytkowników. Jest również zbiorem osobistych refleksji na temat jakości uzyskanych efektów funkcjonalnych i koncepcji ich poprawienia. Istotną obserwacją jest, że wykorzystanie zaawansowanej technologii samo w sobie nie gwarantuje spełnienia potrzeb użytkownika, a może generować dla niego szereg zupełnie nowych problemów użytkowych.

Celem tej pracy jest zaprojektowanie urządzenia chwytającego, które rozwiąże serię zaobserwowanych problemów użytkownika robotycznego ramienia asystującego. Istnieje wiele różnych rodzajów ramion robotycznych i chwytaków, znajdujących szerokie zastosowanie w nauce oraz przemyśle. W momencie tworzenia tego opracowania istniały tylko dwa dostępne komercyjnie ramiona robotyczne przeznaczone do montażu na wózku inwalidzkim. Producent pierwszego z nich - KINOVA - jest światowym prekursorem w tej dziedzinie. Do opracowania drugiego ramienia zostałem zaproszony przez firmę ACCREA, a celem projektu było rozwiązanie problemów użytkowych i funkcjonalnych istniejącego produktu oraz stworzenie możliwości wyboru dla odbiorców tego rodzaju urządzeń.

Do podjęcia próby stworzenia własnego projektu skłoniła mnie refleksja nad urządzeniem ACCREA, które – podobnie jak KINOVA – nie w pełni odpowiadało na zaobserwowane potrzeby użytkowników. Pomimo początkowego potencjału do wprowadzenia zmian, ostatecznie funkcjonalność całego systemu pozostała na niezmiennym poziomie. Analiza materiałów zgromadzonych w toku wspomnianego projektu pozwoliła na opracowanie nowych założeń projektowych, na których oparto projekt nowego urządzenia.

Geneza

Kilka lat wcześniej zostałem zaproszony do udziału w projekcie, którego celem było stworzenie ramienia robotycznego na rynek niemiecki, które zamontowane do elektrycznego wózka inwalidzkiego będzie stanowić pomoc dla jego użytkownika w wykonywaniu niektórych codziennych czynności. Do projektu zaprosił mnie dr Bartek Stańczyk, prace inżynierskie realizowane były przez jego firmę Accrea engineering, zamawiającym urządzenie była firma Exxomove.de, a specyfikacja pochodziła od niemieckiego Ministerstwa Zdrowia.

Udział w tym projekcie pozwolił mi na kompleksowe zapoznanie się z problematyką osób sparaliżowanych i pozytywną rolę jaką może odegrać w ich życiu urządzenie takie jak robotyczne ramię asystujące. Wcześniej, dziedzina ta była poza moim zakresem zainteresowań. Nie spotykałem też na swojej drodze osób z dysfunkcjami tego stopnia. Wejście w ten projekt wymagało ode mnie zanurzenia się w nową dla mnie niezwykle ciekawą dziedzinę. Bardzo szybko jasnym stało się, że paraliż to nie jest problem tylko osoby chorej. To problem rodziny, przyjaciół, opiekunów. To problem, który ewoluuje w czasie, zmienia się z wiekiem osoby chorej jak i z wiekiem rodziny. Takie osoby, zależnie od stopnia niepełnosprawności, są niemal całkowicie zdane na pomoc innych ludzi, a opieka nad nimi to wymagająca praca 24h/dobę. Użytkownicy ramion robotycznych to osoby w dowolnym wieku, pod warunkiem że posiadają jakąś zdolność ruchową do samodzielnego poruszania się wózkiem z napędem elektrycznym. Jest to więc bardzo szerokie spektrum wiekowe. Są to osoby o znacznym stopniu niepełnosprawności. Zdarzają się przypadki, gdzie użytkownik pewne czynności może wykonywać własnymi rękami choć w ograniczonym zakresie, a interfejs sterujący oparty jest o tablet. Możliwe jest też, że osoba aby móc się samodzielnie poruszać na wózku, wykorzystuje manipulator obsługiwany mięśniami policzka, brodą, ustami, ruchami głowy itp.

Moim zadaniem w projekcie było opracować architekturę komponentów ramienia, ustawić kinematykę, zbudować modele powierzchniowe CAD oraz wykonać szkice 3D chwytaka. Oczywiście współpracowałem w tym zakresie z inżynierami i konstruktorami, z których każdy miał swoją część pracy do wykonania i możliwa była stała wzajemna konsultacja projektu. Szczegółowe wytyczne do projektu zostały dostarczone przez zamawiającego w formie dokumentu specyfikacji. Zawarte tam informacje dotyczyły gabarytu ramienia złożonego, rozłożonego, zasięgu ruchów, budowy chwytaka, ilości stopni swobody ruchu, sposobu montażu do wózka, sterowania i wielu pomniejszych szczegółów technicznych. Wskazano również zestaw czynności, które użytkownik przy pomocy ramienia powinien wykonać.

Były to następujące czynności:

- *Podnieść ze stołu kubek z napojem i napić się z niego.*
- *Podnieść ze stołu słomkę, włożyć ją do kubka, podnieść kubek i napić się z jej pomocą.*
- *Chwycić piłkę tenisową zawieszoną na sznurku (używana jako pomoc przy otwieraniu drzwi w domu).*
- *Przenieść litrową butelkę z wodą.*



Rys.2: Użytkownik ramienia Jaco, Źródło: <https://www.online-wohn-beratung.de>

Satysfakcja i poczucie dobrze wykonanej pracy nad stworzeniem czegoś co w znaczący sposób poprawi jakość życia wielu osób dość szybko się ze mnie ulotniły. Przyczyną był dysonans poznawczy jakiego doświadczyłem podczas uczestnictwa w testach ramienia. Otrzymałem też wgląd w materiały wideo z innych testów z pacjentami w Niemczech. Zauważyłem, że pomimo spełnienia wszystkich wymagań projektowych, nasi użytkownicy mają duże problemy ze sprawnym posługiwaniem się tym ramieniem.

Wśród osób zaangażowanych w projekt panowało przeświadczenie, że po prostu użytkownicy muszą nauczyć się tym ramieniem posługiwać i po jakimś czasie na pewno problemy znikną. Sięgnąłem do materiałów promocyjnych producenta KINOVA. Tam wszystko wyglądało idealnie. Użytkownicy radośni i zadowoleni, potrafią zrobić tym ramieniem dużo więcej niż wymaga nasza specyfikacja, a czynią to z wielką zręcznością. Po bliższym przyjrzeniu się sposobowi filmowania i montażu można było zauważyć, że krytyczne momenty ustawiania chwytaka względem obiektów są pominięte. Twórcy w montażu materiałów wideo uwypuklili najlepsze cechy ich produktu, przedstawiając go jako wszechstronnego i niezawodnego asystenta codziennego życia. Oglądając te materiały bez większej refleksji i znajomości zagadnień technicznych widz dostaje obraz urządzenia niemal inteligentnego, dziecinnie prostego w użyciu. Producent zamieścił również w Internecie kilka filmów sponsorowanych nakręconych z perspektywy twórcy wideobloga, szczęśliwego użytkownika ramienia. Społecznie akceptowalne stało się to, że producent prezentuje swój produkt oszczędzając czas widza i koloryzując nieznacznie rzeczywistość. Dzięki temu łatwiej mu zainteresować swym produktem szersze grono odbiorców w krótkiej formie spotu reklamowego. Niepublikowane materiały video przedstawiające testy z użytkownikami ramienia Accrea ukazywały całkowicie odmienną rzeczywistość. Pojedyncze długie ujęcia nagrywane jedną kamerą bez cięć. Wyraźnie widać, że użytkownicy wykonują proste czynności bardzo powoli, popełniając przy tym wiele różnorodnych błędów. Należało więc poszukać w Internecie innych filmów z ramieniem Kinova, zamieszczonych przez ludzi przynajmniej oficjalnie nie związanych z producentem. Poszukiwania skupiły się głównie na długich amatorskich ujęciach bez montażu. Tu znalazłem potwierdzenie swoich przypuszczeń. Na filmach można zobaczyć twarze użytkowników i podobny rodzaj napięcia, mimiki i emocji tak jak w testach prowadzonych przez Accrea. Widać wysiłek, dużo błędów i niepowodzeń. Wniosek jaki wysuwał się z przeprowadzonego przeglądu materiałów video był taki, że oto udało się nam stworzyć z pełni konkurencyjny produkt dla JACO, jednocześnie powielając też jego kluczowe wady.

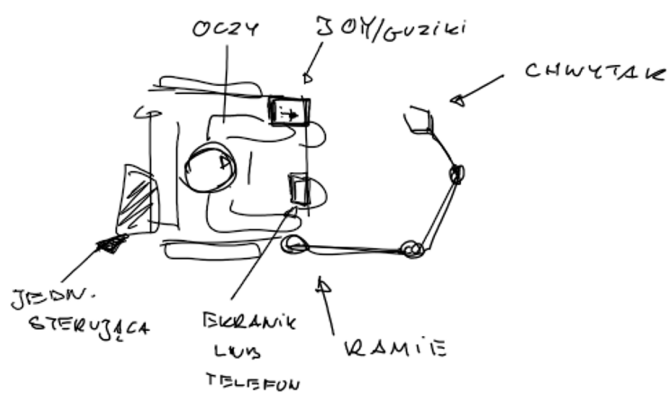


Rys.3: Użytkownik ramienia Jaco, Źródło: <https://www.online-wohn-beratung.de>

Można było potwierdzić, że w obecnej konstrukcji nie możliwe jest, aby takie urządzenie mogło działać tak sprawnie i elegancko jak przedstawiono to w materiałach marketingowych. Był jeszcze jeden aspekt, który nie dawał mi spokoju. Chodzi o etykę takich działań marketingowych. Myślę, że jest duże ryzyko, że jakieś osoby zaufają reklamie. Następnie otrzymają takie urządzenie, a po czasie poświęconym na wytężoną naukę obsługi będą w końcu musiały stwierdzić, że jednak nie są w stanie zrobić tego co osoby na filmach. Jaki to będzie miało na nie wpływ? Myślę, że moje obawy są w pewnym stopniu uzasadnione. Widziałem olbrzymi optymizm i zapał do nauki posługiwania się tym urządzeniem wśród testerów. Dlatego postanowiłem zająć się tym zagadnieniem, zbadać je i zrozumieć. Wierzyłem, że zaprowadzi mnie to na drogę do skutecznego rozwiązania problemu. Wiedziałem, że ze względu na obowiązujące wymagania przetargowe, moja praca i jej efekty nie będą mogły być wzięte pod uwagę przez Producenta. Wszystko co nie będzie dokładnie tym o czym pisze Zamawiający zostanie odrzucone na drodze urzędowej.

Uznałem, że mimo wszystko chcę podjąć się tego wyzwania. Był wszakże cień szansy aby posiadając dużo bardziej przyjazne użytkownikom rozwiązanie wpłynąć na zmianę zapisów przetargowych i wprowadzić swój produkt, deklasując tym samym konkurencję. Nie wiedziałem dokąd doprowadzą mnie wyniki badań, nie byłem pewien czy będę umiał poradzić sobie z wszystkimi napotkanymi problemami - finalnie czy faktycznie uda mi się zaproponować coś znacząco lepszego, co faktycznie pomoże ludziom. Efektem moich działań jest właśnie ta praca i projekt, który poddaję pod ocenę.

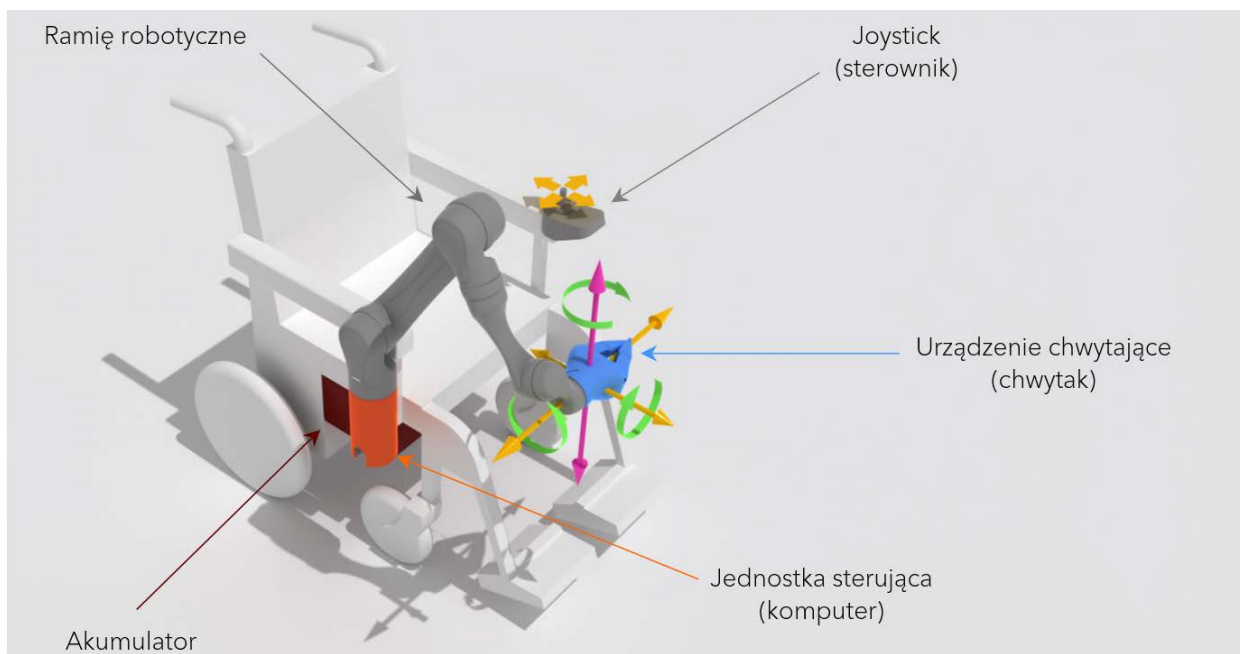
SYSTEM



Rozdział 1

Analiza

Rozdział ten przybliży, czym jest robotyczne ramię asystujące, co składa się na system, którego jest częścią, oraz jak się nim posługiwać. W dalszej części znajduje się opis testu porównawczego dwóch urządzeń oraz wnioski z tego doświadczenia. Analiza została wykonana w oparciu o dwa wspomniane wcześniej urządzenia. Co do zasady, ich działanie jest bardzo podobne. Różnią się rozwiązaniami konstrukcyjnymi, które z punktu widzenia użytkownika mogą być w większości nieodczuwalne. Dlatego tekst opracowania będzie odnosił się do obu tych ramion zamiennie, wskazując na unikalne cechy któregoś z nich. Celem tych działań jest zbudowanie pełnego obrazu funkcjonowania tego rodzaju urządzeń oraz wskazanie ich mocnych i słabych cech.



Rys.4: Schemat ideowy zastosowania robotycznego ramienia asystującego na elektrycznym wózku inwalidzkim.

1.1 Charakterystyka ramion robotycznych

System ramienia asystującego składa się z chwytaka, ramienia zintegrowanego z jednostką sterującą - komputerem, akumulatora oraz sterownika. W tym wypadku sterownikiem jest podstawowy joystick dostarczany przez firmę Kinova. Zamiennie będzie nazywany również kontrolerem. Zależnie od preferencji zamawiającego ramię może być sterowane dedykowanym joystickiem lub może wykorzystywać kontroler sterujący wózkiem.

W celu zmiany położenia chwytaka w przestrzeni użytkownik używa joysticka oraz przycisków. Kierunki ruchu joysticka w płaszczyźnie poziomej odpowiadają kierunkom ruchu chwytaka. W czasie ruchu komputer ramienia, z wykorzystaniem kinematyki odwrotnej¹ na bieżąco przelicza wzajemne położenie wszystkich jego części, tak aby chwytak znajdujący się na jego końcu znalazł się w żądanym punkcie w przestrzeni. Szybko można zauważyć, że możliwa ilość ruchów joysticka jest mniejsza od ilości możliwych ruchów chwytaka. Niesie to ze sobą pewne komplikacje w obsłudze urządzenia, które zostaną omówione w dalszej części pracy. Ciężar obu urządzeń wynosi w przybliżeniu 5 kilogramów, a możliwy udźwig 1,5kg. Obaj producenci określają wodoszczelność swoich konstrukcji jako IPx2.²

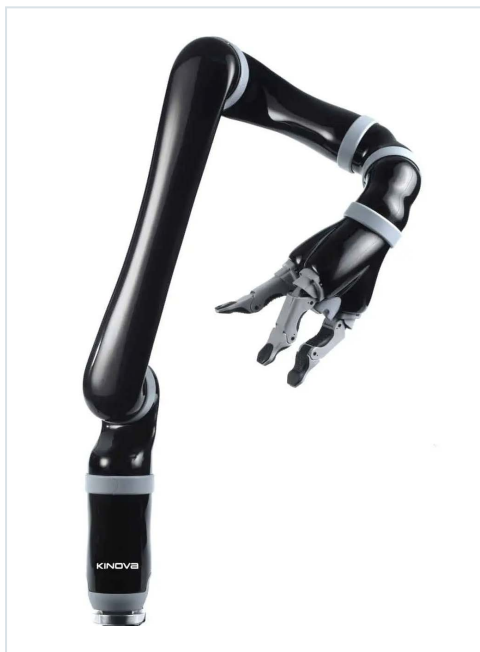
KINOVA

Ramię asystujące JACO, produkowane przez kanadyjską firmę KINOVA, posiada 6 stopni swobody czyli, 6 punktów, w których możliwy jest ruch segmentów ramienia względem siebie.³ W tych punktach znajdują się napędy elektryczne oparte na silnikach krokowych i przekładniach harmonicznym. Część chwytająca, nazywana niekiedy ręką lub dłonią, posiada trzy niezależne dwupaliczkowe palce. Każdy z palców wyposażony

1 Wprowadzenie do robotyki: mechanika i sterowanie / John J. Craig ; tł. z ang. Warszawa : Wydaw. Nauk.-Techn., 1995.

2 Stopień ochrony obudowy sprzętu elektrycznego: PN-EN 60529:2003

3 Źródło: www.kinovarobotics.com



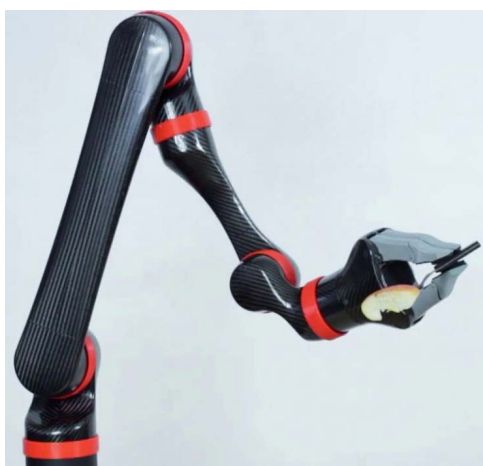
Rys.5: Robotyczne ramię Jaco,
Źródło: <https://assistive.kinovarobotics.com>

jest we własny napęd. Użytkownik może wybrać sposób, w jaki palce będą zaciskane. Możliwy jest chwyt pęsetowy oraz chwyt potrójny szczękowy. Programowo można sterować każdym z palców osobno. Sterowanie wszystkimi funkcjami ramienia odbywa się za pomocą standardowego kontrolera dostarczanego w zestawie. Duże czarne części obudowy wykonane zostały z cienkościennego laminatu karbonowego lakierowanego na wysoki połysk. Jasnoszare części wykonywane są małoseryjną metodą odlewania polimerów chemoutwardzalnych w formach. Pozostałe elementy konstrukcji wykonane zostały z aluminium obrabianego na CNC. Taki dobór materiałów i technologii produkcji umożliwił uzyskanie bardzo dobrego stosunku wytrzymałości do masy. Umożliwia też produkcję jednostkową lub nisko seryjną. Charakterystyczną cechą ramienia KINOVA jest jego estetyka i sposób ukształtowania powierzchni. Ten mocno zaokrąglony, organiczny i pozbawiony krawędzi kształt wynika

wprost z zastosowanej technologii formowania laminatu i warunków technicznych ściśle określających parametry tak wykonywanych części. Firma KINOVA posiada szereg patentów na rozwiązania techniczne wykorzystane w ramieniu JACO. Ramię Kinova występuje w kilku wariantach stopni swobody, dostępne są różne chwytaki i urządzenia sterujące. JACO z widocznym na zdjęciu chwytakiem, przez swoją precyzję działania używane jest między innymi przez firmę Airbus do testowania przyrządów pokładowych swoich samolotów. Ramię widoczne na zdjęciach, to ten sam wariant, który jest stosowany jako ramię asystujące w wózkach inwalidzkich przez firmy oferujące tego typu sprzęt dla osób niepełnosprawnych.

ACCREA

Polska firma ACCREA Engineering oferuje ramię asystujące w dwóch konfiguracjach nazwanych ARIA i BATEO. Różnica między ramionami wynika z innego układu napędów, a co za tym idzie, z nieco innego kształtu. Zachowana jest jednak spójność wzornicza obu tych konfiguracji. Ramię ACCREA jest w dużym stopniu podobne konstrukcyjnie do ramienia KINOVA. Zostało stworzone jako bezpośrednia alternatywa dla ramienia JACO stosowanego w wózkach inwalidzkich, które do tej pory nie miało konkurencji. Z tego względu zostało skonstruowane według tego samego wzoru co KINOVA i wykorzystuje te same technologie produkcji. Zakup tego typu sprzętu klasyfikowanego jako rehabilitacyjny, zwykle odbywa się z udziałem funduszy państwowych lub fundacji. Firmy, które chcą oferować takie urządzenia w swojej ofercie, muszą więc działać w oparciu o postępowania przetargowe. Zapisy przetargowe, naturalnie za sprawą braku konkurencji, ukształtowały się tak, że odpowiadają parametrom produktu KINOVA. Firma ACCREA, chcąc zaoferować równoważny produkt, musiała wziąć te



Rys.6: Robotyczne ramię Bateo,
Źródło: <https://www.accrea.com>

zastosowanej technologii formowania laminatu i warunków technicznych ściśle określających parametry tak wykonywanych części. Firma KINOVA posiada szereg patentów na rozwiązania techniczne wykorzystane w ramieniu JACO. Ramię Kinova występuje w kilku wariantach stopni swobody, dostępne są różne chwytaki i urządzenia sterujące. JACO z widocznym na zdjęciu chwytakiem, przez swoją precyzję działania używane jest między innymi przez firmę Airbus do testowania przyrządów pokładowych swoich samolotów. Ramię widoczne na zdjęciach, to ten sam wariant, który jest stosowany jako ramię asystujące w wózkach inwalidzkich przez firmy oferujące tego typu sprzęt dla osób niepełnosprawnych.



Rys.7: Ramię Jaco w zautomatyzowanych testach Airbus Helicopter, Źródło: <https://www.youtube.com/@Kinovarobotics>

wszystkie warunki pod uwagę przy tworzeniu własnej konstrukcji. Jest to widoczne już na pierwszy rzut oka. Tym co najsilniej wpłynęło na podobieństwo do ramienia Kanaadyczyków, jest technologia cienkościennego laminatu węglowego. Determinuje ona kształt i grubość przekrojów, sposób formowania powierzchni oraz uniemożliwia wykonywanie otworów i krawędzi. Aby nie naruszyć ochrony patentowej, inna jest kinematyka oraz całkowicie inaczej skonstruowano część chwytającą. Posiada ona jeden napęd i trzy symetrycznie poruszane nim dwupalczkowe palce. Części zewnętrzne wykonane są w technologii odlewania polimerów chemoutwardzalnych w formach. Konstrukcja wewnętrzna wykonana jest z aluminium metodami CNC. Ramię ACCREA rozwijane jest w kilku kierunkach zastosowań specjalnych; między innymi powstała wersja ramienia asystującego przy operacjach laparoskopowych. Urządzenia BATEO i JACO, zgodnie z założeniami, działają bardzo podobnie. Mają zbliżone gabaryty i parametry użytkowe. Mimo różnic w konstrukcji chwytaka, z punktu widzenia użytkownika na wózku działa on w większości przypadków tak samo. Wyjątkiem jest specyficznie realizowany przez JACO chwyt pęsetowy, dwoma z trzech palców, ale dostępny jest w bardziej zaawansowanych wersjach sterownika z ekranem. Nie jest to funkcjonalność krytyczna. W zamian za to ramię ACCREA posiada mniej podatne na uszkodzenia palce.



Rys.8: Wariant ramienia Bateo podczas symulacji operacji laparoskopowej, Źródło: <https://www.accrea.com>

1.2 Interfejs użytkownika



Rys.9: Joystick wózka i wyświetlacz Kinova,
Źródło: <https://assistive.kinovarobotics.com.de>



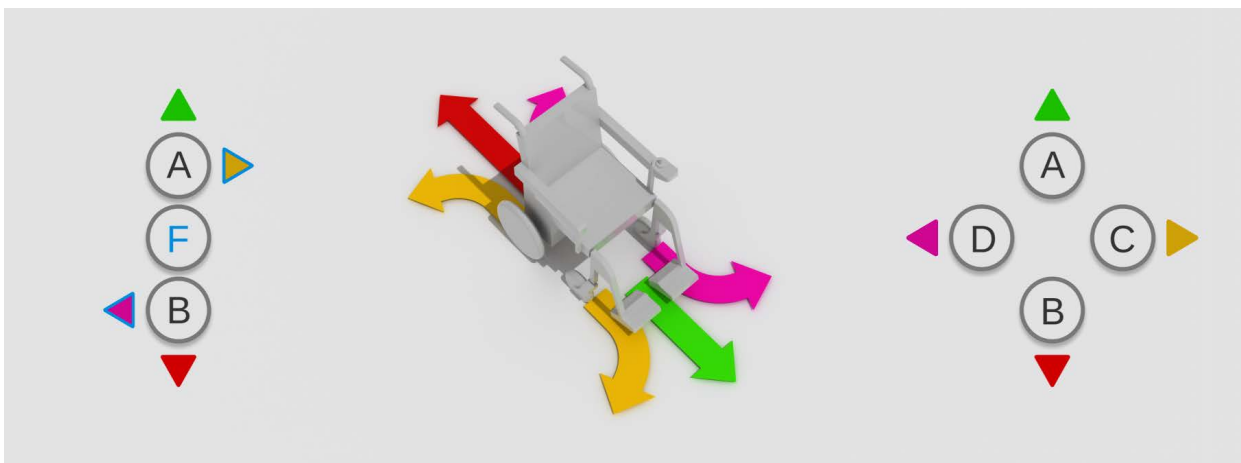
Rys.10: Joystick Kinova



Rys.11: Sterowanie dwuelementowe, przycisk oraz klawiatura

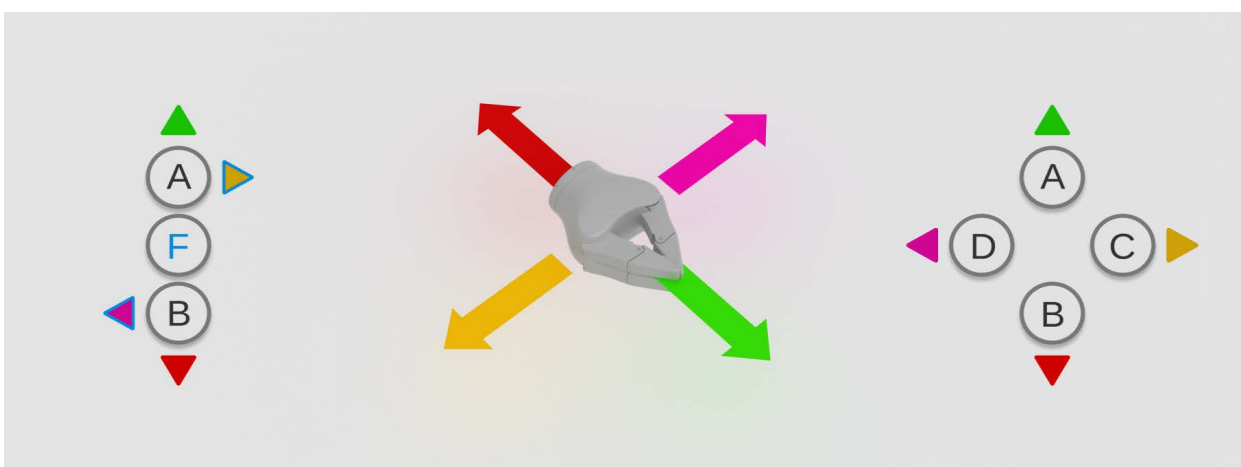
Interfejs użytkownika składa się z joysticka jako narzędzia do wydawania poleceń, ramienia jako efektora oraz ekranu z graficzną wizualizacją możliwych kierunków ruchów chwytaka. Możliwe jest wykorzystanie natywnego kontrolera do sterowania wózkiem lub dodanie dedykowanego kontrolera do sterowania ramieniem, takiego jak joystick, klawiatura funkcyjna, pad lub inny, odpowiednio spersonalizowany interfejs. Ramię JACO można zamówić ze standardowym kontrolerem, który posiada joystick, 7 przycisków i 8 diod sygnalizacyjnych. Joystick ma trzy stopnie swobody: dwa z nich to ruch dźwigni na płaszczyźnie poziomej, a trzeci to obrót dźwigni w osi pionowej. Umożliwia to jednoczesne poruszanie chwytakiem w trzech wymiarach. Funkcję obrotu na joysticku można przypisać ruchowi chwytaka w pionie (górze-dół) lub jego obrotowi w nadgarstku (prawy-lewy). Firma Accrea nie posiada w ofercie dedykowanego kontrolera dla ramienia BATEO, jednak istnieje możliwość podłączenia dowolnego kontrolera ruchu do jednostki sterującej. Dobór odpowiedniego kontrolera oraz kalibrowanie systemu w obu przypadkach odbywa się z udziałem użytkownika oraz ekspertów dystrybutora sprzętu rehabilitacyjnego podczas sesji testowej. Podczas korzystania z urządzenia użytkownik koncentruje się na końcówce ramienia - chwytaku, kontrolerze oraz obiekcie, z którym chce wejść w interakcję. Polecenia są wydawane przy użyciu zmysłu dotyku, podczas gdy informacja zwrotna o efekcie wykonanej czynności dociera do użytkownika za pomocą zmysłów wzroku i słuchu. Użytkownik ocenia wzrokowo, czy położenie chwytaka w przestrzeni jest poprawne oraz czy siła chwycenia obiektu jest wystarczająca, aby móc go na przykład podnieść i bezpiecznie przenieść w inne miejsce. Siłę zaciśnięcia chwytaka ocenia na podstawie efektów, takich jak to, czy chwycony obiekt nie wysuwa się z chwytaka, czy nie został odkształcony lub czy nie wydał niepokojącego dźwięku. Napędy urządzenia wydają dźwięki charakterystyczne dla przekładni mechanicznych, a ich natężenie i wysokość, po zapoznaniu się z urządzeniem, dostarczają użytkownikowi dodatkowych informacji na temat prędkości, z jaką przemieszcza się chwytak.

Jest to przydatne w treningu posługiwania się urządzeniem z wykorzystaniem joysticka, którego stopień wychylenia wpływa na zmianę prędkości napędów. Informacja dźwiękowa uczy właściwego wyczucia stosunku prędkości do odległości na jaką chwytak ma być przemieszczony. W przypadku gdy kontroler użytkownika działa zero-jedynkowo, maksymalna prędkość napędów ramienia jest ograniczana, aby uniknąć przeciążeń wynikających z nagłego startu i zatrzymania konstrukcji. Jak wspomniałem wcześniej, ilość stopni swobody⁴ ruchu joysticka lub liczba przycisków kontrolera może być mniejsza niż liczba stopni swobody chwytaka. Dzieje się tak często, ponieważ dysfunkcje rąk użytkownika mogą uniemożliwiać użycie optymalnego kontrolera do sterowania chwytakiem. Sytuacja staje się bardziej skomplikowana, im prostszy kontroler może obsłużyć użytkownik.



Rys.12: Sterowanie wózkiem w dwóch kierunkach przy pomocy 3 i 4 przycisków.

W uproszczeniu, aby móc poruszać się wózkiem z napędem elektrycznym, minimalnym wymogiem jest kontroler złożony z trzech przycisków. Jeden z tych przycisków pełni rolę przycisku funkcyjnego. Oznacza to, że każde wciśnięcie przycisku funkcyjnego zmienia funkcje przypisane dwóm pozostałym przyciskom. Przyciski są monostabilne, co oznacza, że napęd wózka działa tylko wtedy, gdy użytkownik trzyma wciśnięty przycisk. Na przykład, przycisk A odpowiada za ruch wózka do przodu, przycisk B za ruch wózka do tyłu. Po wciśnięciu przycisku funkcyjnego F, funkcje przypisane przyciskom A i B zmieniają się na skręt wózkiem, przy czym przycisk A odpowiada za skręt w prawo, a przycisk B za skręt w lewo. Kolejne naciśnięcie przycisku



Rys.13: Sterowanie chwytakiem w dwóch kierunkach przy pomocy 3 i 4 przycisków.

F powoduje przywrócenie funkcji ruchu do przodu i do tyłu dla przycisków A i B. Dzięki możliwości zmiany funkcji dwóch z trzech przycisków możliwe jest proste sterowanie wózkiem. Podobnie może odbywać się sterowanie ramieniem - przełączając funkcje przycisków odpowiednią liczbę razy, można obsłużyć wszystkie funkcje ramienia. Jest to technicznie wykonalne, ale zajmuje więcej czasu. Z praktycznego punktu widzenia lepiej, aby użytkownik mógł obsługiwać kontroler złożony z pięciu przycisków. Taki kontroler pozwala na użycie czterech przycisków do przemieszczenia chwytaka na jednej płaszczyźnie w dwóch kierunkach. W ten sposób użytkownik może jednocześnie poruszać się w kierunkach przód-tył oraz prawo-lewo, bez konieczności przełączania funkcji. Kontroler nie musi stanowić jednego obiektu. Może zostać podzielony na dwie grupy przycisków -

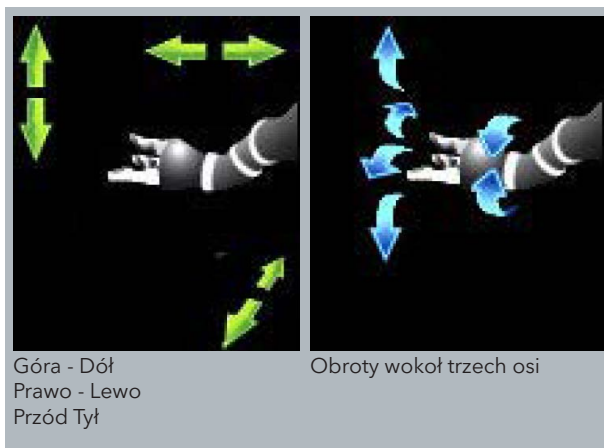


Rys.14: Prosty joystick ACCREA.

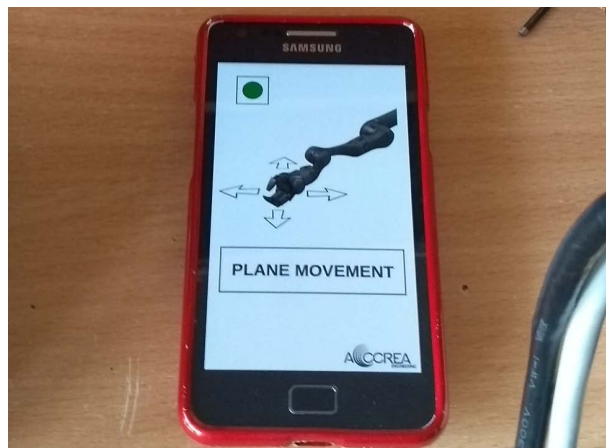


Rys.15: Wizualizacja graficzna funkcji joysticka ACCREA.

jedną dla prawej, a drugą dla lewej ręki - lub jeszcze bardziej rozproszony. Wymagania opisane powyżej spełnia prosty joystick z jednym przyciskiem, który został użyty do testów. Użytkownik śledzi wzrokiem ruch chwytaka, kontrolując jego położenie i starając się unikać kolizji z otoczeniem. Kiedy chce zmienić zestaw kierunków ruchu chwytaka, przenosi wzrok na ekran z podpowiedziami i wciska przycisk funkcyjny, aż znajdzie zestaw strzałek odpowiadający ruchom jakie chce wykonać. Aby ułatwić obsługę ramienia, obaj producenci oferują dodatkowy interfejs graficzny, który za pomocą strzałek pokazuje aktualny stan pracy i dostępne kierunki ruchu urządzenia. Kinova oferuje dedykowany mały ekran, natomiast Accrea udostępnia tę funkcję za pośrednictwem aplikacji na urządzenia mobilne. W obu przypadkach wizualizacja ramienia na ekranie jest nieruchoma, a zmieniają się jedynie strzałki podczas wciskania przycisku funkcyjnego.

Góra - Dół
Prawo - Lewo
Przód Tył

Obroty wokół trzech osi

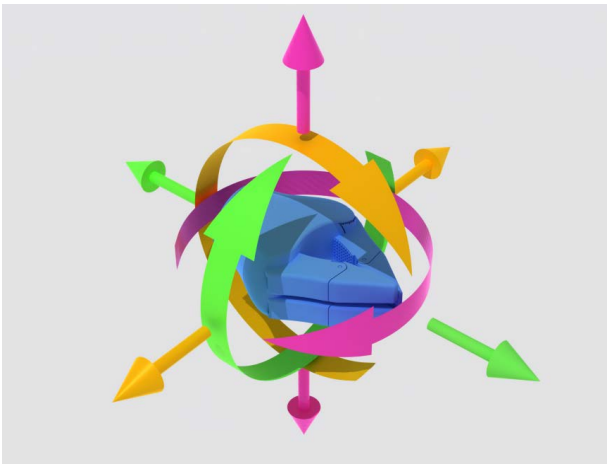
Rys.16: Ekran interfejsu użytkownika - Kinova
Źródło: Jaco assistiverobot User guide

Rys.17: Ekran interfejsu użytkownika - Accrea

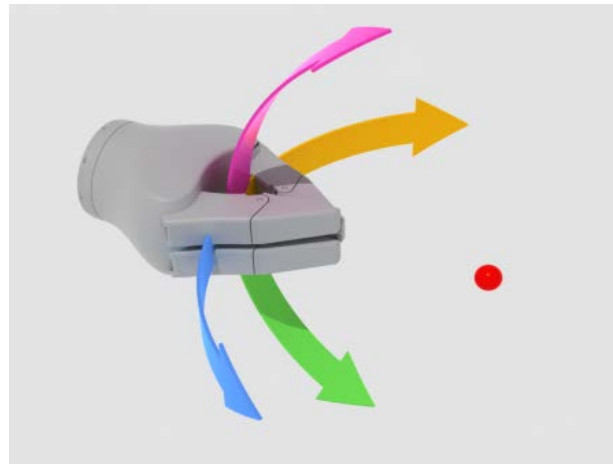
Reprezentacja graficzna ramienia na wyświetlaczu nie odpowiada jego rzeczywistemu ułożeniu, co zmusza użytkownika do samodzielnego przekształcania układu strzałek na rzeczywiste kierunki ruchu ramienia w przestrzeni przed sobą. Niektóre układy strzałek mogą prowadzić do błędnej interpretacji kierunków ruchu ramienia. Przycisk funkcyjny działa w pętli zamkniętej, co oznacza, że aby wybrać np. wcześniej używaną funkcję, trzeba kilkakrotnie go nacisnąć, aż pojawi się ona ponownie na ekranie. Brakuje także kontekstowej informacji graficznej, która pokazywałaby poprzednią i następną funkcję.

1.3 Nawigowanie chwytkiem

Sterowanie ramieniem opiera się na kartezjańskim, czyli trójwymiarowym układzie współrzędnych. Użytkownik, korzystając z kontrolera, przemieszcza urządzenie w trzech wymiarach. Punkt, w którym umocowany jest chwytak, a którym użytkownik steruje, ma 6 stopni swobody. Oznacza to, że ruch możliwy jest w trzech kierunkach oraz możliwe są obroty wokół trzech osi: X, Y, Z. Istnieje też funkcja umoliwiająca zmianę położenia punktu wokół którego będzie obracał się chwytak.



Rys.18: Wizualizacja możliwych ruchów i obrotów

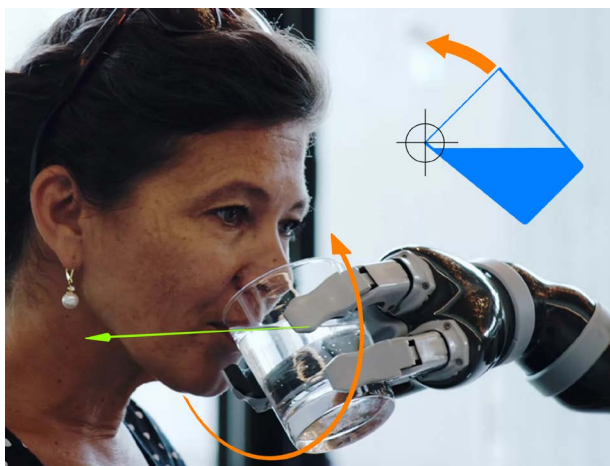


Rys.19: Wizualizacja obrotu wokół punktu wirtualnego

Za pomocą kontrolera można przemieszczać chwytak w kierunkach: przód-tył, prawo-lewo oraz góra-dół, a także obracać go wokół każdej z trzech osi. Chwytak może obracać się wokół własnej osi wzdłużnej o dowolny kąt, w tym także wielokrotność kąta 360 stopni. Po włączeniu urządzenia przyciskiem na obudowie, ramię z pozycji zaparkowanej (z boku wózka) ustawia się w zaprogramowaną pozycję gotowości do pracy. Pozycję tę można skonfigurować podczas sesji testowej. Następnie, przy pomocy kontrolera, użytkownik może przemieszczać końcówkę ramienia, na której znajduje się chwytak, w dowolnym kierunku w zasięgu ruchu ramienia. Sterownik Kinova pozwala na wybór joysticka o 2 lub 3 osiami ruchu oraz kilka trybów sterowania chwytkiem:

- Tryb translacji
- Tryb nadgarstka
- Tryb picia
- Tryb palców

Pierwszy tryb producent nazywa trybem translacji. Umożliwia on poruszanie chwytkiem w trzech osiach/kierunkach: przód-tył, prawo-lewo, góra-dół. W trybie nadgarstka użytkownik kontroluje pozycję chwytaka wokół wirtualnego punktu odniesienia zlokalizowanego kilka centymetrów przed palcami chwytaka. Punkt ten pozostaje ustalony do



Rys.20: Tryb picia, przybliżony punkt obrotu chwytaka
Źródło: <https://assistive.kinovarobotics.com.de>

ponownego przełączenia w tryb translacji. Tryb picia działa w ten sposób, że wirtualny punkt obrotu nadgarstka znajduje się w umownym miejscu na krawędzi szklanki trzymanej przez chwytak. Umożliwia to przechylenie szklanki lub butelki względem punktu styku z ustami użytkownika.

W trybie palców użytkownik kontroluje otwieranie i zamykanie palców chwytaka. W Jaco użytkownik może dodatkowo wybrać czy zamykać dwa czy trzy palce jednocześnie. W każdym z trybów, użytkownik joysticka o dwóch osiach przełącza zestawy ruchów joysticka aby obsłu-

żyć pozostałe możliwe ruchy chwytaka. Zdarza się również, że aktywowane są tylko 2 z 4 dostępnych ruchów, a informację o tym jakie to ruchy użytkownik musi wyczytać ze strzałek na wyświetlaczu. Producent JACO ostrzega, że w pewnych warunkach robot będzie zachowywał się inaczej niż opisuje instrukcja. Dzieje się tak ze względu

ZMIANA funkcji joysticka		1	2	3	4
1.	Ruch do przodu	P			
2.	Ruch do tyłu	T			
3.	Ruch w prawo	Pr			
4.	Ruch w lewo	Le			
5.	Ruch do góry		P		
6.	Ruch do dołu		T		
7.	Obrót osi poziomej w prawo		Pr		
8.	Obrót osi poziomej w lewo		Le		
9.	Obrót w górę względem punktu			P	
10.	Obrót w dół względem punktu			T	
11.	Obrót w prawo względem punktu			Pr	
12.	Obrót w lewo względem punktu			Le	
13.	Chwytak otwórz				P
14.	Chwytak zamknij				T
15.	Nic				Pr
16.	Nic				Le

Rys.21: Tabela funkcji ramienia firmy ACCREA

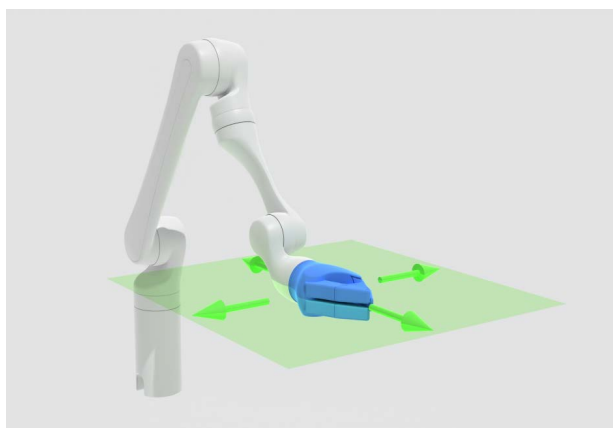
na działanie algorytmów unikania osobliwości⁵, to jest takich konfiguracji ramienia, w których mogłoby dochodzić do jego zablokowania lub nieprzewidzianych zachowań. Funkcja ta działa znakomicie w ramieniu BATEO, a jej działanie jest dla użytkownika niemal niezauważalne. Wszystkie ruchy, które może wykonać chwytak BATEO, zostały przedstawione w tabeli. Jest ich łącznie 14: 12 ruchów chwytaka oraz 2 ruchy palców (otwieranie i zamykanie). W związku z tym, użytkownik musi wydać łącznie 14 różnych poleceń. Joystick dwuosiowy umożliwia wydanie 4 poleceń (wykonanie 4 ruchów), które zostały zaznaczone w tabeli w kolorowych polach z oznaczeniami literowymi-



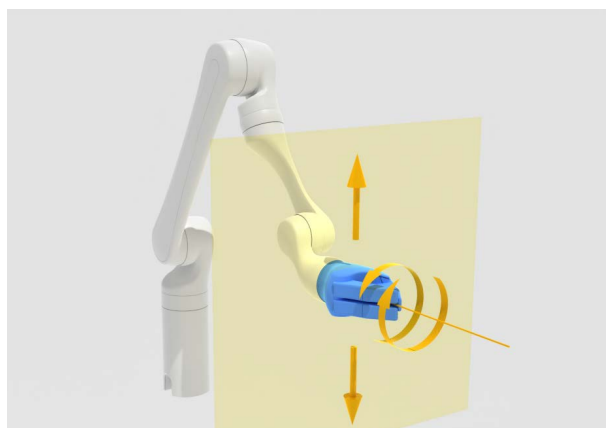
Rys.22: Wizualizacja pętli zmiany funkcji ramienia Accrea

5 https://pl.wikipedia.org/wiki/Konfiguracje_osobliwe

mi. Aby wykonać wszystkie 14 poleceń potrzeba 3,5 joysticka. ($14/4=3,5$) albo cztery razy zmieniać funkcje jednego joysticka. W takim układzie po czwartej zmianie zostają dwie niewykorzystane możliwości ruchu joysticka. Każde przełączenie funkcji powoduje przypisanie zestawu kolejnych czterech kierunków ruchu chwytaka. Odbywa się to z wykorzystaniem jednego przycisku z przypisanym menu, które działa w pętli zamkniętej. Przesuwanie chwytaka w dwóch pierwszych kierunkach odbywa się na płaszczyźnie poziomej (A), która zawsze jest równoległa do podłoża, a chwytak ustawiony jest równoległe do ramy wózka. Poruszanie joystickiem przód-tył, prawo-lewo da efekt w postaci przesuwania chwytaka w identyczny sposób. Chcąc teraz unieść chwytak lub zbliżyć go do podłogi potrzebne jest użycie przycisku funkcyjnego i zmiana płaszczyzny ruchu (B) na prostopadłą do podłoża. W tym układzie pary ruchów joysticka przód-tył lub zależnie od konfiguracji, prawo-lewo będą odpowiadać ruchom chwytaka góra-dół. Aby znów móc przesunąć chwytak do przodu (w kierunku od użytkownika), trzeba użyć przycisku funkcyjnego i ustawić poziomą płaszczyznę ruchu(A). Sterowanie chwytakiem w trybie nadgarst-



Rys.23: Płaszczyzna ruchu A (1 na rys.22)



Rys.24: Płaszczyzna ruchu B (2 na rys.22)

ka odbywa się w identyczny sposób, po przełączeniu funkcji na wyświetlaczu pokazują się strzałki obrazujące możliwe ruchy chwytaka. Kontroler dostarczany przez firmę Kinowa dzięki swej kompleksowej budowie bogatej w przyciski i trzy osiowemu joystickowi pozwala na skorzystanie z kilku dodatkowych funkcji ruchów i regulacji ramienia. W ramieniu BATEO nawigacja ramieniem została rozwiązana nieco prościej. Ruch chwytaka w płaszczyźnie poziomej odbywa się identycznie jak ma to miejsce w JACO. Oprogramowanie sterownika autorstwa inżynierów firmy ACCREA nie wymaga stosowania trybów pracy (choć jest taka możliwość). Ma to tę zaletę, że pętla przełączania kierunków jest jednopoziomowa i krótsza niż w JACO. W obu przypadkach sprawne nawigowanie ramieniem z chwytakiem bez instrukcji obrazkowych jest prawie niemożliwe, a korzystanie z instrukcji w obecnej formie, nieznacznie tylko zmniejsza ilość popełnianych błędów, ale też spowalnia cały proces ze względu na potrzebę ciągłego przenoszenia wzroku pomiędzy ramieniem a wyświetlaczem.

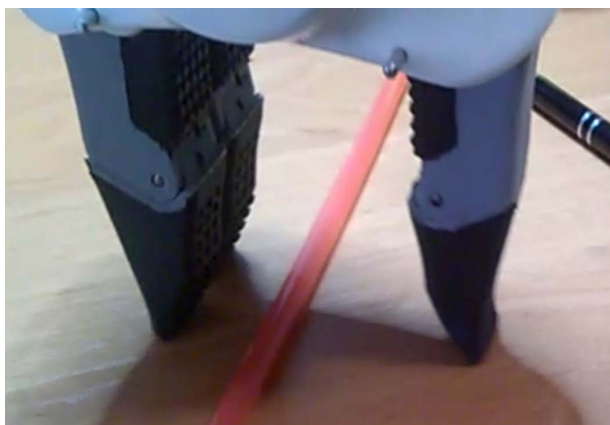
1.4 Chwywanie przedmiotów



Rys.25: Chwywak Bateo trzymający flamaster

Aby chwycić jakiś obiekt, np. kubek ceramiczny trzeba zadbać o właściwe ustawienie chwytaka względem tego kubka. Jeśli chwytak nie będzie ustawiony równoległe do powierzchni na której stoi kubek to podczas chwytu zostanie on przekrzywiony i może dojść do wylania płynu na chwytak. Podobnie gdy chcemy odstawić kubek, którego podstawa będzie zwykle nachylona względem podłoża. Kubek opadnie, a zawartość może się wylać na powierzchnię. Również w czasie zaciskania palców na kubku może on zostać przemieszczony. Może dojść do przesunięcia go w taki sposób, że znajdzie on swoje symetryczne ustawienie między palcami chwytaka, lub może też dojść do jego wypchnięcia spomiędzy palców. Te zjawiska są efektem niedostatecznego wyregulowania pozycji chwytaka względem kubka. Z innego rodzaju problemem spotkamy się chcąc chwycić jakiś mały obiekt, np. słomkę z powierzchni stołu. Chwywak należy wtedy ustawić palcami pionowo

w dół i zbliżyć do blatu. Ujawnia się tu charakterystyczna cecha geometrii ruchu palców chwytaka. Z użytkowego punktu widzenia niekorzystną cechą tego i wielu podobnych konstrukcyjnie chwytaków, jest ruch postępowy palców w czasie ich zamykania. Chwywak pozostaje w bezruchu, a palce zakreślają łuk, zwiększając tym samym długość całkowitą chwytaka i zmniejszając odległość od powierzchni stołu. Jeżeli użytkownik najpierw rozchyli palce chwytaka a następnie precyzyjnym ruchem oprze je o blat, to w czasie ich zaciskania dojdzie do kolizji z blatem. Pojawia się naprężenie w całym ramieniu oraz pomiędzy blatem a palcami. Konstrukcja ramienia jest solidna

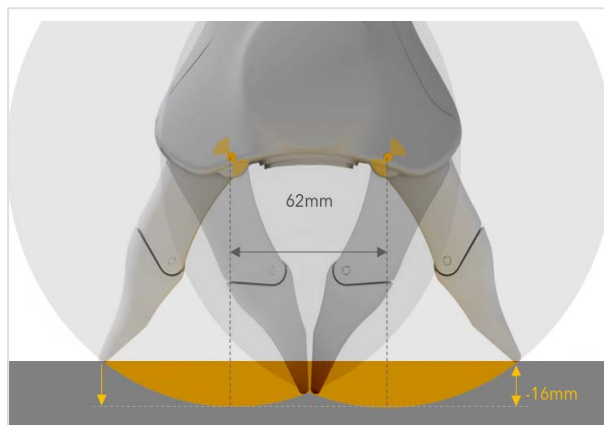


Rys.26: Próba chwycenia słomki, BATEO

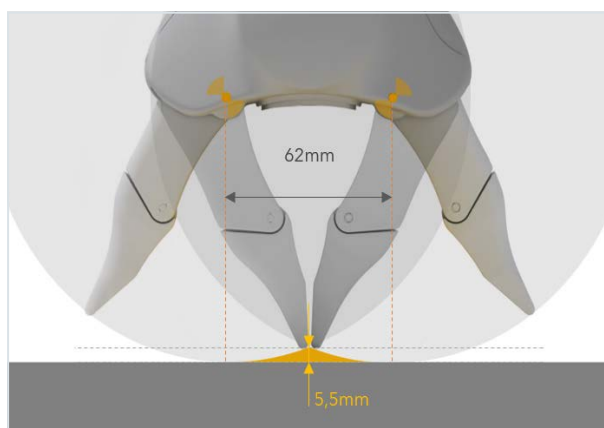


Rys.27: Próba chwycenia słomki, JACO

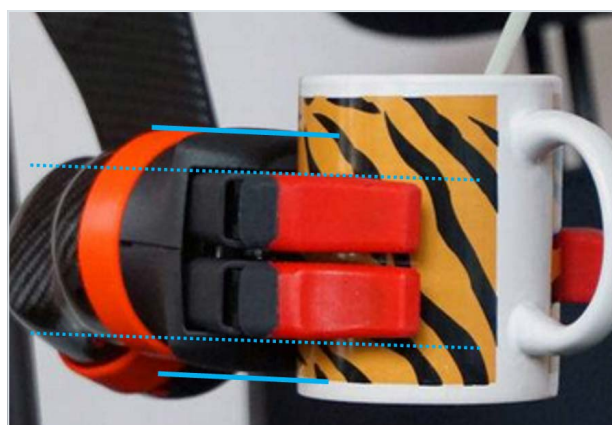
i precyzyjnie wykonana, nie ma możliwości kompensacji tego naprężenia w mechanizmach chwytaka. Skutkuje to albo zatrzymaniem ruchu palców w kontakcie z blatem, albo ugięciem blatu, albo uszkodzeniem palców. Jeżeli natomiast użytkownik zostawi sobie dystans pomiędzy końcami rozwartych palców chwytaka a blatem, to z dużą powtarzalnością palce zamkną się nad chwytaną słówką, obok niej, lub ją przesuną w inne miejsce. Możliwe jest działanie pośrednie, czyli rozwarcie palców niewiele większe niż grubość słówki, dopasowanie kąta obrotu chwytaka do położenia słówki oraz precyzyjne oparcie koniuszków palców o blat. Spełniając te warunki chwycenie słówki prawie zawsze będzie skuteczne. W rozpatrywanych konstrukcjach dystans pomiędzy skrajnymi położeniami koniuszków palców w pionie to ok. 16mm. Pokazano to na rysunku z chwytakiem ACCREA. Oś obrotu palców znajdują się w odległości 62mm od siebie. Użytkownik ustawia rozwarty chwytak w odległości 16mm od powierzchni. Podczas zamykania chwytaka, gdy końce palców ustawione są pionowo mijają punkty osi obrotu palców. To moment w którym długość całkowita chwytaka jest największa, a koniuszki palców stykają się z blatem. Po przekroczeniu tego punktu długość chwytaka ponownie zaczyna się zmniejszać. Koniuszki palców oddalają się od blatu. Skrajne najdalsze i najbliższe położenie koniuszków palców dzieli w linii prostej ok. 5,5mm. Następstwami tych dwóch zjawisk są problemy z chwytaniem płaskich obiektów o szerokości / średnicy poniżej 62mm. Z tego samego powodu występują kolizje palców z podłożem podczas zamykania chwytaka na obiektach większych od 62mm. Chwycenie słówki bez wykorzystania opisanej wcześniej techniki jest praktycznie niemożliwe, gdyż ma ona średnicę ok. 6mm, a zatem prawie w całości mieści się w przestrzeni gdzie chwytak nie sięga już do stołu. Występowanie kolizji z podłożem jest przyczyną nadwyrężania konstrukcji palców, przeciążania



Rys.28: Zakres ruchu palców w kolizji z blatem, BATEO



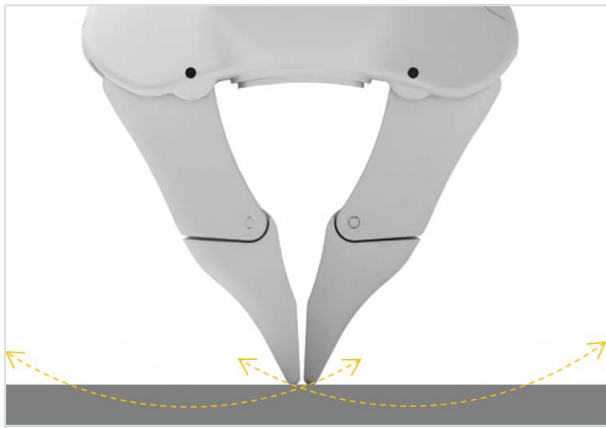
Rys.29: Pole, w którym mieści się słówka, BATEO



Rys.30: Chwytak Bateo, place poruszają się równolegle



Rys.31: Chwytak Jaco, brak równoległości palców



Rys.32: Chwytnie Bateo, łuki zakreślane przez palce



Rys.33: Chwytnie Bateo, maksymalna średnica przedmiotu



Rys.34: Chwytnie Bateo, minimalna średnica przedmiotu

napędów i powstawania naprężeń w konstrukcji całego ramienia. Poprzez „wydłużające się palce” powstaje siła wypychająca chwytak do góry. Jest to również częstą przyczyną uszkodzeń małych delikatnych przedmiotów. Producenci radzą sobie z tym na dwa sposoby. W chwytaku ACCREA w nowszej wersji zastosowano palce z elastycznymi koniuszkami. Dzięki temu palce poddają się naciskowi przesuwając się po blacie podczas zamykania i przenoszą tylko niewielką część naprężeń na resztę konstrukcji. Niestety za sprawą dużej elastyczności tworzywa, z którego wykonano palce, chwyczone w ten sposób obiekty mają skłonność do wypadania z uścisku. Z czasem dochodzi również do wycierania się elastycznego materiału. KINOVA zamieściła na swoim kanale YouTube film instruktażowy jak należy przeprowadzić proces podnoszenia słomki z podłoża. W przypadku braku możliwości zaprojektowania konstrukcji pozbawionej wskazanych wad, sposobem ominięcia niekorzystnych cech geometrii ruchu palców może być umożliwienie chwytania małych obiektów bokiem chwytaka. Wtedy palce będą poruszać się równoległe do powierzchni. W istniejących konstrukcjach jest to nie możliwe gdyż obudowa chwytaka wystaje poza obrys palców. Opisana tu złożoność operacji, które należy wykonywać w celu chwytania małych przedmiotów codziennego użytku, niesie podobieństwo do pracy operatora koparki lub dźwigu, gdzie masa i skala poruszanych obiektów jest liczona w setkach i tysiącach kilogramów, a zatem i złożoność operacji jest uzasadniona. Do opisanych sytuacji trzeba

jeszcze dołożyć aspekt widoczności. Obszar działania takiego ramienia jest znacznie większy niż zasięg ramienia człowieka. Pozycja siedząca na wózku oraz punkt umocowania ramienia sprawia, że chwytany obiekt jest zwykle bardziej oddalony od ciała użytkownika. Odległość oraz przysłanianie widoku schwytych obiektów są czynnikami zwiększającymi trudność operowania chwytakiem. Należy zapewnić swobodę ruchów ramienia oraz skompensować brak możliwości wychylania się użytkownika na wózku. Wszystko to wprowadza dodatkowe komplikacje w posługiwaniu się urządzeniem.

1.5 Test porównawczy ramion

Mimo zastosowania zaawansowanych technologicznie urządzeń o ogromnym potencjale, użytkownicy napotykają znaczne trudności w sprawnym wykorzystaniu ramienia asystującego. Wcześniej poczyniono już pewne obserwacje dotyczące tego problemu. Aby zweryfikować te spostrzeżenia oraz sformułowane na ich podstawie hipotezy, zorganizowany został test porównawczy ramion Kinova i Accrea. Pierwszym celem testu było sprawdzenie, czy ramię KINOVA rzeczywiście przewyższa łatwością obsługi ramię ACCREA. Drugim celem było zbadanie, czy ogólne trudności w sterowaniu ramieniem wynikają z niepełnosprawności użytkowników, czy też problem leży w urządzeniu. Aby uzyskać rzetelną odpowiedź, zastąpiono typowego użytkownika osobą w pełni sprawną ruchowo, dobrze zaznajomioną z obsługą tych urządzeń. Test został przeprowadzony



Rys.35: Ramię BATEO



Rys.36: Ramię JACO

w warunkach warsztatowych, gdzie ramiona zostały przymocowane do blatu. Wpływ miejsca montażu był pomijalny ponieważ nie wpłynął na sposób sterowania, a w obu przypadkach urządzenia były ustawione względem użytkownika w taki sam sposób, co zapewniało porównywalność wyników. Do sterowania JACO wykorzystano standardowy kontroler, który był dołączony do urządzenia, natomiast do obsługi ACCREA posłużono się roboczym sterownikiem wyposażonym w joystick czterokierunkowy i przycisk funkcyjny. Funkcje obu kontrolerów oraz ramion zostały ujednolicone programowo, aby działały w identyczny sposób. Pierwszym użytkownikiem testującym został autor tej

pracy. Do zadań testera należało: chwycić i przenieść długopis, kubek, butelkę litrową, ołówek, telefon. Dodatkowo chwycić kubek, napić się i odstawić go na miejsce. Pierwsze wrażenie było bardzo pozytywne. Ramiona bardzo interesująco wyglądają w ruchu. Obserwacja jak urządzenie zmienia kształt by dopasować wszystkie swoje segmenty do zmieniającego się położenia chwytaka w przestrzeni jest satysfakcjonującym i ciekawym estetycznie doświadczeniem.

Test wykazał, że ramiona działają w bardzo zbliżony sposób. Zaobserwowaną różnicą było to, że chwytak JACO miał tendencję do niekontrolowanego obracania się w niektórych sytuacjach wokół wirtualnego punktu pomiędzy jego palcami. W wyniku takiego zachowania ramienia użytkownik był zmuszony wykonać zauważalnie więcej czynności ruchu, aby uzyskać zamierzone ustawienie końcówki ramienia. W związku z tym dało się odnieść wrażenie, że ramię BATEO działa w bardziej przewidywalny i przyjazny dla użytkownika sposób. Osobiste odczucia testera na temat łatwości nawigowania ramieniem były takie, iż jest odwrotnie niż w materiałach marketingowych producenta JACO. Posługiwanie się ramieniem JACO okazało się bardziej kłopotliwe niż ramieniem BATEO. Przesuwanie chwytaka płaszczyźnie poziomej było intuicyjne nie stanowiło żadnego problemu. Natomiast przed zmianą wysokości, na której znajduje się koniec ramienia, należało użyć przycisku do zmiany funkcji joysticka. W tym momencie pojawiało się pierwsze zawahanie – czy, aby podnieść chwytak, należy wychylić joystick do przodu, czy pociągnąć go do siebie? Następnie, aby ponownie przesunąć ramię w płaszczyźnie poziomej, konieczne było kilkukrotne użycie przycisku do zmiany funkcji joysticka aż do ustawienia właściwej płaszczyzny ruchu.

Dodatkową trudność sprawiało manipulowanie chwytakiem w pobliżu obiektu, który miał zostać pochwycony. Ustawienie poziomu, na którym miały być palce, opisano powyżej. Kolejne problemy pojawiały się, gdy konieczne było wyregulowanie właściwej odległości chwytaka od obiektu, ustawienie go symetrycznie względem przedmiotu oraz dopasowanie kąta pochylenia do jego kształtu. Brak precyzji w tych ustawieniach czasem prowadził do przesunięcia lub przewrócenia obiektu. Nawet jeśli udało się go pochwytać, często chwyt nie był wystarczająco pewny.

Bardzo trudne okazało się również odpowiednie dawkowanie siły zaciśnięcia palców na przedmiocie. Zbyt silny chwyt mógłby doprowadzić do odkształcenia lub uszkodzenia obiektu, natomiast zbyt delikatny mógł skutkować jego wypadnięciem z chwytaka. Liczba operacji związanych z przełączaniem funkcji joysticka, a następnie próbami wykonania odpowiednich ruchów, szybko stała się męcząca dla użytkownika. Zauważono również, że testujący coraz częściej, zamiast spoglądać na ekran z instrukcjami i wyobrażać sobie kierunki ruchów ramienia, zaczynał eksperymentować. Przełączał funkcje, wykonywał delikatne ruchy joystickiem, aby empirycznie sprawdzić, jak będzie się zachowywał i dopiero wtedy podejmował właściwy ruch. Ta taktyka sprawdzała się do momentu, gdy w chwytaku znajdował się kubek z płynem, a eksperymenty mogły doprowadzić do jego rozlania. Podobna sytuacja miała miejsce, gdy chwytak pozostawał w kontakcie z innym obiektem, i następowała próba jego wycofania. W takich przypadkach metoda eksperymentalna często prowadziła do przewrócenia obiektu lub pogłębienia skutków kolizji. Doszło do uszkodzenia lakieru na jednej z obudów chwytaka BATEO, gdy ten gwałtownie ruszył w stronę krawędzi regału, choć miał być od niej odsunięty. Test ramion okazał się stresujący. Finalnie odczucie testującego było takie, że ramiona działają w podobnie „oporny” sposób, niezbyt chętnie wykonując polecenia, a ich obsługa nie jest tak intuicyjna, jak się początkowo wydawało. Pojawiła się refleksja, że to ćwiczenie pozwoliło poczuć się jak osoba z dysfunkcjami ruchowymi. To poczucie wynikało z ograniczeń aparatu ruchowego, którym na czas testu stało się ramię robotyczne. Choć samo urządzenie posiada bardzo duże możliwości ruchowe, posługi-

wanie się nim przy pomocy uproszczonych interfejsów okazuje się bardzo trudne. Na zakończenie fazy testów wykonano próbę kreślenia długopisem po kartce umieszczonej na blacie. Na materiałach promocyjnych ramienia JACO widać, jak dziewczynka używa ramienia do malowania obrazu. W teście udało się narysować jedynie proste linie odpowiadające osiom ruchu X oraz Y na powierzchni stołu. Ramiona nie umożliwiają rysowania łuków ani linii pod innym kątem. Podobnie niemożliwe jest rysowanie na powierzchni odchylonej od pionu lub poziomu - jak na sztaludze. Aby sprawdzić, czy zaobserwowane trudności w kierowaniu ramieniem wynikają jedynie z wyboru uproszczonego kontrolera, przeprowadzono test z wykorzystaniem manipulatora 3Dconnection SpaceExplorer. Manipulator ten został zaprojektowany do nawigacji w środowisku 3D w oprogramowaniu CAD. Posiada 6 stopni swobody oraz przekazuje informacje o stopniu wychylenia w każdym kierunku. Jest również wyposażony w 15 programowalnych przycisków. Użycie tak zaawansowanego urządzenia do sterowania ruchem chwytaka miało rozwiązać wątpliwości dotyczące kontrolera uproszczonego. Dokładnie ten sam manipulator (3DConnection) był używany przez inżynierów podczas prac konstrukcyjnych oraz w ich testach użytkowych na prototypach. Jak się spodziewano, SpaceExplorer znacząco usprawnił poruszanie ramieniem. Teraz możliwe było jednoczesne poruszanie chwytakiem w trzech kierunkach, a także kontrola prędkości ruchu i stopnia wychylenia manipulatora w tym samym czasie. Pozwoliło to na wykonanie każdego obrotu chwytaka bez potrzeby przełączania funkcji. Nawigacja z wykorzystaniem SpaceExplorera została oceniona jako bardzo wygodna. Nadal jednak problematyczne okazało się precyzyjne ustawienie chwytaka względem obiektu, dopasowanie kątów, odległości oraz przekształcanie w wyobraźni kierunków ruchu joysticka na oczekiwany ruch ramienia. Było to szczególnie trudne, gdy chwytak ustawiał się bokiem lub przodem do osoby testującej. Mimo znacznego wzrostu komfortu i sprawności obsługi, nadal pojawiały się momenty, w których testujący odczuwał dezorientację. Wykonanie tej serii testów potwierdziło słuszność wcześniej postawionej hipotezy - problemy użytkowników z nawigacją ramieniem nie wynikają jedynie z ich niepełnosprawności. Takie same trudności zaobserwowano u w pełni zdrowej osoby, wyposażonej dodatkowo w znacznie bardziej wszechstronny kontroler.



Rys.37: Kontroler 3DConnexion SpaceExplorer



Rys.38: Wizualizacja możliwych ruchów kontrolera

Podsumowując, sprawne poruszanie obiektem w przestrzeni wymaga precyzyjnej kontroli ruchów. Idealnie jest, gdy kontroler, którego używamy, posiada tyle samo stopni swobody co przemieszczany obiekt. SpaceExplorer spełnia to założenie i posiada również przyciski, którymi można obsługiwać funkcje otwierania i zamykania chwytaka. Pomimo tego, nie zapewnia pełnej biegłości w poruszaniu urządzeniem. Wysznuło więc wniosek, że problem musi tkwić w sposobie mapowania kierunków ruchu kontrolera na kierunki ruchu manipulatora.

Powyższy test z wykorzystaniem manipulatora SpaceExplorer został powtórzony z udziałem jednego z konstruktorów ramienia BATEO. Mimo jego doskonałej znajomości konstrukcji ramienia oraz umiejętności posługiwania się kontrolerem - co powinno przełożyć się na lepsze wyniki w testach, jego sprawność realizacji zadań i odczucia były w dużej mierze zgodne z odczuciami pierwszego testera.

OBSERWACJE:

1. Wykonanie zaplanowanych czynności zajęło dużo więcej czasu niż początkowo zakładano oraz sprawiało trudności testującym.
2. Najmniej problemów sprawiało chwytanie średniej wielkości obiektów jak kubek czy litrowa butelka wody.
3. Dużą uciążliwość stanowiła potrzeba wielokrotnego przełączania funkcji joysticka. Testujący zwrócili uwagę na ułożenie trybów ruchu ramieniem. Odnieśli wrażenie, że ich kolejność jest niewłaściwa, a kierowanie chwytakiem w wielu momentach jest nieintuicyjne.
4. Bardzo często po przełączeniu funkcji joysticka popełniany był błąd w wyborze kierunku ruchu co skutkowało inną od zamierzonej reakcją ramienia.
5. Duży problem stanowiło chwytanie z blatu takich przedmiotów jak ołówek i telefon. Ustawienie chwytaka we właściwej odległości od blatu wymaga wprawy, dobrej oceny odległości oraz jest czasochłonne. Przy tej czynności palce albo kolidują z blatem zanim zbliżą się do przedmiotu, albo zamykają się ponad chwytanym obiektem. Czynność ta wymaga wielu korekt wysokości, kątów ustawienia chwytaka względem podłoża, kąta rozwarcia palców. Zastosowanie trzech symetrycznie poruszanych palców dodatkowo utrudnia tę czynność.
6. Pewną uciążliwością było zero-jedynkowe działanie napędów (w zastanej konfiguracji oprogramowania). Ujawniała się ona przy wykonywaniu małych krótkich ruchów. Ramię stawało się odczuwalnie nerwowe, a start napędów z pełną mocą powodował niekiedy przesuwanie chwytaka poza punkt docelowy.
7. W trakcie testu doszło do uszkodzenia lakieru na obudowie chwytaka. Po zatrzymaniu w pobliżu mebla i przełączeniu funkcji joysticka w wyniku błędu operatora nastąpił ruch ramienia w przeciwnym do zamierzonego kierunku powodując kolizję.
8. Wykonane testy potwierdziły, że bardzo łatwo jest uszkodzić palce w JACO. Są wykonane z lekko elastycznego tworzywa, które nieco amortyzuje kolizje, co jest zjawiskiem pozytywnym. Jednocześnie trudno jest dostrzec moment w którym jego elastyczność zostaje przekroczona w wyniku czego pojawiają się trwałe uszkodzenia palców. Bardzo dużo błędów popełnianych jest wtedy gdy chwytak ustawia się w taki sposób, że jego ruch w lewo to ruch joysticka w przód lub jego ruch w prawo to ruch joysticka w prawo. Czyli mowa o takim ułożeniu gdy chwytak zwrócony jest do użytkownika palcami, a osie jego obrotów ulegają odwróceniu. Pojawianie się takich ułożeń jest charakterystyczne dla funkcji obracania chwytaka względem punktu w przestrzeni oraz dla funkcji unikania osobiwości.

1.6 Wnioski

Przeprowadzona analiza budowy urządzeń, sposobów nawigowania oraz realizowania funkcji użytkowych, a także wykonanie szeregu testów doprowadziła do zdefiniowania następujących wniosków:

- Przetestowane urządzenia w porównywalny sposób realizują swoje funkcje. Jednak płynność mikro ruchów i zawodna filozofia sterowania wymagają poprawy.
- Sterowanie ramieniem okazało się nieintuicyjne. Zmiana funkcji joysticka i eksperymentowanie z nowymi kierunkami ruchu zajmuje czas i prowadzi do powstawania błędów. Zaobserwowano częstą dezorientację użytkownika w kierunkach ruchów urządzenia.
- Testowane urządzenia bardzo dobrze sprawdzają się w chwytaniu relatywnie dużych przedmiotów o regularnym kształcie, takich jak kubek lub jabłko. Chwyty jest mocny i stabilny.
- Wyzwaniem dla użytkownika jest precyzyjne ustawienie chwytaka względem chwytanego przedmiotu, dostosowanie kąta pochylenia w trzech osiach oraz odpowiednie wpasowanie obiektu w chwytak. Te czynności wymagają częstych przełączeń trybów i wielu małych ruchów korygujących.
- Ujawniono problem z odniesieniem kierunków ruchów chwytaka do kierunków ruchu joysticka.
- Chwytywanie z blatu cienkich przedmiotów chwytakiem skierowanym pionowo w dół sprawia trudności i wymaga wielu prób. Problematyczne jest ustawienie chwytaka we właściwej odległości od podłoża i obiektów, a także częste kolizje z podłożem.
- W przypadku małych ruchów ramię sprawia wrażenie zbyt szybkiego i nerwowego. Używanie małych, skokowych ruchów wymaga od użytkownika zwiększonej uwagi i refleksu. Pojawia się stres związany z obawą przed spowodowaniem uszkodzeń, przewróceniem przedmiotu lub wylaniem płynu.
- Brak funkcji bezpieczeństwa zapobiegających kolizjom podczas przemieszczania chwytaka i w momencie startu w niewłaściwą stronę. Obudowy są podatne na uszkodzenia. Lakier odpryskuje, urywają się palce, a konstrukcja palców Jaco jest wyjątkowo delikatna.

OBSZARY WYMAGAJĄCE POPRAWY:

1. Przełączanie trybów sterowania
2. Odwzorowanie kierunków ruchu ramienia na joysticku
3. Chwytywanie cienkich przedmiotów z powierzchni
4. Kolizje i uszkodzenia
5. Precyzja ustawienia chwytaka względem obiektu

Rozdział 2

BADANIA

W tym rozdziale przedstawione zostały wyniki badań przeprowadzonych w celu zdiagnozowania przyczyn problemów użytkowych i funkcjonalnych ramienia robotycznego. Drugim celem było zweryfikowanie poprawności wniosków wynikających z wcześniejszych analiz. Z perspektywy obserwatora dokonano analizy sposobu, w jaki użytkownicy posługują się ramionami robotycznymi. Wykorzystano materiały wideo z testów na użytkownikach, udostępnione przez firmę Accrea, oraz materiały wideo z użytkownikami ramienia dostępne w sieci. Materiały te okazały się bardzo bogate w informacje dotyczące doświadczeń użytkowników tych urządzeń. Przeprowadzono zanonimizowane wywiady z inżynierami pracującymi nad ramieniem Accrea, dokonano obserwacji użytkowników zdrowych, korzystających z ramienia zamontowanego na wózku, podczas spotkania walidacyjnego w Accrea. Przeanalizowano również ślady użytkowania oraz uszkodzenia ramion Accrea i Kinova. Na końcu przedstawiono podsumowanie oraz wnioski.

2.1 Cel, zakres, metody

Celem badań jest identyfikacja wad użytkowych oraz próba ustalenia ich przyczyn na podstawie obserwacji doświadczeń użytkowników. Wnioski z badań posłużyły do zdefiniowania problemów wymagających rozwiązania, a koncepcje rozwiązań wskazały kierunki rozwojowe w dalszym projekcie nowego urządzenia. Materiałami badawczymi były materiały zdjęciowe oraz wideo z testów ramienia BATEO przeprowadzonych na wybranych użytkownikach podczas prac projektowych nad ramieniem.

Ponadto:

- Przeprowadzono przegląd materiałów marketingowych udostępnionych przez firmę Kinova.
- Dokonano przeglądu Internetu w celu znalezienia materiałów dotyczących ramienia JACO, udostępnionych przez użytkowników niezwiązanych z producentem.
- Przeprowadzono test użytkowy na wózku inwalidzkim z zamontowanym urządzeniem Accrea.
- Dokonano oględzin ramienia JACO, które zostało dostarczone do serwisu z powodu uszkodzeń.
- Przeprowadzono nieformalny wywiad z inżynierami odpowiedzialnymi za konstrukcję ramienia BATEO.

W celu uzyskania jak największej ilości użytecznych informacji zastosowano kilka metod badawczych, dobranych odpowiednio do zgromadzonego materiału badawczego oraz przedmiotu badań.

- Do zebrania materiałów dotyczących indywidualnych przypadków użytkowników wykorzystano metodę analizy danych zastanych⁶, znaną jako desk research. Metodę tę zastosowano także do przeglądu chwyteków dostępnych na rynku.
- Z pomocą metody obserwacyjnej⁷ dokonano opracowania materiałów wideo.
- Przy analizie zebranych spostrzeżeń wykorzystano metodę analizy i konstrukcji logicznej⁸.
- Dalsza praca projektowa odbywała się z zastosowaniem metody eksperymentalnej, ukierunkowanej na znalezienie rozwiązań zidentyfikowanych wcześniej problemów.
- W celu wstępnej weryfikacji koncepcji rozwiązań kinematycznych i mechanicznych wykorzystano metodę symulacji komputerowej.

Zastosowane podejście, choć drobiazgowo i czasochłonne, okazało się słuszne. Duża ilość danych, jakie udało się uzyskać, zestawiona z wnioskami wcześniejszej analizy, umożliwiła prawidłowe zdiagnozowanie problemów użytkowych oraz sformułowanie właściwych założeń do projektu.

Na kolejnych stronach przedstawiono kadry z materiałów wideo, opatrzone komentarzami z poczynionych obserwacji.

6 Marta Makowska, Analiza danych zastanych. Przewodnik dla studentów. Wydawnictwo Naukowe Scholar, 2013

7 Józef Pieter, Ogólna metodologia pracy naukowej. Ossolineum, 1967

8 Apanowicz Jerzy, Metodologia ogólna, Wyższa Szkoła Administracji i Biznesu, Gdynia 2002

2.2 Badania z użytkownikami

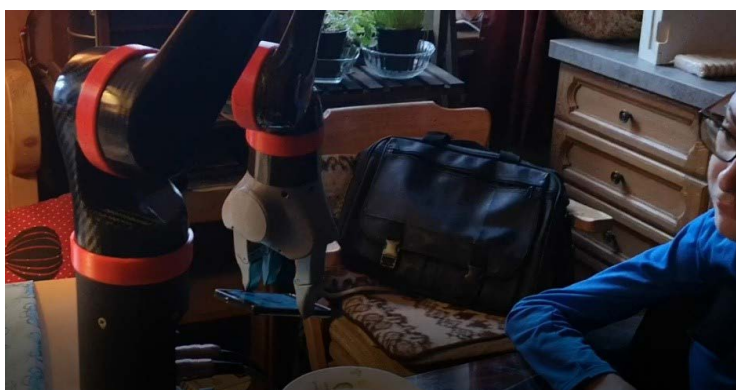
Kadr 1



Rys.39: Bateo, kadr z filmu.

Kadr pokazuje moment, w którym chwytak przenoszący biszkopt z impetem uderzył w talerzyk. Ciastko pękło, a blat stolika zamocowanego do wózka ugiął się o kilka centymetrów. Kolizja ta nie miała negatywnego wpływu na chwytak ani ramię, jednak ujawniła możliwość wyrządzenia uszkodzeń sprzętom znajdującym się w otoczeniu użytkownika.

Kadr 2



Rys.40: Bateo, kadr z filmu.

Przenoszenie płaskiego obiektu – telefonu komórkowego. Na nagraniu widoczne jest, jak obiekt powoli wysuwa się z uchwytu pod wpływem drgań ramienia podczas przenoszenia. Jeden z palców chwytaka, spod którego telefon zaczął się wysuwać, pozostał nieruchomy. Następnie telefon wysunął się z dwóch pozostałych palców, upadł na podłogę i rozpadł się na części.

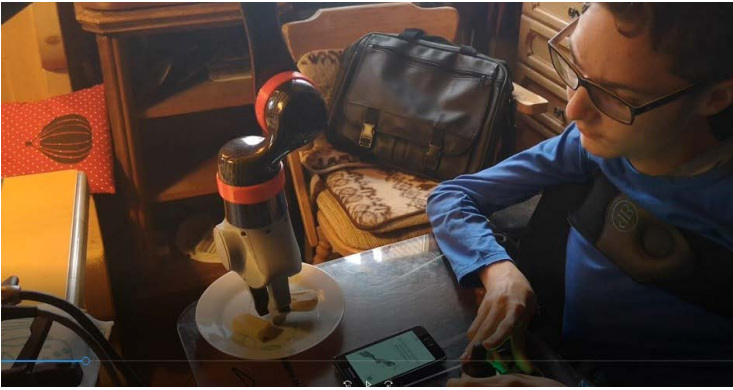
Kadr 3



Rys.41: Bateo, kadr z filmu.

Na tym ujęciu widoczny jest kubek ze słomką przenoszony w stronę stołu. Ramię ustawiło się w taki sposób, że jeden z jego dużych przegubów porusza się w pobliżu głowy użytkownika. W tym przypadku wynika to z przyjętego punktu montażu ramienia, jednak podobna sytuacja może wystąpić także przy montażu na wózku, gdzie punkt montażu znajduje się bliżej użytkownika. Bliskość ruchomego mechanizmu wywołuje u użytkownika delikatny dyskomfort.

Kadr 4



Rys.42: Bateo, kadr z filmu.

Kontroler, telefon z instrukcją obrazkową oraz chwytak są tym razem w bliskim polu widzenia użytkownika. Jednocześnie ogarnia wzrokiem wszystkie elementy systemu. Mimo to, stresuje się i postępuje bardzo ostrożnie. Widoczny kadr pokazuje sytuację w której chwytak z biskopem był ok 20 cm nad talerzykiem i ruszył z pełną prędkością w dół. Użytkownik zdążył zareagować, zwolnił nacisk na joystick i chwytak zatrzymał się tuż nad powierzchnią talerzyka.

Kadr 5



Rys.43: Bateo, kadr z filmu.

Na tym ujęciu widoczny jest moment gryzienia biskopka. Jednak niekomfortowe jest ustawienie chwytaka względem twarzy użytkownika. Wynika to z faktu, że ramię nie dostosowuje się automatycznie do dogodnej pozycji, a użytkownik nie zdecydował się na dokonanie zmiany ustawienia chwytaka przed rozpoczęciem tej czynności, dążąc do jak najszybszego osiągnięcia celu.

Kadr 6



Rys.44: Bateo, kadr z filmu.

Ten kadr ukazuje moment próby odłożenia ciastka na talerzyk. Ramię gwałtownie ruszyło w dół z wysokości około 30 cm, a użytkownik nie zdążył w porę zwolnić nacisku na joystick. Biskopk został zniszczony, a talerzyk, pod naciskiem chwytaka, prawie spadł z odkształconego pod naporem blatu stolika.

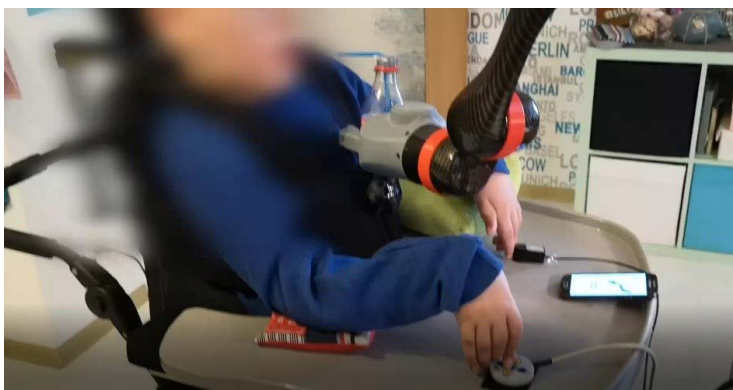
Kadr 7



Rys.45: Bateo, kadr z filmu.

Kadr z testów z młodszą użytkowniczką z cięższym stopniem niepełnosprawności. Kontroler nie posiada joysticka, składa się z dwóch oddzielnych części, aby możliwa była obsługa jego funkcji obiema rękami. Funkcje joysticka zastąpiły przyciski ułożone w kształt koniczynki, który odpowiada kierunkom ruchu. Funkcje przełączane są lewą ręką.

Kadr 8



Rys.46: Bateo, kadr z filmu.

Czynność picia przez słomkę przebiegła bez problemów. Użytkowniczka korzystała z czterech z pięciu dostępnych przycisków pod prawą ręką. Można zauważyć, że ramię porusza się zbyt szybko po naciśnięciu przycisku. Dziewczynka ma pewne trudności z naciśnięciem, jednak wykazuje się dobrym refleksem. Niestety, po zwolnieniu przycisku mija kilka chwil, zanim ponownie uda jej się go wcisnąć, by kontynuować ruch lub wykonać ruch przeciwny w celu skorygowania położenia chwytaka.

Kadr 9



Rys.47: Bateo, kadr z filmu.

To kadr z momentu, w którym butelka miała zostać odstawiona na stół przed wózkem. Pomyłkowo został wykonany szybki ruch obrotowy chwytaka, który doprowadziłby do rozlania zawartości butelki. Dziewczynka szybko zareagowała i chwytak został w porę zatrzymany. Kolejny wybór kierunku ruchu był już właściwy i butelka w kilku ostrożnych ruchach została postawiona na stole.

Kadr10



Rys.48: Bateo, kadr z filmu.

Uścisk dłoni z tatą. Użytkownicy chętnie witają się z innymi przy pomocy ramienia, a osoby z otoczenia szybko zaczynają traktować je jak integralną część użytkownika. Uściśnięcie dłoni chwytakiem wymaga dużej ostrożności użytkownika, aby nie użył zbyt dużej siły. Istnieje także ryzyko przyszczypania skóry dłoni przez przemieszczające się części palców.

2.3 Analiza filmów z użytkownikami ramienia JACO

Analizowane filmy pochodzą z platformy YouTube, gdzie zostały zamieszczone. Przedstawiają użytkowników ramienia JACO podczas wykonywania codziennych czynności.

Kadr 1



Rys.49: Jaco, kadr z filmu.

Źródło: https://www.youtube.com/watch?v=_INXEjI7gTI

Czynność przywołania windy. Użytkowniczka ma za zadanie nacisnąć mały przycisk. Jej pole widzenia jest jednak nieco ograniczone, bo chwytak zasłania jej panel windy. Na kadrze widać, że palce chwytaka JACO naciskają jednocześnie na dwa przyciski. Wyprostowane palce chwytaka zostały zgniecione przez silne dościsnięcie do ściany.

Kadr 2



Rys.50: Jaco, kadr z filmu.

Źródło: <https://www.youtube.com/watch?v=xZb-MbcG6KW8&t=32s>

Otwieranie i zamykanie szuflady bokiem obudowy chwytaka. Użytkownik nie jest w stanie zajrzeć do wnętrza szuflady ze swojego miejsca, ponieważ przednia ścianka zasłania mu widok. Bez wizualnego kontaktu z obiektem w szufladzie, nie będzie mógł go uchwycić.

Kadr 3

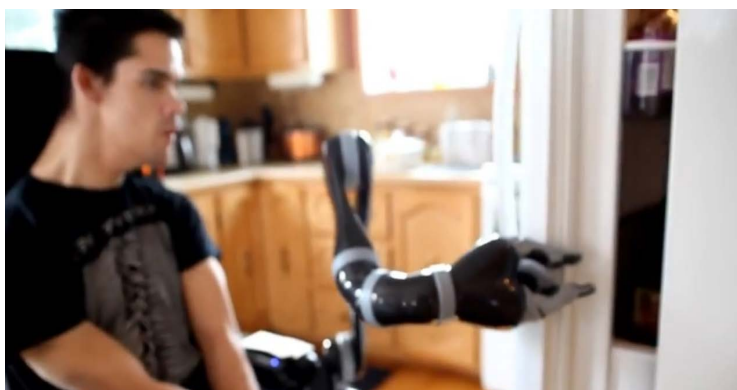


Rys.51: Jaco, kadr z filmu.

Źródło: <https://www.youtube.com/watch?v=xZb-MbcG6KW8&t=32s>

Otwieranie drzwiczek metalowej szafki bokiem ramienia. Kadr ukazuje praktyczny sposób posługiwania się ramieniem w takiej sytuacji. Użytkownicy nie ograniczają się do wykorzystywania samego tylko chwytaka.

Kadr 4



Rys.52: Jaco, kadr z filmu.

Źródło: <https://www.youtube.com/watch?v=r3yWmf8blz0&t=55s>

Użytkownik nie otwiera drzwi lodówki ciągnąc za uchwyt. Otwiera je wkładając palce chwytaka w szczelinę z uszczelką i odciąga do siebie aż drzwi się otworzą. Następnie odsuwa drzwi lodówki do pełnego otwarcia. Aby otworzyć drzwi przy pomocy uchwytu musiałby wykonać większą ilość czynności, więc znalazł bardziej efektywny sposób.

Kadr 5



Rys.53: Jaco, kadr z filmu.

Źródło:

Widok na kontroler w użyciu. Można zauważyć, że narożnik urządzenia jest oklejony grubym plastrem, prawdopodobnie w wyniku uszkodzenia w kolizji z otoczeniem lub w celu zabezpieczenia go przed takimi uszkodzeniami. Kontroler często jest najbardziej wystającym elementem w obrysie wózka.

Kadr 6



Rys.54: Jaco, kadr z filmu.

Źródło: <https://www.youtube.com/wa-tch?v=Kso1NewoC-g>

Kadr z perspektywy użytkownika. Próba sięgnięcia do szafki przy słabym oświetleniu. Ramię i chwytak ograniczają pole widzenia użytkownika, co utrudnia ocenę odległości chwytaka od półki. Użytkownik nie zauważa, że palce chwytaka są częściowo zagłębione w szafce, a podczas próby uniesienia ramienia zaczepiają o krawędź. Palce zauważalnie się odkształcają, co często prowadzi do ich uszkodzenia.

Kadr 7



Rys.55: Jaco, kadr z filmu.

Źródło: <https://www.youtube.com/watch?v=1x7-DV5Ovso>

Doświadczony użytkownik ramienia JACO próbował napić się kawy, przemieszczając kubek w kierunku ust. Kubek jednak zahaczył o twarz i przechylił się w uchwycie, ponieważ ruch został wykonany zbyt energicznie. W wyniku tego kubek poluzował się w chwytaku i przechylił. Czynność musiała zostać powtórzona.

Kadr 8



Rys.56: Jaco, kadr z filmu.

Źródło: <https://www.youtube.com/wa-tch?v=sE73UCgBZpg>

Widok na ekran z menu i podpowiedziami. Ekran często znajduje się na skraju pola widzenia użytkownika, podczas gdy ten skupia się na obserwacji ruchów chwytaka przed sobą.

Kadr 9



Rys.57: Jaco, kadr z filmu.

Źródło: <https://www.youtube.com/wa-tch?v=sE73UCgBZpg>

Przypadkowy kąt ustawienia chwytaka względem szklanki. Na tym kadrze widoczny jest chwytak, który oparł się o krawędź szklanki, lekko ją przechylając na prawą stronę. Ruch ramienia był energiczny i nieprecyzyjny, co wynikało z nieprawidłowego oszacowania odległości między chwytakiem a szklanką.

Kadr 10



Rys.58: Jaco, kadr z filmu.

Źródło: <https://www.youtube.com/watch?v=-LqaaT0vhvk>

Użytkownik naciska klamkę obudową chwytaka, a następnie otwiera drzwi, podważając je na krawędzi. Chwytak jest zamknięty, a wyprostowane palce wsunięte między futrynę a drzwi.

Kadr 11



Rys.59: Jaco, kadr z filmu.

Źródło: <https://www.youtube.com/watch?v=-LqaaT0vhvk>

Włączanie/wyłączanie światła palcami lub bokiem chwytaka.

Kadr 12



Rys.60: Jaco, kadr z filmu.

Źródło: <https://www.youtube.com/watch?v=-LqaaT0vhvk>

Nalewanie wody z kranu do kubka ze słomką. Widok z perspektywy użytkownika. Aby uniknąć dodatkowych operacji, użytkownik chwycił kubek i trzymając go, otworzył wypływ wody z kranu. Strumień wody popłynął tuż obok chwytaka.

Kadr 13



Rys.61: Jaco, kadr z filmu.

Źródło: <https://www.youtube.com/watch?v=-LqaaT0vhvk>

Odsuwanie drzwi szafy bokiem chwytaka. Chwytak został docisnięty do drzwi, a następnie przesunięty do przodu. Cała konstrukcja ramienia została w wyniku tego ruchu bardzo obciążona.

Kadr 14



Rys.62: Jaco, kadr z filmu.

Źródło: <https://www.youtube.com/watch?v=-LqaaT0vhvk>

Podnoszenie obiektów znajdujących się blisko wózka, poza zasięgiem wzroku użytkownika. Proces ten jest utrudniony ze względu na ograniczoną widoczność podłoża wokół wózka. Kluczowe jest prawidłowe wyczucie odległości chwytaka od podłogi, aby uniknąć kolizji i uszkodzenia palców chwytaka.

Kadr 15



Rys.63: Jaco, kadr z filmu.

Źródło: <https://www.youtube.com/watch?v=y5Tm99lf82Y>

podpowiadać, że chwytak będzie zachowywał się jak ludzka dłoń – w jakiś sposób dopasowując się do chwytanego obiektu, wyczuwając jego kształt i dobierając siłę ścisku.

Wideo przedstawia próbę chwycenia chusteczki. Użytkownik stara się zaczepić chusteczkę palcem i zamknąć chwyt, jednak za każdym razem chusteczka spada. Rozwarte palce chwytaka sugerują, że jest to maksymalny zakres jego chwytu, ale punkt styku zamkniętych palców znajduje się centralnie pomiędzy nimi. Przez antropomorficzny kształt ramienia z chwytakiem intuicja może

Kadr 16



Rys.64: Jaco, kadr z filmu.

Źródło: <https://www.youtube.com/watch?v=hf3lfpV4hfA>

Kolejny przykład użycia ramienia w bliskiej obecności bieżącej wody przedstawia sytuację, w której użytkownik przygotowuje się do umycia zębów za pomocą ramienia. Istnieje duże ryzyko uszkodzenia urządzenia w kontakcie z bieżącą wodą.



2.4 Analiza uszkodzeń i śladów eksploatacji chwytaka JACO

Pojawiła się możliwość przyjrzenia się urządzeniu JACO, które wróciło od użytkownika do naprawy z wyłamanym palcem. Zauważone uszkodzenia odpowiadały zaobserwowanym sposobom użytkowania ramienia przedstawionym na filmach.

Rodzaje zaobserwowanych uszkodzeń:

- Otarcia i odpryski lakieru na zewnętrznych powierzchniach części chwytającej i ramienia.
- Ślady przekroczenia granicy plastyczności tworzywa na palcach.
- Uszkodzenia i wgniecenia na zewnętrznych powierzchniach palców.
- Ślady zamalowywania pędzelkiem ubytków lakieru na obudowie.
- Duża ilość brudu na palcach, gromadząca się w zakamarkach i na granicy materiałów, świadcząca o zalaniu palców substancją inną niż woda.



Rys.65: JACO, widoczne otarcia i ślady zmęczenia materiału



Rys.66: Palce JACO, noszące stare zabrudzenia



Rys.67: JACO, maskowanie uszkodzeń lakieru



Rys.68: Nadgarstek JACO, uszkodzenia lakieru.



Rys.69: JACO, uszkodzenia lakieru.

Według informacji przekazanych przez firmę Exxomove, która serwisuje te ramiona, najczęściej występującą usterką są połamane palce. W takim przypadku palec wymienia się w całości jako podzespół. Wymiany dokonuje pracownik serwisu u klienta, lub klient wysyła ramię do serwisu. Konstrukcja ramienia nie pozwala na szybką wymianę palca przez klienta we własnym zakresie. Usterka polegająca na wyłamaniu palca nie jest objęta gwarancją. Podobne usterki występują także w ramionach BATEO. Dlatego chwytak firmy ACCREA został wyposażony we wzmocnione palce, oraz możliwa jest ich łatwiejsza wymiana.

2.5 Wywiad wśród inżynierów

Z rozmów przeprowadzonych wśród zespołu inżynierów badających ramię Kinova oraz projektujących własne rozwiązanie Accrea wynika, że chwytanie i przenoszenie przedmiotów z pomocą tych ramion również sprawia im trudności. Niezależnie od producenta, problemy narastały, gdy używano kontrolera innego niż SpaceExplorer. Inżynierowie szybko stawali się niecierpliwi z powodu tego, że proste czynności zajmują im niewspółmiernie dużo czasu. Do sterowania ramieniem wykorzystywano joystick 6DOF dostarczony przez Kinovę i montowany na wózku. Jedna osoba, która świetnie opanowała sterowanie ramieniem przy pomocy SpaceExplorera, nie miała większych zastrzeżeń do jego działania. Panowało powszechne przeświadczenie, że skoro użytkownik wcześniej pozbawiony był jakiegokolwiek samodzielności, to zdobytą dzięki ramieniu niezależność na pewno doceni, nawet pomimo trudności w sterowaniu i długiego czasu potrzebnego na wykonanie czynności.

2.6 Testy z udziałem dystrybutora



Rys.70: Ramię Bateo zamontowane na wózku

Podczas spotkania roboczego z przedstawicielami dystrybutora ramion BATEO na Niemcy przeprowadzono kolejną obserwację procesu użytkowego chwytaka w czasie testów. Autor również wykonał próby z pozycji osoby siedzącej na wózku. Program testów zakładał sprawdzenie automatycznej reorientacji bazowego układu współrzędnych ramienia zamontowanego na wózku, umożliwiającej pionizację ciała użytkownika. W wyniku zmiany położenia siedziska o 90 stopni, inżynierowie mieli za zadanie zmodyfikować oprogramowanie ramienia, aby podczas pionizacji wózka uniknąć kolizji z ziemią i przeorientować je do pracy w pionie. Do testów chwytania używano jedynie kubka ceramicznego. W zespole nie było osób niepełnosprawnych. Co znamienne, choć ramię było sprzężone z kontrolerem wózka,

który pozwalał na sterowanie chwytkiem, wszyscy testujący chętniej używali kontrolera SpaceExplorer. Zauważono, że możliwość pionizacji ciała pozytywnie wpłynęła na poprawę widoczności z punktu widzenia użytkownika. Dzięki pozycji pionowej łatwiej było dostrzegać przedmioty na podłodze w bliskiej odległości od wózka oraz wygodniej podnosić je chwytkiem. Zauważono również poprawę komfortu używania ramienia, ponieważ w pozycji pionowej punkt mocowania ramienia znajdował się na wysokości kolana użytkownika. Efektem tego było bardziej naturalne operowanie chwytkiem na wyciągniętym ramieniu w okolicach twarzy. Zredukowało to poczucie przytłoczenia obecnością ruchomego urządzenia w bliskiej odległości torsu i twarzy. Sesja ta, poza wspomnianymi obserwacjami, nie przyniosła wielu nowych informacji, potwierdzając jedynie, że zaobserwowane wcześniej problemy z nawigacją chwytkiem oraz precyzyjnym jego ustawianiem są powszechne i wystąpiły również w tym przypadku.



Rys.71: Ramię Bateo zamontowane na wózku



Rys.72: Jaco, uszkodzenia lakieru.



Rys.73: Jaco, uszkodzenia lakieru.

2.7 Podsumowanie badań i wnioski

Przeprowadzone testy, badania oraz wcześniejsze analizy pozwoliły na zidentyfikowanie wad funkcjonalnych i użytkowych robotycznego ramienia asystującego. Część z tych wad odnosi się do całego systemu, część do urządzeń chwytających. Potwierdzone zostały wcześniejsze obserwacje i przypuszczenia, że stopień niepełnosprawności użytkownika nie ma krytycznego wpływu na zaobserwowane ograniczenia w sprawnym posługiwaniu się ramieniem. Stwierdzono, że istnieje odwrotna zależność między ilością

wykonywanych operacji sterowania a stopniem skomplikowania kontrolera. Kontrolery dostosowane do możliwości ruchowych osób niepełnosprawnych mogą jednorazowo obsłużyć tylko część dostępnych funkcji ramienia z chwytakiem, co przekłada się na dłuższy czas wykonywania zadań. Testy i obserwacje wykazały jednak, że stosując ten sam uproszczony model kontrolera, osoba w pełni sprawna ruchowo napotyka na takie same problemy jak osoba niepełnosprawna. Obie grupy użytkowników popełniają podobne błędy nawigacyjne. To spostrzeżenie jest na tyle interesujące, że warto je zgłębić.

Stwierdzono, że istnieje duży potencjał do stworzenia bardziej funkcjonalnego urządzenia, które znacząco poprawiłoby doświadczenia użytkownika. Do tej pory mogło występować mylne wrażenie, że częste uszkodzenia ramion i chwytaków są wynikiem ograniczeń motorycznych użytkowników oraz niewłaściwego użytkownika. Głębsza analiza wykazała, że użytkownicy mają nieco inne potrzeby użytkowe, niż te, które początkowo zdefiniowali twórcy istniejącego urządzenia. Dużym ryzykiem poważnej awarii jest posługiwanie się urządzeniem w pobliżu bieżącej wody. Producenci cechują swoje urządzenia stopniem wodoszczelności IPx2, co zgodnie z normą PN-EN 60529:2003 oznacza ochronę przed kroplami wody padającymi na obudowę pod kątem 15° względem położenia normalnego. Zalanie wodą z kranu może więc zniszczyć urządzenie. Ograniczenie to należy uznać za istotną wadę użytkową obu urządzeń.

Kolejną istotną wadą jest brak zaprojektowanej informacji zwrotnej dla użytkownika dotyczącej siły, z jaką palce chwytaka zaciskają się na przedmiocie. Użytkownik ocenia siłę chwytu jedynie na podstawie bodźców słuchowych i wzrokowych, zakładając, że jeśli przedmiot nie wysuwa się z uścisku i nie został zgnieciony, to siła ścisku jest odpowiednia. Badania użytkownika ramienia uwiarygodniły wyraźną potrzebę przesuwania przedmiotów, podważania i przeciągania ich bez chwytania. Czynności takie jak naciskanie klamki drzwi, otwieranie skrzydła drzwi, otwieranie szafek czy lodówek, odsuwanie przeszkód itp., nie zawsze wymagają chwytania przedmiotu. W obecnej wersji urządzeń czynności te są realizowane z wykorzystaniem palców i obudowy chwytaka, które nie zostały dostosowane do takich zastosowań. To prowadzi do uszkodzeń mechanicznych, takich jak wyłamywanie palców, otarcia obudowy i uszkodzenia sprzętów w otoczeniu. Uszkodzenia chwytaka w przeważającej części nie są wynikiem zużycia eksploatacyjnego, ale używania go „niezgodnie z przeznaczeniem”. To określenie, znane z kart gwarancyjnych, w tym przypadku należy zinterpretować jako rozszerzenie funkcjonalności produktu przez użytkownika i uznać za znaczący wkład w projekt nowego urządzenia.

Regularnie powtarzają się sytuacje, w których ramię lub chwytak ogranicza widoczność osoby korzystającej z niego. Użyteczny zasięg chwytaka wynosi 1 m, a punkt jego montażu do wózka jest wysunięty do przodu i znajduje się na wysokości kolana osoby siedzącej na wózku. Jest to uzasadnione względami bezpieczeństwa, aby ramię w żadnym scenariuszu ruchu nie wchodziło w kolizję z ciałem użytkownika.

PODSUMOWANIE

Wyznaczono cztery obszary doświadczeń użytkownika, w których należy zacząć poszukiwać możliwości poprawy urządzenia lub wyprowadzenia innowacji.

- Nawigowanie chwytakiem w przestrzeni
- Architektura chwytaka i geometria ruchu palców
- Informacja zwrotna maszyna-człowiek
- Automatyzacja czynności powtarzalnych

CZY TAK:

GDZIE JEST PROBLEM? → WIE OZIAŁA TAK RAZNIE
ZAWYB SIĘ CUKIŁO

DLACZEGO? PRZYCZYNY:

- ✓ WSA PRACUJE OKRZYŻU
- ✓ BARDZO CZYLIWY: AMERYKAŃSKI KANIG
- ✓ JEST WIEKOWY

CZY PROBLEM JEST WAŻNY?
LUB JEST DOBRE

CZY PROBLEM JEST W STROPIWIE?
LUB JEST DOBRE. LUB PROBLEM?
PROBLEM JEST DOBRE..

CZY PROBLEM JEST W CZYLIWIE?
LUB TAK WYCHODZI..

CZYLI CO? NIE MA WYCHODZI...??
LUB MA STOP

CZY JEŚLI ZASTANIEŃ CURENTO PROBLEM

TO WYCHODZI ZACZINIA CUKIŁO?

• SPRAWDZMY TO → JEST NIE WYCHODZI.

[WYCHODZI: WYCHODZI, WYCHODZI WIE, JE JESTEN]

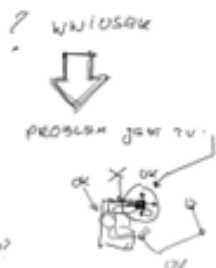
• CZY STROPIWIE? CZYLIWIE → WYCHODZI WYCHODZI

• SPRAWDZMY TO GŁOBE NAVIGATOREM: → JEST NIE WYCHODZI

WYCHODZI: JEST WYCHODZI, ALE WYCHODZI TO NIE TO
CZYLEC OBARUZE NI TU WYCHODZI WYCHODZI I SIĘ NIE WYCHODZI

PROBLEM JEST W WYCHODZI WYCHODZI JESTEN WYCHODZI
WYCHODZI I WYCHODZI WYCHODZI WYCHODZI WYCHODZI

! ? JESTEN TO JESTEN WYCHODZI?



PODOBNY PROBLEM
JEST NIE WYCHODZI WYCHODZI
- WYCHODZI WYCHODZI
- WYCHODZI WYCHODZI
- WYCHODZI WYCHODZI
- WYCHODZI WYCHODZI



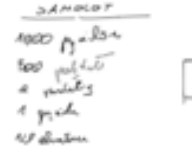
KONCEPCJE I ROZWIĄZANIA

- SYSTEM WYCHODZI
- WYCHODZI WYCHODZI
- WYCHODZI WYCHODZI
- WYCHODZI WYCHODZI



WYCHODZI WYCHODZI

- WYCHODZI WYCHODZI
- WYCHODZI WYCHODZI



WYCHODZI WYCHODZI

WYCHODZI
WYCHODZI WYCHODZI
JE WYCHODZI WYCHODZI WYCHODZI
TRON WYCHODZI WYCHODZI WYCHODZI

WYCHODZI WYCHODZI

WYCHODZI WYCHODZI

Rozdział 3

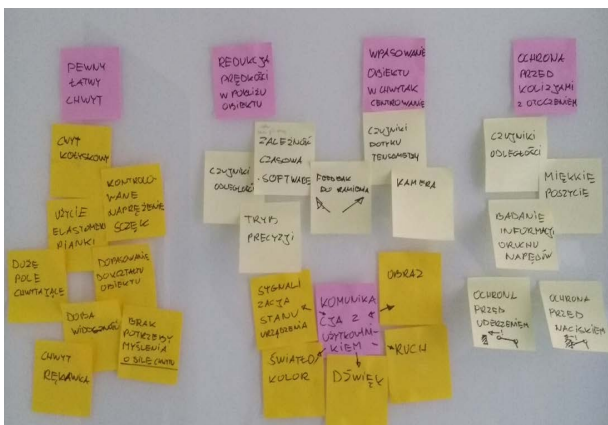
ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE

W tym rozdziale zdefiniowano szczegółowe założenia do projektu. Zagadnienia nawigacji oraz mapowania kierunków ruchów w tym urządzeniu są bardzo interesujące, odpowiadają w znacznym stopniu za łatwość posługiwania się urządzeniem, oraz mają duży potencjał na poprawę użyteczności i doświadczeń użytkownika. Drobiazgowe zbadanie tego zagadnienia mogłoby stać się na tyle obszerne by zaistnieć jako osobne opracowanie. Aspekt dynamicznego mapowania kierunków ruchu wymagałby głębszego poznania oraz rozszerzenia badań i eksperymentów na grupie użytkowników. Do projektu należałoby również zaangażować programistów oraz inżynierów automatyków, którzy stworzyliby nowe warianty oprogramowania dla całego systemu sterującego ramieniem. Pomimo ograniczonych zasobów, zagadnieniu temu poświęcono osobny podrozdział. Niniejsze opracowanie koncentruje się na fizycznej części projektu. Większość czasu, który użytkownik spędza na korzystaniu z ramienia, to czas poświęcony na wykonywanie

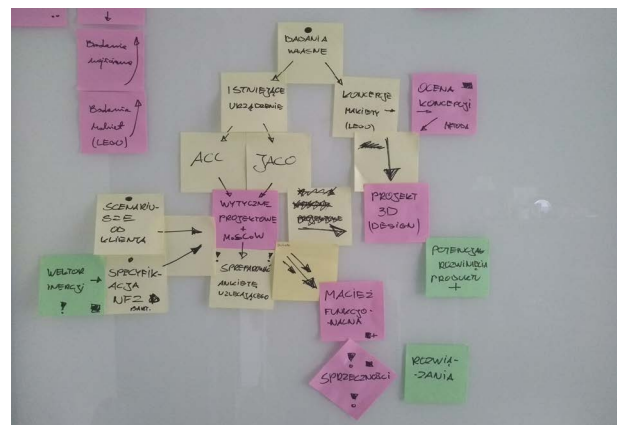
mikro czynności chwytkiem i manipulowanie nim w bliskiej odległości od chwytanym obiektów. To wtedy powstaje najwięcej błędów i uszkodzeń. Skupienie się na rozwiązaniu problemów związanych z urządzeniem chwytającym przyniesie istotną poprawę użyteczności całego systemu. W ramach projektu podjęta zostanie próba zaprojektowania chwytaka w taki sposób, aby uprościć wykonywanie przewidzianych czynności. Zaproponowane zostaną również sposoby zniwelowania problemów związanych z nawigacją chwytkiem przez zmiany w sposobie posługiwania się urządzeniem.

3.1 Założenia funkcjonalne

1. Urządzenie powinno być intuicyjne w obsłudze - działa dokładnie w taki sposób jak się tego spodziewa użytkownik.
2. Automatyczne mapowanie kierunków ruchu chwytaka - dopasowuje rzeczywiste kierunki ruchów chwytaka w danym momencie tak aby najbardziej odpowiadały rzeczywistym ruchom joysticka.
3. Urządzenie komunikuje się z użytkownikiem za pomocą sygnałów świetlnych i dźwiękowych - dodanie na chwytaku kontrolki LED, sprawi, że nie będzie musiał odwracać oczu od chwytaka. Powiązanie koloru światła z zestawem ruchów. Przełączanie funkcji zmienia kolor. Skojarzenie zestawu ruchów z kolorem bez patrzenia w instrukcję. Można dodać zestaw dźwięków, które nie będą irytować osób w otoczeniu.
4. Stałe korzystanie z instrukcji jest zbędne - posiłkowanie się instrukcjami graficznymi tylko na etapie uczenia użytkownika.
5. Urządzenie wyręcza użytkownika z typowych powtarzalnych operacji - zautomatyzować powtarzane, następujące po sobie ruchy, aby nie trzeba ich było wykonywać samemu.
6. Urządzenie reaguje na przeszkody - gdy dojdzie do kolizji z przedmiotem lub otoczeniem, chwytak samoczynnie zatrzyma się minimalnie cofając. Można kontynuować ruch - np. przesuwania czegoś, np. przytrzymując lub ponawiając ruch joysticka.
7. Chwytak w czytelny dla użytkownika sposób komunikuje kontakt z chwytanym obiektem i zakres użytej siły chwytu.
8. Urządzenie nie wymaga precyzji od użytkownika - budowa chwytaka powinna pozwalać na bezpieczny chwyt bez względu na nieprecyzyjne ustawienie względem chwytanego obiektu.
9. Urządzenie przewiduje kolejne ruchy użytkownika - samopoziomowanie i pionizacja chwytaka w czasie przemieszczania.



Rys.74: Tablica z karteczkami, grupowanie funkcji i cech

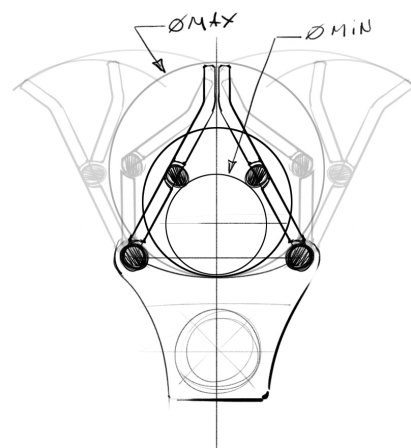
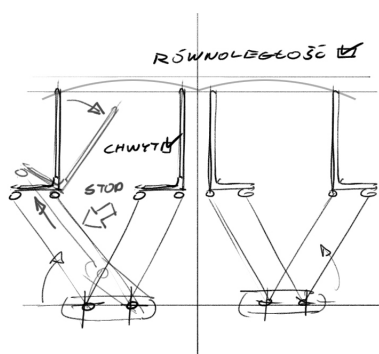


Rys.75: Tablica z karteczkami, porządkowanie zagadnień

10. Delikatny start napędów ramienia w celu złagodzenia skutków błędu nawigacji.
11. Projekt urządzenia odpowiada typowym zachowaniom użytkowników.
12. Urządzenie umożliwia łatwe chwycenie słomki do napojów leżącej na stole.
13. Chwytnak wytrzymuje kolizje z obiektami w otoczeniu.
14. Urządzenie rozszerza możliwości kognitywne - Użytkownik może poznawać otoczenie w nowy dla siebie sposób, np. poznając ciężar obiektów lub temperaturę.

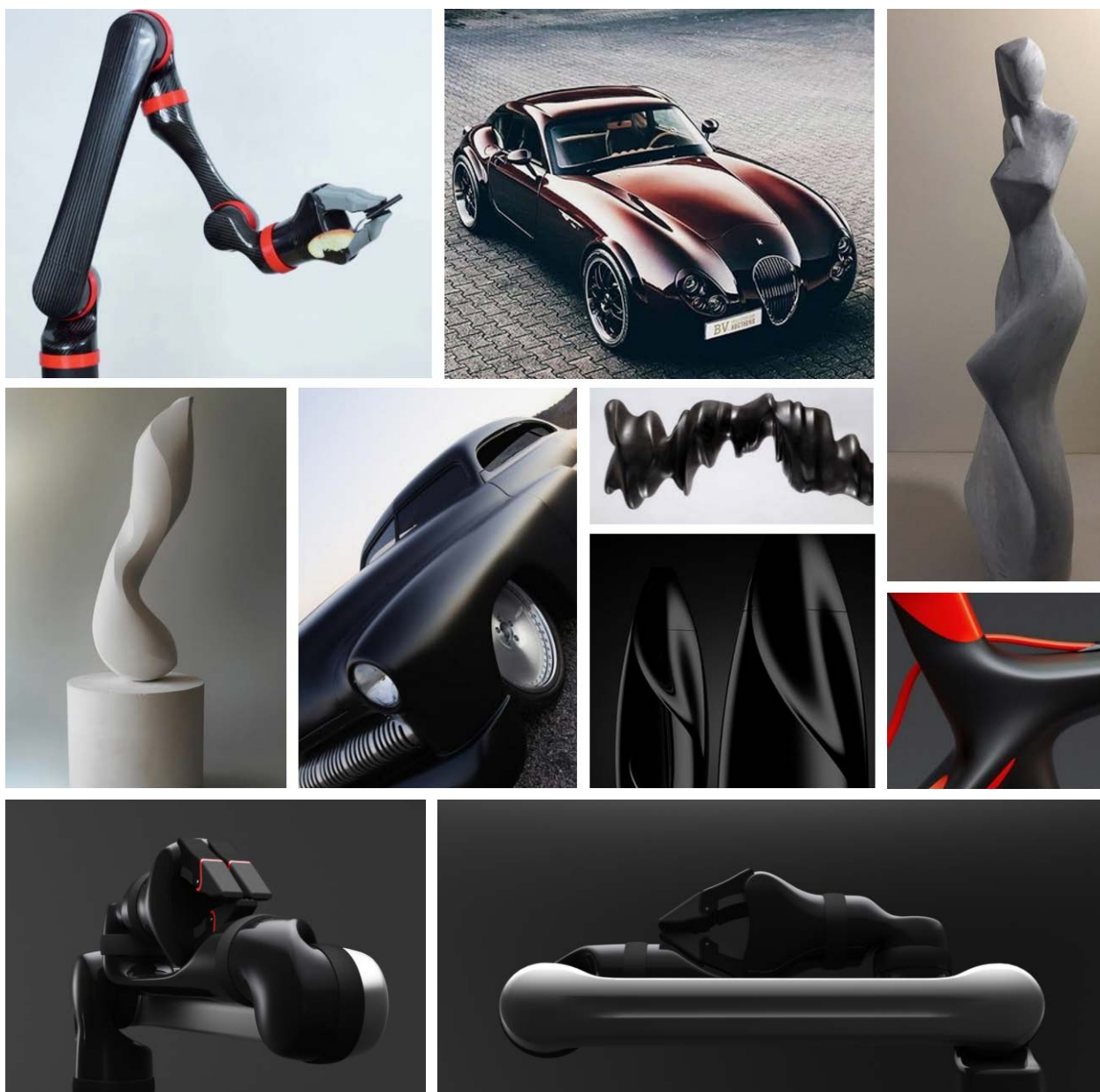
3.2 Założenia techniczne

1. Chwytnak zasilany jest ze złącza na końcu ramienia.
2. Konstrukcja umożliwia chwytanie obiektów o średnicy 95mm.
3. Konstrukcja umożliwia przenoszenie ciężarów do 1,5 kg.
4. Konstrukcja posiada stopień ochrony minimum IPx4 dla części czynnych.
5. Masa chwytaka nie może się zwiększyć.
6. Odległość punktu chwytu od punktu montażu powinna być identyczna jak w BATEO.
7. Chwytnak musi być kompatybilny mechanicznie z ramieniem BATEO.
8. Należy przewidzieć miejsce dla dodatkowej małej płytki PCB.
9. Chwytnak w stanie złożonym na wózku powinien zmieścić się w obrysie ramienia.
10. Ruch palców chwytaka musi odbywać się po linii prostej
11. Obudowa z miękkich materiałów
12. Należy uniemożliwić uszkodzenie chwytaka w normalnym użytkowaniu, lub wprowadzić łatwą wymianę uszkodzonych części przez osobę nie będącą technikiem.
13. Stosowane rozwiązania nie mogą naruszać praw patentowych.
14. Rozwiązania wymagające licencji są wykluczone.
15. Materiał aluminium CNC, druk 3D, karbon, odlewy z żywicy, silikon.
16. Produkcja nisko seryjna i jednostkowa.



3.3 Założenia stylistyczne

1. Chwytek powinien być spójny wzorniczo z ramieniem.
2. Chwytek powinien kontynuować / nawiązywać językiem stylistycznym do istniejącego ramienia.
3. Powinien mieć miłe dla oka gładkie powierzchnie
4. Powinien sprawiać wrażenie przyjaznego i bezpiecznego
5. Preferowane kształty o charakterze organicznym
6. Liczbę detali w obudowie ograniczyć do minimum
7. Umożliwić zmianę kolorystyki chwytaka i detali
8. Wprowadzić akcent kolorystyczny związany z funkcją



Rys.76: Moodboard

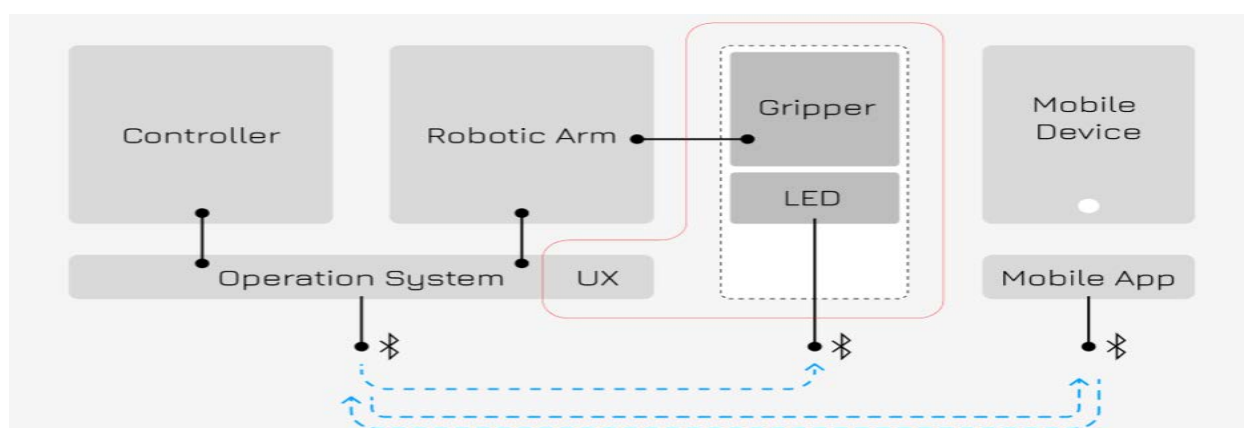
3.4 Ograniczenia

1. Części konstrukcji wykonane z aluminium w technologii obróbki skrawaniem CNC.
2. Zachować maksymalną prostotę i niską objętość części z aluminium w celu uniknięcia dużych strat materiału przy obróbce.
3. Ograniczyć lub wyeliminować stosowanie żywic syntetycznych, poliuretanów oraz silikonów.
4. Części z tworzyw wykonać w technologii druku 3D FDM, SLA lub olewania ciśnieniowego w formach aluminiowych.
5. Wykorzystać jak najwięcej standardowych komponentów mechanicznych dostępnych w handlu

3.5 Nowa architektura systemu

Na nowoprojektowany system złożą się następujące elementy:

- Ramię BATEO z jednostką sterującą i akumulatorem
- Chwytnak z modułem komunikacyjnym BT oraz źródłem światła LED RGBW
- Dodatkowy moduł BT PCB z czujnikiem temperatury, montowany w chwytaku
- Urządzenie mobilne - tablet lub telefon
- Aplikacja wspomagająca użytkownika z funkcją komunikacji z modułem BT chwytaka, aplikacja instalowana na urządzeniu mobilnym
- Zaktualizowane o nowe funkcjonalności oprogramowanie ramienia BATEO
- Moduł kamery BT ze źródłem światła LED
- Przystawka na kamerę lub telefon



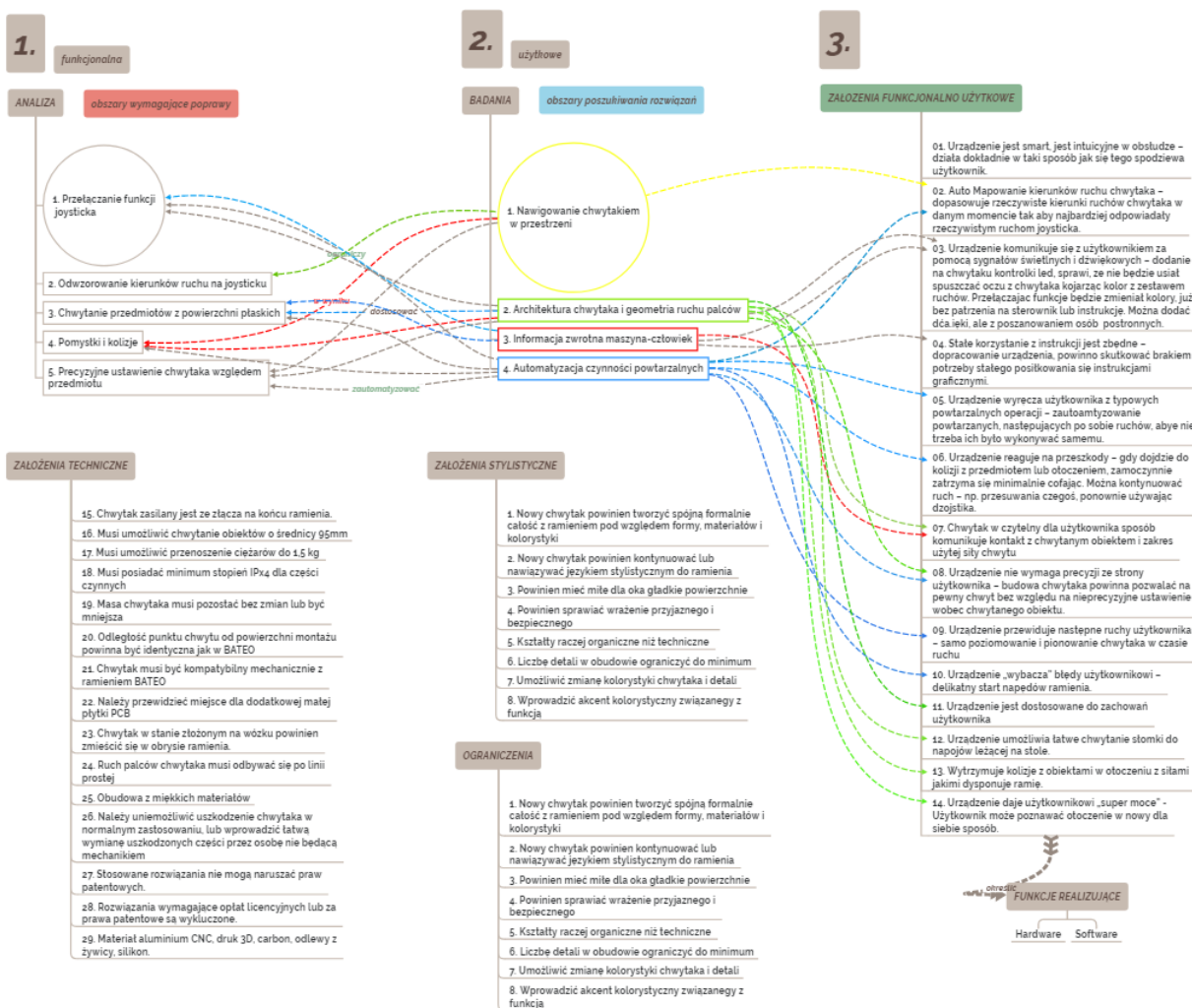
Rys.77: Schemat architektury systemu, ze wskazaniem chwytaka (czerwona ramka), implementacja UX do konstrukcji.

Istotną zmianą wprowadzoną do obecnie istniejącego systemu jest dodanie modułu komunikacji bluetooth do chwytaka. Moduł ten będzie odpowiadał za informację zwrotną do użytkownika. Informacja zwrotna będzie przekazywana przy pomocy impulsów kolorowego światła z diody LED na obudowie chwytaka. Należy przewidzieć też miejsce na dodanie dodatkowego modułu z czujnikiem temperatury na małej płytce PCB wewnątrz chwytaka. Zakres projektu obejmuje budowę hardware'u chwytaka multifunkcyjnego,

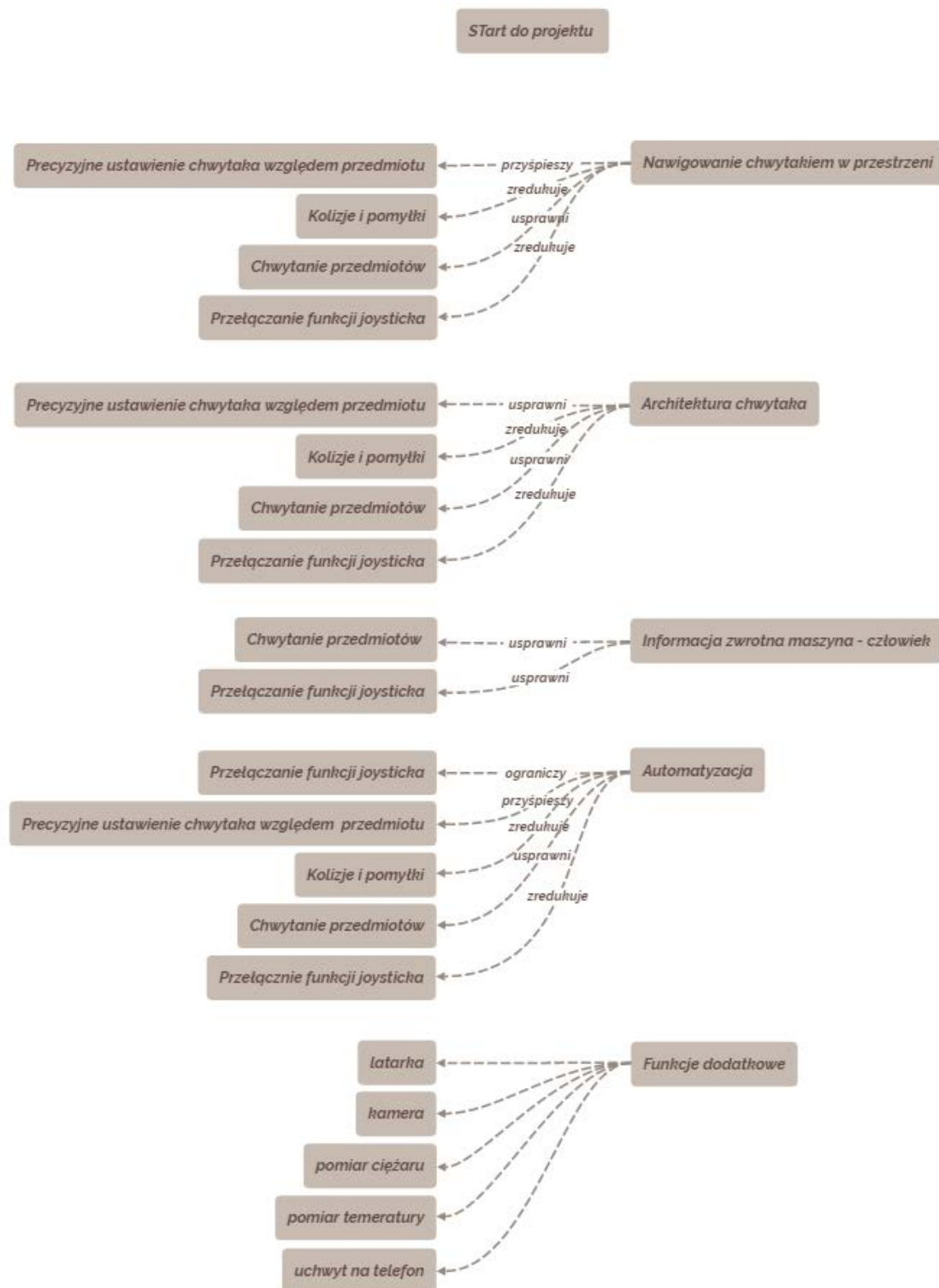
opracowanie nowego sposobu mapowania kierunków ruchu chwytaka oraz stworzenie scenariuszy funkcji automatycznych. Te scenariusze będą służyć jako wkład projektowy dla deweloperów, którzy opracują nowe oprogramowanie sterujące ramieniem.

3.6 Synteza

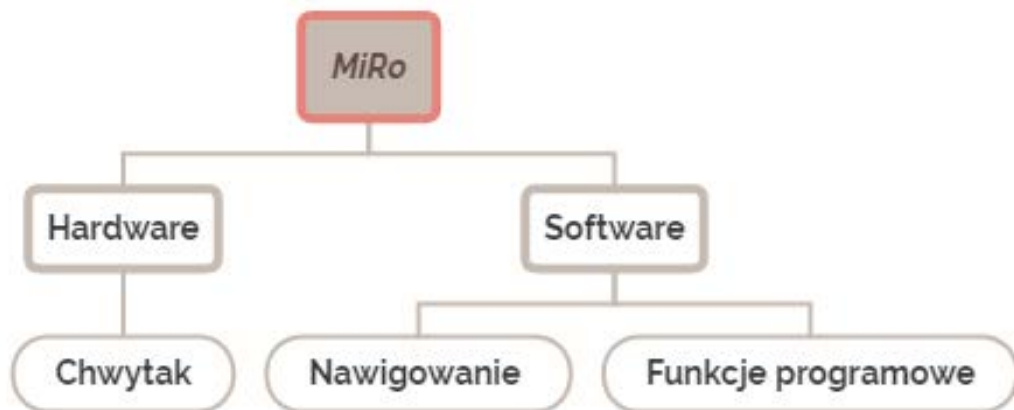
W kolejnym etapie przeprowadzono syntezę założeń projektowych. Obszary wymagające usprawnień zostały powiązane z obszarami, w których będą poszukiwane odpowiednie rozwiązania. Proces ten został przedstawiony w dwóch pierwszych częściach diagramu. W trzeciej części umieszczono szczegółowe założenia tematycznie przyporządkowane do odpowiadających im obszarów. Celem tego działania było logiczne powiązanie ze sobą zależnych elementów, co pozwala na łatwiejsze ich wykorzystanie w procesie projektowania. W wyniku tak przeprowadzonej syntezy zdefiniowano funkcjonalności, które finalny produkt powinien posiadać. Ze względu na sposób ich realizacji, projekt został podzielony na dwie części. W pierwszej części prace projektowe będą skoncentrowane na stworzeniu funkcjonującego urządzenia, natomiast w drugiej części opracowane zostaną funkcje realizowane programowo.



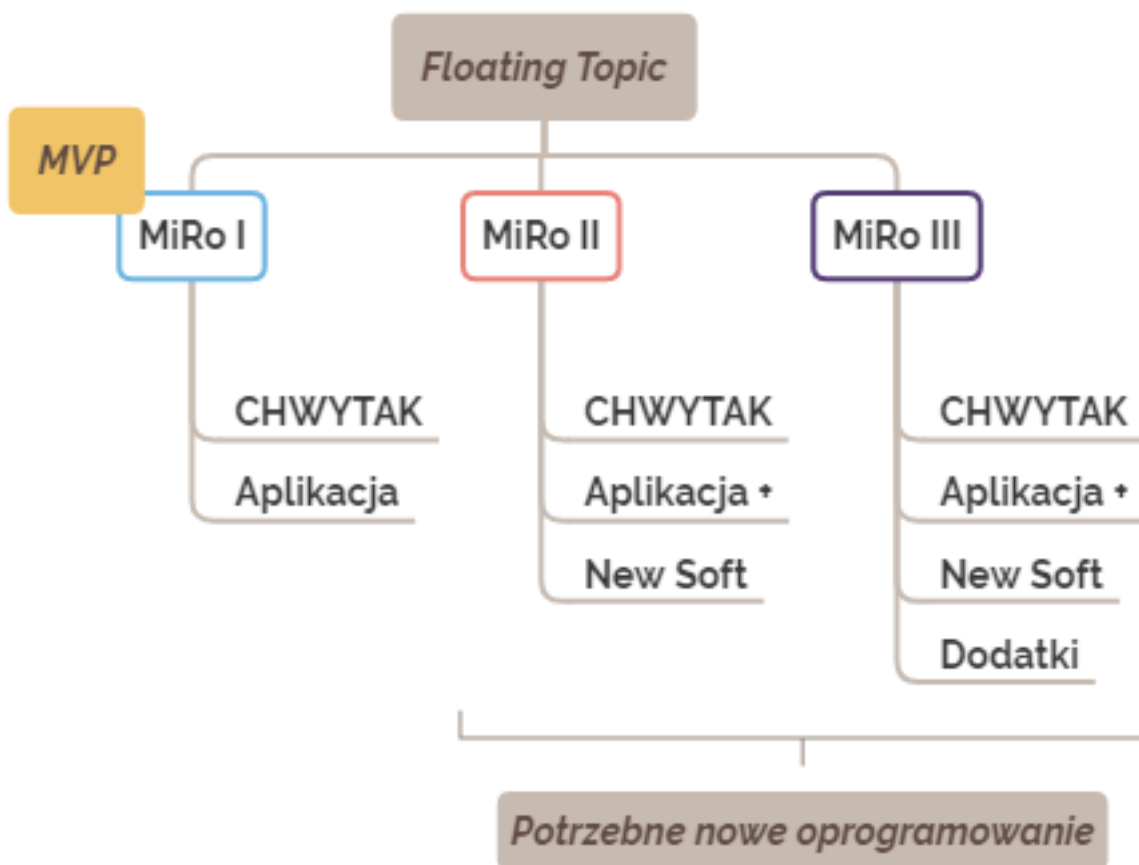
Rys.78: Synteza założeń projektowych.



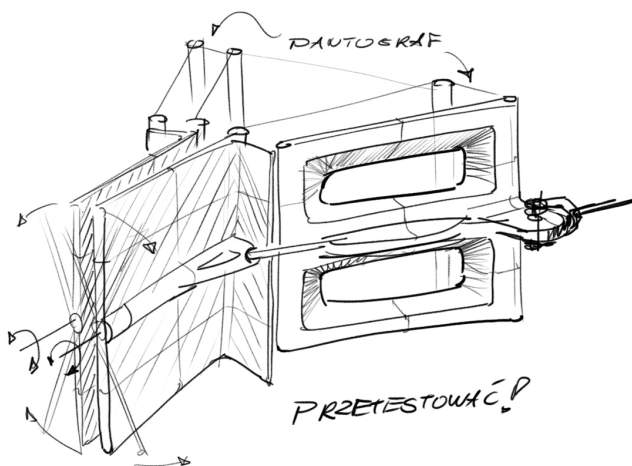
Rys.79: Synteza założeń projektowych - relacje pomiędzy problemem, a obszarem poszukiwania rozwiązań.



Rys.80: Podział zakresu projektu na dwa główne obszary: konstrukcję i oprogramowanie



Rys.81: Podział rezultatów projektu na trzy warianty produktu finalnego.



Rozdział 4

PROJEKT KONCEPCYJNY

Przystępując do projektu, jasno określono wizję wartości, jaką urządzenie powinno przynieść użytkownikom. Na podstawie przeprowadzonego procesu badawczego określono, jakie cechy urządzenie powinno posiadać, jak powinno działać oraz w jaki sposób interagować z użytkownikiem. W pierwszym kroku wykonano przegląd istniejących technologii oraz dostępnych rozwiązań. Celem tego działania było sprawdzenie, czy na rynku istnieje już produkt spełniający postawione założenia, który można by zaadaptować do ramienia Accrea. Takie podejście jest uzasadnione z punktu widzenia biznesowego oraz ekologicznego. Niemniej jednak prawdopodobieństwo znalezienia rozwiązania odpowiadającego w pełni stawianym wymaganiom uznano za niskie, ze względu na specyficzne przeznaczenie nowo projektowanego chwytaka. Przegląd podobnych rozwiązań może jednak stanowić inspirację i dostarczyć cennej wiedzy na temat technologii, które można by wykorzystać w projekcie.

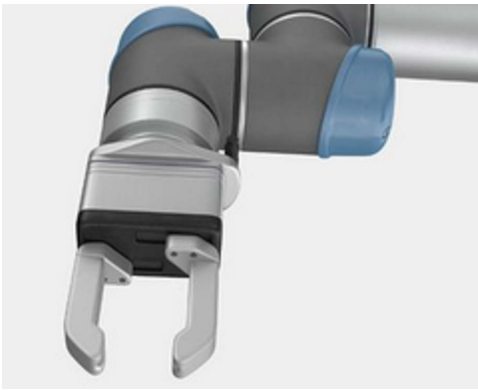
4.1 Przegląd istniejących rozwiązań chwytaków

Do przeprowadzenia przeglądu wykorzystano Internet. W pierwszym etapie przeszukano strony wiodących producentów robotów i automatyki przemysłowej w celu zidentyfikowania produktów komercyjnych. Następnie przeszukano sieć według określonych fraz, poszukując rozwiązań prototypowych i koncepcyjnych. Warty uwagi pomysłem było zapoznanie się z archiwalną bazą prototypów robotycznych dłoni, opracowanych przez firmę Accrea. Projekty te jednak nie spełniały wymagań tego projektu, głównie ze względu na ich niedostateczne dopracowanie oraz tendencję do naśladowania budowy i funkcji ludzkiej dłoni, co w kontekście przyjętych założeń nie czyniło ich odpowiednimi. Natomiast przegląd zasobów Internetu umożliwił zidentyfikowanie kilku trendów, którymi kierują się producenci robotycznych urządzeń chwytających.

Kierunek I - Próby przeniesienia kinematyki i precyzji ludzkiej dłoni przy pomocy różnych rozwiązań mechanicznych, wykorzystujących napędy ciągnowe i sztuczną skórę (powłokę wyposażoną w sensory). Takie urządzenia, wraz ze sterującymi nimi rękawicami haptycznymi, tworzone są do wykonywania precyzyjnych, ale niebezpiecznych dla ludzi prac, np. w laboratorium chemicznym, w obecności podwyższonego promieniowania, w laboratorium biologicznym itp. Charakteryzują się one wysoką precyzją działania, lecz wymagają zaawansowanego oprogramowania i wydajnego komputera. Lekkość i miniaturyzacja są okupione skomplikowaniem mechanizmów oraz wysokimi kosztami.

Kierunek II - Chwytki przemysłowe dostosowane są do specyficznych czynności oraz współpracy z określonymi robotami. Do tej grupy zalicza się różnorodne chwytaki szczękowe, szczypce, chwytaki magnetyczne, przyssawki itp. Są to narzędzia o prostej konstrukcji, wykonane z powszechnie dostępnych podzespołów. Projektowane jako elementy większych systemów technicznych, z uwzględnieniem części, z którymi mają współpracować - np. zamków, zatrzasków, matryc, szczypiec, szczęk czy łapek podciśnieniowych. Charakteryzują się one brakiem uniwersalności, będąc nastawionymi na realizację konkretnych zadań, a także wysoką trwałością użytkową.

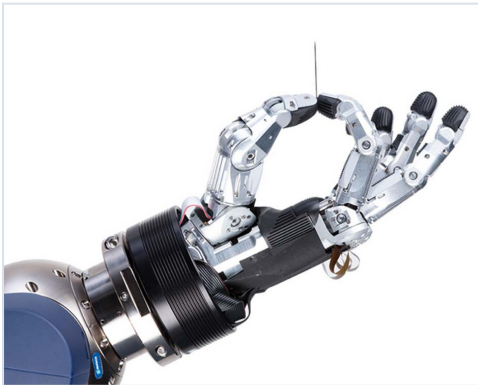
Kierunek III - Naśladowanie natury, czyli bionika, opiera się na głębokiej analizie mechanizmów występujących w organizmach żywych i próbach ich przeniesienia na grunt mechaniki, co niekiedy przynosi spektakularne efekty wizualne. W połączeniu z eksperymentowaniem na nowych materiałach, ten kierunek może prowadzić do tworzenia urządzeń zadziwiających - niemal żywych, delikatnych i niestabilnych, o prostej budowie, ale wymagających zaawansowanych technologii. Kluczowym elementem tej koncepcji jest sposób kształtowania materiałów na wzór natury, z naciskiem na wykorzystanie ich sprężystości oraz zdolności do zmiany objętości.



Rys.83: Bionic handling assistant,
Źródło: <https://www.festo.com>

Universal Robots

Prosty chwytak mechaniczny wykonany z metalu. Jego szczęki napędzane są przez silnik elektryczny, a ich ruch odbywa się pionowo, prostopadłe do siebie. Zajmuje niewiele miejsca, ale ma też bardzo niewielki zakres ruchu. W kontekście spełnienia założeń projektowych pożądany jest ruch szczęk po linii prostej.



Rys.84: Bionic handling assistant,
Źródło: <https://www.festo.com>

Schunk

Piękna precyzyjna maszyna inspirowana mechaniką ludzkiej ręki, mająca w założeniu dorównywać jej precyzją. Urządzenie niezwykle skomplikowane i trudne w budowie. Sterowanie taką dłonią musi odbywać się przez specjalnie napisany sterownik symulujący ruchy dłoni. W kontekście założeń projektowych jest zbyt skomplikowana.



Rys.85: Bionic handling assistant,
Źródło: <https://www.festo.com>

Festo

Bardzo ciekawy przykład mechanizmu podanego (compliant mechanism). Mechanizm będący jedną częścią, za sprawą zróżnicowania grubości materiału uzyskuje punkty obrotu na wzór zawiasów. Dodatkowo, jego sprężystość powoduje, że stara się obejmować chwytaną część.



Rys.86: Bionic handling assistant,
Źródło: <https://www.festo.com>

Franka

Kolejny przykład chwytaka o szczękach poruszających się równolegle. Urządzenie ze zdjęcia ma szerokość, która jest pochodną maksymalnego rozwarcia szczęk. Taki kształt byłby nie optymalny w moim projekcie.

Fraunhofer

Chwytek należący do robota społecznego o nazwie Care-o-bot 4, który został zaprezentowany w 2015 roku jako wspólny projekt Fraunhofer Institute oraz studia Phoenix Design. Uwagę zwraca uproszczona konstrukcja - tylko jeden ruchomy palec, a forma przywodzi na myśl zimową ciepłą miękką rękawicę. Jest to najprzyjaźniej wyglądający chwytek z wszystkich jakie widziałem. Na wewnętrznej stronie zamontowano kamerę i czujnik odległości.



Rys.87: Care-o-bot, Fraunhofer-Institut,
Źródło: <https://www.care-o-bot.de/>

Mechaniczne

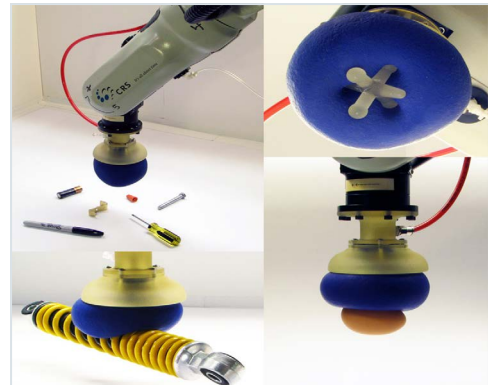
Inny rodzaj konstrukcji, dużo lżejszej i bardziej delikatnej. Ruch palców osiągnięty jest przez naciąganie i luzowanie metalowych linek, mających swe napędy w nie widocznym na zdjęciu przedramieniu. Precyzja takiego urządzenia potrafi być bardzo duża, ale stopień skomplikowania i regulacji jest bardzo wymagający.



Rys.88: Bionic handling assistant,
Źródło: <https://www.festo.com>

Pneumatyczne

Oto przykład chwytaka, który wykorzystuje mieszki z elastomeru wypełnione małymi lekkimi kuleczkami. W środku, pomiędzy kuleczkami, znajduje się powietrze. Mieszek jest dociskany do obiektu (obiekt nie może być płaski i większy od mieszka), przyjmując jego kształt. Powietrze jest usuwane, a ciśnienie atmosferyczne zaciska mieszki na obiekcie. Kuleczki wewnątrz nie mogą się poruszać względem siebie, więc utrzymują obiekt w bezruchu.



Rys.89: Bionic handling assistant,
Źródło: <https://www.festo.com>

Kuka

Rozwiązanie pochodzące z robotyki przemysłowej. Proste ramię robotyczne wyposażone w jednofunkcyjny chwytek, a nad nim zabudowany system kamer monitorujący w czasie rzeczywistym przestrzeń poniżej. Program komputerowy interpretuje widok z kamer jako np. chaotycznie ustawione przedmioty. Następnie optymalizuje ich ułożenie i steruje robotem, który je układa.



Rys.90: KUKA visionTech,
Źródło: <https://www.kuka.com/de-de>

PODSUMOWANIE

Nie znaleziono chwytaka, który spełniałby podstawowe założenie, jakim jest ruch szczęk po linii prostej lub w inny prosty sposób rozwiązywał zadanie chwytania obiektów z powierzchni bez konieczności dodatkowej aparatury. Nie natrafiono na chwytak, który chwyciłby jednocześnie zarówno duże, jak i małe obiekty o nieregularnych kształtach.

W jednym z filmów demonstrujących technologie automatyki przemysłowej problem ruchu szczęk po łukach został rozwiązany programowo poprzez przesunięcie chwytaka w czasie zamykania względem obiektu. Efekt ten wygląda na rozwiązanie, lecz w rzeczywistości funkcjonalność została uzyskana jednorazowo przez programistę w tym konkretnym zastosowaniu maszyny CNC. Bardzo interesującym, ze względu na prostotę budowy oraz wysoką funkcjonalność, jest rozwiązanie firmy Festo. Przeprowadzona zostanie ocena możliwości adaptacji tego rozwiązania, jego funkcjonalności oraz ewentualnych naruszeń patentowych. Chwytaki pneumatyczne zostały odrzucone z uwagi na koszty dodatkowego zasilania, takie jak pompy, węże, zawory i regulatory ciśnienia.

Ciekawym i eleganckim technicznie rozwiązaniem jest sprzężenie chwytaka z systemem wizyjnym z kamerami umieszczonymi nad sceną, gdzie wykonywane są zadania. Odpowiednie oprogramowanie śledzi ruch i koryguje jego poprawność. Taki system rozwiązuje problem pozycjonowania chwytaka względem przedmiotu. Mimo wielu zalet, przeciw temu rozwiązaniu przemawia objętość całej konstrukcji, potrzeba zastosowania wydajnego komputera oraz oprogramowania z funkcjami uczenia maszynowego.

W kolejnym kroku przystąpiono do projektu chwytaka wielofunkcyjnego. Zostanie przeprowadzony proces od swobodnych koncepcji, przez szybkie prototypy kinematyczne i funkcjonalne wykonywane z LEGO Technic, aż po konstrukcję w CAD oraz testy na prototypach w technologii druku 3D.



Rys.91: Zegarmistrz przy pracy,
Źródło: <https://www.pomysly-na.pl>



Rys.92: Wspinaczka na skalnej ścianie
Źródło: <http://www.jurajskakraina.pl>

4.2 Projekt chwytaka

Pomimo przeglądu różnych konstrukcji, nie udało się znaleźć urządzenia spełniającego zdefiniowane założenia. Przegląd ujawnił pewne trendy w konstrukcji takich urządzeń. Widok rozwiązań próbujących naśladować ludzką rękę wzbudził wątpliwości, czy chwytak o budowie antropomorficznej jest optymalnym wyborem do realizacji postawionych przed urządzeniem zadań. Projektowane urządzenie jest bliższe rozwiązaniom przemysłowym, głównie z uwagi na określoną, relatywnie wąską gamę czynności, które ma wykonywać. Istnieje ryzyko, że urządzenie, ewolucyjnie przystosowane do realizacji wyspecyfikowanych zadań, będzie wyglądać zupełnie inaczej niż obecnie stosowane rozwiązania.

Ludzka ręka została ukształtowana w drodze ewolucji, aby była wszechstronna, zapewniając przetrwanie i przewagę nad innymi gatunkami. „Przewaga dzięki technice” – głosi odważne hasło jednego z producentów samochodów. Dzięki tej samej konstrukcji biomechanicznej, jaką jest ręka, człowiek może używać wielkiej siły fizycznej, broniąc się i zadając ciosy w walce

wręcz, a także z wyczuciem i wirtuozerią grać na skrzypcach. Może wspinać się po skalnych ścianach Alp oraz z niezwykłą precyzją składać mikroskopijne elementy szwajcarskich mechanizmów. Oczywiście te skrajności nie występują jednocześnie, ale pokazują ogromny potencjał adaptacyjny tej jednej konstrukcji zwanej ręką.

Zatem, czy kopiowanie budowy tego misternego wynalazku natury w celu realizacji prostych funkcji, takich jak chwyatanie obiektów, przesuwanie ich oraz wywieranie nacisku na powierzchnie, jest działaniem współmiernym do potrzeb? Istnieje przekonanie, że nie. Przyjmując zamkniętą listę funkcji i projektując urządzenie wyłącznie do ich realizacji, możliwe jest stworzenie zupełnie nowego, unikalnego i niepowtarzalnego rozwiązania. Chociaż jest to śmiało założenie, które może prowadzić do powrotu do początkowego punktu, intuicja podpowiada, że warto podążać tą drogą.

Patrząc na listę założeń przed oczami mam kalejdoskop przeglądanych wcześniej rozwiązań, ich kombinacji, wariantów. Wszystko wydaje się tak niesamowicie skomplikowane. Musiałem zrobić krok w tył.

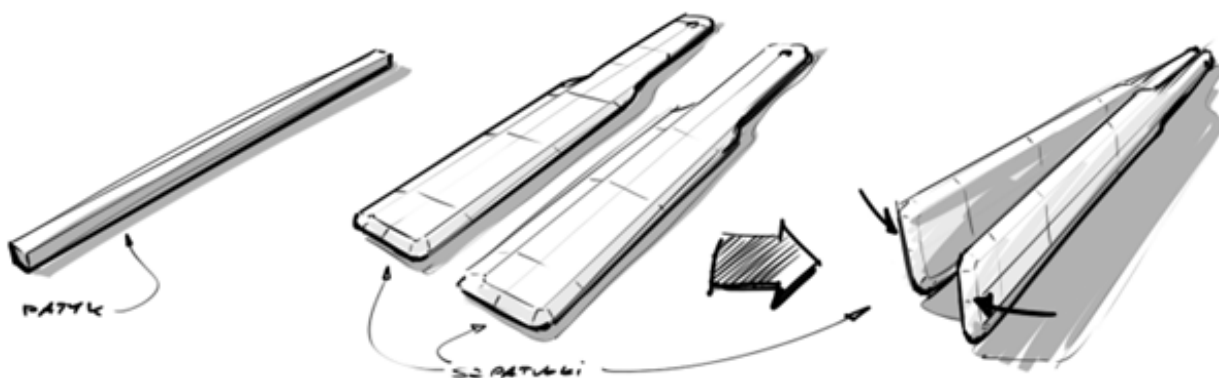
Czy w codziennym życiu, jeśli nie jestem pianistą, skrzypkiem, zegarmistrzem, chirurgiem lub saperem, to możliwości tak misternej konstrukcji jaką jest ludzka ręka są przeze mnie w pełni wykorzystywane? Oczywiście, że nie. Wiele czynności jesteśmy w stanie wykonać jednym palcem, nadgarstkiem,

łokciem, a czasem nawet brodą, gdy „braknie rąk”. Nasi domowi czworonożni przyjaciele również potrafią otwierać sobie drzwi i przenosić przedmioty. Idąc dalej tym tokiem rozumowania, zastanawiałem się jak mogłoby wyglądać takie najprostsze i najbardziej funkcjonalne narzędzie do wykonywania tych czynności. Znalazłem listewkę o długości ok. 30cm, grubości 2cm, kwadratową w przekroju. Szybko zastąpiłem ją kuchenną drewnianą szpatułą, upewniając się, że będzie bardziej wytrzymała.

Co do zasady funkcjonalność obu jest jednakowa. Redukując drastycznie stopień skomplikowania mechanizmu, zawsze należy pamiętać o redukcji oczekiwań co do ja-



Rys.93: Pies trzymający kapeć
Źródło: <https://depositphotos.com>



Rys.94: Szkic ideowy: patyk, szpatuły, szczypce.

kości jego działania. Do realizacji założenia, zadania, czynności, można podejść ekstremalnie pragmatycznie. Coś jest zrobione, albo coś zrobione nie jest. Jednak w świecie ludzi ma też znaczenie jak to zostanie zrobione, wykonane, w jakiej jakości, w jakim stylu lub z jakim doświadczeniem użytkownika.

- Dok, twierdzi pan, że zrobił pan z DeLoreana wehikuł czasu?
- Marthy, jak budować wehikuł czasu to z klasą.⁹

Okazało się, że patyk – szpatułka może być użyty do wykonania wielu zakładanych czynności. W ujęciu binarnym, działanie to jest nieporadne i nieeleganckie. Na przykład – otwieranie drzwi. Nacisk na klamkę patykiem powoduje, że klamka ulega przesunięciu, jednak utrzymanie patyka na klamce staje się trudniejsze, im mocniej jest ona naciskana. W końcu drzwi się otwierają, patyk ześlizguje się w dół z mocnym szarpnięciem,



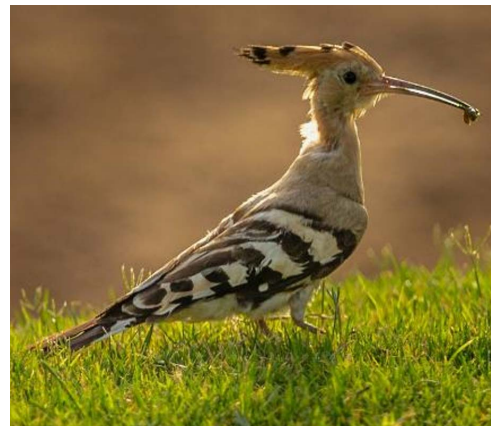
Rys.95: Kot otwiera sobie drzwi
Źródło: <https://depositphotos.com>

a uwolniona klamka wraca do swego normalnego położenia z prędkością błyskawicy i hałasem. Drzwi są otwarte – zadanie zostało wykonane. Następnie patyk wsuwany jest w szczelinę i drzwi są odchylane. Kolejnym krokiem jest zamknięcie drzwi. To zadanie okazuje się trudniejsze, gdyż nie można jednocześnie utrzymać wciśniętej klamki i dociągnąć nią drzwi. Pozostaje podłożyć patyk pod klamkę i mocno pociągnąć. Drzwi zamykają się – znów w złym stylu, tym razem odczuwany jest ból nadgarstka. Zaskakujące jest, że taka prosta czynność wymagała tak dużej siły. Eksperyment kontynuowany jest poprzez korzystanie z patyka do innych czynności,

takich jak korzystanie z klatki schodowej, jazda windą, sprawdzanie szaf, szuflad, lodówki, włączanie i wyłączanie światła oraz sterowanie baterią zlewozmywakową. Okazuje się, że narzędzie będące kawałkiem listewki jest zaskakująco skuteczne. Należy jednak odpowiednio ustawiać patyk ręką i używać zauważalnie większej siły niż zwykle, ponieważ patyk działa na rękę jak dźwignia. Podsumowując, taka szpatuła działa nadspodziewanie dobrze, mimo że jej działanie jest zero-jedynkowe i generuje sporo hałasu. Pozostawia także ślady na meblach i samą się niszczy. Może być używana do przesuwania przedmiotów, ale nie do ich podnoszenia. Kolejnym krokiem jest usprawnienie narzędzia



Rys.96: Pałeczki do ryżu,
Źródło: <https://www.youtube.com/@nozecznywidecem7373>



Rys.97: Dudek, autor: Mohammed Suhail
Źródło: <https://www.pexels.com>

poprzez dodanie drugiej szpatuły. Oto sposób, w jaki otrzymano dosyć szerokie pałeczki do ryżu. Szczypce do krochmalu, szczypce do spaghetti, pęseta, a także dziobki ptaków, czy podługowata szczeka psa. Dwa elementy umocowane na jednym końcu zawiasem, pozwalającym na ich obracanie względem siebie. Rozwiązanie okazało się

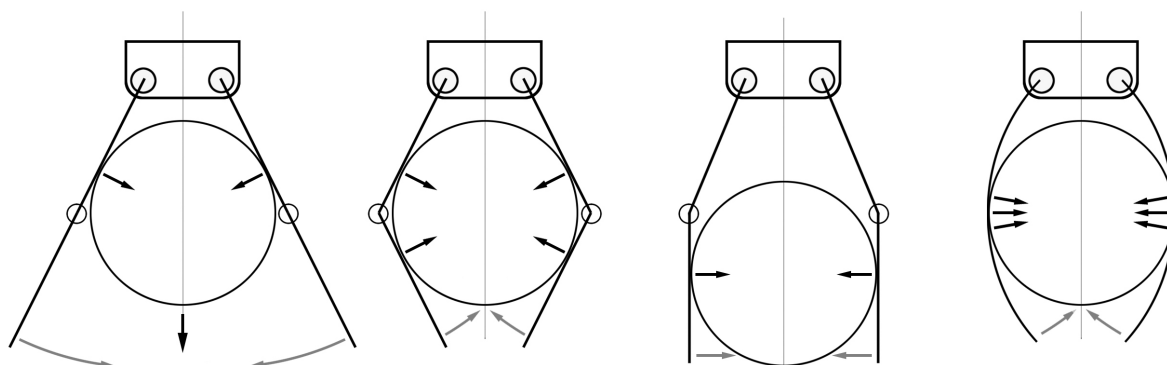
skuteczne, więc nic dziwnego, że w wielu przypadkach natura na tym etapie zakończyła proces projektowy i skupiła się na dopracowywaniu detali. Po umocowaniu dwóch patyków razem i powtórzeniu eksperymentu, otwieranie drzwi stało się dużo łatwiejsze, choć wciąż nie idealne, a zamykanie również było prostsze. Problemem stało się jednak niewystarczające tarcie między szpatułami a klamką drzwi. Bez trudu można było teraz podnosić plastikowe butelki z wodą, szczególnie te z przewężeniem poprawiającym chwyt. Udało się również wyjąć drobiazgi z szuflady i odłożyć je z powrotem na miejsce.

Na tym etapie uzyskane efekty były bardzo zadowalające, jednak eksperyment ujawnił nowy problem – trudność w precyzyjnym doborze siły potrzebnej do chwytania i utrzymania obiektu między patykami. Największe trudności wystąpiły z przedmiotami takimi jak: szklanka – obawa przed wypuszczeniem i stłuczeniem lub przed zgnieceniem jej; otwarta plastikowa butelka z wodą – zgniatanie butelki i wylewanie wody, co prowadziło do jej odkształcania i niestabilności; telefon komórkowy na stole – obawa przed upuszczeniem, gdyż przy zbyt dużym ściskaniu telefon wyskakiwał z uchwytu i przemieszczał się w przypadkowym kierunku. Nawet widząc, jak telefon zaczyna się wysuwać i próbując zwiększyć ścisk, nie udawało się go zatrzymać. Użycie okładziny z taśmy izolacyjnej nieco pomogło. Telefon i butelka z wodą zachowywały się niemal identycznie jak na filmach z użyciem skomplikowanego chwytaka.

Eksperyment potwierdził zatem znaczenie precyzyjnego chwytania przedmiotów. Problematyczne jest właściwe dobranie siły ściskania obiektu, co jest powszechnym problemem w robotyce. Mechanika nie posiada zmysłów, więc podejmuje się różne próby radzenia sobie z tym problemem, od stosowania okładzin z materiałów o dużej adhezji, po rozwiązania sztucznej skóry wyposażonej w czujniki nacisku, które działają w sprzężeniu zwrotnym z napędami na podstawie zaprogramowanych algorytmów. Użytkownik robotycznego ramienia asystującego, który nie posiada „wyczucia” siły chwytania, ma ten sam problem. W jego przypadku utrudnieniem jest brak możliwości odbierania tej siły zmysłem dotyku i reagowania na nią. Informacja zwrotna dociera do użytkownika jedynie przez zmysł wzroku oraz słuchu.

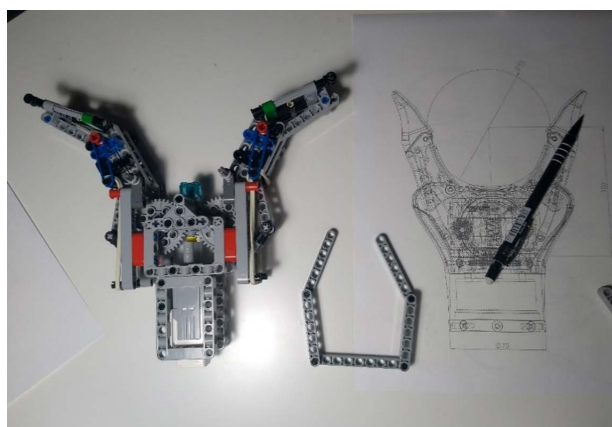
Jako że użyto jedynie dwóch przypadkowych kawałków drewna, a większość założeń dla chwytaka udało się zrealizować, zdecydowano się kontynuować tę drogę i sprawdzić, dokąd zaprowadzi. Początkowo rozwiązanie wydawało się zbyt proste, by nie określić go jako „prostackie”. Po głębszym przemyśleniu zmieniono zdanie, ponieważ uwzględnienie potrzeby użycia zawiasu, napędu do zamykania i otwierania szczypiec, dodania odpowiednich okładzin, umocowania do ramienia oraz zabezpieczenia mechanizmu przed wodą ujawniło, że na etapie eksperymentu myślowego powstał średnio złożony mechanizm.

W kolejnym kroku skupiono się na zbieraniu pomysłów dotyczących sposobów chwytania butelki z wodą lub kubka. Chwytanie za uszko odrzucono jako zbyt trudne i kłopotliwe. Skoncentrowano się na metodzie objęcia chwytakiem średnicy obiektu. Największą powierzchnię styku z przedmiotem zapewniłby chwytak w rodzaju FESTO. W odniesieniu do niego, testowany wcześniej dwuramienny chwytak należy umieścić na przeciwległym końcu skali. Daje on tylko dwa punkty lub linie styku z przedmiotem. W przypadku większych obiektów układ ten powoduje wypychanie przedmiotu z uchwytu siłą wypadkową, będącą sumą sił zaciskających. Wielkość tej siły wypadkowej jest wprost proporcjonalna do stosunku średnicy chwytanego obiektu do długości ramion chwytaka. Im mniejsza średnica i dłuższe ramiona, tym mniejsza siła wypadkowa. Powszechnie stosowanym sposobem chwytania jest łapanie obiektu pomiędzy dwie równoległe szczęki, pod warunkiem że obiekt jest symetryczny. Jeśli nie jest, zostanie przemieszczony podczas ściskania do punktu uzyskania równowagi sił wypadkowych. Rozwiązanie, które zostało wybrane do kontynuacji projektu, dzieli ramiona chwytaka na



Rys.98: Chwytnak - ideowy szkic rozmieszczenia punktów styku z obiektem i kierunków działających sił.

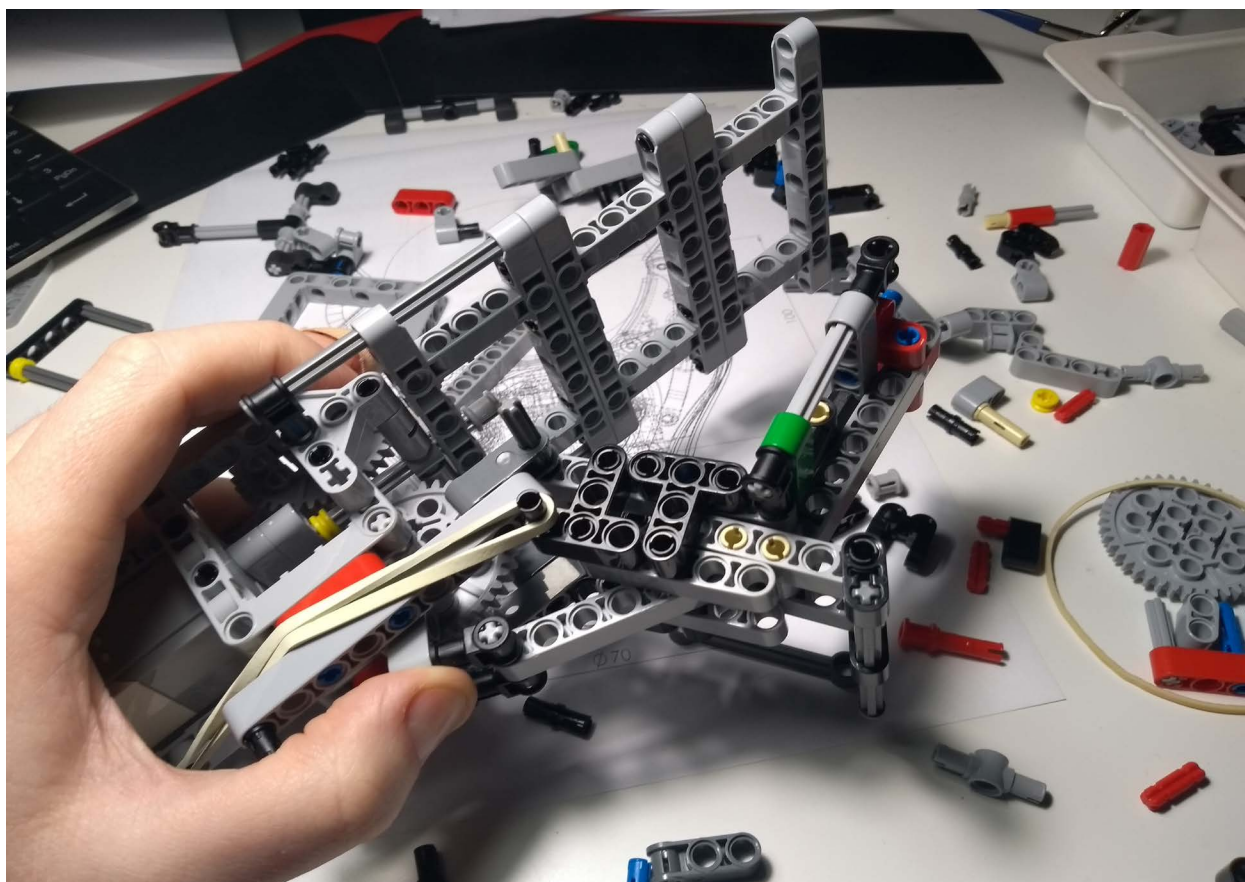
dwie części, co pozwala na uzyskanie czterech punktów styku z przedmiotem, a siły wypadkowe każdej pary punktów styku się równoważą. Obiekt jest utrzymywany w jednej osi dzięki tarciu powierzchniowemu oraz w pozostałych osiach dzięki kolizji z częściami chwytaka. To rozwiązanie przypomina zastosowane wcześniej w chwytakach Bateo i Jaco palce o dwóch palczkach. Jednakże, zamiast palców, planowane jest użycie dużych powierzchni chwytających. Konieczne było rozważenie, czy taka konstrukcja, zbudowana z dużych powierzchni chwytających, pozwoli na precyzyjne chwytanie małych i płaskich przedmiotów. Okazało się, że konstrukcja kinematyczna pozostaje identyczna, a poprawia się parametr precyzji chwytu. W porównaniu do chwytaka palcowego, większe pole powierzchni chwytających umożliwi lepsze ustawienie względem chwytanego przedmiotu. Mimo że może to wpływać na widoczność (większe powierzchnie mogą zasłaniać obiekt), to zwiększony obszar chwytu rekompensuje ten problem, umożliwiając skuteczne chwytanie małych przedmiotów bez potrzeby precyzyjnego chwytaka. Precyzyjny chwytak o wąskich palcach byłby konieczny jedynie, gdyby wymagana była precyzyjna manipulacja chwyconym obiektem, czego jednak nie przewiduje specyfikacja ani założenia projektu. Aby fizycznie zweryfikować poprawność wypracowanej koncepcji, zdecydowano się na użycie edukacyjnego zestawu klocków LEGO Mindstorms. To pragmatyczne podejście, które umożliwia tworzenie wielu szybkich koncepcji i bieżące ich testowanie na działających konstrukcjach z klocków. Wykorzystanie LEGO pozwala na uniknięcie marnowania materiałów i produkowania odpadów, a także na oszczędność energii elektrycznej, gdyż nie są potrzebne elektronarzędzia. Obejmuje to również brak konieczności stosowania klejów, lakierów, szpachli, taśmy klejącej, śrubek i innych akcesoriów montażowych.



Rys.99: Funkcjonalny referencyjny model LEGO chwytaka zbudowany na podstawie oryginalnej konstrukcji ACCREA.

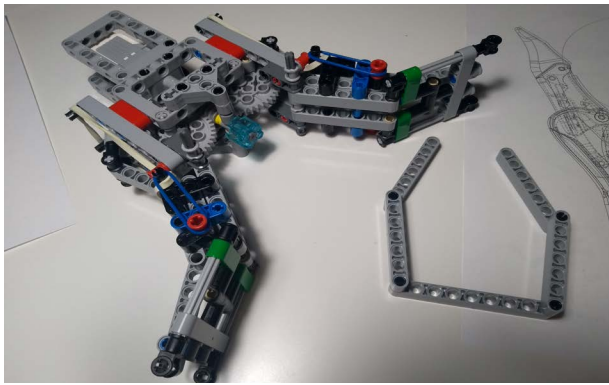
Koszt tego etapu ogranicza się jedynie do zakupu samego zestawu, który został nabyty wcześniej. Korzyści obejmują również zaoszczędzony czas dzięki używaniu gotowych części, które są idealnie dopasowane i nie wymagają specjalnych narzędzi do montażu i demontażu - wystarczą ręce. Możliwość bieżącego testowania działania napędu elektrycznego tworzonych konstrukcji, a także wykorzystanie mikrokomputera LEGO i aplikacji do programowania graficznego z użyciem tzw. nodów, pozwala na szybkie sprawdzanie poprawności

algorytmów na działających mechanizmach. Takie podejście minimalizuje straty czasu, materiału i energii, umożliwiając testowanie niezliczonej ilości wariantów prototypów. Rozpoczęto od zbudowania kinematycznego odpowiednika chwytaka ACCREA z klocków LEGO. Starano się zachować zbliżone proporcje i wymiary paliczków, aby sprawdzić działanie konstrukcji i odnieść je do rzeczywistego chwytaka. Celem było uzyskanie punktu referencyjnego dla kosztów kolejnych konstrukcji. Powstał działający model referencyjny z napędem, sterowany przyciskiem na przewodzie. Wymiary oraz zakresy ruchów palców były zbliżone do oryginału, a działanie porównywalne. Model różnił się jedynie liczbą palców (dwa zamiast trzech) oraz mniejszym udźwigiem, jednak spełniał swoją funkcję wystarczająco dobrze, aby uznać go za punkt referencyjny dla przyszłych konstrukcji. Poniżej zamieszczono serię zdjęć z prac nad konstrukcją mechanizmu chwytaka. Głównym celem było uzyskanie układu kinematycznego umożliwiającego pewne



Rys.100: Budowa modelu referencyjnego, odtwarzanie kinematyki chwytaka ACCREA.

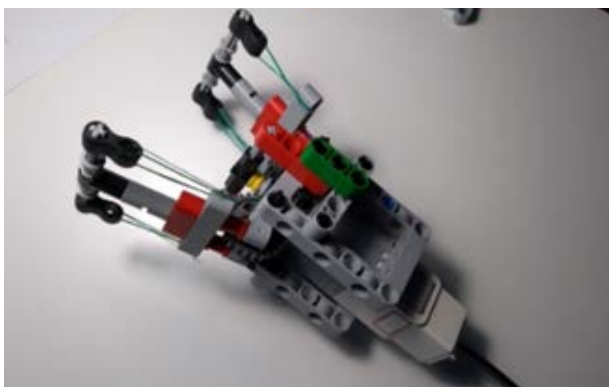
chwytanie zarówno dużych, jak i małych obiektów. Zauważono różnicę między chwytaniem końcami szczęk a obejmowaniem obiektu całymi szczękami. Pojawił się pomysł, aby zewnętrzne części chwytaka były wychylne i w momencie chwytania małego obiektu układały się na nim jak szczypce. Tym sposobem otrzymano koncepcję złożoną z trzech istotnych cech. Szerokie płaszczyzny chwytające, które dają dużą powierzchnię styku z przedmiotem, dwuczęściowe ramiona chwytające, które obejmują większe przedmioty oraz wychylne zewnętrzne części, mogące działać jak szczypce na małych obiektach. Model chwytaka z wychylnymi, sprężysto zamontowanymi częściami chwytającymi okazał się skuteczny. Gumowe elementy na końcach odpowiadają za prawidłowy chwyt przedmiotów. Początkowo skala modelu oraz dobór klocków były niewystarczająco sztywne, co prowadziło do znacznego uginania się końców przy napotykananiu przedmiotu i dalszym dociskaniu przez napęd. Ostatecznie efekt okazał się lepszy niż zakła-



Rys.101: Referencyjny model kinematyczny



Rys.102: Przebudowa modelu.



Rys.103: Model chwytaka z wychylnymi osiowo szczypcami

dano. Uginające się części akumulują siłę napędu, co oznacza, że cała siła ścisku nie jest przekazywana na przedmiot na sztywno. Proces zaciskania takiej konstrukcji na przedmiocie różni się od omawianych wcześniej chwytaków i trwa odczuwalnie dłużej, przebiegając w kilku fazach:

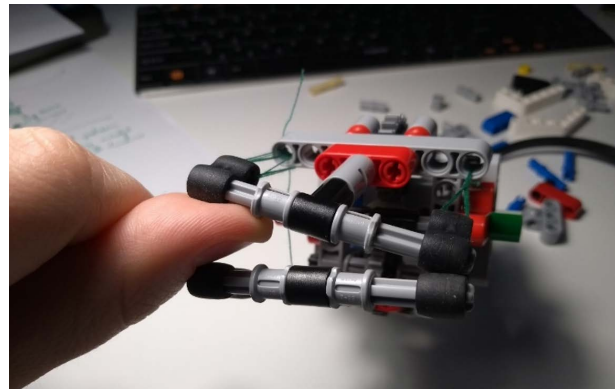
1. Ruch szczęk w kierunku obiektu.
2. Faza, gdy szczęki napotykały obiekt i zaczynają się odkształcać poprzez obrót na osiach, podczas gdy napęd nadal zbliża je do siebie.
3. Moment, gdy szczęki zetkną się w przeciwnym punkcie do obiektu, lecz zaciskanie szczęk trwa nadal, a ich deformacja postępuje wolniej.

W drugiej fazie na obiekt działa siła ściskająca o charakterze sprężystym. Dzięki temu możliwe jest delikatne chwytanie lekkich, miękkich lub łatwo deformowanych przedmiotów. To dodatkowa pozytywna cecha tego rozwiązania. Jednym z założeń jest sygnalizacja kontaktu chwytaka z obiektem oraz informacja o sile zacisku. Takie zachowanie chwytaka, gdzie widoczna jest stopniowa narastająca siła poprzez deformację chwytaka, może pełnić funkcję informacyjną. Możliwość obserwacji powolnego narastania siły pozwala dostrzec, zanim wysokie wartości sił spowodują deformację przedmiotu. Możliwość wychylania się dźwigni i samodzielnego, sprężystego dostosowywania do kształtu obiektu znacznie poprawiła pewność chwytu i zredukowała potrzebę precyzyjnego ustawienia chwytaka względem przedmiotu. Rozwiązanie to zostało zaimplementowane w projekcie finalnym. Następnie rozwinięto tę koncepcję do wersji z dwoma palcami o dwóch palczkach. Szczypce osadzone na krótkich sprężystych tulejach, jednak taki układ nie działał poprawnie z powodu zbyt swobodnych odkształceń w różnych kierunkach. Chwytanie dużych obiektów prowadzi do zaciskania palców i zwiększenia powierzchni kontaktu z obiektem. Obiekt utrzymywany jest dzięki tarciu powierzchniowemu oraz kolizjom mechanicznym z palcami. Może być wysunięty tylko w kierunku równoległym do osi obrotu szczęk.

Zasada działania jest taka sama jak w modelu BATEO. Osadzenie osi obrotu szczęk w pewnej odległości od siebie sprawia, że chwytanie średnich obiektów nie aktywuje zaciskania palców. Przedmiot jest przesuwany do trójkątnego obszaru pomiędzy szczękami lub utrzymywany jest jedynie dzięki tarciu powierzchniowemu pomiędzy zewnętrznymi szczękami. Utrzymanie ciężkich przedmiotów wymagałoby bardzo dużych sił zaciskających szczęki.

Ułożenie chwytaka przed chwytem względem średniego obiektu cylindrycznego (np. dyspensera mydła) pokazuje, że obiekt znajduje się pomiędzy wewnętrznymi paliczkami. Trudno jednoznacznie określić, w którym miejscu musiałby się znaleźć, aby być chwycony wyłącznie przez paliczki zewnętrzne. Zbyt duże wychylenie wewnętrznych paliczków może wprowadzać w błąd. Na tym modelu widać, że są one bardziej skierowane na zewnątrz, podobnie jak w modelach JACO i BATEO. Jednak zewnętrzny kształt palców może sugerować, że są one wyprostowane.

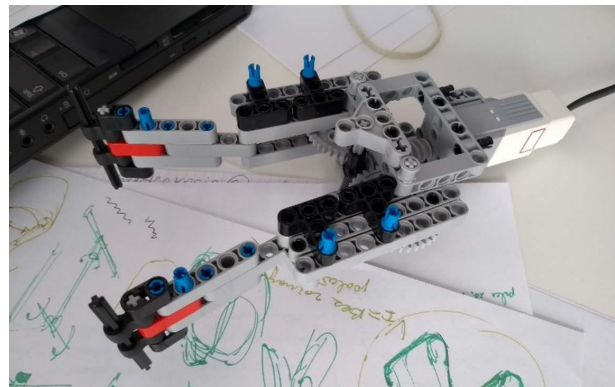
Chwył działa prawidłowo: wewnętrzne paliczki, po napotkaniu obiektu, przekazują napęd do zaciśnięcia paliczków zewnętrznych wokół obiektu. Obiekt nie może wysunąć się w kierunku przednim. Chwył może przesuwać się po powierzchni obiektu z powodu braku wystarczającego tarcia do unieruchomienia go w uścisku. Konieczne może być zastosowanie materiałów o większym tarciu powierzchniowym lub bardziej sprężystych. Następnie ograniczono możliwości wychylenia zewnętrznych paliczków w celu uzyskania wyprostowanych palców. Taka geometria znacząco ułatwiła wzrokową ocenę obszaru zamknięcia chwytaka. Wewnętrzne powierzchnie szczęk są teraz w jednej linii, w przeciwieństwie do poprzedniej wersji. Nadal szczęki-paliczki zewnętrzne zamykają się po napotkaniu oporu przez paliczki wewnętrzne, co wpływa na działanie całego mechanizmu. Choć łatwiej jest chwycić przedmiot końcami palców, trudniej jest go utrzymać z powodu mniejszych powierzchni styku. Zamykanie chwytaka działa prawidłowo-



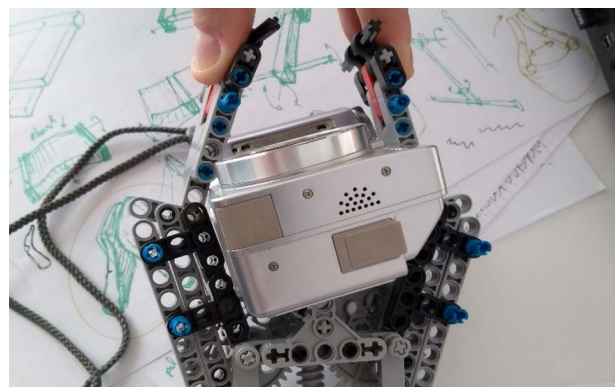
Rys.104: Działanie wychylnych osiowo dźwigni-szczypców



Rys.105: Działanie wychylnych osiowo dźwigni-szczypców



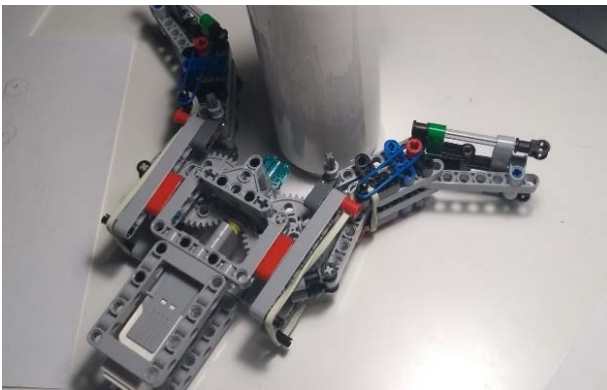
Rys.106: Nowy model z dwu-segmentowymi palcami.



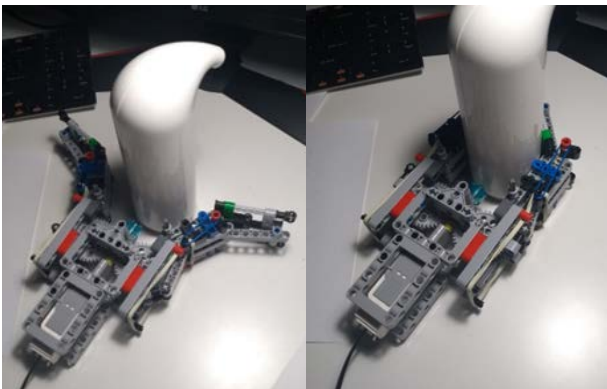
Rys.107: Zaciskanie palców na obiekcie.



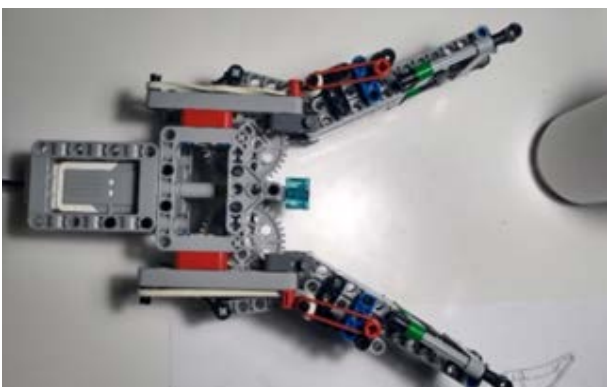
Rys.108: Model referencyjny zamknięty.



Rys.109: Relacja palców chwytaka do obiektu.



Rys.110: Zamykanie palców na obiekcie.



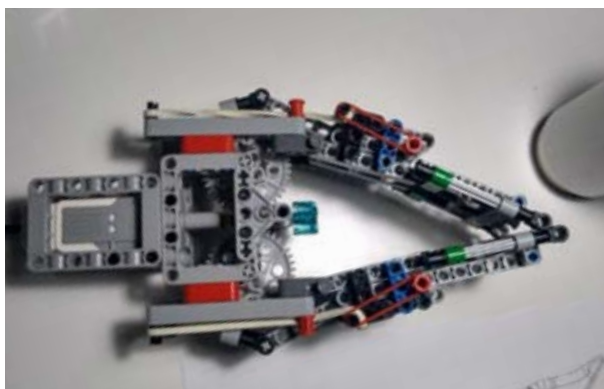
Rys.111: Modyfikacja - ograniczenie wychYLENIA palców.

wo. Wewnętrzne paliczki, po napotkaniu obiektu, przekazują pozostałą siłę napędu do zaciśnięcia paliczków zewnętrznych wokół obiektu. Pierwotna konstrukcja zakładała, że paliczki u nasady są od siebie oddalone, aby ograniczyć ich rozwarście przy chwytaniu dużych obiektów. Konsekwencją tego rozwiązania jest utworzenie trójkątnego obszaru wewnątrz zamkniętego chwytaka. Obecnie obszar ten znacznie się powiększył, co sprawia, że niemożliwe jest stabilne utrzymanie obiektu znajdującego się w tym obszarze. Chwycony obiekt będzie trzymany niestabilnie, przesunie się do tyłu i wypadnie. Aby skutecznie utrzymać obiekt, siła tarcia pomiędzy paliczkami a obiektem musiałaby być bardzo duża. W celu eliminacji tego problemu konieczne będzie zmniejszenie odległości pomiędzy osiami szczęk wewnętrznych, co wymaga opracowania nowego sposobu napędu szczęk i paliczków.

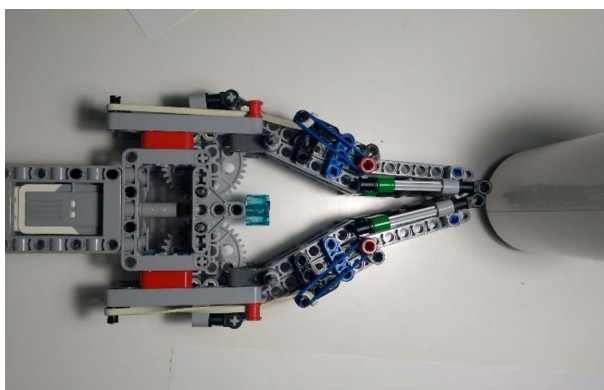
Na zdjęciu 113 widać pewne niedoskonałości kątów chwytu, wynikające z luzów między klockami. Stan ten przedstawiony jest w chwili maksymalnego zamknięcia chwytaka. Po lewej stronie, podczas zamknięcia, siła chwytu skoncentrowana jest pomiędzy końcami paliczków zewnętrznych. Taki chwyt wymaga dużej precyzji i siły, aby obiekt się nie wysunął, co może łatwo prowadzić do uszkodzenia delikatnych przedmiotów. Po odrzuceniu tego mechanizmu skoncentrowano się na poszukiwaniu właściwej geometrii szczęk chwytaka, odkładając na razie na bok kwestie związane z konstrukcją napędów. Pojawiła się koncepcja mechaniczna zakładająca, że wszystkie paliczki będą wychylne osiowo, co pozwoli na lepsze dopasowanie do kształtu obiektów (rys. 114). Układ ten obejmuje dwie pary paliczków oraz gumowe elementy, które nadają konstrukcji sprężystość. Na rysunku widać, jak paliczki zewnętrzne zaciśnięte są na obiekcie, tworząc punkt podparcia na przeciwległych końcach. Przeprowadzono próby chwytania zarówno mniejszych, jak i większych płaskich obiektów. Wyniki wykazały, że chwytanie mniejszych obiektów przebiega

bez problemów. Problem pojawił się podczas chwytania dużych, niskich obiektów, takich jak prostokątny klocek przedstawiony na dole zdjęcia 114. Końce paliczków, choć zamontowane sprężysto na gumkach, nie mają ograniczenia obrotu i mogą ustawić się niemal równoległe do siebie pod kątem 90 stopni od położenia widocznego na zdjęciu. Uniemożliwia to skuteczne chwytanie dużych obiektów. Pozytywnym zaskoczeniem okazało się działanie wychylnych szczęk, jak przedstawiono na zdjęciu powyżej, gdzie dopasowały się one do rozszerzającego się ku górze przekroju szklanki. W rezultacie znacząco poprawiła się stabilność chwytu w porównaniu do szczęk, które kontaktowały się tylko z górną krawędzią na obwodzie szklanki. Próba chwycenia walca ujawniła, że wychylne paliczki nie zapewniają wystarczająco stabilnego chwytu, ponieważ możliwy jest obrót trzymanego walca wzdłuż osi chwytaka. Podczas prób przenoszenia walca stwierdzono, że może on dość swobodnie wychylać się na boki. Wnioskuje się, że zbyt wiele punktów swobody, które poprawiają dopasowanie do obiektu, jednocześnie uniemożliwiają jego skuteczne przeniesienie. Kolejnym krokiem była weryfikacja pomysłu przeniesienia mechaniki ludzkiego palca, aby sprawdzić, czy ten mechanizm może sprawdzić się lepiej. W koncepcji użyto szarych klocków jako kości, gumki recepturki jako mięśni oraz czerwonej nitki jako ścięgna. Koncepcja została porzucona z powodu dużej komplikacji mechanicznej oraz potrzeby użycia znacznej siły jedynie do pokonania oporu gumek.

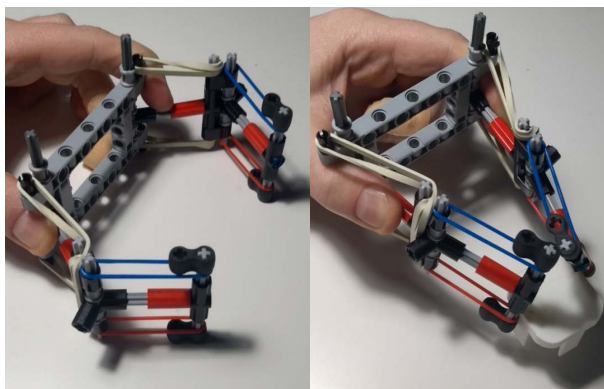
Następnie zbudowano model chwytaka dwupalczastego z dwoma różnymi mechanizmami palców jednocześnie (rys. 119). Decyzję tę podjęto, aby zaoszczędzić czas budowy oraz umożliwić jednoczesne prowadzenie testów porównawczych dwóch koncepcji. Model ten wyposażono w dwa mechanizmy umożliwiające samoistne zgięcie górnego paliczka po napotkaniu przeszkody przez paliczek dolny. Wariant lewy przemieszcza paliczek zewnętrzny równoległe do osi wzdłużnej chwytaka.



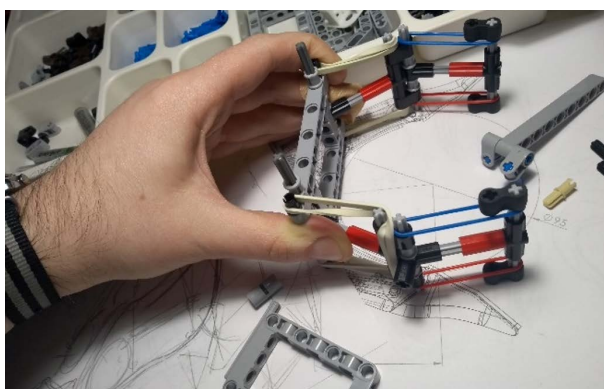
Rys.112: Zamknięty chwytak, widoczne pole wewnątrz.



Rys.113: Niedoskonałości wymiarowe modelu z LEGO.



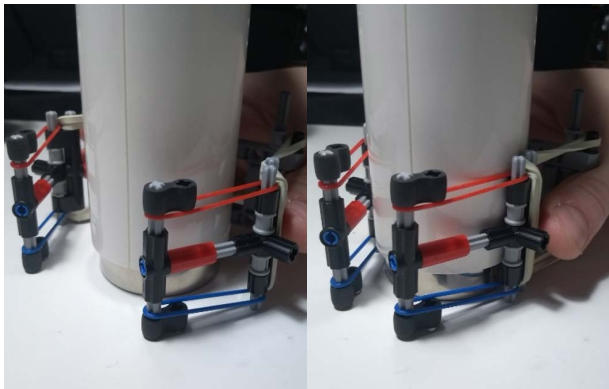
Rys.114: Model z czterema sprężystymi segmentami.



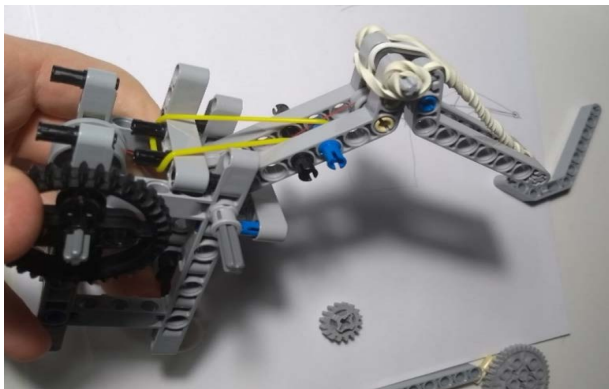
Rys.115: Model z czterema sprężystymi segmentami.



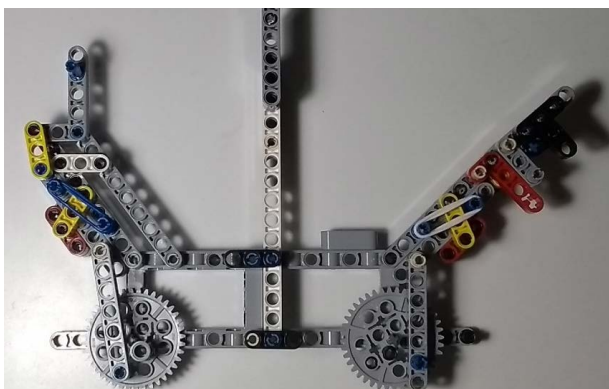
Rys.116: Test chwytania szklanki.



Rys.117: Test chwytania walca.



Rys.118: Koncepcja palca opartego na ścięgnach (gumki).



Rys.119: Model porównawczy, dwie różne konstrukcje palca.

Zapewnia to chwyt na całej powierzchni paliczka i w rezultacie zwiększa powierzchnię tarcia między paliczkiem a obiektem chwytanym.

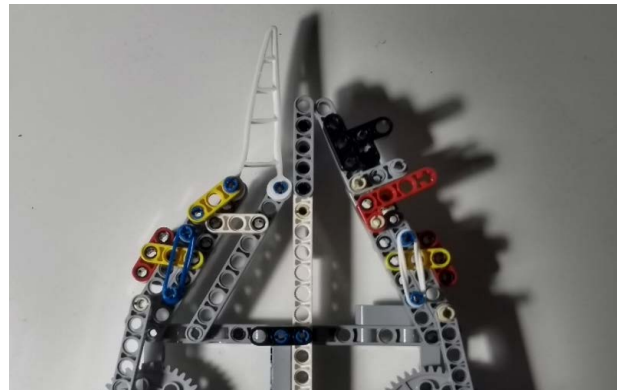
Na podstawie dotychczasowych doświadczeń wykonano także wariant chwytaka z wykorzystaniem rozwiązania FESTO jako zewnętrznego paliczka. Sprawdzone możliwości wykonania takiego chwytaka z jednego elementu. Kombinowany wariant, w którym górny paliczek został zaprojektowany w CAD i wydrukowany z miękkiego TPU, okazał się możliwy do realizacji. W produkcji można wykonać formę i odlać taki komponent z silikonu lub poliuretanu. Należało upewnić się, czy jest to optymalne rozwiązanie, zanim zainwestuje się znaczny czas w produkcję form i detali. Okazało się, że mechanizm działał bardzo dobrze w określonych proporcjach, zbliżonych do proporcji palca. Przeszła poprawnie, gdy wydrukowany został w wersji wyższej, przypominającej płetwę, co miało być bardziej odpowiednie.

Niewątpliwą zaletą tego rozwiązania jest maksymalizacja powierzchni styku z obiektem oraz utrzymywanie napięcia po zaciśnięciu. Chwytywanie małych detali wydawało się obiecujące, choć łatwo było wytrącić przedmiot. Przy chwytaniu dużych obiektów pojawił się problem związany z dotykaniem się końcami elastycznych paliczków, co osłabiało siłę chwytu. Próby wykazały, że taki kombinowany mechanizm nie działał zgodnie z założeniami. Występowanie wzajemnych kolizji przy chwytaniu niektórych obiektów oraz brak możliwości zwiększenia powierzchni spowodowały decyzję o przerwaniu dalszego rozwijania tej koncepcji.

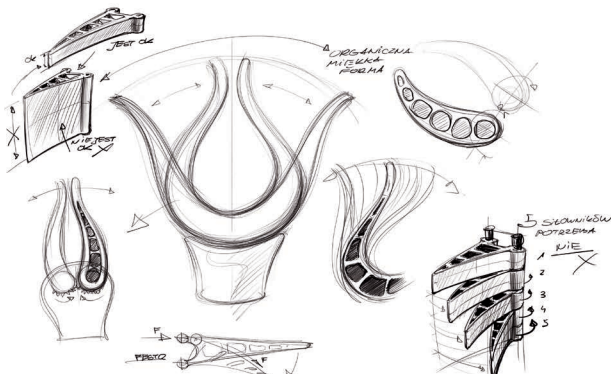
Choć dotychczas nie udało się wypracować konstrukcji, która w pełni spełniałaby założenia, przeprowadzone prace dostarczyły kilku cennych wniosków. Na ich podstawie można założyć, że nowe urządzenie chwytające powinno:

1. Składać się z czterech szczęk - paliczków.
2. Posiadać paliczki wewnętrzne z wspólną osią obrotu lub osiami położonymi blisko siebie.

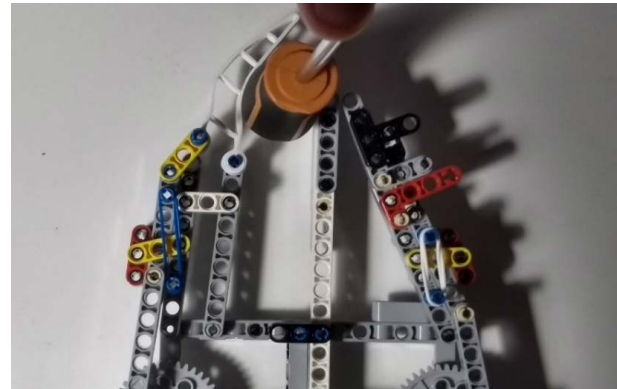
3. Zamykające się szczęki powinny nie pozostawiać wewnątrz wolnej przestrzeni.
4. Ruch paliczków zewnętrznych powinien być równoległy.
5. Paliczki zewnętrzne powinny zaciskać się na obiekcie w sposób analogiczny do palców w systemach BATEO i JACO.
6. Paliczki zewnętrzne powinny być zamontowane sprężysto i mieć możliwość wychylania.
7. Szczypce na palczkach zewnętrznych powinny mieć pewien margines sprężystości.



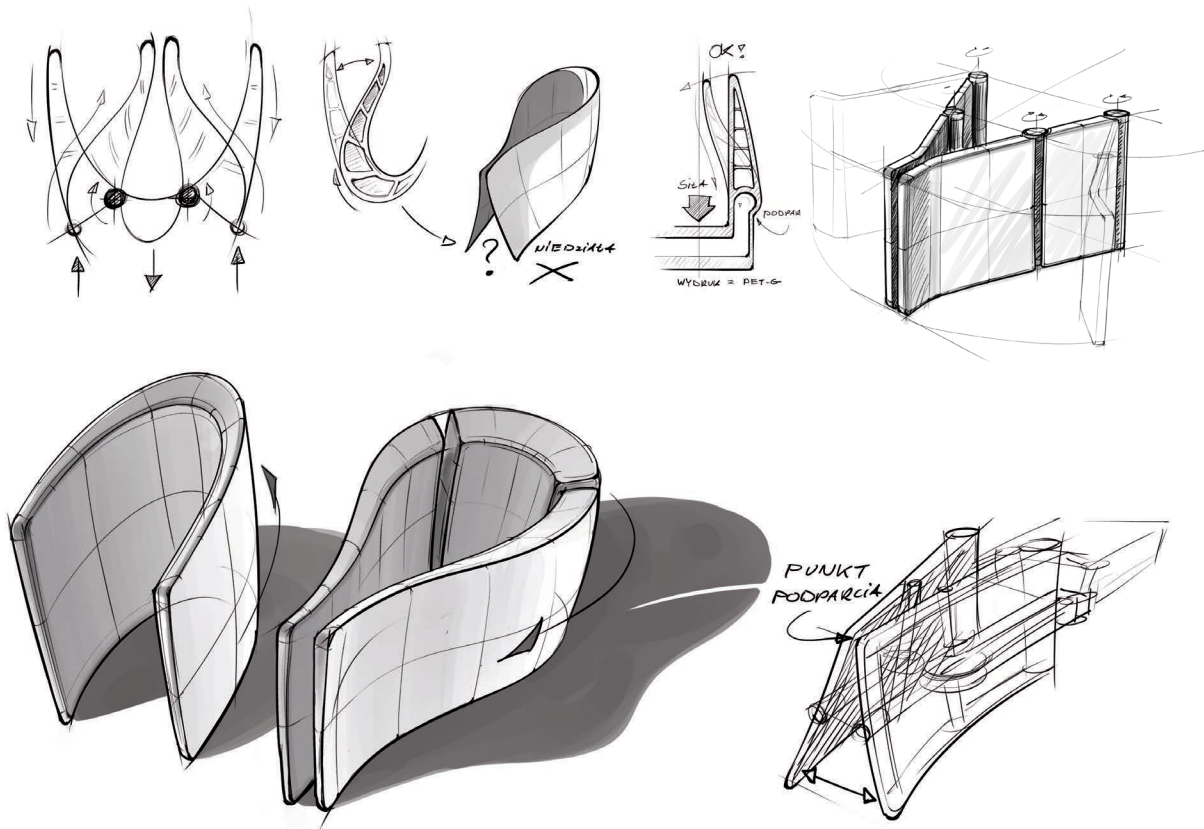
Rys.121: Model z palczkiem na wzór FESTO.



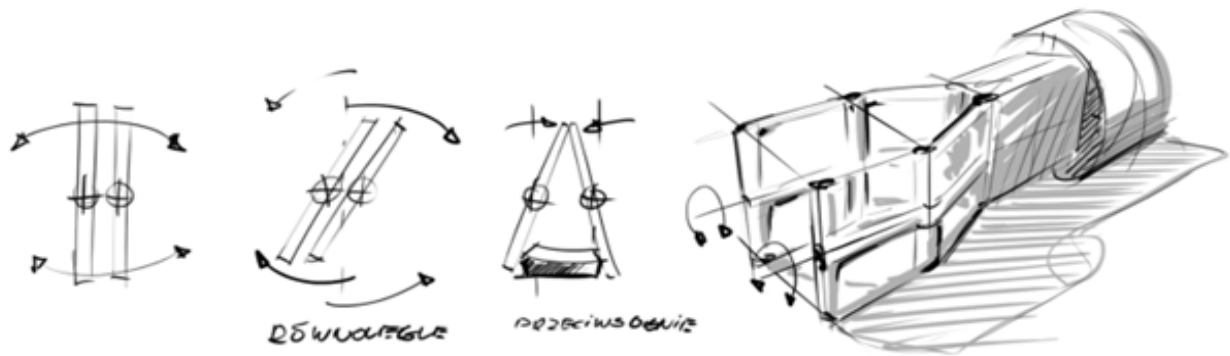
Rys.122: Szkice koncepcyjne.



Rys.123: Działanie modelu z częścią elastyczną.



Rys.120: Szkic koncepcyjny, pomysł rozwinięcia patentu FESTO.



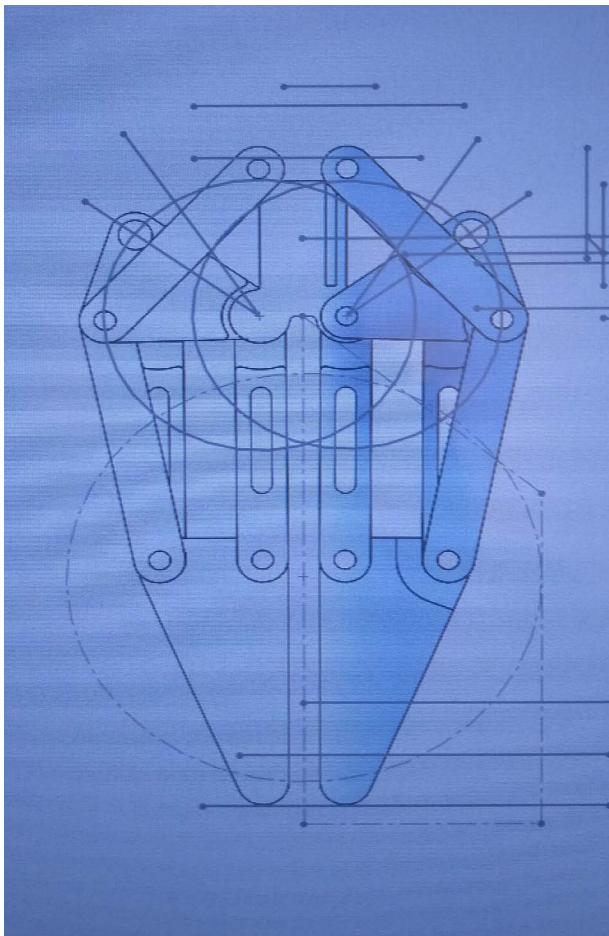
Rys.124: Ideowy szkic głównych cech konstrukcji nowego chwytaka.

Projekt szczegółowy chwytaka

Prace rozpoczęto od wykreślenia geometrii mechanizmu chwytaka, uwzględniając wymiary bazowe oraz zakresy ruchów. Następnie zbudowano prosty model bryłowy, który miał zostać zmontowany przy pomocy śrub pełniących rolę osi obrotu części. Po dopasowaniu wymiarów i szybkiej optymalizacji możliwe było wydrukowanie pierwszej działającej makiety. Do wydruku wykorzystano materiał PLA, a części zmontowano za pomocą ogólnodostępnych śrub metrycznych. Aby etap wczesnego prototypowania z druku 3D przebiegał jak najszybciej, przyjęto założenie, że początkowo prace będą prowadzone podobnie jak w przypadku LEGO, poprzez tworzenie własnych "klocków". Konstrukcję zaplanowano w taki sposób, aby każda część pełniła tylko jedną funkcję. Pozwalało to, w przypadku błędu lub uszkodzenia, szybko przeprojektować dany element,

wydrukować go ponownie i zamontować w prototypie. Stare części nie były wyrzucane od razu, na wypadek konieczności powrotu do wcześniejszej wersji konstrukcji. Podejście „jedna część – jedna funkcja” zaowocowało również zmniejszeniem zużycia materiału oraz skróceniem czasu drukowania.

Za pomocą oprogramowania SOLIDWORKS wykonano szereg symulacji ruchu, które następnie powtórzono na gotowym urządzeniu. Na tym etapie konieczne było wprowadzenie trzech istotnych zmian konstrukcyjnych. Ostatecznie powstał mechanizm chwytaka napędzany silnikiem oraz sterownikiem LEGO. Pierwszy prototyp mechanizmu chwytaka z napędem manualnym miał na celu sprawdzenie poprawności konstrukcji oraz działania zgodnie z oczekiwaniami. Na tym etapie zdecydowano się na pozostawienie podwójnych ramion tworzących pantografy, które poruszały zewnętrznymi policzkami. Zauważono jednak, że system popychaczy zajmuje zbyt dużo miejsca, co wymagało powrotu do środowiska CAD w celu zmniejszenia gabarytów całego zespołu. Po modyfikacji



Rys.125: Wstępny szkic geometrii nowego chwytaka w CAD.

konstrukcji rozpoczęto prace nad opracowaniem rozwiązania kompensującego ruch postępowy paliczków podczas zamykania chwytaka.

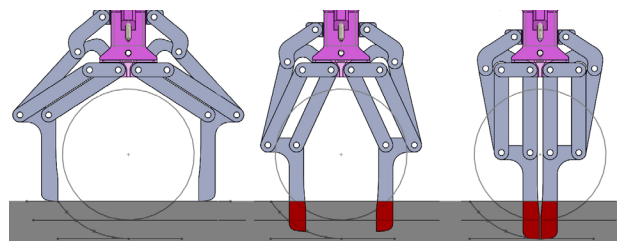
Symulacja działania mechanizmu w programie SolidWorks ilustruje sytuację, w której użytkownik zamyka chwytak nad blatem roboczym. Widać, jak zaznaczone na czerwono fragmenty, poruszając się po łuku, zagłębiają się poniżej powierzchni roboczej. Kolejnym zadaniem było przekształcenie ruchu po łuku końca paliczka w ruch po linii prostej.

Na kolejnym rysunku przedstawiono konstrukcję z dodanym mechanizmem kompensującym ruch postępowy palców. Oś napędowa, wyprowadzona z silnika, napędza zielononiebieskie koło oraz żółtą śrubę. W trakcie sześciu obrotów osi silnika następuje pełny proces otwarcia lub zamknięcia palców oraz przesunięcie całego zespołu do przodu lub do tyłu o odległość zaznaczoną na czerwono na poprzednim rysunku. Ilustracja w trzech krokach pokazuje, jak zastosowanie tego mechanizmu zmieniło działanie chwytaka. Jak można zauważyć, odległość silnika od blatu pozostaje stała, a końce paliczków zewnętrznych poruszają się po linii prostej, jednocześnie podnosząc punkt mocowania palców wraz z niebieskim bębniem przekładni.

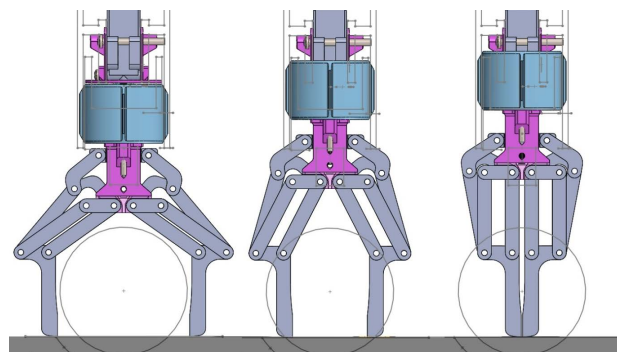
Po wydrukowaniu i zmontowaniu kolejnego prototypu zaplanowano przeprowadzenie testu mającego na celu potwierdzenie prawidłowego działania geometrii



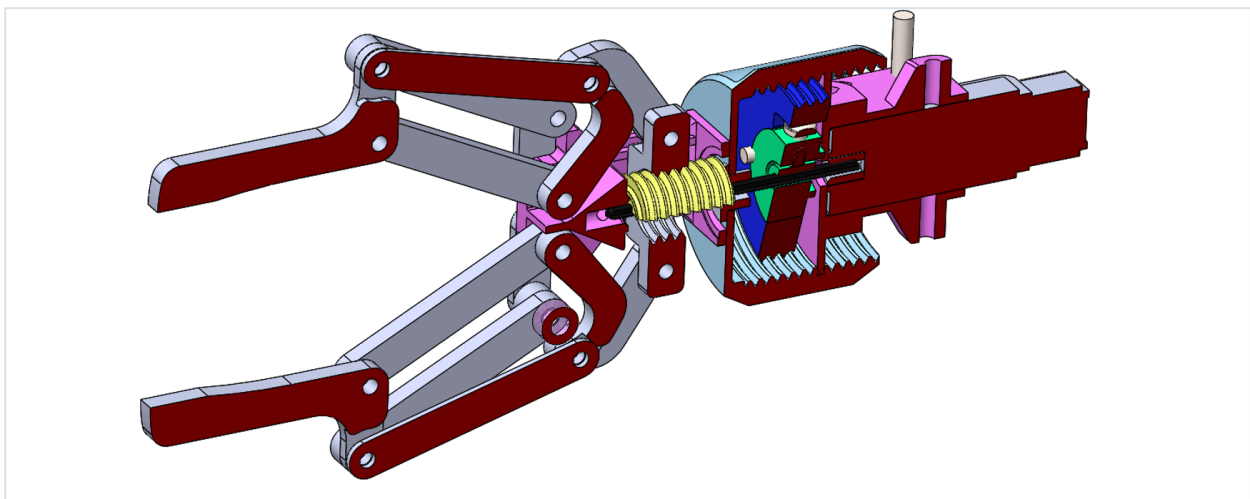
Rys.127: Wydrukowany uproszczony model palców.



Rys.128: Symulacja ruchu postępowego palców.



Rys.126: Symulacja z mechanizmem kompensującym.



Rys.129: Przekrój przez chwytak z mechanizmem kompensującym ruch postępowy palców.

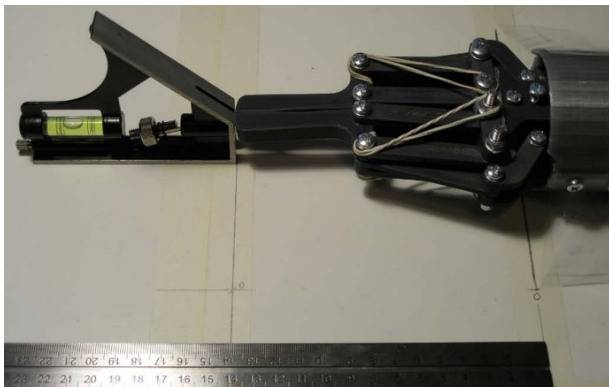
szczęk. W przypadku nieprawidłowego działania mechanizmu, wadliwe części będą usuwane i zastępowane poprawionymi.



Rys.130: Model przygotowany do badania.

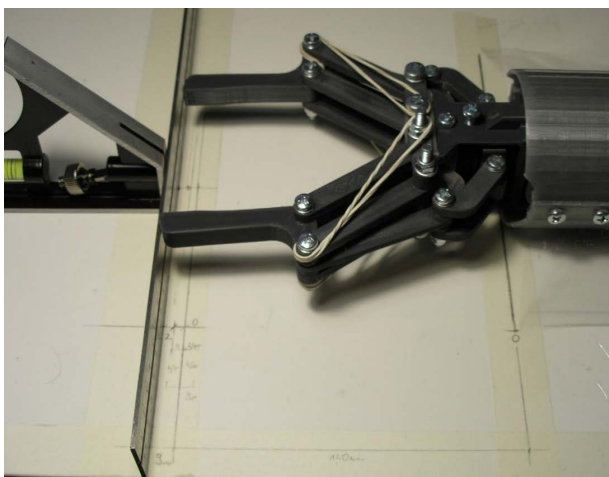
Badanie opracowanej koncepcji

Po wydrukowaniu niezbędnych elementów i ich zamontowaniu do części pochodzących z wcześniejszej konstrukcji przystąpiono do testowania opracowanego mechanizmu w warunkach rzeczywistych. Badanie zostało przeprowadzone w taki sposób, że chwytak został stabilnie przymocowany do blatu roboczego. Palce zostały zaciśnięte, a następnie



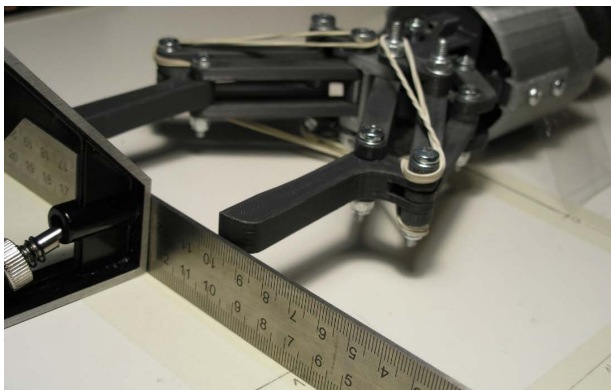
Rys.131: Ustalenie punktów referencyjnych.

zmierzone odległość pomiędzy obudową a końcami palców zewnętrznych. Równolegle do nich umieszczono metalową linijkę, pełniącą rolę powierzchni roboczej (blatu). W przypadku poprawnego wykonania mechanizmu, podczas rozchylania palców chwytaka, końcówki palców powinny przesuwac się wzdłuż powierzchni linijki. Położenie „0”. Pomiaru wykonywane pomiędzy linią pomiarową a linią przebiegającą przez końce palców chwytaka zaobserwowano różnice. Unieruchomienie modelu odpowiada rzeczywistej sytuacji, w której użytkownik ustawił chwytak w odpowiedniej odległości od blatu lub obiektu. Następnym krokiem jest uchwycenie obiektu. W tym momencie może dojść do kolizji z obiektem lub blatem, albo palce chwytaka zaciskają się nad chwytanym obiektem, co zmusza użytkownika do wykonania korekty położenia ramienia.



Rys.132: Mechanizm okazał się nieskuteczny.

Pomiar w pozycji „0” wykazał, że maksymalna odległość, na jaką została odepchnięta linijka, wynosiła 9 mm. Badanie przeprowadzono, obracając oś silnika sześć razy, każdy pełny obrót oznaczał odkładanie punktu położenia końcówki paliczka na żółtej ta-

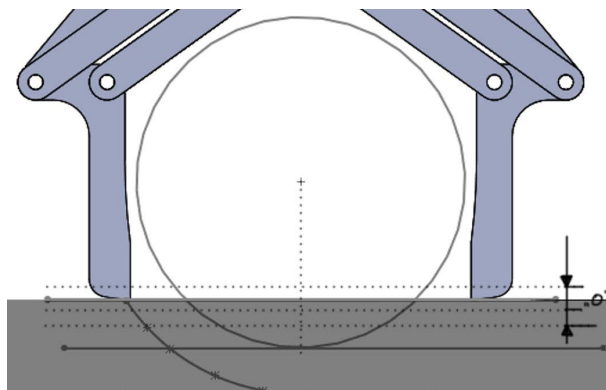


Rys.133: Inny kadr z badania ruchu palców chwytaka.



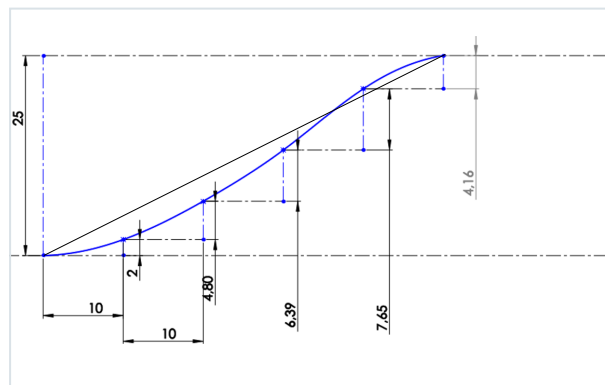
Rys.134: Widok od przodu chwytaka

śmie przyklejonej do blatu. Wynik badania mnie zaskoczył, ponieważ urządzenie zachowywało się nieco inaczej niż w symulacji komputerowej. Ruch postępowy palców został zredukowany, jednak tylko do około 9 mm z początkowych 26 mm. Jak można zauważyć na rysunku, oznaczone punkty znajdują się powyżej i poniżej poziomu „0” i są rozmieszczone niesymetrycznie. Oznacza to, że zaprojektowany mechanizm redukcyjny działa, ale nie w pełni efektywnie. Dodatkowo oscylacje końców chwytaka względem linii pomiarowej wskazują na bardziej złożony charakter tego zjawiska.



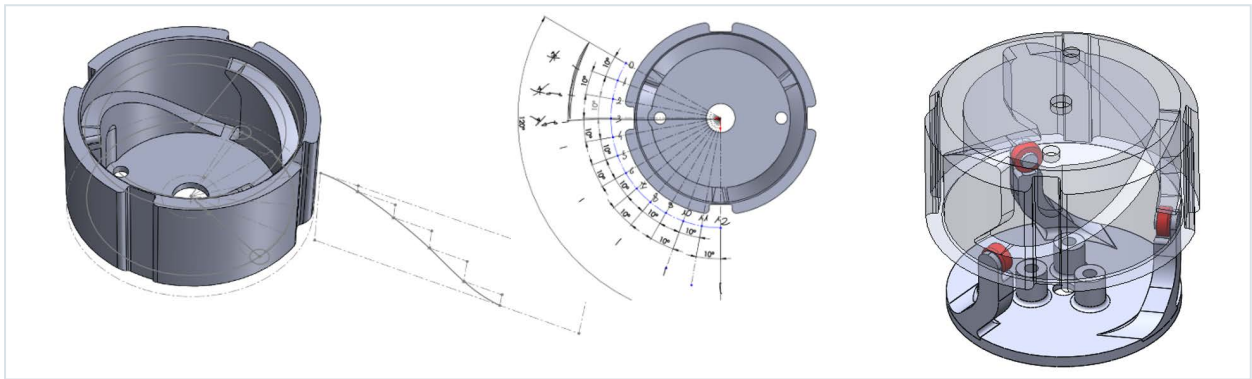
Rys.135: Rzeczywiste pomiary przeniesione do CAD

Pojawia się wątpliwość, czy moje kompetencje są wystarczające, aby osiągnąć zamierzony efekt. W związku z brakiem specjalistycznej wiedzy inżynierskiej postanowiono zastosować metodę inżynierii odwrotnej, która nie zagłębia się w istotę problemu, a skupia się na obserwacji widocznych rezultatów. Aby wykluczyć potencjalne błędy wynikające z nakładania się tolerancji wymiarowych oraz niedoskonałości montażowych, cały proces przeprowadzono w środowisku 3D. Wirtualnie zamocowano paliczki do linii, po której miały się poruszać. Usunięto wadliwą przekładnię, a następnie dodano tablicę, na której wyrysowano krzywą dynamiki zmiany położenia mechanizmu. W poprzednim mechanizmie miała to być linia prosta, jednak okazało się, że bardziej odpowiedni byłby kształt przypominający wycinek sinusoidy. Odcinek 25 mm stanowi zakres ruchu postępowego końcówki paliczka od położenia „0” do pełnego rozwarcia. Niebieska linia na wykresie, z naniesionymi punktami, ilustruje zmiany przemieszczenia końcówki paliczka w funkcji obrotów napędu, dokładnie w trakcie 6 obrotów osi napędowej. Teraz wystarczyło jedynie opracować mechanizm, który kompensowałby przemieszczenie paliczków zgodnie z przedstawionym wykresem. W tym celu pojawił się pomysł stworzenia odpowiedniego mechanizmu kompensacyjnego. Wyrysowaną krzywą owinięto na cylindrze i powielono trzykrotnie. Poprzez wytłoczenie do wnętrza cylindra utworzono trzy krzywki, po których będą poruszać się popychacze wyposażone w rolki. Mechanizm zaciskania palców zostanie przymocowany do cylindra. Popychacze



Rys.136: Rzeczywiste pomiary przeniesione do CAD

W tym celu pojawił się pomysł stworzenia odpowiedniego mechanizmu kompensacyjnego. Wyrysowaną krzywą owinięto na cylindrze i powielono trzykrotnie. Poprzez wytłoczenie do wnętrza cylindra utworzono trzy krzywki, po których będą poruszać się popychacze wyposażone w rolki. Mechanizm zaciskania palców zostanie przymocowany do cylindra. Popychacze



Rys.137: Koncepcja nowego mechanizmu kompensującego opartego na krzywkach.

będą podróżować po krzywkach cylindra, przemieszczając się w taki sposób, jak końce szczęk. Ruch w przeciwną stronę ma na celu zniwelowanie niechcianego ruchu postępowego końcówek paliczków, co zapewni ich poruszanie się po linii prostej. Ze względu na konieczność zachowania stabilności konstrukcji i symetrycznej pracy, zastosowano trzy krzywki i trzy popychacze. To jednak wprowadziło pewną komplikację. Pełny ruch zamknięcia/otwarcia chwytaka trwa 6 obrotów silnika, a niechciany ruch postępowy końcówek szczęk o 25 mm trwa tyle samo. Tymczasem przesunięcie popychaczy po krzywkach cylindra zajmuje 1/3 obrotu silnika. W związku z tym konieczne jest zastosowanie odpowiedniego rodzaju przekładni, aby zsynchronizować oba ruchy i umożliwić ich jednoczesną realizację.

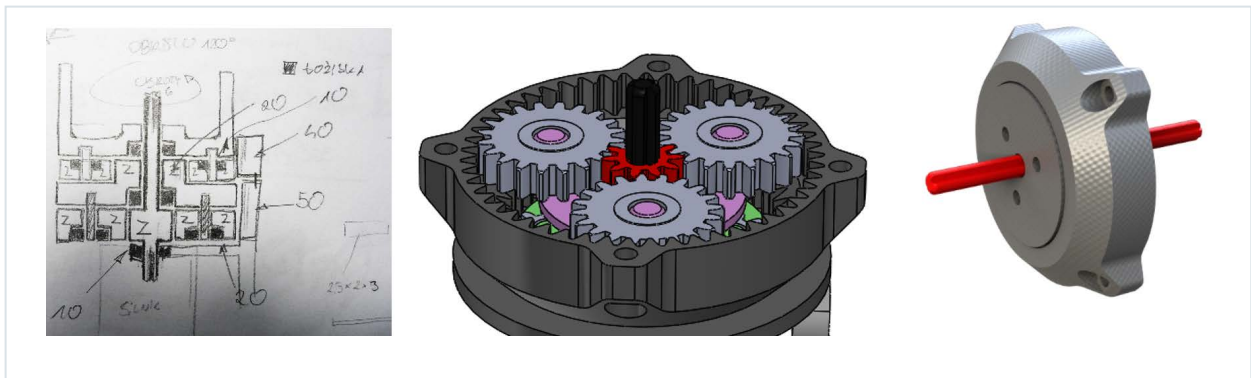
Wymagania

Sześć obrotów silnika przekłada się na 2160 stopni, podczas gdy wymagany ruch wynosi jedynie 120 stopni. Oznacza to, że konieczne jest zastosowanie przełożenia 18:1. Każdy pełny obrót silnika powoduje, że popychacz przesuwają się po okręgu o 1/18 obrotu. Ze względu na potrzebę zwartej budowy oraz uproszczenie konstrukcji zdecydowano o zastosowaniu w tym miejscu przekładni planetarnej. Niezastąpionym narzędziem podczas projektowania okazał się kreator kół zębatach w programie SOLIDWORKS.

Tak duże przełożenie wymusiło zastosowanie dwóch przekładni, ponieważ w technologii wykonania prototypu – przy użyciu druku FDM z materiału PLA i ograniczeniu średnicy chwytaka do 70 mm – uzyskanie wymaganego przełożenia okazało się niemożliwe.

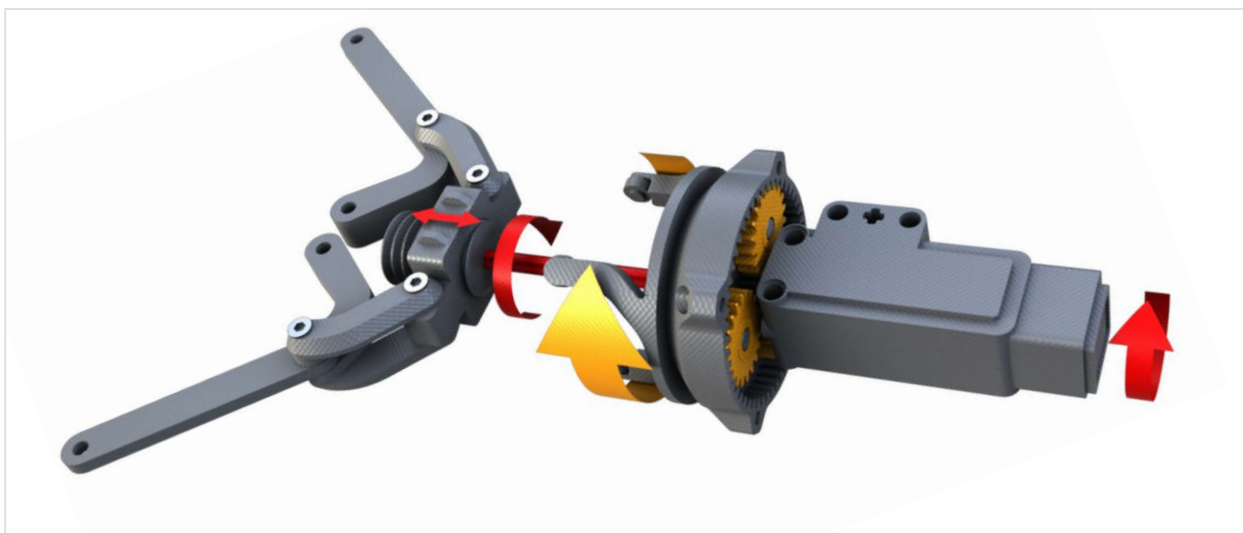
W związku z tym, pierwszy stopień przekładni zapewnia przełożenie 6:1, a drugi 3:1.

Całą konstrukcję udało się zamknąć w zwartej bryłę. Korona z popychaczami, zamontowana na górze przekładni, obraca się z odpowiednio zredukowaną prędkością. Przez



Rys.138: Koncepcja i instrukcja dwustopniowej przekładni planetarnej z wałkiem przelotowym.

przekładnię planetarną oraz cylinder z krzywkami przebiega bezpośrednia oś napędowa pochodząca od silnika, która napędza drugą przekładnię odpowiedzialną za mecha-



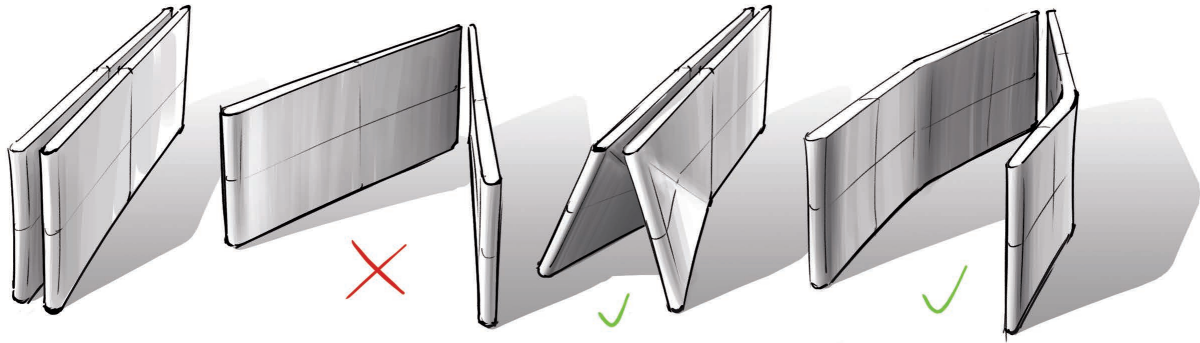
Rys.139: Widok zespołu napędowego chwytaka

nizm szczęk chwytaka. Czerwone strzałki oznaczają napęd bezpośredni z silnika, natomiast pomarańczowa wskazuje napęd z przekładni. Silnik, poprzez długą oś o przekroju krzyżowym, bezpośrednio napędza śrubę, która odpowiada za przesuwanie mechanizmu poruszającego popychaczami palców. Na osi napędowej przy silniku znajduje się dwustopniowa przekładnia planetarna, która napędza koronę popychaczy. Popychacze poruszają się po bębnie z krzywkami (oznaczonym na rysunku przezroczystym kolorem), do którego przymocowany jest wspornik szczęk chwytaka. Wewnątrz wspornika umieszczona jest śruba oraz mechanizm poruszający palcami.

Ten etap zajął więcej czasu, niż się początkowo spodziewano, a opracowanie prawidłowo działającego mechanizmu wymagało licznych iteracji. Potwierdziła się zasadność zastosowania koncepcji modułowej, co pozwoliło zminimalizować zużycie materiałów oraz ilość odpadów w procesie rozwoju. Części widoczne na zdjęciu to wadliwe elementy, które zostały umieszczone w kontenerze na tworzywa sztuczne.



Rys.140: Zbiór wadliwych części z etapu powstawania konstrukcji.



Rys.144: Szkielet ideowy obrazujący sposób działania nowej konstrukcji.

Po opracowaniu kluczowej konstrukcji, niezbędnej dla tego projektu, przystąpiono do projektowania całościowego kształtu urządzenia. Opracowane mechanizmy zostały wykorzystane w szkicach, aby zachować realistyczne proporcje w rysunkach. Na początku przyjęto trzy hipotetyczne kierunki rozwoju projektu. Wewnętrznie jestem przekonany, że nowy chwytak już na pierwszy rzut oka powinien sprawiać wrażenie urządzenia bezpiecznego i funkcjonalnego.



Rys.141: szkic ikona

1. Obudowa strukturalna - powinna zostać zaprojektowana w taki sposób, aby widoczne, surowe części konstrukcyjne zostały uproszczone wizualnie, tworząc estetyczną, trójwymiarową kompozycję. Ważne jest, aby obudowa nie ulegała dekonstrukcji formalnej podczas użytkowania, ponieważ urządzenie realizuje swoje funkcje zarówno w stanie złożonym, rozłożonym, jak i pośrednim. Z tego względu nie ma potrzeby szczególnego wyróżniania któregoś z tych stanów.



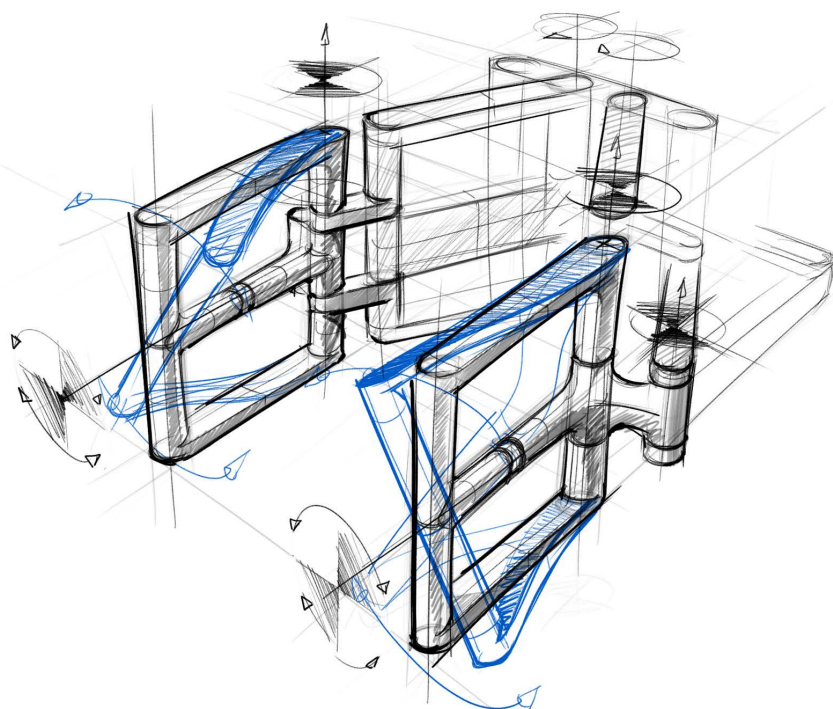
Rys.142: Szkic ikona

2. Obudowa sztywna - do uzyskanej konstrukcji mechanicznej



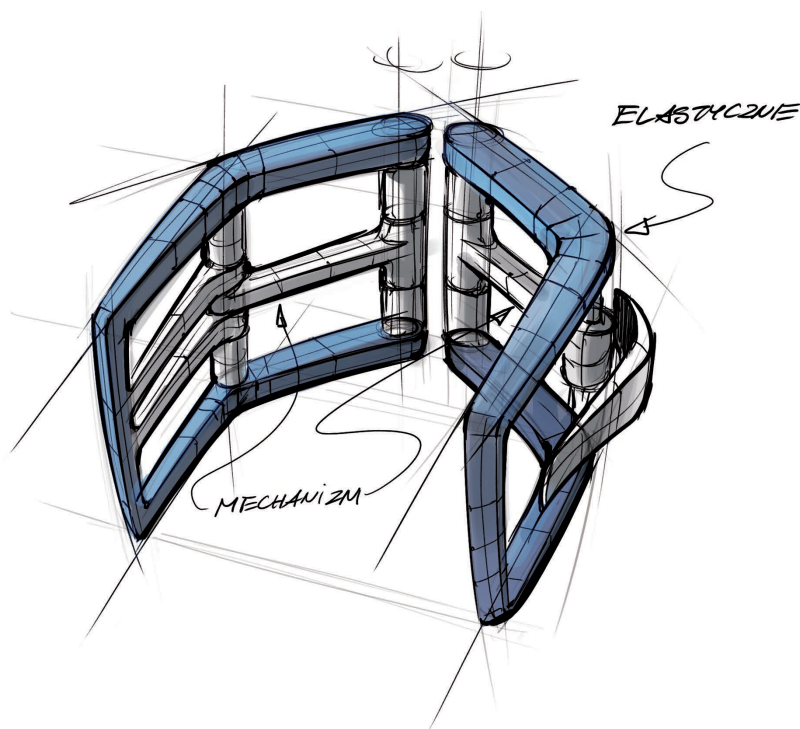
Rys.143: Szkic ikona

3. Obudowa miękka - gładka organiczna forma płynnie zmieniająca kształt

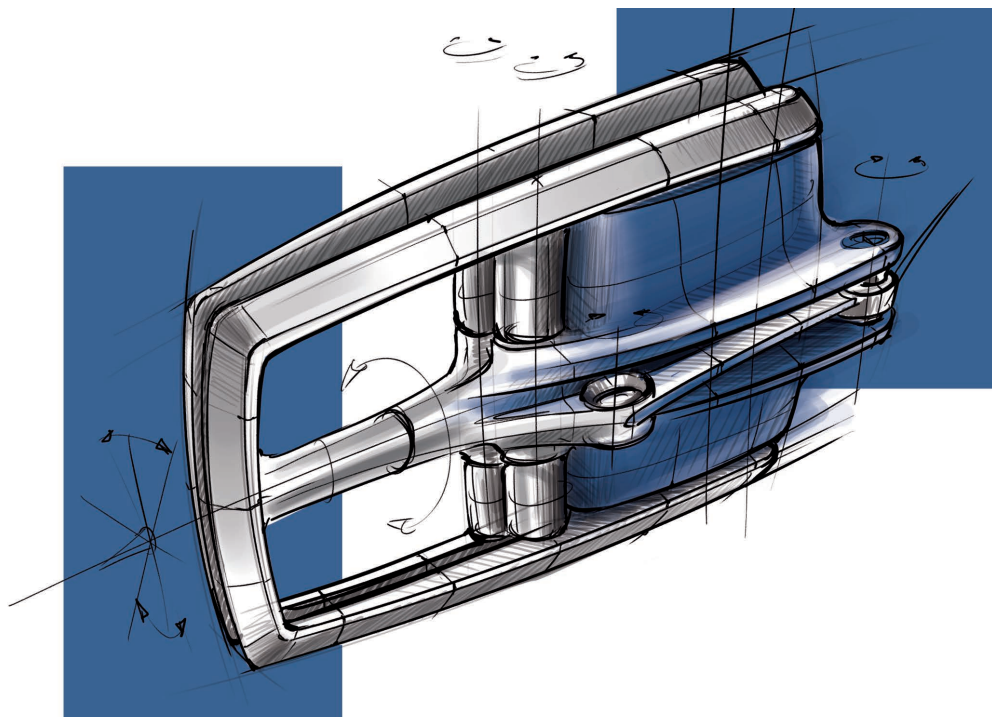


Rys.145: Szkic mechaniki chwytaka z elastycznie wychylnymi paliczkami.

Rozpoczęto od prac nad nadaniem estetycznej formy dla surowej konstrukcji mechanicznej, mającej na celu uczynienie jej bardziej przyjazną i estetyczną bez potrzeby stosowania dodatkowych obudów. Inspiracją w tym zakresie były przykłady projektów, w których konstrukcja pełni funkcję estetyczną, takie jak krzesła czy ramy rowerowe, zwłaszcza te wykonane z karbonu. Choć efekty niekiedy okazały się interesujące, ogólny odczuwalny efekt wskazywał, że forma filigranowa może być nieodpowiednia dla narzędzi i urządzeń, które są używane w sposób bezpośredni. Duży kontrast między taką

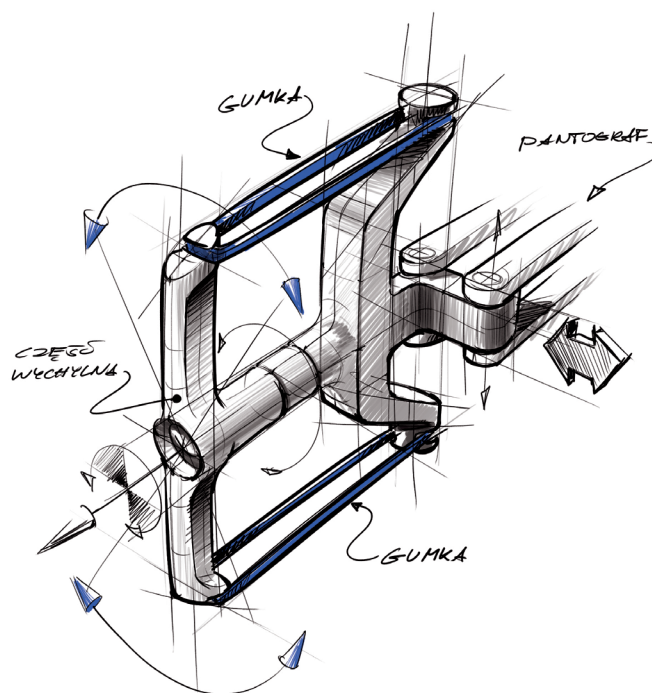


Rys.146: Jeden ze szkiców koncepcyjnych stylizacji mechanizmu.

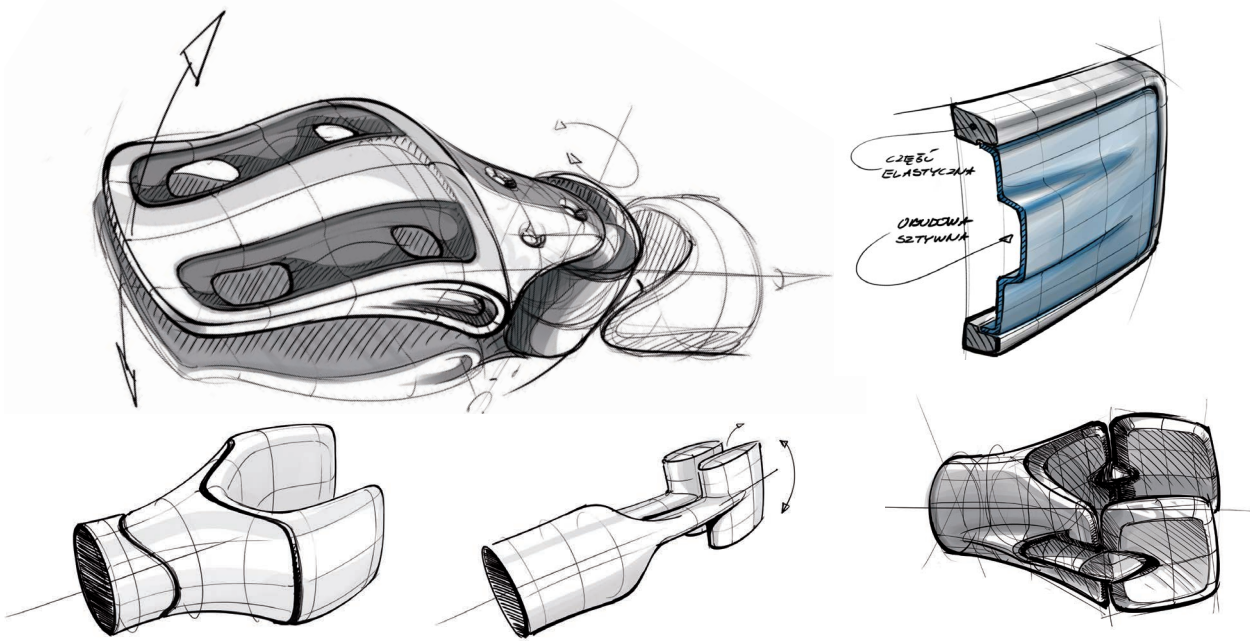


Rys.147: Inny pomysł stylizacji mechanizmu z przejrzystą przednią częścią chwytaka.

formą a masywnym ramieniem oraz wiele ruchomych elementów mogłyby budzić niepokój. W związku z tym podjęto decyzję o wstrzymaniu dalszych prac nad tą koncepcją i powrocie do niej, jeśli żadna z kolejnych opcji nie okaże się lepsza. Dużym wyzwaniem przy projektowaniu obudowy jest konieczność jej podziału na części, aby mogła dostosować się do zmieniającego się kształtu urządzenia w trakcie użytkowania. Wymaga to uwzględnienia wielu przesuwających się względem siebie elementów, które należy uszczelnić lub, przeciwnie, oddzielić w sposób umożliwiający uniknięcie gromadzenia

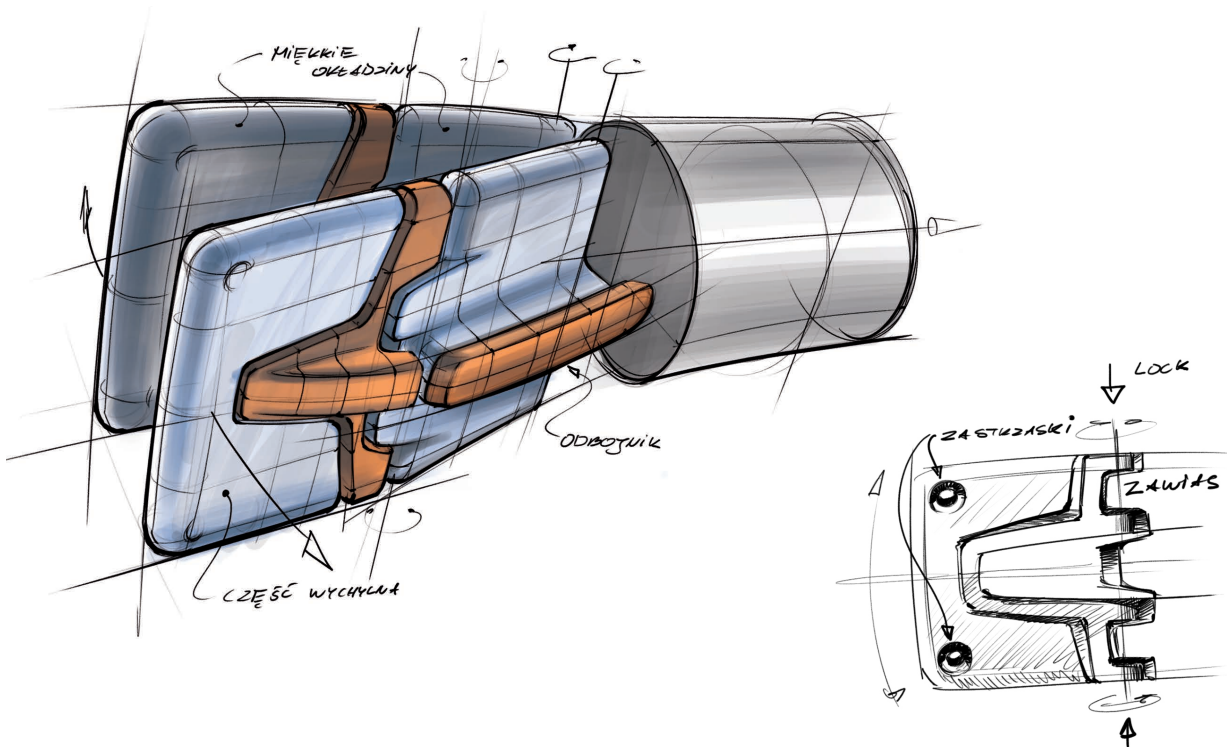


Rys.148: Szkic koncepcji mechanicznej wykorzystującej oddzielne elementy sprężyste.

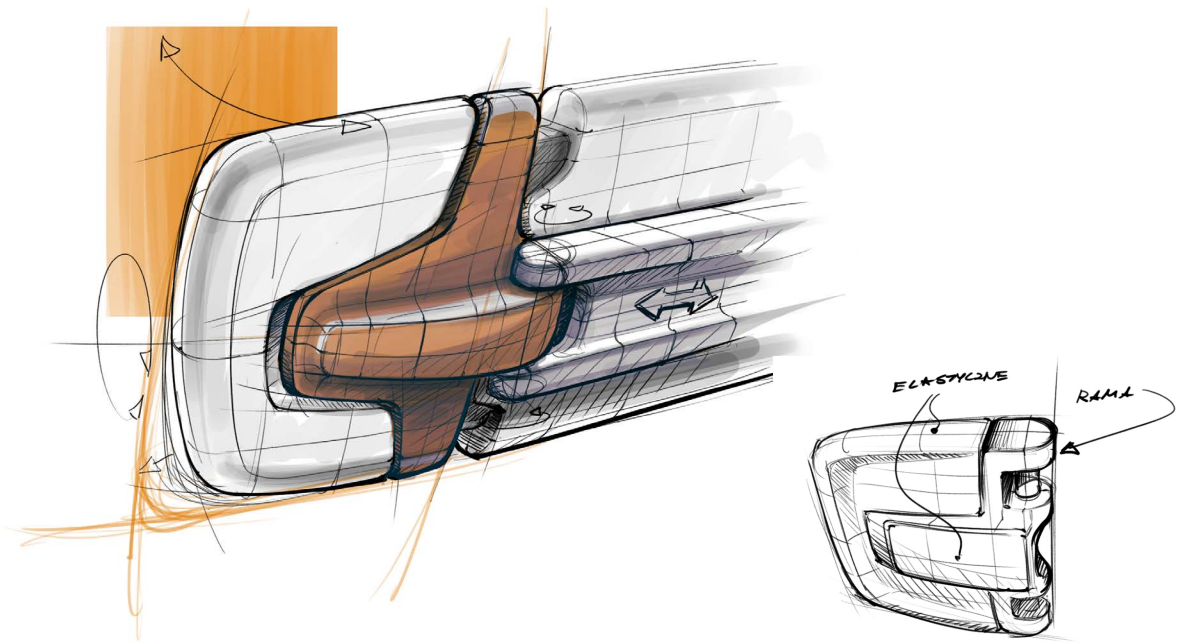


Rys. 149: Szkice koncepcyjne idei sztywnej konstrukcji i elementów zewnętrznych z elastomerów.

się płynów i ułatwiający usuwanie zanieczyszczeń. Rozważono możliwość połączenia sztywnych części obudowy - skorup - za pomocą elastomeru wtryskiwanego w formie lub zastosowanie wodoodpornej tkaniny, która mogłaby pełnić funkcję zarówno zawiasów, jak i uszczelnień. Choć efekt mógłby być spektakularny, biorąc pod uwagę ilość pracy, eksperymentów z materiałami oraz ogólne skomplikowanie projektu, uznano, że ostateczne rozwiązanie mogłoby sprawiać trudności w zakresie montażu, konserwacji i naprawy w przypadku uszkodzenia którejs z części.

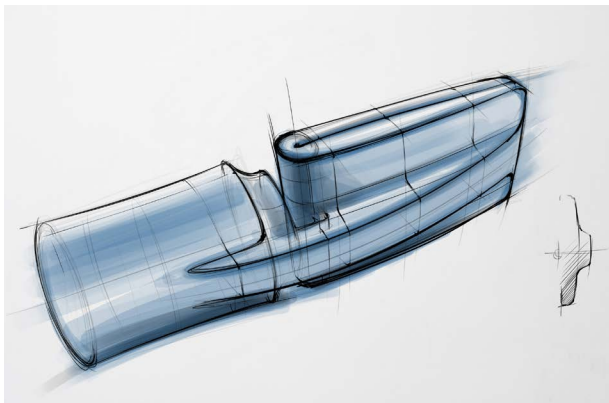


Rys. 150: Koncepcja budowy z dwóch rodzajów materiałów.

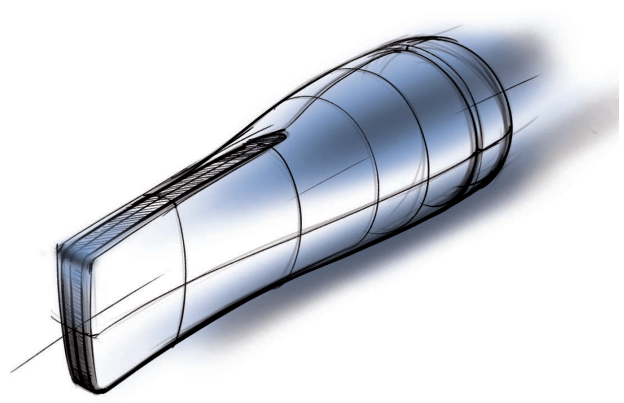


Rys.151: Szcik innego wariantu koncepcji dwu materiałowej.

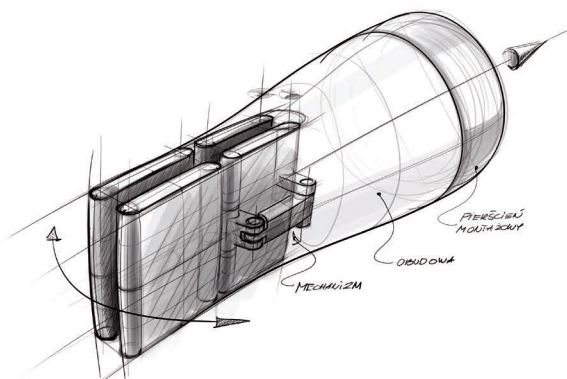
Wariant pośredni obudowy, składający się z fragmentów sztywnych i elastycznych, mógłby być realizowany jako elastyczny monolit o zróżnicowanej grubości ścianek, co umożliwiłoby swobodne przemieszczanie się fragmentów o większej grubości i sztywniejszych. Problem kłopotliwego i zawodnego łączenia materiałów zostałaby w ten sposób rozwiązany. Nowym wyzwaniem stałby się sposób produkcji takiej obudowy, nazwijmy ją rękawicą, w technologii nisko seryjnej. Rozwiązanie pojawiło się wkrótce – należałoby



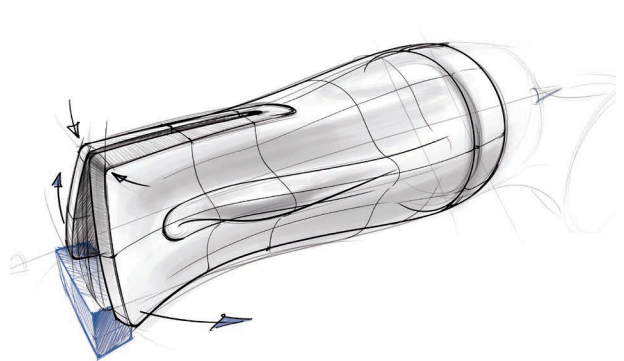
Rys.152: Pomysł ujednocnienia bryły chwytaka



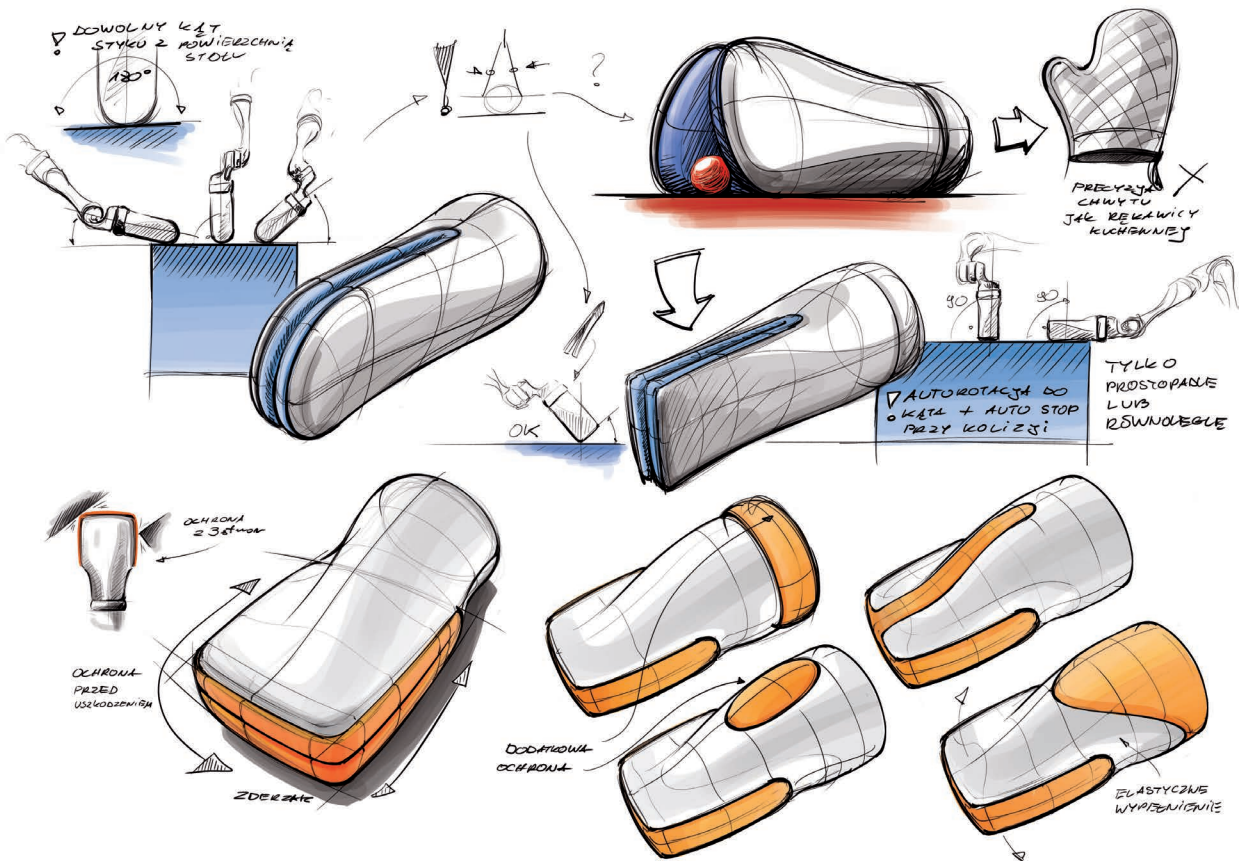
Rys.153: Uproszczenie koncepcji - rozwiązanie idealne



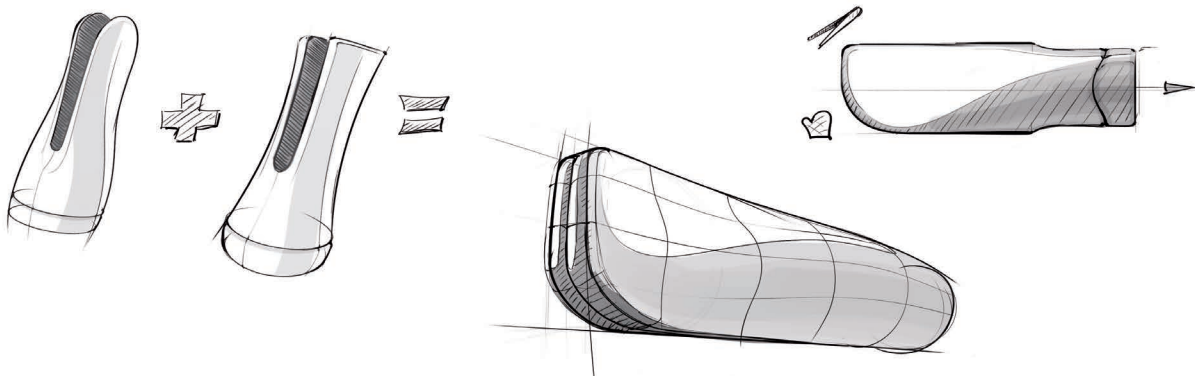
Rys.154: Wpisanie konstrukcji w uproszczony kształt.



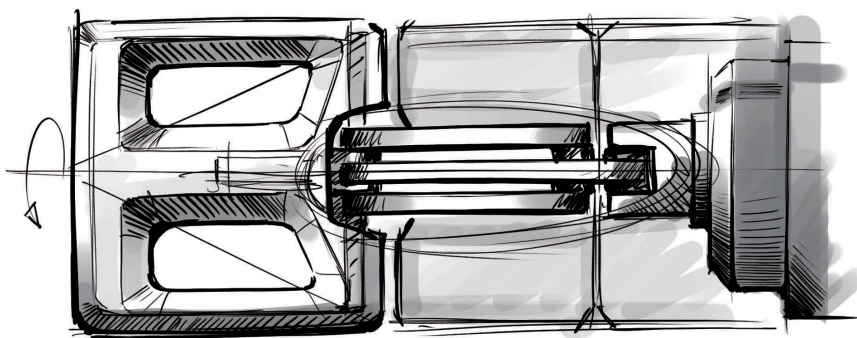
Rys.155: Wizualizacja chwytania przedmiotu.



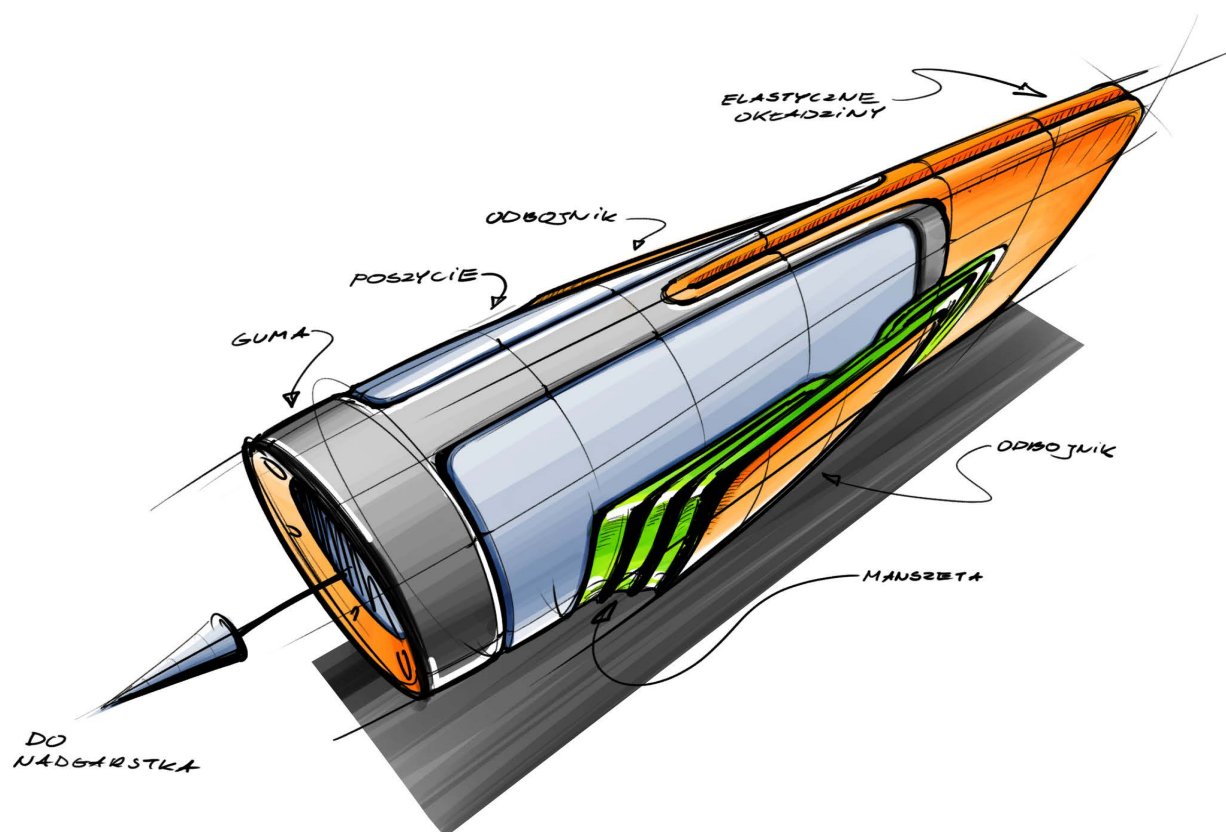
Rys.156: Studium kształtu chwytaka. Warianty rozmieszczenia zderzaków.



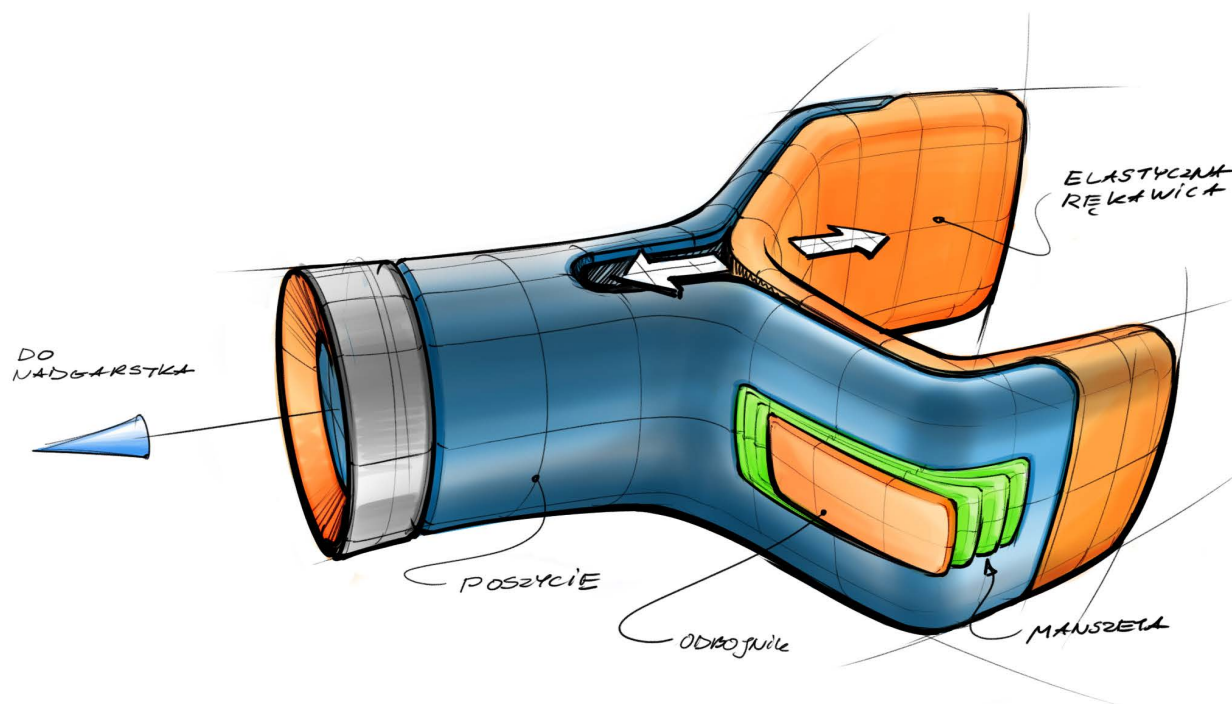
Rys.157: Synteza kształtu chwytaka, ale odrzucona. Łatwiej sterować chwytakiem symetrycznym.



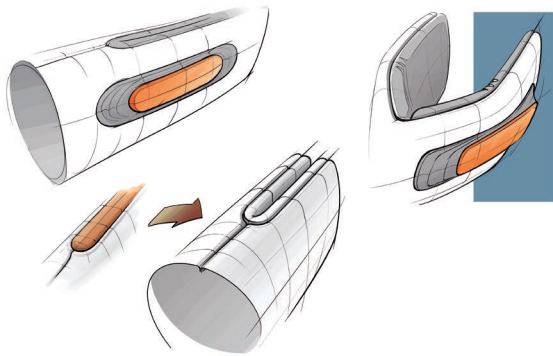
Rys.158: Szkic wariantu konstrukcji wewnątrz chwytaka.



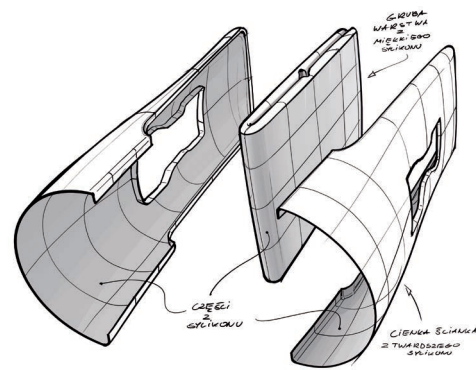
Rys.159: Koncepcja elastycznej rękawicy.



Rys.160: Koncepcja elastycznej rękawicy, wizualizacja działania.



Rys.162: Redukcja ilości części.

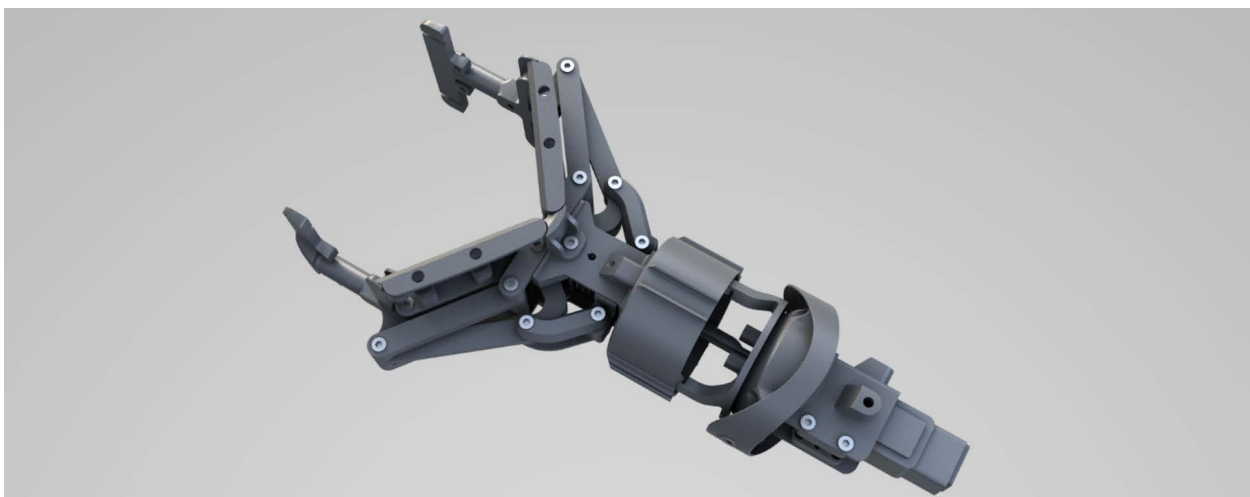


Rys.163: Redukcja ilości części.

zastosować formę podobną do formy z rdzeniem traconym, z tą różnicą, że rdzeń byłby trwały i znajdowałby się wewnątrz rękawicy, formując pocienia w ściankach odpowiedzialne za zginanie materiału. Forma zewnętrzna byłaby wieloelementowa, aby umożliwić jej demontaż po wypełnieniu elastomerem i utwardzeniu. Gotowa rękawica byłaby zdejmowana z rdzenia. Problemem, którego nie umiałem sobie wyobrazić i którego nie potrafiłem zaprojektować w CAD, było kontrolowane zginanie i naciąganie materiału rękawicy w odpowiednich miejscach. Wykonałem szybki przegląd Internetu w poszukiwaniu podobnych rozwiązań i natrafiłem na projekt badawczo-rozwojowy, którego produktem była bioniczna ręka. Początkowo byłem pełen uznania dla twórców, choć z czasem dostrzegłem, że nie poradzili sobie z estetyką rozwiązania w różnych konfigu-



Rys.164: DEKA bionic arm. Sylikonowe poszycie konstrukcji.
Źródło: <https://www.wevolver.com/specs/deka.bionic.arm>.



Rys.161: Referencyjna konstrukcja CAD do projektu.

racjach ułożenia palców. Mimo zaprogramowanych w kształcie zgięć materiał odkształcał się w niekontrolowany sposób w różnych miejscach na powierzchni, co prowadziło do efektu zbyt luźnej gumowej rękawicy. Po wykonaniu kilku szkiców takiego poszycia w kontekście własnej mechaniki, ostatecznie uznałem, że rezygnuję z dalszych prac nad tym pomysłem. Potrzebne było rozwiązanie, które zachowywałoby się przewidywalnie i nad którym możliwe byłoby pełne panowanie.

Trzeci kierunek poszukiwań formy dla chwytaka zdaje się być już wyeksploatowany przez koncepcję gumowej rękawicy. Dotychczasowe wyniki pracy nie były jednak w pełni satysfakcjonujące. Pomysły były interesujące, ale ich realizacja okazywała się nadmiernie skomplikowana. Od początku projektu istniało wewnętrzne przekonanie, że urządzenie powinno być tańsze, bardziej dostępne i możliwie proste w produkcji dla niewielkiej



Rys.165: Samochód koncepcyjny BMW Gina.

Źródło: <https://www.v10.pl/galerie/bmw,gina,1,artykul,14770,0,JPG.html>

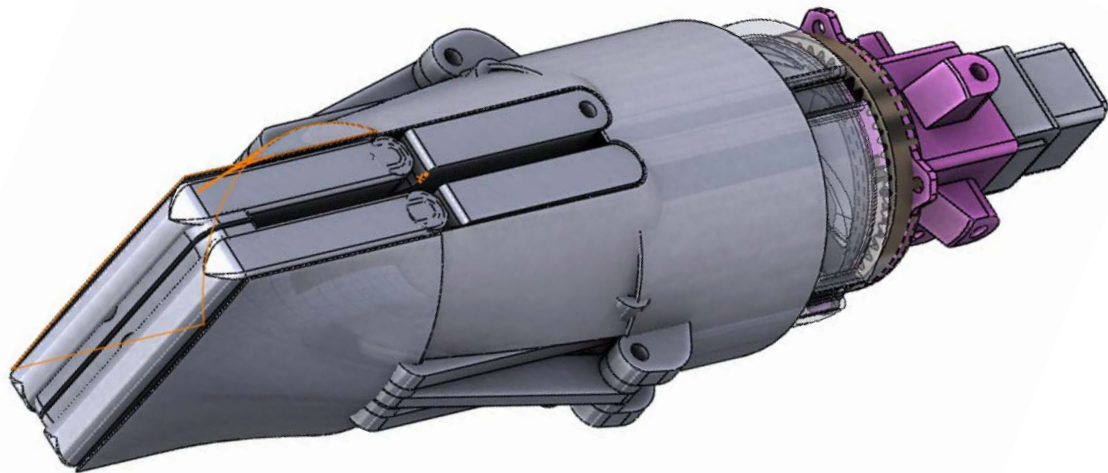
firmy. Wykonywanie wysokiej jakości form z aluminium czy sklejanie części obudowy pod szkłem powiększającym nie spełniało tych założeń.

W poszukiwaniu inspiracji przypomniano sobie koncept BMW Gina, tworzony przez zespół Chrisa Bangle'a w latach 2001-2008. Argumentacja¹⁰ Bangle'a przemawiająca za użyciem tkaniny zamiast blachy do stworzenia poszycia zewnętrznego samochodu rozwiązała resztki obaw. Według Bangle'a, widoczne blachy karoserii nie pełnią funkcji konstrukcyjnej, dlatego można je zastąpić dowolnym materiałem. Choć koncept ten ma znacznie głębsze znaczenie, to w warstwie użytkowej zastosowanie elastycznej tkaniny wydaje się przekonujące. Mogło to rozwiązać większość dotychczasowych problemów. Choć nie spodziewano się spektakularnych efektów, postanowiono spróbować.

Jako pierwszy powstał szybki prototyp obudowy wykonany z pary skarpetek bawełnianych. Choć nie wygląda jak BMW, to po poddaniu tej koncepcji subiektywnie obiektywnej krytyce otrzymano następujące wnioski:

- brak jest elementów ruchomych obudowy,
- brak jest szczelin montażowych zbierających brud,
- brak jest szczelin mogących przyciąć skórę ręki innej osoby,
- brak jest odpryskującego lakieru
- forma jest minimalistyczna, prawie organiczna, można ją modyfikować konstrukcją wewnątrz

¹⁰ <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0012176EN/gina-the-bmw-group-design-philosophy-of-the-challenging-established-concepts-hazarding-visions?language=en>



Rys.166: Jedna z poprzednich koncepcji obudowy sztywnej wieloelementowej.

- uzyskano odporność na zarysowania obudowy i sprzętów w otoczeniu
- istnieje możliwość hydrofobizacji tkaniny, więc może stać się nieprzemakalna
- wszystkie te cechy pozostają niezmienione w stanie zamkniętym i otwartym

Wydaje się, że jest to obiecujący pomysł. Mimo to, estetyka tego rozwiązania nie jest w pełni przekonująca. Liczy się, że poprzez zaprojektowanie sposobu układania się tkaniny na przebijających krawędziach uda się kontrolować formę. Bryła wydaje się być proporcjonalna.

Kolejnym krokiem jest określenie parametrów, jakie powinna spełniać tkanina poszycia chwytaka. Było to zaskoczeniem, ponieważ nie przewidywano zastosowania tekstyliów w tym projekcie, a materiały tekstylne były także poza obszarem dotychczasowych zawo-



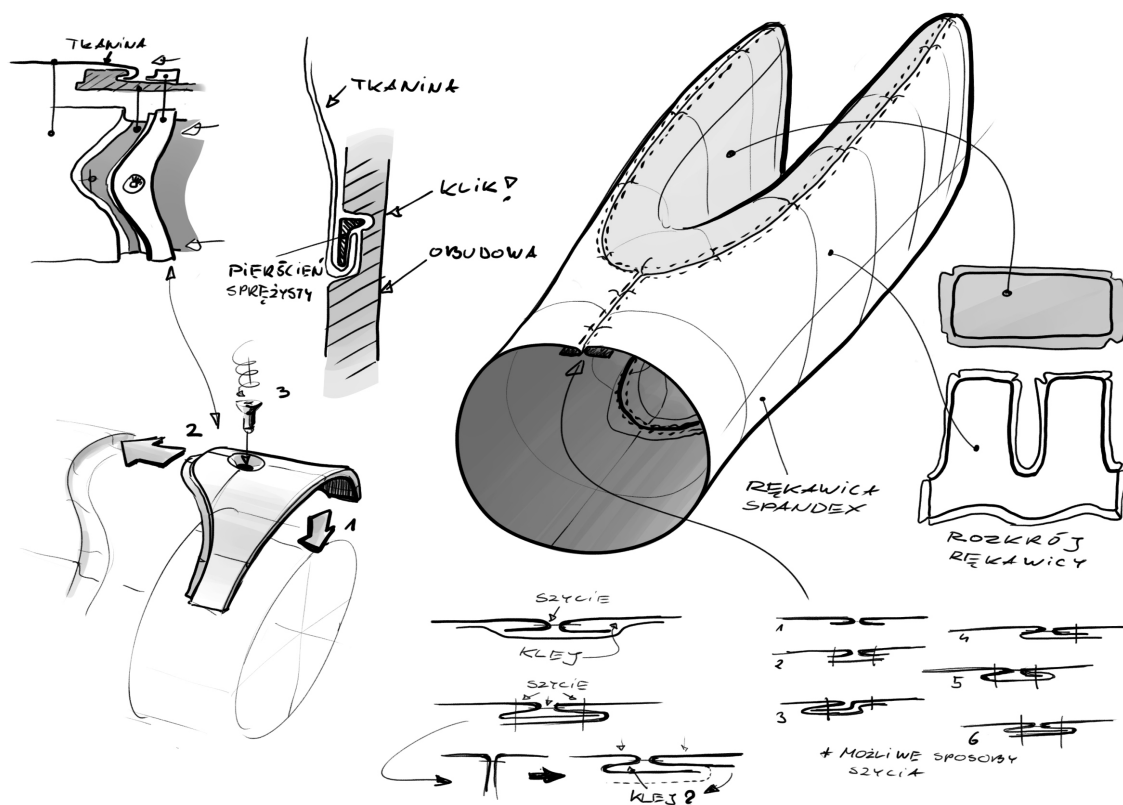
Rys.167: Pierwszy prototyp poszycia chwytaka.

dowych zainteresowań. Myśląc o estetyce projektu, oczekiwano raczej uzyskania efektu przypominającego wysokiej klasy mysz komputerową lub nowoczesną ruchomą protezę nogi. Parametry materiału:

- elastyczny i rozciągliwy w dwóch kierunkach, ale stawia niewielki opór przy rozciąganiu, aby nie próbował zamykać chwytaka. Wymagałoby to użycia silniejszego napędu do przewyciężenia dodatkowego oporu stawianego przez materiał.
- niewrażliwy na trwałe odkształcenia,
- nieprzepuszczalny, nie przepuszcza wody, nie posiada szwów,
- jest relatywnie tani i łatwo dostępny,
- powinien być w kolorze czarnym, dopasowanym do reszty ramienia, ale dobrze aby też występował w innych kolorach.

Dokonano przeglądu materiałów i tkanin o cechach zbliżonych do potrzeb oraz zamówiono próbki. Otrzymano kilkanaście rodzajów tkanin, takich jak sztuczna skóra, spandeks, lateks, lycra, elastan, satyna oraz różne mieszanki z bawełną. Po przeprowadzeniu testów dotyczących rozciągliwości, odporności na wodę, plamy, otarcia itp., wykonano również próby klejenia tych materiałów.

Zdecydowano się na matowe wykończenie powierzchni materiału, bez widocznej faktury komórkowej skóry. Materiały z domieszką bawełny były najprzyjemniejsze w dotyku oraz oferowały najładniejszy rozkład światła na powierzchniach. Niestety, przy rozciąganiu widoczne były przerwy w splocie, co nawet pomimo zastosowania impregnatów, mogło prowadzić do przesiąkania wody. Wybrano materiał ze średniej półki cenowej, charakteryzujący się rozsądnym stosunkiem wytrzymałości do estetyki powierzchni. Uznano, że rozpoczęcie prac od zszywania materiału, a później poszukiwanie innego sposobu zapewnienia szczelności, będzie najodpowiedniejsze.



Rys.168: Projekt rękawicy i detale montażowe.



Rys.169: Prototyp poszycia z materiału spandeks. Taśma papierowa imituje gumowane części chwytne.

Pierwszy prototyp został ubrany w rękawicę wykonaną ze spandeksu. Widoczne są przebijające z wnętrza przypadkowe mechanizmy oraz taśma papierowa imitująca elastyczne elementy. Z tyłu widoczne jest koło napędu manualnego służące do testów działania mechanizmu chwytaka. Po wykonaniu prototypu poszycia z docelowego materiału możliwe było zweryfikowanie właściwości tego rozwiązania, takich jak:

- Łatwość założenia poszycia na konstrukcję, okazała się kluczowa dla tego rozwiązania.
- stopień dopasowania materiału do konstrukcji chwytaka
- idealne wypełnienie miejsc pomiędzy częściami zmieniającymi swoje położenie,
- wodoszczelność
- odporność na plamy i zabrudzenia
- niesamowita odporność na powierzchniowe uszkodzenia
- ochrona przed uszkodzeniami obiektów w otoczeniu
- prosta, ale nie banalna forma całości,



Rys.170: Próby chwytania przedmiotów.



Rys.171: Inscenizowany błąd użytkownika.

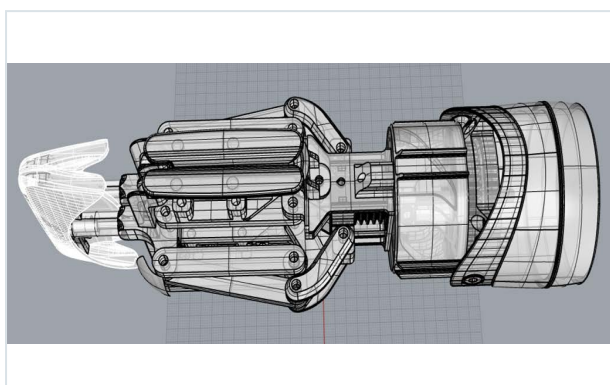


Rys.172: Weryfikacja wodoodporności rękawicy.

- interesująco układające się światło na powierzchni tkaniny
- i w końcu odczucie niezwykłej prostoty tego rozwiązania.

Ktoś kto nie zobaczy całej tej mechaniki wewnątrz pomyśli, że to działa tak prosto i naturalnie. Te stwierdzenia, a w szczególności ostatnie, potwierdzają, że projekt jest obiektywnie dobry. Obrana ścieżka projektowa, choć zawiła, pozwoliła dotrzeć do celu. Przy chwytaniu butelki widoczny jest sposób, w jaki tkanina układa się na konstrukcji. Wygląda to dyskusyjnie, ale obiecująco. Konieczne było dalsze przekonanie się o skuteczności rozwiązania.

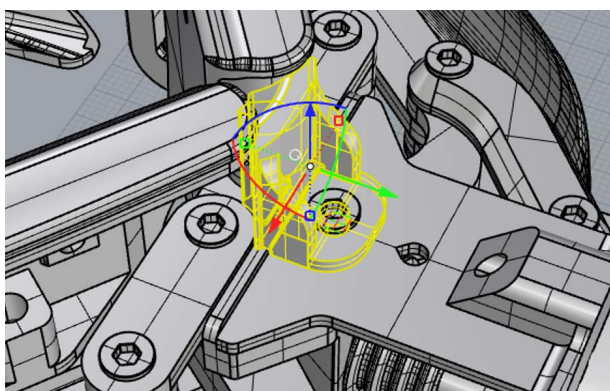
Testy chwytania wykazały dużą stabilność i brak osłabienia siły napędu. Jakość chwytu poprawiła się dzięki większemu tarcia między tkaniną a obiektem, chociaż jeszcze bez zastosowania nakładek gumowych. Funkcje wychylnych części działają poprawnie; chwytak nie otwiera się samoczynnie, a po chwyceniu przedmiotu pewnie go trzyma.



Rys.173: Kompletna konstrukcja wewnętrzna chwytaka.



Rys.174: Stylizacja widocznych krawędzi konstrukcji.



Rys.175: Dodatkowa część, kształtująca poszycie.

Przeprowadzono test na zalanie strumieniem wody. Użytkownicy takich ramion często testują je w ten sposób, dlatego również przeprowadzono ten test. Celem było napełnienie szklanki wodą i wycofanie ramienia. Przez pomyłkę ramię przemieściło się do przodu pod strumień wody, pozostając tam przez 5 sekund, a następnie zostało wycofane. Efekt był łatwy do przewidzenia: materiał nie przepuścił wody. Obawy dotyczyły przepuszczalności wody przez własnoręcznie wykonany szew, który znajdował się bezpośrednio pod strumieniem wody. Zbyt późno zauważono ten problem, aby móc zareagować. W wyniku tego kilka kropli wody przedostało się do wnętrza, jednak przeciek wystąpił w miejscu oddalonym od części elektrycznej, czyli silnika.

W porównaniu do istniejących chwytaków ACCREA i KINOVA, które mają szczelność klasy IPX2, rozwiązanie to jest o kilka klas wyżej. Klasa IPX2 oznacza ochronę przed wodą kapiącą z różnych kierunków pod kątem do 15 stopni. Należy to przebadać laboratoryjnie, ale według tabeli i własnego doświadczenia w projektowaniu szczelnych obudów, to rozwiązanie może uzyskać klasę IPX4 lub IPX5. Przekłada się to bezpośrednio na bezpieczeństwo urządzenia w razie przypadkowego kontaktu ze strumieniem wody.

Początkowo zbudowano w aplikacji do modelowania powierzchniowego geometrię odpowiadającą efektowi uzyskanym w rzeczywistości. W pierwszej fazie projek-

tu poszukiwano sposobu na pozbycie się przebijających krawędzi surowej obudowy. Zauważono jednak, że naturalnie pojawiają się one tylko w dwóch miejscach na obwodzie, a tam, gdzie sąsiadują z prostokątnymi elementami po bokach, zanikają dzięki większemu naprężeniu tkaniny. Postanowiono pozostawić te krawędzie, dostosowując ich kształt tak, aby zamiast linii prostych układały się w wygięte ku końcowi łuki. Końce łuków miały korespondować z podłużnymi krawędziami po bokach.

Aby uzyskać niewielką zaokrągloną krawędź u zbiegu szczęk chwytaka, konieczne było wstawienie symetrycznie po obu stronach części, które ukształtują tkaninę w odpowiedni sposób. Następnie poszukiwano innego kształtu dla wystających po bokach elementów maskujących części mechaniczne i pełniących funkcję odbojników. Poprzedni kształt w stanie otwartym zbyt przypominał dłoń w rękawiczce, co budziło negatywne konotacje. Niepożądane było, aby ten obiekt budził bezpośrednie skojarzenia z budową ciała człowieka.

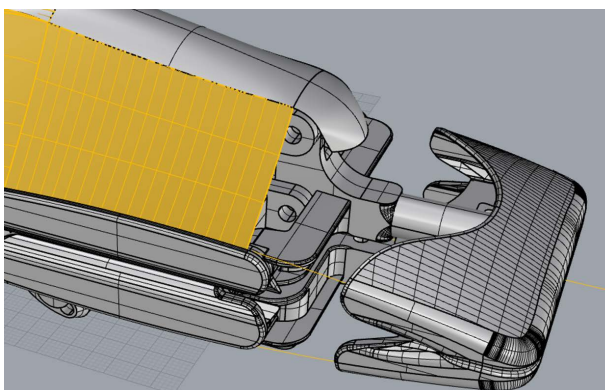
Kolejnym krokiem było zmodyfikowanie konstrukcji odbojników w celu uzyskania pożądanego kształtu poszycia. Po próbkach wydruków dopracowano kształt i sposób mocowania nakładek na chwytak. Zastosowanie poszycia w formie rękawicy automatycznie rozwiązało problem ukrycia i uszczelnienia miejsc zginania szczęk chwytaka. Tkanina umożliwiła także swobodne wychylanie końców chwytaka na boki, co stanowi największy walor tego rodzaju poszycia.

Modyfikacji i uproszczeniu uległa też zewnętrzna strona nakładki chwytaka, która pełni również funkcje odbojnika przy kolizjach. Wykonałem kilka próbnych wizualizacji 3D, aby zobaczyć jak jest charakter uzyskanej formy i jak może się on zmieniać wraz ze zmianą materiału i koloru.

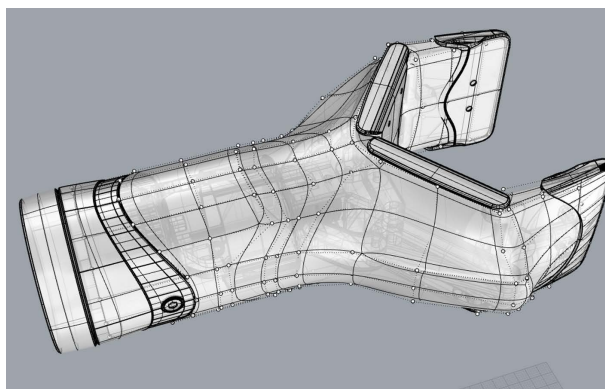
Uzyskane efekty mnie zaskoczyły, a kształt chwytaka w tych ujęciach wygląda trochę jak futurystyczna łódź, lub odrzutowa wyścigówka... Na pewno nie jak chwytak. W interesujący sposób zmienia się charakter formy w zależności od dobranych materiałów.



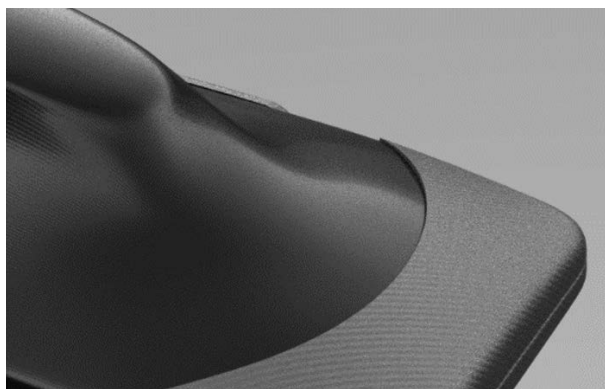
Rys.176: Korekty kształtu konstrukcji.



Rys.177: Odtwarzanie powierzchni materiału w Rhinoceros 3D



Rys.178: Model 3D otwarty z gotowym poszyciem



Rys.179: Dopracowany formalnie detal części chwytającej.



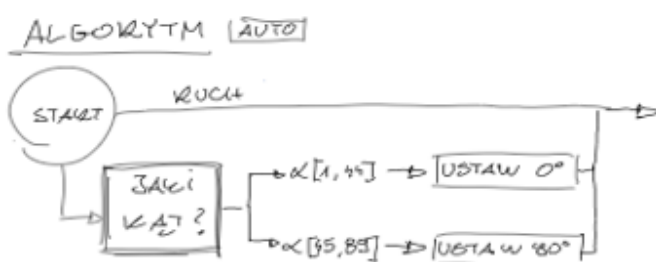
Rys.180: Chwytek zamontowany do ramienia Accrea BATEO.

To przydatna cecha w przypadku późniejszych liftingów lub wersji modyfikowanych dla klienta. Poprzez uzyskanie spójności powierzchni urządzenia z ramieniem oraz przede wszystkim za sprawą organicznie zmieniającego się kształtu zdecydowałem o jednoznacznej animacji nowego urządzenia. Jego kształt nieco przypominał dziób ptaka. Szukając podobieństw w naturze natknąłem się na fotografii pingwinów cesarskich. Ujęło mnie ich piękno i kolorystyka, a zwłaszcza ten designerski pomarańczowy akcent. Rozkład światła na ich czarnych piórkach

przypomina nieco ten na materiale chwytaka. Elastycznym częściami odpowiedzialnym za chwytanie przedmiotów oraz pełniącym rolę odbojników nadałem kolor pomarańczowy, który komunikuje ich funkcje. Ostatnim elementem jest półprzezroczysty świecący pierścień wykonany metodą druku 3D z PETG z widocznym ryflowaniem. Zastosowanie większej średnicy dyszy oraz grubszej warstwy druku zaowocowała wyższej jakości powierzchnią oraz lepszą transmisją światła. Całość zwieńcza czarny połyskliwy pierścień maskujący śruby montażowe chwytaka do nadgarstka.



Rys.181: Wizualizacja projektu chwytaka, jeden z rozważanych wariantów kolorystycznych.



4.3 Projekt funkcjonalno użytkowy

Założenie 1:

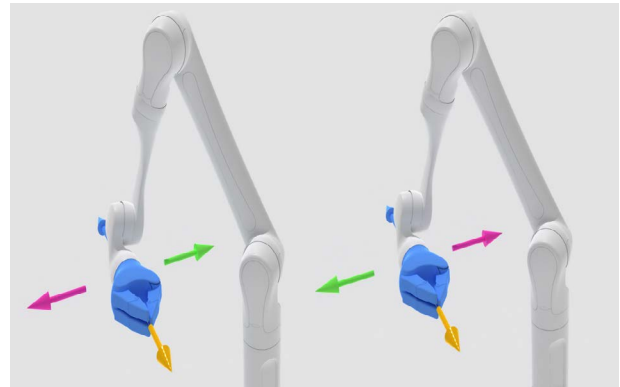
Urządzenie jest intuicyjne w obsłudze.

Jak to osiągnąć? Jakie funkcje zrealizują ten cel?

Przedmioty w naszym otoczeniu najczęściej stoją lub leżą na jakiejś płaskiej poziomej powierzchni (stół, półka). Aby je chwycić trzeba ustawić chwytak w pionie lub poziomie.

Funkcja 01: Auto mapowanie kierunków ruchu chwytaka.

Oprogramowanie na bieżąco dopasowuje zestaw rzeczywistych ruchów i obrotów chwytaka do rzeczywistych ruchów joysticka. Jeżeli chwytak zostanie obrócony np. wokół osi pionowej o kąt 90 lub 180, co będzie oznaczać, że aby to komputer zamieni wcześniejsze kierunki ruchu na odpowiadające rzeczywisty



Rys.182: Auto mapowanie kierunków ruchu.

Założenie 2:

Urządzenie komunikuje się z użytkownikiem za pomocą sygnałów świetlnych i dźwiękowych.

Jak to osiągnąć? Jakie funkcje zrealizują ten cel?

Potrzeba używania aplikacji z podpowiedziami kierunków ruchu chwytaka wynika głównie z tego w jaki sposób kierunki ruchu chwytaka zostały zmapowane na joystick, oraz brak jest informacji o stanie urządzenia w stożku widzenia użytkownika, gdy jest on skupiony na obsłudze. Ponadto, komunikaty wyświetlane w aplikacji wymagają od użytkownika interpretacji.



Rys.183: Komunikacja światłem LED - kolory i impulsy.

Funkcja 02: Sygnalizacja stanu i komunikaty zwrotne

W chwytaku znajduje się moduł LED RGB z modułem komunikacji BT. Łączy się z aplikacją mobilną i sygnalizuje światłem i kolorem na chwytaku dany wybrany zestaw ruchów oraz stan, jak poziom siły, kolizję, przeciążenie napędów. Użytkownik zapamiętując kolor z zestawem ruchów nie będzie musiał stale korzystać z instrukcji.



Rys.184: Sygnalizacja LED o wybranej powierzchni ruchu.

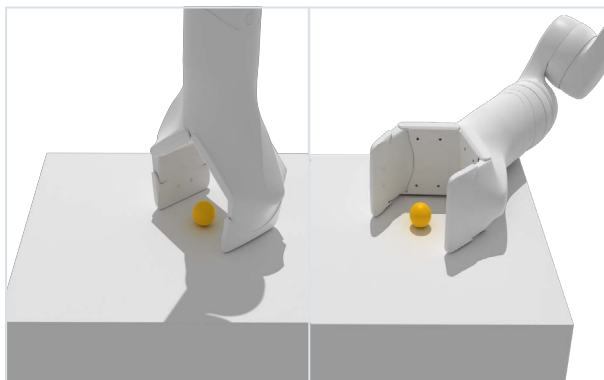
Założenie 3:**Urządzenie wyręcza użytkownika z typowych powtarzalnych operacji.**

Jak to osiągnąć? Jakie funkcje zrealizują ten cel?

Przedmioty w naszym otoczeniu najczęściej stoją lub leżą na jakiejś płaskiej poziomej powierzchni (stół, półka). Aby je pewnie chwycić użytkownik musi samodzielnie wypoziomować chwytak.

Funkcja 03: Auto rotacja chwytaka

Komputer sterujący zawsze automatycznie w czasie przemieszczania ramienia ustawia chwytak w poziomie lub pionie, zależnie do którego kąta jest w danej sytuacji bliżej. Wyjątek stanowi sytuacja gdy Chwytak się auto poziomował, następnie użytkownik zmienił jego położenie i coś chwycił. Wtedy podczas przenoszenia funkcja nie zostanie wykonana.

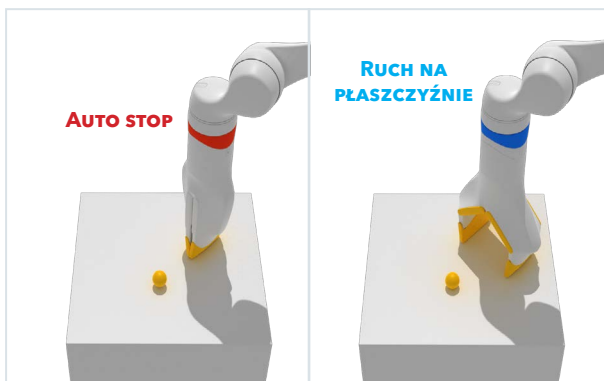


Rys.185: Auto rotacja do pionu lub poziomu.

Kiedy zdarzy się, chwytak zderzy się z czymś w otoczeniu, zadziała funkcja auto zatrzymania. Następnym krokiem w takiej sytuacji jest potrzeba ominięcia przeszkody, użytkownik więc musi manualnie zmienić zestaw ruchów chwytaka na taki, który to umożliwi.

Funkcja 04: Auto przełączanie funkcji przy kolizji

Jeżeli użytkownik po auto zatrzymaniu chwytaka w kontakcie z przeszkodą zwolni joystick, to komputer zinterpretuje to jako kolizję i automatycznie przełączy do nawigacji w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku ruchu. Zostanie to zasygnalizowane odpowiednim kolorem i dźwiękiem.



Rys.186: Auto przełączanie funkcji po kolizji.

Założenie 4:**Urządzenie reaguje na przeszkody**

Jak to osiągnąć? Jakie funkcje zrealizują ten cel?

Kolizje zdarzają się z powodu złej oceny odległości, ograniczonej widoczności, pomyłki w nawigacji, zbyt dużej prędkości ruchu chwytaka, złej oceny momentu zatrzymania napędu.

Funkcja 05: Auto zatrzymanie przy kolizji

Użytkownik przemieszcza chwytak. Jeżeli z jakiegoś powodu nie zwolni joysticka przed kolizją z blatem, ścianą, lub cięższym przedmiotem, to chwytak zatrzyma się w



Rys.187: Auto zatrzymanie po kolizji i wycofanie ruchu.

kontakcie z przeszkodą i minimalnie cofnie. Jeżeli użytkownik nie zwolni joysticka to komputer zinterpretuje to jako polecenie przesunięcia/popchnięcia i po chwili chwytak ruszy dalej we wskazanym kierunku.

Założenie 5:

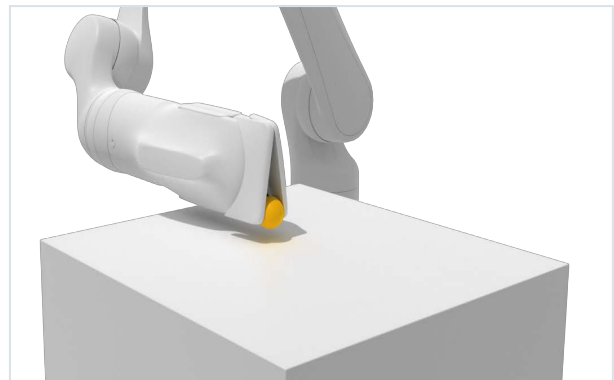
Urządzenie nie wymaga precyzji ze strony użytkownika

Jak to osiągnąć? Jakie funkcje zrealizują ten cel?

Precyzyjne ustawianie pozycji chwytaka jest potrzebne zawsze przy chwytaniu przedmiotów oraz niekiedy przy odstawianiu. Asymetryczne chwytaki o trzech palcach mają problemy z symetrycznym rozkładem sił na obiekcie. Dość często można zaobserwować, że chwyt odbywa się przy pomocy tylko dwóch nie w pełni przeciwstawnych palców. Powoduje to przypadkowe dopasowanie się przedmiotu do chwytaka i zmianę położenia przedmiotu np. względem powierzchni, z której został podniesiony.

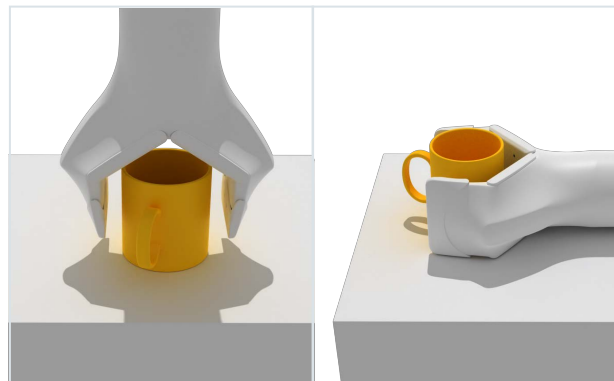
Funkcja 06: Symetryczny uniwersalny chwytak

Projekt daje możliwość skutecznego chwytania z blatu przedmiotów w dowolnym nieprecyzyjnym ułożeniu chwytaka. Forma chwytaka komunikuje zakres i kierunek ruchu szczęk. Materiały i kolory wskazują części funkcjonalne urządzenia.



Rys.188: Sprężyste szczęki dopasują się do kształtu obiektu.

Wiele problemów sprawia użytkownikom symetryczne ustawienie chwytaka względem chwytanego obiektu. Przy złym ustawieniu przedmiot może się przesunąć lub przewrócić. Najłatwiej jest chwycić obiekty z góry, chwytakiem ustawionym do użytkownika tak, że widzi przedmiot oraz dwa przeciwstawne palce chwytaka. Chcąc jednak chwycić kubek by się z niego napić, konieczne jest ustawienie chwytaka równoległe do stołu.

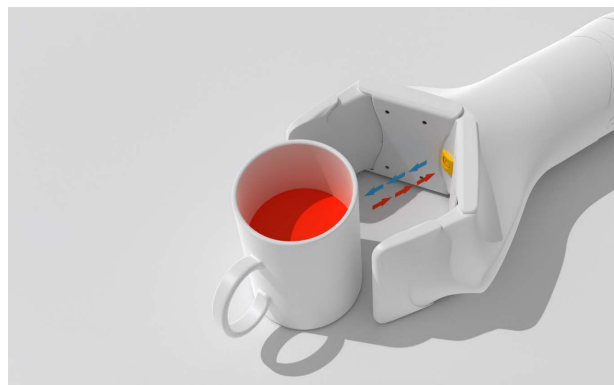


Rys.189: Geometria szczęk ułatwia stabilny chwyt przedmiotu.

Funkcja 07: Auto pozycjonowanie chwytaka względem przedmiotu

Jak to osiągnąć? Jakie funkcje zrealizują ten cel?

Chwytak posiada czujniki odległości. Gdy chwytak zbliży się do przedmiotu, komputer automatycznie koryguje jego ustawienie względem obiektu.



Rys.190: Umieszczenie czujnika odległości.

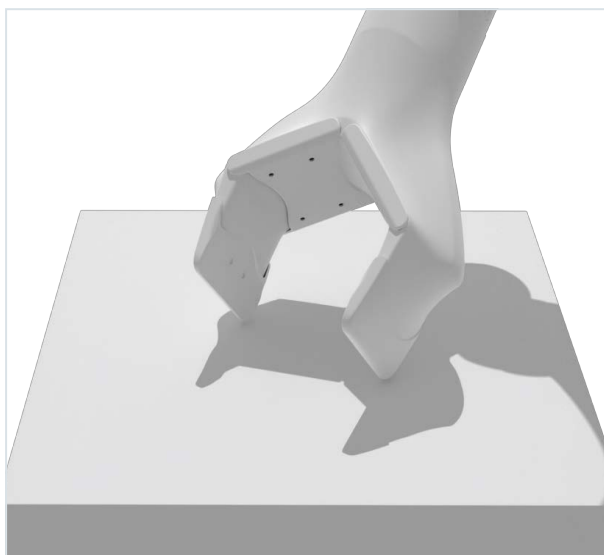
O ile ustawienie chwytaka w pionie lub poziomie jest relatywnie proste – łatwo to ocenić, o tyle ustawienie kąta obrotu chwytaka jest trudne bo często brak jest punku odniesienia, chwytak też może być różnie ustawiony względem użytkownika co uniemożliwia wyczuć wartość kąta obrotu.

Funkcja 08: Przyciąganie obrotu chwytaka do zadanych kątów

Użytkownik wychyla joystick i chwytak się obraca w zadanym kierunku.

Chwytak zatrzymuje się na najbliższym ustawionym kącie np. 0, 45, 90, 135 itd.

Użytkownik zwalnia joystick już po zatrzymaniu napędu. Nie ma potrzeby, aby starał się uchwycić właściwy moment zatrzymania, czy regulował jego położenie.



Rys.191: Automatyzacja regulacji kąta pochylenia chwytaka.

Założenie 06:

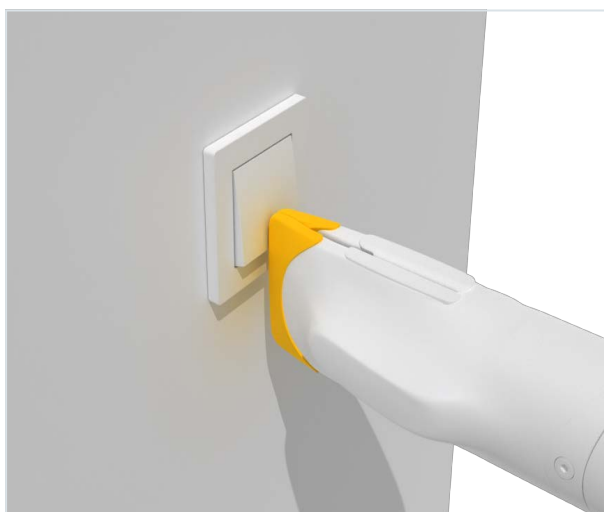
Urządzenie „wybacza” błędy użytkowników

Jak to osiągnąć? Jakie funkcje zrealizują ten cel?

Błędy użytkownika polegają zwykle na ruchu chwytakiem w złym kierunku i/lub ze zbyt dużą prędkością. Wymaga do dodatkowych korekt położenia lub może powodować kolizje z otoczeniem.

Funkcja 09: Łagodny start napędów

Zaprogramowany łagodny start napędów w początkowej fazie ruchu wydłuża czas na reakcję użytkownika oraz spowoduje, że w czasie krótkich ruchów ramię będzie poruszać się spokojnie. Po przebyciu kilku centymetrów łagodnie osiągnie docelową prędkość. Możliwe jest wprowadzenie funkcji łagodnego zatrzymania po zwolnieniu joysticka, aby dodatkowo złagodzić ruch. Wymagałoby to jednak sprawdzenia w rzeczywistości, ponieważ ruch byłby kontynuowany jeszcze przez kilka centymetrów po zwolnieniu joysticka, tym samym użytkownik musiałby reagować z wyprzedzeniem.



Rys.192: Soft start ogranicza ilość uszkodzeń i kolizji.

Założenie 07:

Urządzenie jest dostosowane do zwyczajów użytkownika

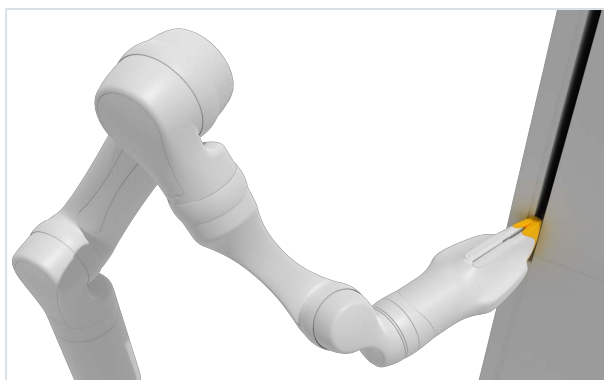
Jak to osiągnąć? Jakie funkcje zrealizują ten cel?

Jednym z podstawowych wymagań co do urządzenia, jest umożliwienie samodzielnego picia i jedzenia. Użytkownicy również często przenoszą naczynia z płynami, lub posługują się chwytakiem w pobliżu bieżącej wody z kranu.

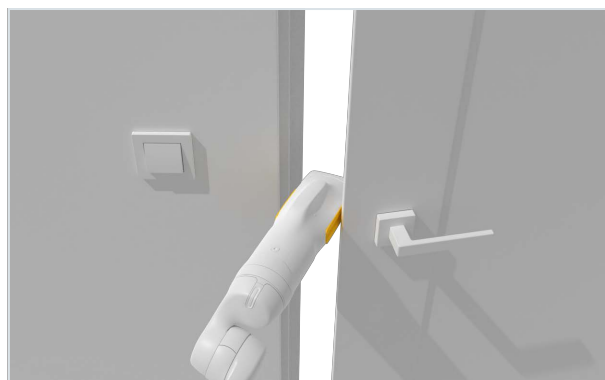
Funkcja 10: Urządzenie jest uodpornione na zalanie wodą

Obudowa jest szczelna lub uszczelnione są części elektryczne chwytaka, a płyn może swobodnie przecieć przez konstrukcję, nie zbierając się wewnątrz. Konstrukcja urządzenia odporna na korozję.

Obserwacje pokazały, że funkcje przemieszczania obiektów bez potrzeby ich chwytania są realizowane mimo, że urządzenia nie są do tego należycie przystosowane. Użytkownicy w naturalny sposób ułatwiają i przyśpieszają sobie czynności.



Rys.193: Podważanie drzwi lodówki, lub szafki.



Rys.194: Otwieranie drzwi przesunięciem chwytaka.

Funkcja 11: Urządzenie jest przystosowane do przesuwania i podważania przedmiotów

Chwytnak posiada zderzaki odbojniki do wykonywania operacji przesuwania i podważania drzwi, szuflad, itp. Konstrukcja jest odpowiednio sztywna i wytrzymała do tych celów w relacji do sił rozwijanych przez napędy ramienia, a nie wartości bezwzględnych.

Gdy zdarzy się, że przenoszony w kubku płyn rozleje się na chwytak, to w obecnych konstrukcjach zbiera się w załamaniach na łączeniach części i dostaje się do wnętrza mechanizmów palców. Niemożliwym jest całkowite osuszenie tych konstrukcji, a wypłukanie chwytaków to ryzyko ich zniszczenia. Chwytnaki z czasem są po prostu brudne.

Funkcja 12: Urządzenie jest łatwe w czyszczeniu

Kształty obudowy i jej części utrudniają gromadzenie brudu lub umożliwiają umycie ich w wodzie. Można zastosować chemiczne środki hydrofobowe na powierzchnię chwytaka i inne jego części, aby uniemożliwić trwale przywieranie brudu.

Wprowadzenie funkcji „auto zatrzymanie przy kolizji” nie zadziała jeśli użytkownik nie będzie miał nowej wersji oprogramowania do ramienia, nie zadziała też gdy ramię będzie wyłączone, a wózek z użytkownikiem będzie się przemieszczał i dojdzie gdzieś do kolizji z meblem lub futryną.

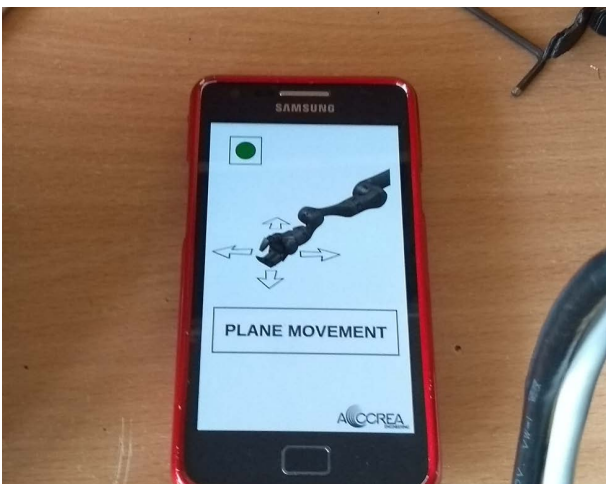
Funkcja 13: Urządzenie jest odporne na uszkodzenia mechaniczne

Mimo wszystkich nowych funkcji ochronnych zaproponowanych w projekcie, trzeba założyć, że użytkownicy będą bardziej kreatywni, lub też mogą zdarzyć się wypadki, których nie przewidziałem. Dlatego konstrukcję chwytaka należy opracować, z rozsądnym zapasem wytrzymałościowym.

FUNKCJA	DZIAŁANIE	SPOSÓB IMPLEMENTACJI
1	Auto mapowanie kierunków ruchu chwytaka	oprogramowanie
2	Świetlna sygnalizacja stanu i komunikaty zwrotne	oprogramowanie
3	Auto rotacja chwytaka	oprogramowanie
4	Auto przełączanie funkcji ruchu przy kolizji	oprogramowanie
5	Auto zatrzymanie przy kolizji	oprogramowanie
6	Symetryczny uniwersalny chwytak	cecha konstrukcji
7	Auto pozycjonowanie chwytaka względem przedmiotu	oprogramowanie
8	Auto przyciąganie chwytaka do zadanych kątów	oprogramowanie
9	Łagodny start napędów	oprogramowanie
10	Odporność na zalanie wodą	cecha konstrukcji
11	Przystosowanie do przesuwania i podważania przedmiotów	cecha konstrukcji
12	Urządzenie jest łatwe w czyszczeniu	cecha konstrukcji
13	Urządzenie jest odporne na uszkodzenia mechaniczne	cecha konstrukcji

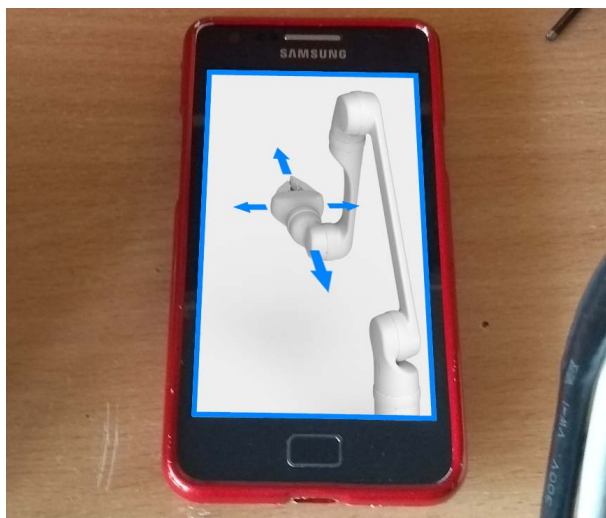
Rys.195: Tabela funkcji programowanych. Nie udało się ich zrealizować przy pomocy samej konstrukcji.

INSTRUKCJE DLA UŻYTKOWNIKA



Rys.196: Ekran interfejsu użytkownika - Accrea

pomyłek i niepewności sprawia sterowanie chwytakiem względem punktu wirtualnego. Użytkownik za każdym razem eksperymentuje w celu ustalenia, jaki ruch joysticka jakiemu ruchowi chwytaka będzie odpowiadał. O odwzorowaniu rzeczywistych ruchów nie



Rys.197: Kolor funkcji sterowania w aplikacji wyświetlany jest poprzez LED RGB na chwytaku.

Aplikacja z instrukcjami dla użytkownika jest obecnie niezbędna do tego by użytkownik mógł samodzielnie posługiwać się ramieniem asystującym. Najważniejszą jej wartością jest wyświetlanie strzałek ruchu chwytaka przy przełączaniu funkcji. Jednocześnie jej największą wadą jest to, że wyświetlana na ekranie wizualizacja ramienia nie odpowiada jego rzeczywistemu ułożeniu względem użytkownika. Wyświetlanie strzałek z odpowiedziami kierunków wymaga od użytkownika wyobraźni przestrzennej i adaptacji tych kierunków na rzeczywiste położenie chwytaka. Najwięcej

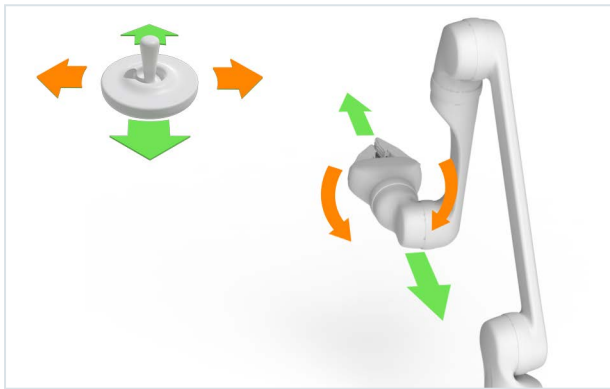
ma w tym przypadku mowy. Koncepcja polega na tym, aby wizualizacja ramienia w aplikacji była rzeczywista, oraz aby wyświetlane strzałki odpowiadały rzeczywistym kierunkom ruchu chwytaka i joysticka. Dla każdego zestawu ruchów przypisany zostanie inny kolor. Zmieniając zestawy ruchów zmieniał się będzie kolor wyraźnych dużych strzałek na wyświetlaczu oraz LED na chwytaku będzie świecił takim samym kolorem. Jako, że w BATEO są potrzebne tylko 4 przełączenia funkcji ruchu, użytkownik szybko nauczy się, jaki kolor sygnalizowany przez chwytak jakim rzeczywistym ruchom odpowiada. Założenie jest takie, aby po krótkim czasie nauki,

nie musiał już w ogóle zerkać na instrukcję. Przełączając funkcje ruchu będzie zmieniał się kolor światła na chwytaku. Funkcje dodatkowe, również będą sygnalizowane na chwytaku i wyświetlaczu jednocześnie.

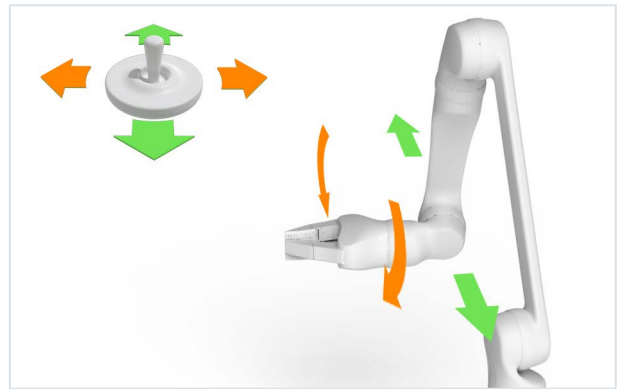
4.4 Koncepcja mapowania kierunków ruchu

Jest to propozycja zmiany sposobu mapowania kierunków ruchu oraz kolejności zestawów ruchu, oparta na obserwacjach i doświadczeniach. W dalszej części zostanie wyjaśnione, jak może wyglądać nowy model nawigacji.

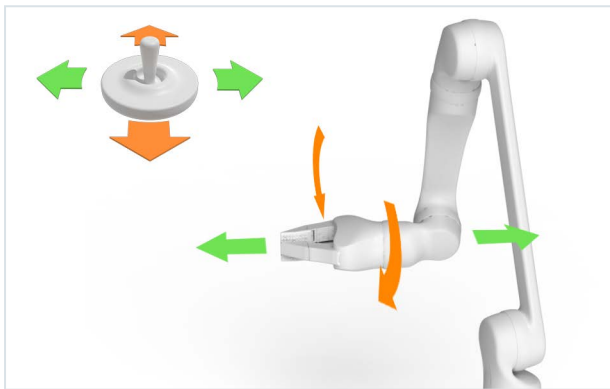
Kierunki ruchu joysticka zostały zaznaczone kolorem i naniesione na model ramienia. Obrót chwytaka wokół własnej osi będzie realizowany przez wychylenie joysticka odpowiednio w lewo i w prawo. W tym układzie kierunki reprezentowane przez sterownik są zbieżne z kierunkami ruchu chwytaka (rys. 198).



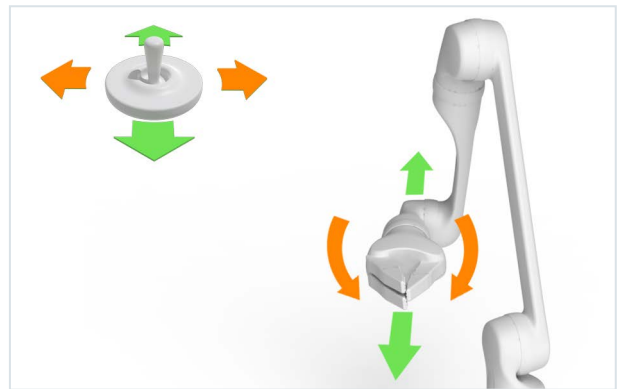
Rys.198: Mapowanie I.



Rys.199: Mapowanie I - błędne, chwytak obrócony 90 w lewo.



Rys.200: Mapowanie II - poprawione, naturalne.

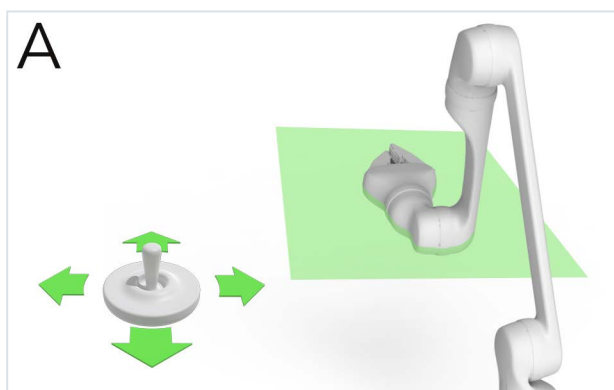


Rys.201: Mapowanie II - poprawione, naturalne.

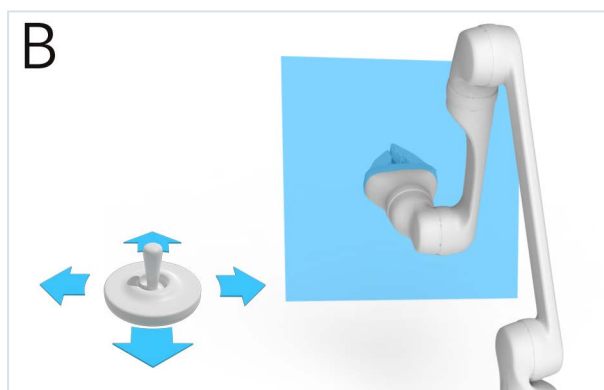
Aby uzyskać lepszą widoczność przedmiotu, który ma być chwytywany, chwytak został obrócony na płaszczyźnie poziomej o 90 stopni w lewo (rys.199). W związku z tym, kierunki ruchu sterownika i chwytaka są następujące: ruch joysticka do przodu oznacza przesunięcie całego „obiekta chwytaka” obróconego w lewo, a kierunki ruchu są rozbieżne ze stronami chwytaka. Aby obrócić chwytak wokół jego osi wzdłużnej w lewo (czyli w tym układzie „do tyłu, do siebie”), joystick powinien być wychylony w lewo zgodnie z pierwotną reprezentacją kierunków. W rzeczywistości obrót ten nie odbywa się wokół osi zielonej, lecz wokół osi pomarańczowej obróconej o 90 stopni w lewo. Czy bardziej intuicyjne byłoby wykonanie tego obrotu poprzez pociągnięcie joysticka do tyłu, zgodnie z oczekiwanym kierunkiem ruchu?(rys.200).

W przypadku, gdy chwytak został obrócony o kolejne 90 stopni w lewo, w stronę użytkownika, może to być wynikiem celowej zmiany lub automatycznej rekonfiguracji ramienia podczas ruchu (rys.201). Kierunki ruchu joysticka zostały zaznaczone kolorem i naniesione na model ramienia. Nadal ruch joysticka do przodu oddala ramię od użytkownika, a ruch do siebie przybliża je. Ruchy na boki są zgodne. Jednak oś obrotu chwytaka została odwrócona. Aby obrócić chwytak w tym samym kierunku co poprzednio (czyli „w lewo” według ilustracji „z lewej na prawą”), joystick należy wychylić w lewo.

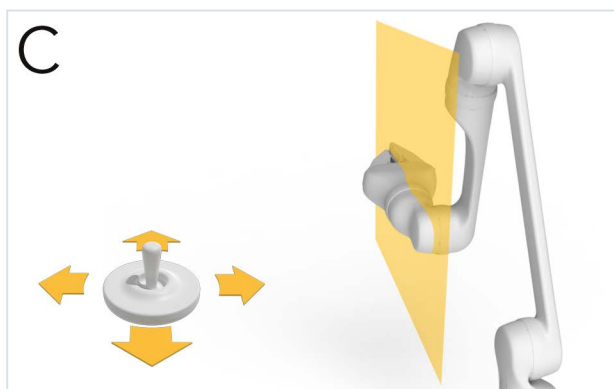
Podczas testu zaobserwowano, że niektóre ustawienia i transformacje w przestrzeni były wykonywane intuicyjnie, podczas gdy w innych przypadkach pojawiały się błędy, które skutkowały działaniem przeciwnym do zamierzonego. Chwile, w których urządzenie działało zgodnie z oczekiwaniami, były odczuwane jako ulga, natomiast w innych przypadkach towarzyszył stres i zniecierpliwienie. Jak zauważył Don Norman w swojej książce, aby uzyskać prawidłowy efekt użycia kontrolera, należy prawidłowo zmapować



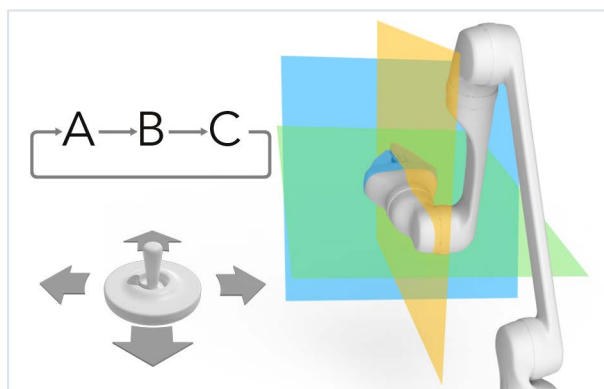
Rys.202: Ruch na płaszczyźnie poziomej.



Rys.203: Ruch na płaszczyźnie pionowej równoległej.



Rys.204: Ruch na płaszczyźnie pionowej prostopadłej.

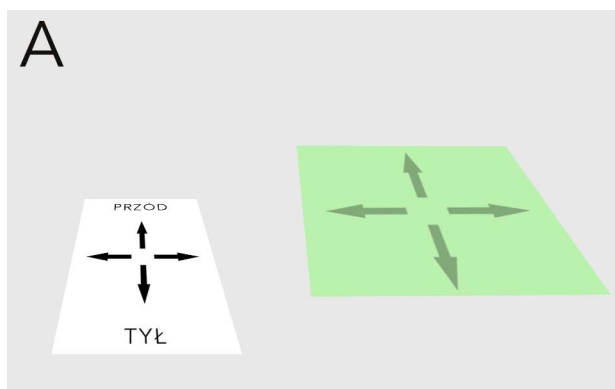


Rys.205: Zmiana powierzchni ruchu (zestawów ruchów).

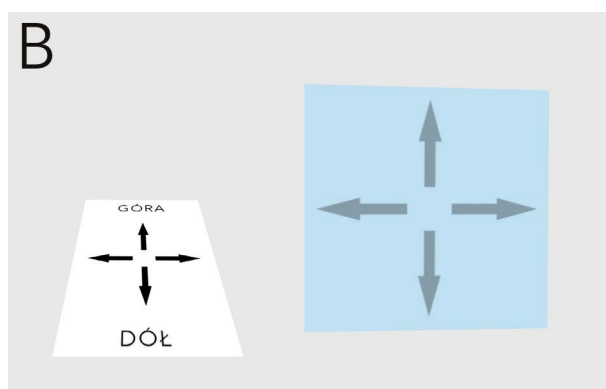
relacje¹¹ między kontrolerem a zachowaniem, które chce się kontrolować. Naturalne wydaje się mapowanie kierunków: góra/przód, tył/dół, prawo/przód (postęp), lewo/tył (regres). Aby przemieszczać chwytak w trzech wymiarach, potrzebna jest możliwość sterowania nim w trzech osiach/kierunkach: przód-tył, prawo-lewo, góra-dół. Przesuwanie chwytaka w dwóch pierwszych kierunkach odbywa się na płaszczyźnie poziomej (A), która zawsze jest równoległa do podłogi (rys.202). Poruszanie joystickiem w kierunkach przód-tył oraz prawo-lewo skutkuje przesuwaniem chwytaka w identyczny sposób. Aby unieść chwytak lub zbliżyć go do podłogi, należy użyć przycisku funkcyjnego i zmienić płaszczyznę ruchu (B) na prostopadłą do podłogi i równoległą do twarzy użytkownika. W tym układzie ruchy joysticka przód-tył oraz prawo-lewo będą skutkować ruchami

chwybaka góra-dół oraz prawo-lewo. Aby ponownie przesunąć chwybak do przodu (w kierunku od użytkownika), należy znów użyć przycisku funkcyjnego i ustawić poziomą płaszczyznę ruchu (A). Możliwa jest także zmiana płaszczyzny ruchu na prostopadłą do podłoża i prostopadłą do twarzy użytkownika (C). Wtedy ruchy joysticka przód-tył oraz prawo-lewo będą skutkować odpowiednio ruchami chwybaka góra-dół oraz przód-tył.

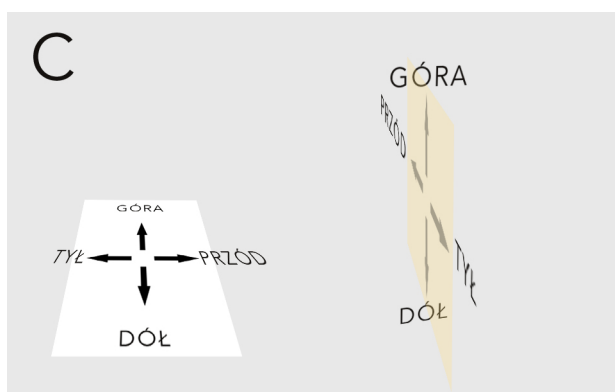
W tym momencie można dostrzec wzorzec mapowania kierunków ruchu chwybaka na kierunki ruchu joysticka. Chociaż z technicznego punktu widzenia jest to poprawne, niekoniecznie będzie intuicyjne dla każdego użytkownika. Jedna płaszczyzna ruchu joysticka może stać się jedną z trzech płaszczyzn ruchu chwybaka (rys.205). W łatwy sposób można to zobrazować, wyobrażając sobie płaszczyznę ruchów joysticka jako kartkę papieru leżącą na biurku przed użytkownikiem. W tej kartce kierunki przód-tył i prawo-lewo są rzeczywiste – joystick i chwybak przesuwają się w ten sam sposób (rys.206). Jeśli zmienimy płaszczyznę ruchu na drugą (B), intuicyjnie zaznaczymy góra-dół oraz prawo-lewo,



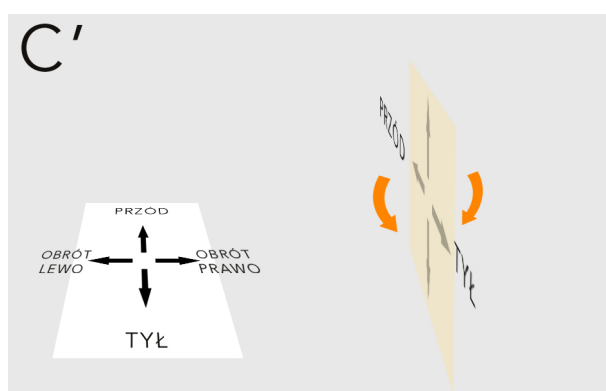
Rys.206: Kierunki ruchu naturalnie zgodne.



Rys.207: Kierunki ruchu przód-tył i/lub góra/dół wymagają interpretacji użytkownika.



Rys.208: W płaszczyźnie C każdy ruch wymaga interpretacji.



Rys.209: Zamiana na mapowanie naturalne.

mimo że płaszczyzna kartki jest pod kątem 90 stopni w stosunku do rzeczywistej płaszczyzny ruchu chwybaka (rys.207). W rzeczywistości ruch do przodu na kartce odpowiada ruchowi w górę, podczas gdy prawo-lewo nadal odpowiada rzeczywistym ruchom.

Z kolei, jeśli przełączymy się na trzecią płaszczyznę ruchu chwybaka (C), zauważymy, że rzeczywisty ruch na kartce w prawo odpowiada rzeczywistemu ruchowi chwybaka w przód, a ruch w przód na kartce to ruch chwybaka w górę (rys.208). W tym przypadku żaden z rzeczywistych ruchów ręki nie pokrywa się z rzeczywistym ruchem chwybaka.

Istnieje jednak wzorzec, którego nasz mózg może szybko się nauczyć i poprawnie nawigować urządzeniem w przestrzeni. Niemniej jednak, pewna niekonsekwencja może być uciążliwa i prowadzić do błędów. Pierwsza płaszczyzna (A) w 100% odpowiada rzeczywistości, a ruchy joysticka są wykonywane intuicyjnie. W drugim przypadku tylko 50% odpowiada rzeczywistości, a 50% wymaga transpozycji. W trzecim przypadku każdy ruch

wymaga transpozycji, ale cała sytuacja jest bardziej abstrakcyjna i nie miesza dwóch różnych systemów.

Dodanie możliwości obrotów chwytnikiem w prawo-lewo oraz obracających się osi w przestrzeni może skomplikować nawigację. Osoby bez dobrze rozwiniętej wyobraźni przestrzennej mogą napotkać więcej problemów z obsługą urządzenia lub mogą potrzebować więcej czasu na naukę. Może się również zdarzyć, że dla niektórych osób reprezentacja będzie inna i na rysunku ruch w prawo będzie odpowiadał ruchowi do tyłu. Niewątpliwie zagadnienie mapowania ruchów w takim urządzeniu jest bardzo ciekawe i wymaga dalszych badań na grupie użytkowników. Postanowiłem jednak nie zgłębiać tego tematu w tej pracy, skupiając się na problemach związanych z urządzeniem chwytającym, które można rozwiązać w inny sposób. Uporządkowanie reprezentacji kierunków w przestrzeni wydaje się być kluczowym zadaniem dla sprawnego posługiwania się ramieniem.

4.5 PODSUMOWANIE

Przeprowadzona praca projektowa składała się z kilku kluczowych etapów, z których każdy wniósł istotny wkład w ostateczne rozwiązanie.

W rozdziale pierwszym przedstawiono problematykę oraz dokonano charakterystyki istniejących rozwiązań wraz z sygnalizacją występujących problemów. Pozwoliło to na dokładne zrozumienie działania omawianego systemu technicznego.

W rozdziale drugim będącym etapem badawczym pracy, określono cele badawcze oraz metody. Rozdział zawiera przegląd z wykonanych badań z użytkownikami oraz drobiazgową ich analizę. Omówione zostały również testy porównawcze i użytkowe urządzeń. Rozdział ten dostarcza pokaźną ilość obserwacji i wniosków, które posłużyły do zdefiniowania szczegółowych założeń do projektu.

W rozdziale trzecim dokonano syntezy wniosków i hipotez projektowych z poprzednich rozdziałów. Określono architekturę nowego systemu oraz pogrupowano wytyczne do projektu wg obszarów których będą dotyczyć, czyli mechaniki, nawigacji oraz oprogramowania. Rozdział ten zawiera przyjęte założenia projektowe, wybór materiałów oraz zastosowane technologie.

Rozdział czwarty dokumentuje prace projektowe nad konstrukcją chwytaka. Przeprowadzone eksperymenty dostarczyły szybkich informacji zwrotnych, co pozwoliło na przejście do modelowania CAD z wstępnie przetestowanym już mechanizmem. Wypracowana konstrukcja choć w pełni funkcjonalna może zostać poddana dalszej optymalizacji zwłaszcza pod względem dostosowania do finalnej technologii produkcji urządzenia.

Rozdział piąty stanowi przedstawienie gotowego projektu wzorniczego multifunkcyjnego chwytaka do ramienia robotycznego. Zawarto w nim wizualizacje gotowego projektu oraz omówienie wszystkich aspektów nowego rozwiązania.

W opracowaniu tym udało się trafnie zdiagnozować przyczyny powtarzających się uszkodzeń i usterek ramion i chwytaków. Przeprowadzone analizy i badania wykazały, że użytkownicy korzystają z tych urządzeń w sposób dla siebie najbardziej wygodny, który nie do końca jest zbliżony z tym jak to sobie wyobrażali konstruktorzy. Zebrane wnioski doprowadziły do stworzenia zupełnie nowej formuły funkcjonalno-użytkowej dla takiego chwytaka. Obserwacje trudności w posługiwaniu się ramionami robotycznymi z jakimi

zmagali się użytkownicy doprowadziły do opracowania zestawu funkcji automatyzujących działanie ramienia. Implementacja ich w kodzie sterownika urządzenia wydatnie usprawniłoby posługiwanie się nową generacją urządzenia.

Konstrukcja, zastosowane materiały oraz usprawnienia użytkowe przyczyniły się do powstania oryginalnej stylistyki urządzenia. Pomimo własnego charakteru estetyka urządzenia harmonizuje z istniejącym ramieniem, które pozostało niezmienione.

Pozytywnie oceniam pomysł aby wykorzystać programowalny zestaw Lego Mindstorms do budowy wczesnych prototypów. Dało to możliwość budowy konstrukcji i natychmiastowego testowania ich. Możliwość weryfikacji poprawności algorytmów funkcji automatyzowanych był możliwy dzięki możliwości łatwego programowania i testowania rozwiązań na zbudowanych konstrukcjach.

Zagadnienie mapowania kierunków ruchów zostało opracowane w ograniczonym zakresie i tylko w warstwie teoretycznej. Niewątpliwą wartością dla projektu było trafne zdiagnozowanie istotności tego obszaru dla kształtowania doświadczenia użytkownika. Uważam, że zagadnienie to zasługuje na głębsze opracowanie oraz wykonanie badań z użytkownikami.

Nie udało się przetestować z użytkownikami ostatecznej formy projektu. Wymagałoby to zaangażowania w projekt - realizowany niekomercyjnie - zespołu inżynierów mechaników i programistów. Potencjalne koszty przygotowania działającego prototypu urządzenia i oprogramowania oraz testy wielokrotnie przekraczałyby moje możliwości finansowe. Jednakże tylko taka forma walidacji projektu może dać prawdziwą informację zwrotną na temat jakości wykonanej pracy projektowej.

Udało się stworzyć rozwiązanie odpowiadające na realne potrzeby użytkowników, a zaprojektowane urządzenie jest nośnikiem unikalnych cech, których obecnie stosowane chwytaki nie posiadają.

Realizacja tego projektu momentami była dla mnie bardzo trudna, ale zarazem przyniosła mi wiele satysfakcji. Konieczność przekraczania własnych ograniczeń, rozszerzania zasobu wiedzy i umiejętności aby udowodnić, że można zrobić krok dalej, zrobić coś lepiej, powodują że praca nad każdym nowym projektem jest jednocześnie pracą nad sobą samym.

Rozdział **5**

PROJEKT WZORNICZY





Rys.210: Ramię z chwytakiem



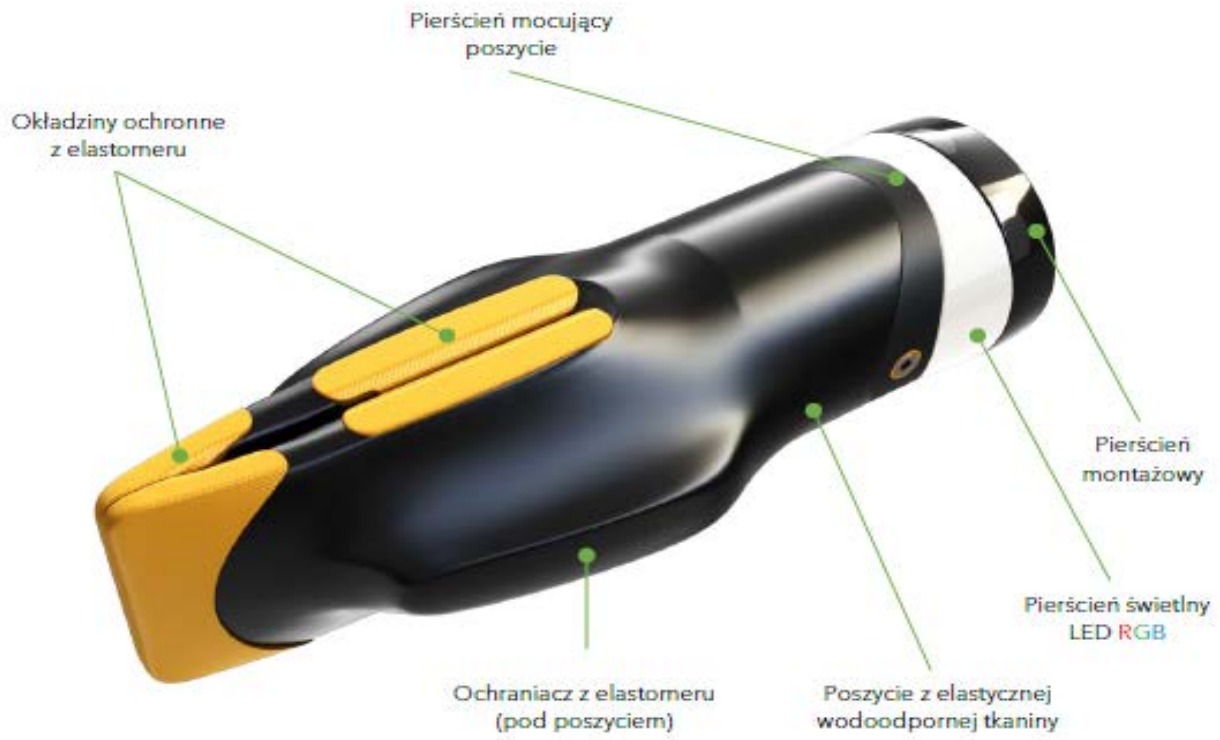
Rys.211: Chwytek



Rys.212: Obrót o 90 stopni.



Rys.213: Widok z perspektywy użytkownika.

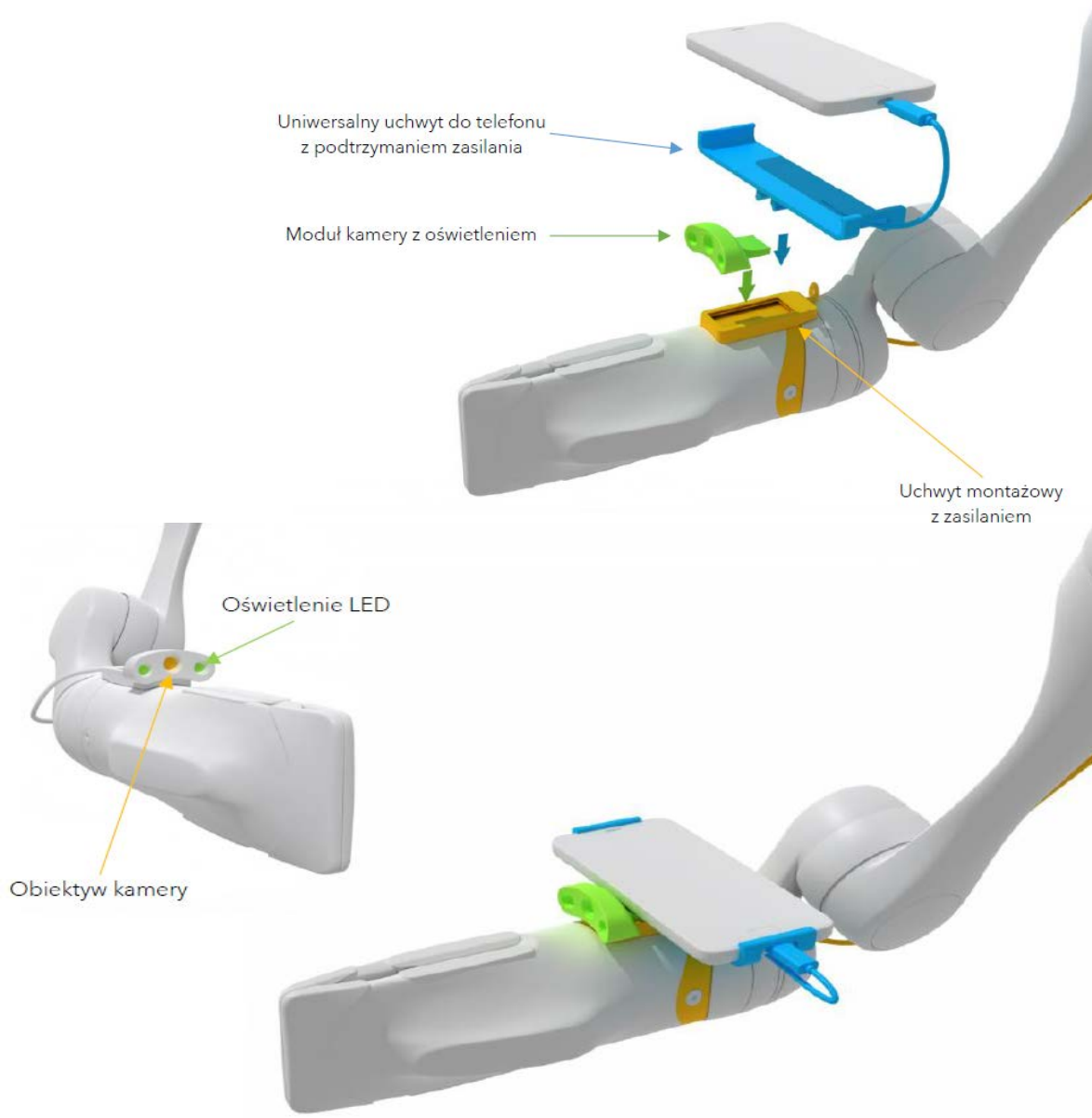
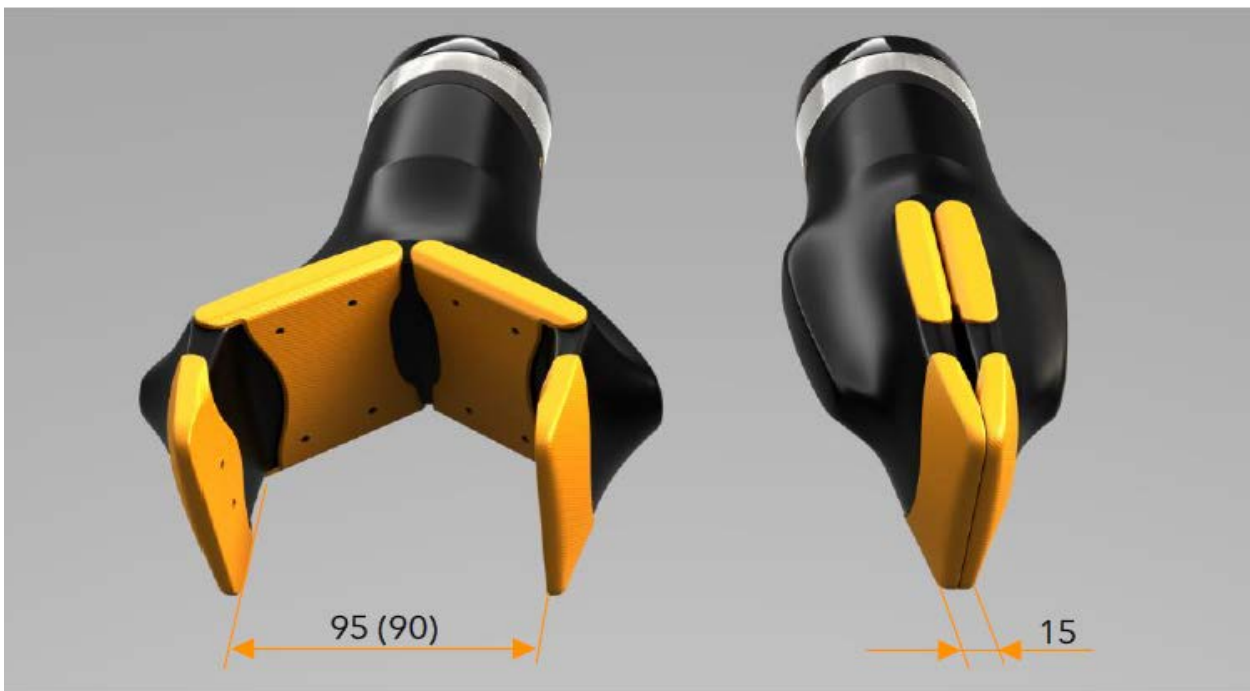


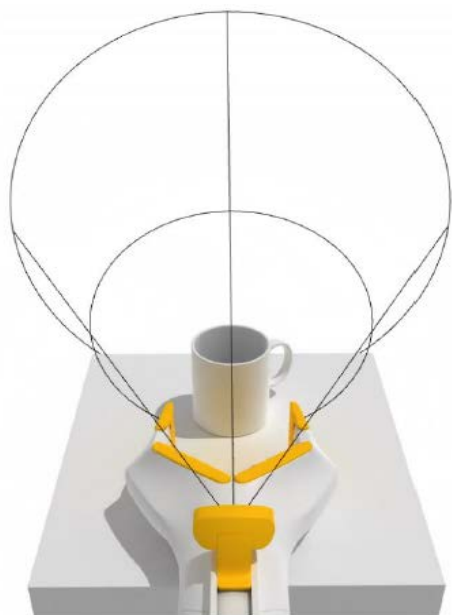


Rys.214: Chwytek otwarty i zamknięty.



Rys.215: Otwarcie/zamknięcie chwytaka nie wpływa na zmianę odległości od blatu.



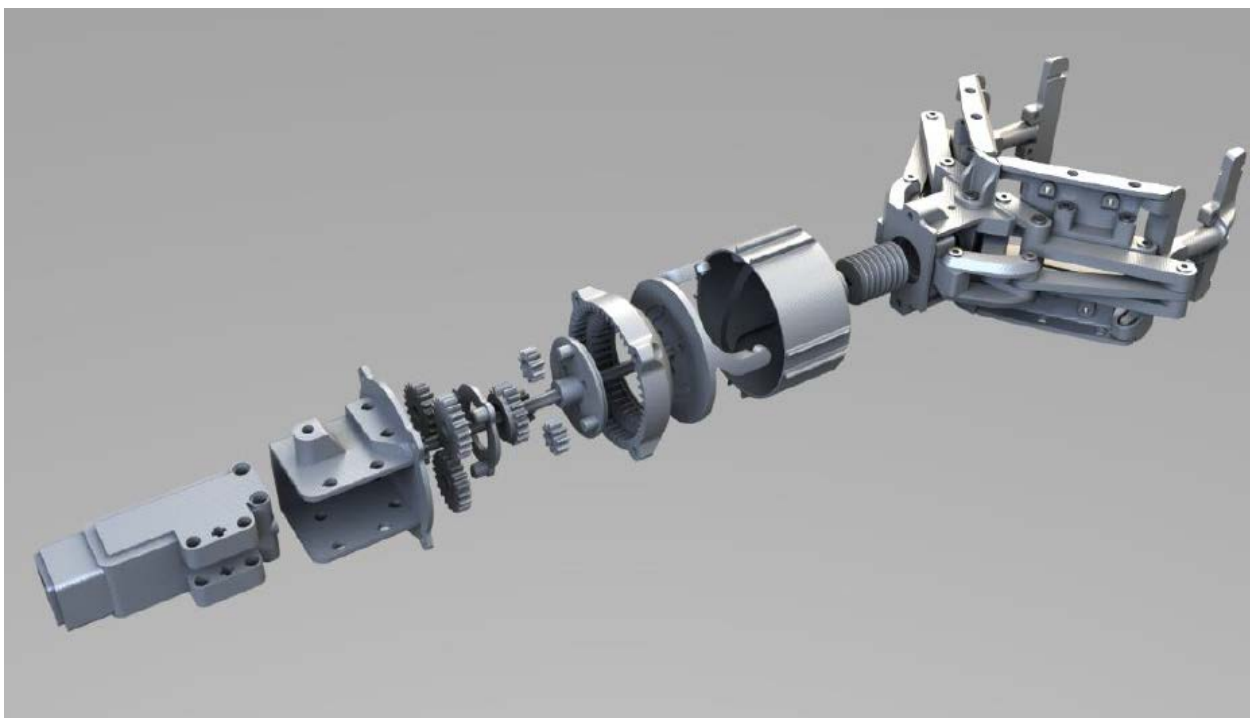
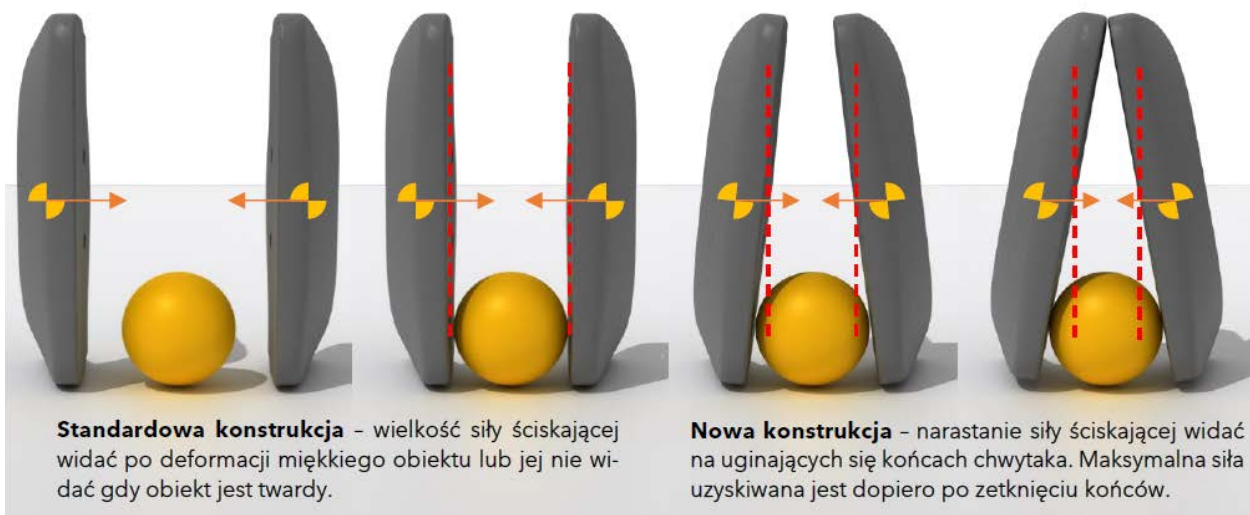


Wizualizacja stożka widzenia kamery przed chwytakiem. Obserwowanie obrazu na tablecie przez użytkownika znacząco ułatwi mu precyzyjne nacielenie chwytaka na obiekt.



Korzystając z kamery i zasięgu ramienia można obserwować otoczenie dookoła siebie bez poruszania wózkiem. Można spojrzeć na świat z perspektywy żabiej lub bociąniej, zajrzeć za najbliższy róg, pomóc szukać czegoś co wpadło w trudno dostępne miejsce. Można zajrzeć pod regał lub łóżko, do lodówki, do pralki, do szafki – słowem eksplorować najbliższe otoczenie w zupełnie nowy, niedostępny dotąd dla użytkownika sposób.





Materiał konstrukcji: PLA, PETG i TPU

Elementy złączne: śruby metryczne cynkowane M3, M4, M5

Przełożenie przekładni: 18/1

Minimalny moment napędowy silnika: 8 Ncm

Prędkość obrotowa silnika: 240 obr/min

Zasilanie: 9V

Maksymalna szerokość / średnica chwytanego obiektu: 95mm

Minimalna szerokość / średnica chwytanego obiektu: brak

Maksymalny udźwig konstrukcji chwytaka: 2kg

Ciężar własny (bez silnika): 0,45kg

Książki:

- John J. Craig, *Wprowadzenie do robotyki: mechanika i sterowanie*, Warszawa 1995
- PN-EN 60529:2003, *Stopień ochrony obudowy sprzętu elektrycznego*
- Marta Makowska, *Analiza danych zastanych. Przewodnik dla studentów*, Warszawa 2013
- Józef Pieter, *Ogólna metodologia pracy naukowej*, Ossolineum, 1967
- Apanowicz Jerzy, *Metodologia ogólna*, Gdynia 2002
- Donald A. Norman, *Design na co dzień*, Kraków 2018
- Donald A. Norman, *Wzornictwo i emocje*, Warszawa 2015
- Karen Gadd, *TRIZ For Engineers: Enabling Inventing Problem Solving*, John Wiley & Sons, Ltd 2011
- Cliff Kuang, Robert Fabricant, *User Friendly: How the Hidden Rules of Design Are Changing the Way We Live, Work, and Play*, MCD 2019
- Krug Steve, *Don't Make Me Think*, Pearson Education (US) 2013
- m.technik*, numery z lat 2019-2023, Wydawnictwo AVT
- Irene pereyra, *Universal Principles of UX*, Rockport Publishers 2023
- Jon Yablonski, *Laws of UX: Using Psychology to Design Better Products & Services*, O'Reilly Media 2024
- Roberto Verganti, *Design - driven innovation*, Harvard Businee Press 2009
- Izot B. Lityniecki, *Spotkanie z bioniką*, Wiedza Powszechna 1974
- Grzegorz Dudek, *Podstawy programowania wykład (PDF)*, Wyższa Szkoła Technologii Informatycznych w Katowicach, Katowice 2016
- A. Kaufmann, *Inwentyka metody poszukiwania twórczych rozwiązań*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne 1975

Źródła internetowe:

- <https://www.exxomove.de/>
- <https://accreea.com/pl/>
- <https://kinovarobotics.com/>
- <https://franka.de/>
- <https://www.fraunhofer.de/en.html>
- <https://www.festo.com/>
- <https://www.kuka.com/>
- <https://www.universal-robots.com/>
- <https://schunk.com/>
- <https://www.care-o-bot.de/>
- <https://www.creativemachineslab.com/jamming-gripper.html>
- <https://3dconnexion.com/>
- https://pl.wikipedia.org/wiki/Konfiguracje_osobliwe
- <https://robotyka.pl/poradnik-ile-osi-potrzebuje-moj-robot>
- <https://www.youtube.com/@AutoMotoTV>, rozmowy z Chris Bangle, Adrian van Hooydonk, Holger Hampf
- <https://www.frankstephenson.com/>
- <https://scottrobertsonworkshops.com/h2dr/>

ENGLISH VERSION

Introduction

Assistive technologies refer to a class of technologies designed to increase the independence of individuals with disabilities. This term encompasses a wide range of devices, from simple tools like walkers, crutches, wheelchairs, glasses, and prosthetics, to more complex devices such as hearing aids, memory support systems, and advanced telecommunication systems. In some cases, assistive technologies also include infrastructural solutions that facilitate mobility in urban environments for wheelchair users or the visually impaired. Assistive technologies have accompanied humanity for a long time. Some of these technologies have become so familiar that they are now considered entirely natural. For a long period, these solutions were based on simple mechanics. However, today's scientific advancements and the simplified access to increasingly sophisticated materials, along with modern design and manufacturing tools, have led to the development of a branch of assistive technology that incorporates robotic solutions. These require significant computational power and technologically parallel industrial systems.

A relatively niche but evolving field within this sector is robotic assistive arms. These devices are mounted onto electric-powered wheelchairs and may be integrated with them in terms of shared control systems and power supplies, or they can function independently. Robotic assistive arms provide individuals with limited mobility, cerebral palsy, or paralysis the opportunity to regain partial independence in their daily lives. Such devices also alleviate the workload of caregivers assisting these individuals. With the help of this invention, users can independently perform simple daily activities such as drinking, eating, opening doors, carrying objects, and even brushing their hair or teeth. However, this field remains narrow and underdeveloped, and both devices and software will likely continue to undergo systematic improvements.

This study is the result of the author's personal experience working on the development of a robotic assistive arm project, as well as observations of user experiences. It also reflects personal insights into the quality of the functional outcomes achieved and conceptual approaches to improving them. A key observation is that the mere application of advanced technology does not necessarily meet users' needs and may, in fact, introduce a range of entirely new usability challenges.

The goal of this thesis is to design a grasping device that addresses a series of observed issues faced by users of robotic assistive arms. There are numerous types of robotic arms and grippers, widely used in both science and industry. At the time of writing, only two commercially available robotic arms designed for mounting on wheelchairs existed. The manufacturer of the first, KINOVA, is a global pioneer in this field. The author was invited to contribute to the development of the second arm, designed by ACCREA, with the project's goal being to resolve the functional and usability issues of the existing product while providing users with more choices for such devices.

The motivation to attempt a new design stemmed from reflections on the ACCREA device, which—like the KINOVA model—did not fully address the observed needs of users. Despite initial potential for introducing improvements, the overall functionality of the system ultimately remained unchanged. An analysis of the materials collected during the project allowed for the development of new design principles, which served as the foundation for the creation of a new device.

Origins

Several years ago, I was invited to participate in a project aimed at developing a robotic arm for the German market. The arm, designed to be mounted on an electric wheelchair, was intended to assist its users in performing certain daily tasks. Dr. Bartek Stańczyk, who led the project, invited me to collaborate, and the engineering work was carried out by his company, Accrea Engineering. The device was commissioned by Exxomove.de, and the specification came from the German Ministry of Health.

My involvement in this project provided me with a comprehensive understanding of the challenges faced by paralyzed individuals and the positive impact that a robotic assistive arm can have on their lives. Previously, this field had been outside my area of interest, and I had not encountered people with such severe disabilities. Entering this project required me to immerse myself in a new and fascinating domain. It quickly became clear that paralysis is not just a problem for the affected individual but also for their family, friends, and caregivers. It is a challenge that evolves over time, changing with the person's age as well as the aging of their caregivers. These individuals, depending on the degree of disability, are almost entirely dependent on the help of others, and caring for them is a demanding, 24-hour-a-day task.

Users of robotic arms range widely in age, provided they have some ability to move and control an electric wheelchair. This makes for a broad age spectrum. These users are typically severely disabled. Some can still perform certain tasks with their own hands, albeit in a limited capacity, using a tablet-based control interface. In some cases, users control their wheelchairs with manipulators operated by cheek muscles, chin movements, head motions, or even mouth movements.

My role in the project was to design the architecture of the arm's components, set up the kinematics, build surface models in CAD, and create 3D sketches of the gripper. Naturally, this work was done in close collaboration with engineers and designers, each responsible for their part of the project, ensuring ongoing mutual consultation throughout the development process. Detailed project guidelines were provided by the client in the form of a specification document. This document included information on the dimensions of the arm in both its folded and extended states, its range of motion, gripper design, degrees of freedom, mounting methods for the wheelchair, control mechanisms, and many other technical details. It also specified a set of tasks that the user should be able to perform with the arm.

These tasks included:

- Picking up a cup from a table and drinking from it.
- Picking up a straw, inserting it into a cup, and drinking through it.
- Grabbing a tennis ball suspended on a string (used as an aid for opening doors at home).
- Moving a one-liter water bottle.

However, the initial satisfaction and sense of accomplishment from creating something that could significantly improve the quality of life for many individuals quickly dissipated. This was due to a cognitive dissonance I experienced while participating in the arm's user tests. I was also given access to video footage of other tests conducted with patients in Germany. Despite meeting all the project requirements, I observed that our users struggled significantly with operating the arm effectively.

Among the project team, there was a prevailing belief that the users simply needed to learn how to use the arm and that, over time, the problems would disappear. I then turned to promotional materials from the KINOVA company, where everything appeared perfect. The users seemed happy and proficient, able to do much more with their arm than our specification required, and they did so with great dexterity. However, upon closer examination of the filming and editing, it became apparent that critical moments, such as positioning the gripper relative to objects, were omitted. The creators highlighted the best features of their product, portraying it as a versatile and reliable assistant for daily life. When watching these materials without technical insight or critical reflection, one might get the impression that the device is almost intelligent and incredibly easy to use.

The manufacturer had also posted several sponsored videos on the Internet, filmed from the perspective of a vlogger who was a satisfied user of the arm. It had become socially acceptable for manufacturers to present their products in a way that saves the viewer's time while slightly embellishing reality. This makes it easier for them to attract a broader audience with a short promotional spot.

In contrast, the unpublished video footage of tests with Accrea's arm revealed a

completely different reality. These were single, long takes, recorded with one camera, without cuts. It was clear that users performed simple tasks very slowly, making a variety of mistakes. It became necessary to search the Internet for other videos of the KINOVA arm, posted by individuals who were at least not officially affiliated with the manufacturer. The search focused mainly on long, unedited amateur recordings. In these, I found confirmation of my suspicions. The faces of the users showed similar tension, expressions, and emotions as seen in the Accrea tests. There was visible effort, many mistakes, and numerous failures.

The conclusion drawn from this video review was that we had successfully created a product fully competitive with the JACO arm while replicating its key flaws. It became clear that, in its current form, it was impossible for such a device to work as smoothly and efficiently as shown in the marketing materials. There was also an ethical aspect that troubled me. There is a significant risk that some individuals may trust the advertising, receive the device, and, after investing considerable time in learning to use it, realize they cannot do what the people in the videos are doing. What impact will this have on them? I believe my concerns are somewhat justified. I saw great optimism and determination among the testers to learn how to use the device.

That is why I decided to investigate this issue further, to study and understand it. I believed it would lead me to a path toward an effective solution. I knew that due to the procurement requirements, my work and its outcomes could not be considered by the manufacturer. Anything that did not precisely align with the client's specifications would be rejected through bureaucratic channels.

Nevertheless, I decided to take on this challenge. There was a slim chance that, by developing a much more user-friendly solution, it might be possible to influence changes in procurement requirements and introduce my product, thus surpassing the competition. I didn't know where the research results would lead me, nor was I sure if I would be able to address all the problems I encountered. Ultimately, I wasn't certain if I would be able to propose something significantly better that would truly help people. This dissertation and the project it presents are the results of my efforts in pursuit of that goal.

Chapter 1

ANALYSIS

This chapter provides an overview of what a robotic assistive arm is, the system it is part of, and how it is operated. It also includes a comparative test of two devices and the conclusions drawn from this experiment. The analysis is based on the two aforementioned devices. In principle, their functionality is very similar, with differences in construction that may largely go unnoticed by the user. Therefore, the text will refer to both arms interchangeably, highlighting the unique features of each where relevant. The goal of these efforts is to present a comprehensive understanding of how these types of devices function and to identify their strengths and weaknesses.

1.1 Characteristics of Robotic Arms

The assistive arm system consists of a gripper, an arm integrated with a control unit—a computer, a battery, and a controller. In this case, the controller is a basic joystick provided by the company Kinova, which will also be referred to as a control device. Depending on the user's preference, the arm can be operated with the dedicated joystick or the controller used for maneuvering a wheelchair.

To change the gripper's position in space, the user operates the joystick and buttons. The joystick's movement directions in the horizontal plane correspond to the gripper's movement directions. During the movement, the arm's computer calculates, in real-time using inverse kinematics, the relative positions of all its components, ensuring that the gripper reaches the desired point in space. It is quickly evident that the number of joystick movements is less than the possible movements of the gripper, which introduces certain complications in operating the device, as will be discussed later in this work. Both devices weigh approximately 5 kilograms, with a load capacity of 1.5 kilograms. Both manufacturers rate the water resistance of their designs as IPx2.

KINOVA

The JACO assistive arm, produced by the Canadian company KINOVA, features six degrees of freedom, meaning there are six points at which the arm segments can move relative to each other. Electric drives, based on stepper motors and harmonic drives, are located at these points. The gripping component, sometimes referred to as a hand, features three independent two-phalanx fingers, each with its own drive. Users can choose how the fingers will close, either using a pincer grip or a triple jaw grip. Software allows independent control of each finger. All functions of the arm are controlled via the standard controller included in the kit. The large black housing components are made from thin-walled carbon fiber laminate with a high-gloss finish. The light gray parts are manufactured using small-series polymer casting in hardening molds. Other structural components are CNC-machined aluminum. This selection of materials and production technologies results in a very favorable strength-to-weight ratio and allows for small-scale or single-unit production.

A distinctive feature of the KINOVA arm is its aesthetic and the way surfaces are shaped. The rounded, organic, edge-free shape is directly influenced by the laminate molding technology and the strict technical parameters required for producing such parts. KINOVA holds several patents for the technical solutions used in the JACO arm. The arm is available in several degrees-of-freedom variants, with various grippers and control devices. The version of the JACO arm seen in the images is used by Airbus for testing on-board aircraft instruments due to its precision. This same variant is also applied as an assistive arm in wheelchairs, offered by companies specializing in equipment for people with disabilities.

ACCREA

The Polish company ACCREA Engineering offers assistive arms in two configurations called ARIA and BATEO. The difference between these arms lies in their drive systems, which lead to slightly different shapes, though the design language of both configurations remains consistent. Structurally, the ACCREA arm is quite similar to the KINOVA arm, as it was created as a direct alternative to the JACO arm used in wheelchairs, which previously had no competition. As such, it was designed according to the same principles as KINOVA and employs the same production technologies.

Purchasing this type of equipment, classified as rehabilitative, usually involves government or foundation funding. Companies offering such devices must therefore operate within tender processes. The tender requirements, due to the lack of competition, have naturally been shaped to match the KINOVA product specifications. ACCREA, seeking to offer an equivalent product, had to consider all these conditions in designing its own arm. This is apparent at first glance. The most significant factor influencing the similarity to the Canadian arm is the thin-walled carbon fiber laminate technology, which dictates the shape and thickness of sections, the surface forming process, and prevents the creation of holes or edges.

To avoid patent infringement, the kinematics differ, and the gripping component was entirely redesigned. It features one drive and three symmetrically actuated two-phalanx fingers. The external parts are made using the polymer casting method in hardening molds, while the internal structure is CNC-machined aluminum. The ACCREA arm is being developed for several specialized applications, including a version designed to assist with laparoscopic surgeries. Both the BATEO and JACO arms operate very similarly, as intended, and have comparable dimensions and performance characteristics. Despite differences in the design of the grippers, from the perspective of a wheelchair user, the arms function in much the same way in most cases. One exception is the specific pincer grip offered by JACO using two of its three fingers, but this is only available in more advanced controller versions with a screen. This is not considered a critical functionality. In exchange, the ACCREA arm has fingers that are less prone to damage.

1.2 USER INTERFACE

The user interface consists of a joystick as the command tool, an arm as the effector, and a screen providing graphical visualization of the possible movement directions of the gripper. It is possible to use the native controller for driving the wheelchair or add a dedicated controller for operating the arm, such as a joystick, functional keyboard, pad, or another appropriately customized interface. The JACO arm can be ordered with a standard controller, which includes a joystick, seven buttons, and eight indicator

LEDs. The joystick has three degrees of freedom: two are related to horizontal plane movement, and the third is the joystick's vertical axis rotation. This allows for simultaneous movement of the gripper in three dimensions. The joystick's rotational function can be assigned to either vertical movement (up-down) or wrist rotation (left-right) of the gripper.

Accrea does not offer a dedicated controller for the BATEO arm, but any motion controller can be connected to the control unit. The selection of an appropriate controller and system calibration in both cases involves the user and rehabilitation equipment experts during a testing session. While using the device, the user focuses on the arm's end effector - the gripper, the controller, and the object they wish to interact with. Commands are issued through tactile feedback, while information about the results of the actions reaches the user through visual and auditory cues. The user visually assesses whether the gripper's position in space is correct and whether the gripping force is sufficient to, for example, lift and safely transport an object to another location. The gripping force is evaluated based on outcomes such as whether the object slips from the gripper, is deformed, or emits any disturbing sound. The device's motors emit sounds characteristic of mechanical gears, and after familiarizing oneself with the device, the intensity and pitch of these sounds provide additional information regarding the speed at which the gripper moves. This auditory feedback is useful during training on how to use the joystick, where the degree of joystick deflection affects the motor speed. The auditory signals help develop a sense of the relationship between speed and the distance the gripper needs to move. If the user's controller operates in a binary (on-off) fashion, the maximum speed of the arm's motors is limited to avoid overloads caused by sudden starts and stops.

As mentioned earlier, the number of degrees of freedom of the joystick or the number of controller buttons may be fewer than the degrees of freedom of the gripper. This often happens because the user's hand dysfunctions can prevent the use of an optimal controller for operating the gripper. The situation becomes more complicated the simpler the controller the user can manage. In simple terms, to move a powered wheelchair, the minimum requirement is a controller composed of three buttons. One of these buttons acts as a functional button. Each press of the functional button changes the functions assigned to the other two buttons. The buttons are monostable, meaning that the wheelchair moves only while the user holds down a button. For example, button A controls forward movement, and button B controls backward movement. When the functional button F is pressed, the functions of buttons A and B switch to steering the wheelchair: button A controls turning right, and button B controls turning left. Another press of button F restores the forward and backward functions to buttons A and B. Thanks to the ability to change the functions of two out of three buttons, basic wheelchair control is achievable. A similar system can be applied to the arm, where switching the functions of the buttons enough times allows operation of all the arm's functions. This is technically feasible but takes more time. From a practical standpoint, it is preferable for the user to have a controller with five buttons. Such a controller would allow the use of four buttons to move the gripper on one plane in two directions, enabling simultaneous movement in the forward-backward and left-right directions without needing to switch functions. The controller does not need to be a single object. It can be divided into two groups of buttons—one for the right hand and another for the left—or further distributed. The simple joystick with one button, used in tests, meets the requirements described above. The user visually tracks the gripper's movement, controlling its position while avoiding collisions with the environment. When they wish to change the set of directions for the gripper's movement, they glance at the hint screen and press the

functional button until they find the set of arrows corresponding to the movements they wish to make. To simplify the arm's operation, both manufacturers offer an additional graphical interface that uses arrows to indicate the current working state and available movement directions of the device. Kinova offers a dedicated small screen, while Accrea provides this functionality through a mobile application. In both cases, the arm's visualization on the screen is static, with only the arrows changing as the functional button is pressed. The graphic representation of the arm on the display does not correspond to its actual configuration, forcing the user to independently translate the arrows into real directions of arm movement in the space ahead. Some arrow configurations may lead to misinterpretation of the arm's movement directions. The functional button operates in a closed loop, meaning that to select a previously used function, the button must be pressed multiple times until the function reappears on the screen. There is also no contextual graphical information showing the previous and next functions.

1.3 NAVIGATING THE GRIPPER

The control of the robotic arm is based on a Cartesian, three-dimensional coordinate system. The user, using a controller, moves the device in three dimensions. The point at which the gripper is mounted, and which the user controls, has six degrees of freedom. This means that movement is possible in three directions, and rotations are possible around the three axes: X, Y, and Z. There is also a function that allows changing the location of the point around which the gripper rotates.

Using the controller, the gripper can be moved forward-backward, left-right, and up-down, as well as rotated around each of the three axes. The gripper can rotate around its own longitudinal axis by any angle, including multiples of 360 degrees. After turning on the device with a button on the housing, the arm moves from the parked position (on the side of the trolley) to a pre-programmed ready-to-work position. This position can be configured during a test session. Then, using the controller, the user can move the end of the arm, where the gripper is located, in any direction within the arm's range of motion.

The Kinova controller allows the selection of a joystick with 2 or 3 axes of movement, as well as several modes of gripper control:

- Translation mode
- Wrist mode
- Drinking mode
- Finger mode

The first mode is referred to by the manufacturer as the translation mode. It enables movement of the gripper along three axes/directions: forward-backward, left-right, and up-down. In wrist mode, the user controls the position of the gripper around a virtual reference point located a few centimeters in front of the gripper's fingers. This point remains fixed until the mode is switched back to translation mode.

Drinking mode works by positioning the virtual wrist rotation point at an arbitrary location on the edge of a glass held by the gripper. This allows the glass or bottle to be tilted relative to the point of contact with the user's mouth.

In finger mode, the user controls the opening and closing of the gripper's fingers. In the Jaco model, the user can also choose whether to close two or three fingers simul-

taneously. In each mode, a two-axis joystick user switches between movement sets to operate the remaining gripper movements. It also happens that only 2 of the 4 available movements are activated, and the user must read which movements these are from the arrows on the display. JACO's manufacturer warns that under certain conditions, the robot may behave differently from what is described in the manual. This is due to singularity avoidance algorithms, which prevent the arm from locking or exhibiting unexpected behaviors in certain configurations. This function works excellently in the BATEO arm, and its operation is almost imperceptible to the user.

All movements that the BATEO gripper can perform are presented in a table, totaling 14: 12 gripper movements and 2 finger movements (opening and closing). Therefore, the user must issue a total of 14 different commands. A two-axis joystick allows for 4 commands (performing 4 movements), which are marked in the table with colored fields and letter notations. To execute all 14 commands, 3.5 joysticks are needed ($14/4=3.5$), or the function of one joystick must be changed four times. In this configuration, after the fourth change, two joystick movement possibilities remain unused. Each function switch assigns a new set of four gripper movement directions. This is done using a single button with an assigned menu that operates in a closed loop.

Moving the gripper in the first two directions takes place on the horizontal plane (A), which is always parallel to the ground, with the gripper positioned parallel to the frame of the trolley. Moving the joystick forward-backward or left-right results in identical gripper movement. To raise or lower the gripper, a function button must be used to change the movement plane (B) to one perpendicular to the ground. In this setup, pairs of joystick movements, forward-backward or, depending on the configuration, left-right, will correspond to gripper movements up and down. To move the gripper forward again (away from the user), the function button must be used, and the horizontal movement plane (A) must be set.

Control of the gripper in wrist mode occurs in the same way. After switching the function, arrows appear on the display to illustrate the gripper's possible movements. The controller provided by Kinova, thanks to its complex design rich in buttons and a three-axis joystick, allows for several additional arm movement and adjustment functions.

In the BATEO arm, navigation is slightly simpler. Gripper movement in the horizontal plane occurs the same way as in JACO. The controller software, developed by ACCREA engineers, does not require the use of work modes (although this option exists). The advantage is that the loop for switching directions is single-level and shorter than in JACO.

In both cases, efficiently navigating the arm with the gripper without pictorial instructions is almost impossible, and using the instructions in their current form only slightly reduces the number of mistakes made but also slows down the entire process due to the need to constantly shift focus between the arm and the display.

1.4 OBJECT GRASPING

To grasp an object, such as a ceramic mug, it is essential to properly align the gripper relative to the mug. If the gripper is not positioned parallel to the surface on which the mug stands, the mug may tilt during grasping, potentially spilling liquid onto the gripper. Similarly, when attempting to place the mug back, if its base is tilted relative to the surface, the mug might fall, causing its contents to spill. Additionally, while the gripper's fingers are closing on the mug, it may shift position. This could result in the mug either

aligning symmetrically between the gripper's fingers or being pushed out of the grip entirely. These phenomena occur due to inadequate positioning of the gripper relative to the object. Another challenge arises when trying to pick up a small object, such as a straw from a table surface. In this case, the gripper must be positioned with its fingers pointing vertically downward and brought close to the tabletop. Here, a characteristic feature of the gripper's finger movement becomes evident. From a practical perspective, one of the disadvantages of this, and many similar gripper designs, is the forward movement of the fingers as they close. The gripper itself remains stationary, but the fingers describe an arc, thereby increasing the overall length of the gripper and decreasing the distance to the surface. If the user first opens the fingers and then precisely places them on the table, closing the fingers would result in a collision with the surface. This causes tension throughout the arm and between the fingers and the surface.

The arm's construction is robust and precisely engineered, but the gripper's mechanism cannot compensate for such tension. As a result, the finger movement will either stop when in contact with the surface, the surface may bend, or the fingers may become damaged. On the other hand, if the user leaves a gap between the gripper's open fingers and the surface, the fingers are likely to close over the straw, next to it, or push it away. There is an intermediate approach where the fingers are opened slightly wider than the width of the straw, the gripper's rotation angle is adjusted to the straw's position, and the fingertips are precisely placed against the table. By following these steps, grasping the straw becomes almost always successful.

In the grippers under consideration, the distance between the extreme vertical positions of the fingertips is approximately 16 mm, as demonstrated in the ACCREA gripper diagram. The finger rotation axes are located 62 mm apart. The user sets the open gripper at a distance of 16 mm from the surface. During the closing motion, when the fingertips are positioned vertically, they pass the rotation axis points of the fingers. This is the point at which the gripper's total length is at its maximum, and the fingertips touch the table. Beyond this point, the length of the gripper begins to decrease again, and the fingertips move away from the surface. The extreme furthest and nearest fingertip positions are about 5.5 mm apart in a straight line.

The consequences of these two phenomena are difficulties in grasping flat objects with a width or diameter below 62 mm. For the same reason, there are collisions between the fingers and the surface when closing the gripper on objects larger than 62 mm. Grasping a straw without using the technique described earlier is virtually impossible, as its diameter is approximately 6 mm, meaning it fits almost entirely into the space where the gripper no longer reaches the table. Collisions with the surface cause strain on the finger construction, overload the drives, and introduce tension throughout the arm's structure. The "lengthening fingers" exert a force that pushes the gripper upwards. This is also a frequent cause of damage to small, delicate objects.

Manufacturers address this issue in two ways. In the newer version of the ACCREA gripper, flexible finger tips are used. As a result, the fingers give way to pressure, sliding across the surface during closure, transferring only a small part of the tension to the rest of the structure. Unfortunately, due to the high flexibility of the material from which the fingers are made, objects grasped in this way tend to slip out of the grip. Over time, the flexible material also begins to wear down. KINOVA has posted a tutorial on their YouTube channel demonstrating how to properly lift a straw from a surface.

In cases where it is not possible to design a structure without the identified flaws, one way to bypass the undesirable characteristics of the finger movement geometry is to allow the gripper to grasp small objects from the side. In this way, the fingers would move parallel to the surface. In the existing designs, this is not possible, as the gripper's

housing extends beyond the outline of the fingers.

The complexity of the operations required to grasp small everyday objects is similar to the work of a crane or excavator operator, where the mass and scale of the objects being moved are measured in hundreds or thousands of kilograms, making the complexity of the operations justifiable. In the scenarios described, visibility is another factor to consider. The working area of such an arm is significantly larger than the reach of a human arm. The seated position on a wheelchair and the mounting point of the arm mean that the object being grasped is typically farther from the user's body. Distance and obstruction of the view of the grasped objects increase the difficulty of operating the gripper. It is necessary to ensure freedom of arm movement and compensate for the user's inability to lean while seated in a wheelchair. All of this introduces additional complications in using the device.

1.5 COMPARATIVE TEST OF ARMS

Despite the use of technologically advanced devices with significant potential, users encounter considerable difficulties in effectively utilizing assistive arms. Previous observations had already been made regarding this issue. To verify these observations and the hypotheses formulated based on them, a comparative test of the Kinova and Accrea arms was organized. The primary goal of the test was to determine whether the KINOVA arm indeed surpasses the ACCREA arm in terms of ease of use. The secondary goal was to investigate whether the general difficulties in operating the arm stem from the users' disabilities or if the problem lies with the device itself. To obtain a reliable answer, a typical user was replaced with a fully able-bodied individual who was well-acquainted with the operation of these devices. The test was conducted in workshop conditions, where the arms were mounted on a workbench. The influence of the mounting location was negligible as it did not affect the control method, and in both cases, the devices were positioned relative to the user in the same way, ensuring comparability of results. A standard controller that came with the JACO arm was used for its operation, while a custom controller equipped with a four-way joystick and a functional button was used for the ACCREA arm. The functions of both controllers and arms were standardized programmatically to operate in the same manner. The first tester was the author of this work. The tasks for the tester included: grasping and moving a pen, a cup, a one-liter bottle, a pencil, and a phone. Additionally, the tester was required to grasp a cup, drink from it, and place it back. The initial impression was very positive. The arms looked very interesting in motion. Observing how the device changes shape to adapt all its segments to the changing position of the gripper in space was a satisfying and aesthetically interesting experience.

The test showed that the arms functioned in a very similar manner. The observed difference was that the JACO gripper had a tendency to uncontrollably rotate in some situations around a virtual point between its fingers. As a result of this behavior, the user had to perform noticeably more movements to achieve the desired position of the arm's end. Therefore, it seemed that the BATEO arm operated in a more predictable and user-friendly manner. The tester's personal feelings about the ease of navigating the arm were the opposite of the marketing materials for the JACO. Using the JACO arm turned out to be more cumbersome than using the BATEO arm. Moving the gripper in the horizontal plane was intuitive and posed no problem. However, before changing the height at which the arm's end was located, it was necessary to use the button to

switch the joystick function. At this point, there was the first hesitation—whether to tilt the joystick forward to lift the gripper or to pull it towards oneself? Then, to resume moving the arm in the horizontal plane, it was necessary to use the function-switching button multiple times until the proper movement plane was set.

An additional difficulty was manipulating the gripper near the object to be grasped. Setting the level at which the fingers should be described above. Further problems arose when it was necessary to adjust the proper distance of the gripper from the object, align it symmetrically relative to the object, and adjust the tilt angle to its shape. Lack of precision in these settings sometimes led to the object being shifted or knocked over. Even if the object was successfully grasped, the grip was often not secure enough.

It was also very difficult to appropriately control the force of the grip on the object. Too strong a grip could deform or damage the object, while too gentle a grip could result in it slipping out of the gripper. The number of operations related to switching joystick functions and then attempting the correct movements quickly became tiring for the user. It was also noted that the tester increasingly started to experiment rather than looking at the instruction screen and imagining the directions of arm movement. He switched functions, made gentle joystick movements to empirically check how it would behave, and only then took the proper action. This tactic worked until the gripper contained a liquid-filled cup, and experiments could lead to spillage. A similar situation occurred when the gripper was in contact with another object, and an attempt was made to retract it. In such cases, the experimental method often led to the object being knocked over or exacerbated the collision effects. There was damage to the paint on one of the BATEO gripper housings when it suddenly moved towards the edge of a shelf, even though it was supposed to be away from it. The arm test proved stressful. Ultimately, the tester's feeling was that the arms functioned in a similarly "resistant" manner, not very eager to follow commands, and their operation was not as intuitive as initially thought. There was a reflection that this exercise allowed the tester to feel like a person with motor disabilities. This feeling arose from the limitations of the robotic arm's mobility. Although the device itself has extensive movement capabilities, operating it with simplified interfaces proved to be very challenging. At the end of the testing phase, an attempt was made to draw with a pen on a sheet placed on the workbench. Promotional materials for the JACO arm show a girl using the arm to paint a picture. In the test, only simple lines corresponding to the X and Y axes on the table's surface could be drawn. The arms did not allow drawing arcs or lines at other angles. Similarly, drawing on a surface tilted from the vertical or horizontal—like on an easel—was not possible.

To check if the observed difficulties in controlling the arm were solely due to the choice of simplified controller, a test was conducted using the 3Dconnection SpaceExplorer manipulator. This manipulator was designed for navigation in 3D environments in CAD software. It has 6 degrees of freedom and transmits information about the degree of tilt in each direction. It is also equipped with 15 programmable buttons. Using such an advanced device to control the gripper's movement was intended to resolve doubts about the simplified controller. The same manipulator (3DConnection) was used by engineers during design work and in their user tests on prototypes.

As expected, the SpaceExplorer significantly improved the arm's maneuverability. It was now possible to simultaneously move the gripper in three directions, control the movement speed, and the degree of tilt of the manipulator at the same time. This allowed every rotation of the gripper to be performed without the need to switch functions. Navigation using the SpaceExplorer was rated as very comfortable. However, precisely positioning the gripper relative to the object, adjusting angles, distances, and transla-

ting joystick movement directions into expected arm movement remained problematic. This was particularly difficult when the gripper was positioned sideways or facing the tester. Despite the significant improvement in comfort and efficiency of operation, there were still moments when the tester felt disoriented.

This series of tests confirmed the validity of the previously formulated hypothesis—users' difficulties with arm navigation do not solely result from their disabilities. Similar difficulties were observed in a fully healthy person, who was also equipped with a much more versatile controller.

In summary, effectively moving an object in space requires precise control of movements. Ideally, the controller used should have as many degrees of freedom as the object being moved. The SpaceExplorer meets this requirement and also has buttons to control the gripper's opening and closing functions. Despite this, it does not provide complete proficiency in operating the device. It was concluded that the problem must lie in the way the controller's movement directions are mapped to the manipulator's movement directions.

The above test with the SpaceExplorer manipulator was repeated with one of the BA-TEO arm's designers. Despite his excellent knowledge of the arm's design and proficiency with the controller—which should have translated into better test results—his efficiency in performing tasks and experiences were largely consistent with those of the first tester.

OBSERVATIONS:

The execution of the planned tasks took much longer than initially anticipated and posed difficulties for the testers.

The least issues were encountered when handling medium-sized objects such as cups or one-liter bottles of water.

A significant inconvenience was the need for frequent switching of joystick functions. Testers noted the arrangement of movement modes for the arm and felt that the sequence was incorrect, making the control of the gripper unintuitive at many points.

Errors were frequently made in selecting the direction of movement after switching joystick functions, resulting in different responses from the arm than intended.

A major problem was grasping items from a surface, such as pencils and phones. Positioning the gripper at the correct distance from the surface required skill, good distance estimation, and was time-consuming. During this task, the fingers either collided with the surface before approaching the object or closed above the item being grasped. This task required many adjustments in height, gripper angle relative to the surface, and finger spread. The use of three symmetrically moving fingers further complicated this process.

A certain inconvenience was the binary operation of the drives (in the current software configuration). This issue manifested during small, short movements. The arm became noticeably jerky, and the drives starting at full power sometimes caused the gripper to move beyond the intended target.

During the test, the paint on the gripper's housing was damaged. After stopping near furniture and switching joystick functions, an operator error caused the arm to move in the opposite direction from the intended path, leading to a collision.

The tests confirmed that it is very easy to damage the fingers of the JACO arm. They are made of slightly flexible material that somewhat absorbs collisions, which is a positive feature. However, it is difficult to detect the point at which this flexibility is exceeded, leading to permanent damage to the fingers. Many errors occur when the gripper is positioned such that left movement of the gripper corresponds to forward movement of the joystick, or left movement of the gripper corresponds to right movement of the joystick. This is particularly evident when the gripper is facing the user with its fingers, and the axes of its rotations are reversed. Such configurations are characteristic of functions involving the rotation of the gripper around a point in space and functions designed to avoid singularities.

1.6 CONCLUSIONS

The analysis of the devices' construction, navigation methods, and functionality, as well as the execution of a series of tests, led to the following conclusions:

- **Functionality Performance:** The tested devices perform their functions comparably. However, the fluidity of micro-movements and the flawed control philosophy need improvement.
- **Control Intuitiveness:** Operating the arm proved to be non-intuitive. Switching joystick functions and experimenting with new movement directions takes time and leads to errors. Frequent disorientation regarding the device's movement directions was observed.
- **Large Object Handling:** The devices perform very well in grasping relatively large, regularly-shaped objects, such as a cup or an apple. The grip is strong and stable.
- **Precision Challenges:** Precisely positioning the gripper relative to the object, adjusting the tilt angle in three axes, and fitting the object into the gripper present challenges. These tasks require frequent mode switches and numerous small corrective movements.
- **Direction Mapping Issue:** A problem was revealed in relating the gripper's movement directions to the joystick's movements.
- **Thin Object Handling:** Grasping thin objects from a vertical surface is challenging and requires multiple attempts. Proper positioning of the gripper relative to the surface and objects, as well as frequent collisions with the surface, are problematic.
- **Movement Sensitivity:** The arm appears too fast and jittery during small movements. Using small, jerky movements requires increased attention and reflexes from the user. Stress arises from the fear of causing damage, knocking over objects, or spilling liquids.
- **Lack of Safety Features:** There is a lack of safety features to prevent collisions during gripper movement and incorrect starting directions. The casings are prone to damage, with paint chipping, finger breakage, and the JACO finger design being exceptionally delicate.

Areas for Improvement:

- Switching control modes
- Mapping movement directions of the arm to the joystick
- Grasping thin objects from surfaces
- Collision prevention and damage reduction
- Precision in positioning the gripper relative to the object

Chapter 2

RESEARCH

This chapter presents the results of the studies conducted to diagnose the causes of usability and functional problems with the robotic arm. The secondary objective was to verify the correctness of the conclusions drawn from previous analyses. From the observer's perspective, an analysis was performed on how users interact with robotic arms. Video materials from user tests provided by Accrea, as well as publicly available videos of users with the arm, were utilized. These materials proved to be highly informative regarding user experiences with these devices. Anonymized interviews were conducted with engineers working on the Accrea arm, observations were made of healthy users utilizing the arm mounted on a wheelchair during a validation meeting at Accrea, and traces of use and damage to the Accrea and Kinova arms were analyzed. The chapter concludes with a summary and conclusions.

2.1 Objectives, Scope, Methods

The objective of the research is to identify usability flaws and attempt to determine their causes based on user experience observations. The findings from the research were used to define problems requiring solutions, and the proposed solutions indicated directions for further development of the new device. The research materials included photographic and video materials from tests of the BATEO arm conducted on selected users during the development of the arm.

Additionally:

- A review of marketing materials provided by Kinova was conducted.
- An Internet search was performed to find materials about the JACO arm, provided by users not affiliated with the manufacturer.
- A usability test was conducted on a wheelchair with the Accrea device mounted.
- An inspection was carried out on a JACO arm that was sent to service due to damage.
- An informal interview was conducted with engineers responsible for the design of the BATEO arm.

To obtain the most useful information, several research methods were employed, appropriately chosen for the collected research material and subject of study.

The method of analyzing existing data, known as desk research, was used to gather materials related to individual user cases and to review available grippers on the market. The observational method was employed to analyze video materials.

The collected observations were analyzed using logical analysis and construction methods.

Further project work was conducted using an experimental method aimed at finding solutions to the previously identified problems.

To preliminarily verify the concepts of kinematic and mechanical solutions, computer simulation methods were used.

Although the approach was meticulous and time-consuming, it proved to be correct. The large amount of data obtained, combined with the conclusions from previous analyses, allowed for accurate diagnosis of usability issues and formulation of appropriate project assumptions.

The following pages present frames from video materials, accompanied by comments on the observations made.

2.2 User Studies

Frame 1

The frame shows the moment when the gripper, transferring a biscuit, collided forcefully with a plate. The biscuit broke, and the tabletop attached to the wheelchair bent by a few centimeters. This collision did not negatively impact the gripper or the arm, but it revealed the potential for damage to equipment in the user's surroundings.

Frame 2

The transfer of a flat object – a mobile phone. The recording shows how the object slowly slips out of the gripper due to the vibrations of the arm during the transfer. One of the gripper's fingers, from which the phone began to slide out, remained stationary. The phone then slipped from the other two fingers, fell to the floor, and broke into pieces.

Frame 3

This shot shows a cup with a straw being moved towards a table. The arm is positioned in such a way that one of its large joints moves near the user's head. This situation results from the chosen mounting point of the arm, but a similar situation may also occur when mounted on a wheelchair, where the mounting point is closer to the user. The proximity of the moving mechanism causes mild discomfort to the user.

Frame 4

The controller, a phone with a visual instruction, and the gripper are all in close view of the user. Despite this, the user is stressed and proceeds very cautiously. The visible frame shows a situation where the gripper with the biscuit was about 20 cm above the plate and moved downwards at full speed. The user managed to react, released the joystick pressure, and the gripper stopped just above the surface of the plate.

Frame 5

This shot shows the moment of biting into the biscuit. However, the positioning of the gripper relative to the user's face is uncomfortable. This is due to the fact that the arm does not automatically adjust to a convenient position, and the user did not decide to adjust the gripper's position before starting this task, aiming for the quickest possible achievement of the goal.

Frame 6

This frame captures the moment of attempting to place the biscuit on the plate. The arm moved abruptly downward from a height of about 30 cm, and the user did not manage to release the joystick pressure in time. The biscuit was destroyed, and the plate, under the pressure of the gripper, almost fell from the deformed tabletop.

Frame 7

A frame from tests with a younger user with a more severe disability. The controller does not have a joystick; it consists of two separate parts to allow control of its functions with both hands. The joystick functions have been replaced by buttons arranged in a cloverleaf shape, corresponding to movement directions. Functions are switched with the left hand.

Frame 8

The task of drinking through a straw went smoothly. The user operated four out of five available buttons with her right hand. It can be observed that the arm moves too quickly after pressing the button. The girl has some difficulty with pressing, but shows good reflexes. Unfortunately, after releasing the button, it takes a few moments before she can press it again to continue the movement or perform a counter-movement to adjust the gripper's position.

Frame 9

This frame shows the moment when the bottle was to be placed on the table in front of the wheelchair. A quick rotational movement of the gripper was mistakenly performed, which could have caused the contents of the bottle to spill. The girl quickly reacted, and the gripper was stopped in time. The next choice of movement direction was correct, and the bottle was carefully placed on the table in a few cautious moves.

Frame 10

A handshake with dad. Users eagerly greet others with the help of the arm, and those around quickly start to treat it as an integral part of the user. Shaking hands with the gripper requires the user to be very cautious not to apply too much force. There is also a risk of pinching the skin of the hand with the moving parts of the fingers.

2.3 Analysis of Videos with JACO Arm Users

The videos analyzed are sourced from YouTube, where they were posted. They show users of the JACO arm performing daily tasks.

Frame 1

This frame depicts the moment when the arm, carrying a biscuit, struck a plate with force. The cookie broke, and the surface of the table attached to the cart bent downward by a few centimeters. This collision did not negatively impact the arm or the gripper, but it revealed the potential for damage to surrounding equipment.

Frame 2

Transferring a flat object - a mobile phone. The video shows the object slowly slipping out of the grip due to vibrations from the arm during transfer. One of the gripper's fingers, from which the phone began to slip, remained stationary. Subsequently, the phone slipped from the other two fingers, fell to the floor, and broke into pieces.

Frame 3

This frame shows a cup with a straw being moved toward a table. The arm is positioned such that one of its large joints moves near the user's head. This situation results from the chosen mounting point of the arm, but a similar issue could arise with mounting on the cart, where the mounting point is closer to the user. The proximity of the moving mechanism causes slight discomfort to the user.

Frame 4

The controller, a phone with a pictorial instruction, and the gripper are all within the user's close field of vision. Despite this, the user appears stressed and proceeds very cautiously. The visible frame shows the gripper with the biscuit about 20 cm above the plate, descending rapidly. The user managed to react, releasing pressure on the joystick, and the gripper stopped just above the surface of the plate.

Frame 5

This frame captures the moment of biting into the biscuit. However, the positioning of the gripper relative to the user's face is uncomfortable. This discomfort arises because the arm does not automatically adjust to a convenient position, and the user did not

opt to adjust the gripper before starting this task, aiming to achieve the goal as quickly as possible.

Frame 6

This frame depicts the attempt to place the biscuit on the plate. The arm moved abruptly downward from a height of about 30 cm, and the user did not manage to release joystick pressure in time. The biscuit was destroyed, and the plate, under the gripper's pressure, almost fell off the deformed tabletop.

Frame 7

A frame from tests with a younger user with a more severe disability. The controller lacks a joystick and consists of two separate parts to allow operation with both hands. The joystick functions have been replaced with buttons arranged in a cloverleaf shape corresponding to directional movement. Functions are switched using the left hand.

Frame 8

Drinking through a straw proceeded without issues. The user utilized four of the five available buttons with the right hand. It is noticeable that the arm moves too quickly after pressing a button. The girl experiences some difficulty with pressing, but demonstrates good reflexes. Unfortunately, there is a delay after releasing the button before she can press it again to continue movement or correct the gripper's position.

Frame 9

This frame captures the moment when the bottle was to be placed on the table in front of the cart. A quick rotational movement of the gripper was mistakenly made, which could have caused the bottle's contents to spill. The girl reacted quickly, and the gripper was stopped in time. The next direction choice was correct, and the bottle was carefully placed on the table in a few cautious movements.

Frame 10

A handshake with the father. Users willingly greet others with the arm, and those around quickly begin to treat it as an integral part of the user. A handshake with the gripper requires the user to be very cautious not to apply too much force. There is also a risk of pinching the skin of the hand due to the moving parts of the fingers.

Frame 11

Turning the light on/off with the fingers or the side of the gripper.

Frame 12

Pouring water from the faucet into a cup with a straw. View from the user's perspective. To avoid additional operations, the user grabbed the cup and held it while opening the faucet. The water stream flowed close to the gripper.

Frame 13

Pushing the wardrobe door aside with the side of the gripper. The gripper was pressed against the door and then moved forward. This movement heavily stressed the entire arm structure.

Frame 14

Lifting objects located close to the cart, out of the user's line of sight. This process is challenging due to the limited visibility of the floor around the cart. Proper distance judgment of the gripper from the floor is crucial to avoid collisions and damage to the gripper's fingers.

Frame 15

The video shows an attempt to grasp a tissue. The user tries to hook the tissue with a finger and close the grip, but the tissue falls each time. The open gripper fingers suggest that this is the maximum range of its grip, but the contact point of the closed fingers is centrally located between them. The anthropomorphic shape of the arm with the gripper may intuitively suggest that the gripper will behave like a human hand - somehow adapting to the object being grasped, sensing its shape, and adjusting the grip force.

Frame 16

Another example of using the arm in close proximity to running water shows the user preparing to brush their teeth with the arm. There is a significant risk of damaging the device when in contact with running water.

2.4 Analysis of Damage and Wear on the JACO Gripper

The opportunity arose to examine a JACO device that had been returned for repairs with a broken finger. The observed damage corresponded to the usage patterns seen in the videos of the arm in operation.

Types of Observed Damage:

- Scratches and chipping of paint on the external surfaces of the gripper and arm.
- Evidence of exceeding the plasticity limit of the material on the fingers.
- Damage and dents on the external surfaces of the fingers.
- Signs of touch-up paint application on the housing.
- Significant accumulation of dirt on the fingers, collected in crevices and at material boundaries, indicating contamination by substances other than water.

According to information from Exxomove, the company servicing these arms, the most common malfunction is broken fingers. In such cases, the finger is replaced as a complete assembly. The replacement is either carried out by a technician at the client's location or the client sends the arm to the service center. The arm's design does not allow for quick replacement of the finger by the client on their own. Finger breakage is not covered by warranty. Similar issues also occur with BATEO arms. Therefore, ACCREA's gripper has been equipped with reinforced fingers, and their replacement is designed to be easier.

2.5 Interviews with Engineers

Discussions with the team of engineers working on the Kinova arm and designing their own solution, Accrea, revealed that gripping and transferring objects with these arms also poses challenges. Regardless of the manufacturer, difficulties increased when using a controller other than the SpaceExplorer. Engineers quickly became frustrated due to the disproportionate amount of time required for simple tasks. The 6DOF joystick provided by Kinova and mounted on the wheelchair was used for arm control. One individual who had mastered the arm control with the SpaceExplorer had no significant complaints about its functionality. There was a common belief that users, having previously been completely dependent, would surely appreciate the independence gained through the arm, even despite difficulties in control and the extended time required to perform tasks.

2.6 Tests with the Distributor

During a working meeting with representatives of the BATEO arm distributor for Germany, further observation of the gripper's usability was conducted during tests. The author also performed tests from the perspective of a person seated in a wheelchair. The test program aimed to assess the automatic reorientation of the base coordinate system of the arm mounted on the wheelchair, enabling the user to be positioned vertically. Following a 90-degree shift in the seat's position, engineers were tasked with modifying the arm's software to avoid collisions with the ground during vertical positioning and to reorient it for vertical operation. Only a ceramic cup was used for gripping tests. There were no disabled individuals in the team. Notably, although the arm was coupled with the wheelchair controller, which allowed for gripper control, all testers preferred to use the SpaceExplorer controller.

It was observed that the ability to position the body vertically positively affected visibility from the user's perspective. The vertical position made it easier to see objects on the floor close to the wheelchair and to lift them with the gripper. There was also an improvement in comfort when using the arm, as the mounting point of the arm was at the user's knee height in the vertical position. This resulted in more natural operation of the gripper at arm's length near the face. It reduced the feeling of being overwhelmed by the presence of the moving device in close proximity to the torso and face. This session, apart from the aforementioned observations, did not yield many new insights, merely confirming that previously observed issues with navigating the gripper and precise positioning were widespread and also occurred in this case.

2.7 Summary of Research and Conclusions

The conducted tests, studies, and previous analyses have allowed for the identification of functional and user-related flaws in the assistive robotic arm. Some of these flaws pertain to the entire system, while others are specific to the gripping devices. Confirmed observations and assumptions show that the degree of disability of the user does not critically impact the observed limitations in the effective use of the arm. It was found that there is an inverse relationship between the number of control operations and the

complexity of the controller. Controllers adapted to the motor abilities of disabled individuals can only handle a portion of the available functions of the arm with the gripper at a time, resulting in longer task completion times. However, tests and observations indicated that using the same simplified controller model, fully able-bodied individuals encounter similar issues as disabled users. Both user groups make similar navigational errors. This observation is intriguing and warrants further investigation.

It was noted that there is significant potential to create a more functional device that would greatly improve user experience. It may have been previously perceived that frequent damage to arms and grippers was due to users' motor limitations or improper use. A deeper analysis revealed that users have somewhat different practical needs than those initially defined by the creators of the existing device. A major risk of severe malfunction is using the device near running water. Manufacturers rate their devices with an IPx2 waterproofing level, which according to PN-EN 60529:2003, indicates protection against water droplets falling on the enclosure at an angle of up to 15° from the normal position. Exposure to water from a faucet can therefore damage the device. This limitation should be considered a significant user-related flaw of both devices.

Another significant flaw is the lack of designed feedback for the user regarding the force with which the gripper's fingers clamp onto the object. Users assess the gripping force solely based on auditory and visual cues, assuming that if the object does not slip from the grip and has not been crushed, the clamping force is appropriate. Arm usage studies have highlighted a clear need for moving objects, prying, and pulling them without gripping. Tasks such as pressing door handles, opening door leaves, opening cabinets or refrigerators, and moving obstacles do not always require gripping the object. In the current versions of the devices, these tasks are performed using the fingers and the gripper's casing, which are not adapted for such applications. This leads to mechanical damage, such as broken fingers, abrasions on the casing, and damage to surrounding equipment. The damage to the gripper is largely not a result of wear and tear but rather the use of the device "for unintended purposes." This term, known from warranty cards, should be interpreted in this case as an extension of the product's functionality by the user and should be considered a significant contribution to the design of a new device.

Regularly recurring situations where the arm or gripper obstructs the user's view are observed. The effective reach of the gripper is 1 meter, and its mounting point on the wheelchair is extended forward and positioned at the user's knee height when seated. This is justified for safety reasons, to prevent the arm from colliding with the user's body in any movement scenario.

SUMMARY:

Four areas of user experience were identified as starting points for seeking improvements or innovations in the device:

- Navigating the gripper in space
- Gripper architecture and finger movement geometry
- Machine-to-human feedback
- Automation of repetitive tasks

Chapter 3

DESIGN ASSUMPTIONS

This chapter defines the detailed assumptions for the project. The issues of navigation and movement direction mapping in this device are highly interesting as they significantly impact the ease of use and have great potential for improving usability and user experience. A thorough investigation of these issues could become extensive enough to warrant a separate study. The aspect of dynamic movement direction mapping would require a deeper understanding and the expansion of research and experiments with user groups. The project would also need to involve programmers and automation engineers to develop new software variants for the entire arm control system. Despite limited resources, this topic has been allocated a separate subsection. This document focuses on the physical part of the project. Most of the time users spend using the arm is devoted to performing micro-tasks with the gripper and manipulating it in close proximity to the objects being grasped. This is when most errors and damage occur.

Addressing problems related to the gripping device will bring significant improvements to the overall system usability. The project will attempt to design the gripper to simplify the execution of intended tasks. Methods will also be proposed to mitigate navigation issues by altering the way the device is used.

3.1 Functional Assumptions

- The device should be intuitive to use - it should operate exactly as the user expects
- Automatic mapping of gripper movement directions - adjusts the actual movement directions of the gripper at any given moment to most accurately match the real movements of the joystick.
- The device communicates with the user through visual and auditory signals - adding an LED indicator to the gripper will eliminate the need for users to look away from the gripper. The color of the light will be linked to a set of movements. Switching functions will change the color. Associating a set of movements with a color without having to refer to the manual. A set of sounds can be added that will not annoy those around.
- Constant reference to the manual is unnecessary - graphical instructions should only be used during the user learning phase.
- The device should assist the user with typical repetitive tasks - automate repeated, sequential movements so that they do not need to be performed manually.
- The device reacts to obstacles - if a collision with an object or the environment occurs, the gripper should automatically stop and slightly retract. The movement can be continued - e.g., moving something - by holding or repeating the joystick movement.
- The gripper should clearly communicate contact with the grasped object and the amount of gripping force used.
- The device should not require precision from the user - the design of the gripper should allow for a secure grip regardless of imprecise alignment with the grasped object.
- The device anticipates the user's next movements - automatic leveling and positioning of the gripper during movement.
- Gentle startup of the arm's drives to mitigate the effects of navigation errors.
- The device design should align with typical user behaviors.
- The device should allow for easy grasping of a straw lying on a table.
- The gripper should withstand collisions with objects in the environment.
- The device should expand cognitive capabilities - allowing users to perceive their surroundings in a new way, such as assessing the weight or temperature of objects.

3.2 Technical Assumptions

- The gripper is powered through a connector at the end of the arm.
- The design should allow for the grasping of objects with a diameter of 95 mm.
- The design should support the handling of weights up to 1.5 kg.
- The design should have a minimum protection rating of IPx4 for active parts.
- The mass of the gripper should not increase.
- The distance from the gripping point to the mounting point should be the same as in BATEO.

- The gripper must be mechanically compatible with the BATEO arm.
- Provision must be made for an additional small PCB.
- The gripper, when folded on the wheelchair, should fit within the outline of the arm.
- Finger movements of the gripper must occur in a straight line.
- The casing should be made of soft materials.
- Damage to the gripper during normal use should be prevented or easy replacement of damaged parts by a non-technician should be facilitated.
- Solutions used should not infringe on patent rights.
- Solutions requiring licensing are excluded.
- Materials include CNC aluminum, 3D printing, carbon, resin casting, and silicone.
- Production should be low volume and bespoke.

3.3 Stylistic Assumptions

- The gripper should be design-consistent with the arm.
- The gripper should continue or reference the stylistic language of the existing arm.
- It should have aesthetically pleasing smooth surfaces.
- It should appear friendly and safe.
- Preferred shapes are organic.
- The number of details in the casing should be minimized.
- The color scheme of the gripper and details should be changeable.
- A color accent related to the function should be introduced.

3.4 Constraints

- Construction parts made from aluminum using CNC machining technology.
- Maintain maximum simplicity and minimal volume for aluminum parts to avoid significant material waste during machining.
- Limit or eliminate the use of synthetic resins, polyurethanes, and silicones.
- Plastic parts should be produced using 3D printing (FDM, SLA) or pressure casting in aluminum molds.
- Utilize as many standard mechanical components available commercially.

3.5 New System Architecture

The newly designed system will consist of the following elements:

- BATEO arm with a control unit and battery.
- Gripper with a Bluetooth communication module and an RGBW LED light source.
- Additional Bluetooth PCB module with a temperature sensor, mounted inside the gripper.
- Mobile device - tablet or phone.
- User support application with communication functionality with the gripper's Bluetooth module, installed on the mobile device.

- Updated BATEO arm software with new functionalities.
- Bluetooth camera module with an LED light source.
- Attachment for the camera or phone.

A significant change introduced to the existing system is the addition of a Bluetooth communication module to the gripper. This module will be responsible for providing feedback to the user. Feedback will be conveyed through colored light pulses from an LED on the gripper's casing. Provision should also be made for adding an additional temperature sensor module on a small PCB inside the gripper. The project scope includes the construction of multifunctional gripper hardware, the development of a new method for mapping the gripper's movement directions, and the creation of automatic function scenarios. These scenarios will serve as design inputs for developers who will create new control software for the arm.

3.6 Synthesis

In the next stage, a synthesis of the design assumptions was carried out. Areas requiring improvements were linked to areas where appropriate solutions would be sought. This process is illustrated in the first two parts of the diagram. The third part contains detailed assumptions thematically assigned to the corresponding areas. The goal of this action was to logically connect dependent elements, facilitating their use in the design process. As a result of this synthesis, the functionalities that the final product should possess were defined. Due to the nature of their implementation, the project was divided into two parts. The first part will focus on creating a functioning device, while the second part will develop software-based functions.

Chapter 4

CONCEPT DESIGN

Upon starting the project, a clear vision of the value that the device should bring to users was established. Based on the conducted research process, the necessary features, operational modes, and user interactions of the device were defined. The first step involved reviewing existing technologies and available solutions. The aim was to determine whether there was already a product on the market that met the set requirements and could be adapted for the Accrea arm. Such an approach is justified from both a business and environmental perspective. However, the likelihood of finding a solution fully meeting the requirements was considered low due to the specific purpose of the newly designed gripper. Nonetheless, reviewing similar solutions may provide inspiration and valuable insights into technologies that could be utilized in the project.

4.1 Review of Existing Gripper Solutions

The review was conducted using the Internet. In the first stage, the websites of leading robotics and industrial automation manufacturers were searched to identify commercial products. Subsequently, the network was searched using specific phrases to find prototype and conceptual solutions. An interesting idea was to explore the archive of robotic hand prototypes developed by Accrea. However, these designs did not meet the project's requirements, mainly due to their insufficient refinement and tendency to mimic the construction and function of the human hand, which made them unsuitable for the project's assumptions. The online review, however, enabled the identification of several trends followed by manufacturers of robotic gripping devices.

Trend I - Attempts to replicate the kinematics and precision of the human hand using various mechanical solutions, including cable drives and artificial skin (a coating equipped with sensors). Such devices, along with controlling haptic gloves, are created for performing precise but dangerous tasks for humans, e.g., in chemical laboratories, in the presence of elevated radiation, in biological laboratories, etc. They are characterized by high precision but require advanced software and powerful computers. Lightness and miniaturization come at the cost of complex mechanisms and high costs.

Trend II - Industrial grippers are tailored for specific tasks and collaboration with particular robots. This group includes various jaw grippers, pincers, magnetic grippers, suction cups, etc. These are tools with simple constructions, made from commonly available components. Designed as parts of larger technical systems, taking into account the components they interact with - such as locks, latches, matrices, pincers, jaws, or vacuum cups. They are characterized by a lack of universality, being focused on performing specific tasks, as well as high durability.

Trend III - Biomimicry, or bionics, is based on the in-depth analysis of mechanisms found in living organisms and attempts to translate them into the realm of mechanics, sometimes resulting in spectacular visual effects. Combined with experimentation with new materials, this direction can lead to the creation of devices that are astonishing - almost lifelike, delicate, and unstable, with simple constructions but requiring advanced technologies. A key element of this concept is shaping materials to mimic nature, emphasizing the use of their elasticity and volume-changing capabilities.

- **Universal Robots**

A simple mechanical gripper made of metal. Its jaws are driven by an electric motor, with their movement occurring vertically, perpendicular to each other. It occupies little space but also has a very limited range of motion. In the context of project requirements, linear movement of the jaws is desired.

- **Schunk**

A beautifully precise machine inspired by the mechanics of the human hand, intended to match its precision. The device is extremely complicated and difficult to build. Control of such a hand must be carried out through a specially written controller simulating hand movements. In the context of the project's assumptions, it is too complex.

- **Festo**

A very interesting example of a compliant mechanism. The mechanism, being a single part, achieves pivot points similar to hinges due to varying material thickness. Additionally, its elasticity causes it to try to conform to the gripped part.

- **Franka**

Another example of a gripper with jaws moving in parallel. The device shown has a width derived from the maximum jaw opening. Such a shape would be suboptimal for my project.

- **Fraunhofer**

A gripper belonging to the Care-o-bot 4 social robot, presented in 2015 as a joint project of the Fraunhofer Institute and Phoenix Design studio. It features a simplified design - only one movable finger, and its form resembles a warm, soft winter glove. It is the friendliest-looking gripper among all I have seen. A camera and a distance sensor are mounted on the inner side.

- **Mechanical**

Another type of construction, much lighter and more delicate. Finger movement is achieved by tensioning and loosening metal cables, which are driven by a mechanism hidden in the forearm. The precision of such a device can be very high, but the complexity and adjustment requirements are demanding.

- **Pneumatic**

An example of a gripper utilizing an elastomer bellows filled with small, light balls. Inside, between the balls, there is air. The bellows is pressed against the object (the object cannot be flat and must be larger than the bellows), conforming to its shape. Air is removed, and atmospheric pressure squeezes the bellows around the object. The balls inside cannot move relative to each other, thus keeping the object stationary.

- **Kuka**

A solution from industrial robotics. A simple robotic arm equipped with a single-function gripper, and above it, a camera system monitoring the space below in real-time. A computer program interprets the camera view as, e.g., chaotically arranged objects. It then optimizes their arrangement and controls the robot to sort them.

SUMMARY:

No gripper was found that met the basic requirement of moving the jaws in a straight line or solving the task of gripping objects from surfaces in a simple way without additional equipment. No gripper was found that could simultaneously grip both large and small objects with irregular shapes. In one of the videos demonstrating industrial automation technologies, the problem of jaws moving in arcs was solved programmatically by shifting the gripper in time relative to the object during closing. This effect appears to be a solution but was actually achieved once by a programmer in that specific CNC machine application. An interesting and technically elegant solution is the Festo gripper, which will be evaluated for adaptability, functionality, and potential patent infringements. Pneumatic grippers were discarded due to additional power supply costs such as pumps, hoses, valves, and pressure regulators.

An intriguing and technically elegant solution is the coupling of the gripper with a vision system with cameras placed over the scene where tasks are performed. The appropriate software tracks movement and corrects its accuracy. Such a system addresses the issue of positioning the gripper relative to the object. Despite many advantages, the volume of the entire setup, the need for a powerful computer, and software with machine learning functions argue against this solution.

The next step involves designing a multifunctional gripper. The process will include free concepts, rapid kinematic and functional prototypes made with LEGO Technic, followed by CAD design and testing of prototypes using 3D printing technology.

4.2 GRIPPER DESIGN

Despite reviewing various designs, no device meeting the defined requirements was found. The review revealed certain trends in the design of such devices. The observation of solutions attempting to mimic the human hand raised doubts about whether an anthropomorphic gripper is the optimal choice for performing the specified tasks. The designed device is more aligned with industrial solutions, primarily due to the specific and relatively narrow range of tasks it is meant to perform. There is a risk that a device, evolutionarily adapted to perform specialized tasks, might look entirely different from the currently used solutions.

The human hand has evolved to be versatile, providing survival and advantage over other species. "Advantage through technology" - as the bold slogan of one car manufacturer goes. Thanks to the same biomechanical structure as the hand, a person can use great physical strength to defend themselves and strike in hand-to-hand combat, as well as play the violin with sensitivity and virtuosity. One can climb the rocky walls of the Alps and assemble microscopic parts of Swiss mechanisms with remarkable precision. Of course, these extremes do not occur simultaneously, but they demonstrate the vast adaptive potential of this singular construct known as the hand.

So, is copying the construction of this intricate natural invention to perform simple functions, such as grasping objects, moving them, and applying pressure to surfaces, proportional to the needs? There is a belief that it is not. By adopting a closed list of functions and designing a device solely for their execution, it is possible to create a completely new, unique, and original solution. Although this is a bold assumption that may lead to a return to the starting point, intuition suggests that it is worth pursuing.

When considering the list of assumptions, I have a kaleidoscope of previously reviewed solutions, their combinations, and variants in mind. Everything seems incredibly complex. I had to take a step back.

In everyday life, if I am not a pianist, violinist, watchmaker, surgeon, or sapper, are the capabilities of such a sophisticated construct as the human hand fully utilized by me? Of course not. Many tasks can be performed with just one finger, wrist, elbow, and sometimes even a chin when "hands are unavailable". Our four-legged friends can also open doors and move objects. Following this line of reasoning, I wondered what such a simplest and most functional tool for performing these tasks might look like. I found a stick approximately 30 cm long, 2 cm thick, and square in cross-section. I quickly replaced it with a wooden kitchen spatula, ensuring it would be more durable.

In principle, the functionality of both is the same. By drastically reducing the complexity of the mechanism, it is always necessary to remember to reduce expectations regarding its performance quality. For the task, activity, or function, an extremely pragmatic approach can be adopted. Something is either done or not done. However, in the human world, it also matters how it is done, executed, in what quality, style, or user experience. It turned out that the stick - spatula could be used to perform many intended tasks. In a binary view, this action is clumsy and inelegant. For example - opening doors. Applying pressure to the handle with the stick causes the handle to move, but keeping the stick on the handle becomes more difficult as the handle is pressed harder. Eventually, the door opens, the stick slides down with a strong jerk, and the released handle snaps back to its normal position with lightning speed and noise. The door is open - the task is accomplished. Next, the stick is inserted into the gap, and the door is pushed open. The next step is closing the door. This task proves more difficult, as it is not possible to simultaneously keep the handle pressed and pull the door shut. It remains to place the stick under the handle and pull hard. The door closes - again in a poor style, this time with a feeling of wrist pain. It is surprising that such a simple task required so much force. The experiment continued by using the stick for other tasks, such as using the staircase, riding the elevator, checking cabinets, drawers, the refrigerator, turning lights on and off, and operating the sink faucet. It turns out that a tool that is a piece of stick is surprisingly effective. However, it is necessary to position the stick correctly with the hand and use noticeably more force than usual, as the stick acts as a lever. In summary, such a spatula works surprisingly well, even though its action is binary and generates a lot of noise. It also leaves marks on furniture and wears out itself. It can be used to move objects but not to lift them. The next step is to improve the tool by adding a second spatula. This is how relatively wide chopsticks were obtained. Tongs for starch, tongs for spaghetti, tweezers, as well as bird beaks, or elongated dog jaws. Two elements mounted on one end with a hinge, allowing them to rotate relative to each other. The solution proved effective, so it is no wonder that in many cases, nature ended the design process at this stage and focused on refining details. After attaching two sticks together and repeating the experiment, opening doors became much easier, though still not ideal, and closing was also simpler. However, the problem became insufficient friction between the spatulas and the door handle. It was now easy to lift plastic water bottles, especially those with a narrowing improving the grip. It was also possible to retrieve small items from the drawer and put them back in place.

At this stage, the obtained results were very satisfying; however, the experiment revealed a new problem - difficulty in precisely adjusting the force needed to grasp and hold an object between the spatulas. The greatest difficulties occurred with items such as: a glass - fear of dropping and breaking it or crushing it; an open plastic water bottle - crushing the bottle and spilling water, which led to deformation and instability; a cell phone on a table - fear of dropping it, as excessive squeezing made the phone slip from the grip and move in a random direction. Even seeing the phone starting to slide out and trying to increase the grip did not prevent it from slipping. Using an insulating tape covering somewhat helped. The phone and water bottle behaved almost identically as in films with a complex gripper.

The experiment confirmed the importance of precise object grasping. The challenge is selecting the proper squeezing force for an object, which is a common issue in robotics. Mechanics lack sensory perception, so various attempts are made to address this problem, from using coverings made of high-adhesion materials to artificial skin solutions equipped with pressure sensors that work in feedback with actuators based on programmed algorithms. A user of an assisting robotic arm, who does not have "feel"

for grasping force, faces the same problem. In their case, the challenge is the lack of ability to sense this force through touch and react to it. Feedback reaches the user only through vision and hearing.

Since only two random pieces of wood were used and most assumptions for the gripper were realized, it was decided to continue on this path and see where it leads. Initially, the solution seemed too simple to avoid being labeled as "crude". After further reflection, the opinion changed, as the need to use a hinge, a mechanism for closing and opening the tongs, adding appropriate coverings, mounting to an arm, and securing the mechanism against water revealed that a moderately complex mechanism was developed at the thought experiment stage.

The next step focused on gathering ideas for methods of grasping a water bottle or a cup. Grasping by the handle was rejected as too difficult and troublesome. Attention was concentrated on the method of encompassing the object's diameter with the gripper. The gripper with the largest contact area with the object would be of the FESTO type. In comparison, the previously tested two-arm gripper should be placed at the opposite end of the scale. It provides only two points or lines of contact with the object. In the case of larger objects, this arrangement causes the object to be pushed out of the grip by the resultant force, which is the sum of the clamping forces. The magnitude of this resultant force is directly proportional to the ratio of the diameter of the grasped object to the length of the gripper arms. The smaller the diameter and longer the arms, the smaller the resultant force. A commonly used method for grasping involves catching the object between two parallel jaws, provided the object is symmetrical. If it is not, it will be shifted during clamping to the point of achieving equilibrium of the resultant forces. The chosen solution for continuing the project divides the gripper arms into two parts, allowing for four points of contact with the object, with the resultant forces of each pair of contact points balancing each other. The object is maintained in one axis by surface friction and in other axes by collision with the gripper parts. This solution resembles the previously used fingers with two phalanges in Bateo and Jaco grippers. However, instead of fingers, large gripping surfaces are planned to be used. It was necessary to consider whether such a construction, built with large gripping surfaces, would allow for precise gripping of small and flat objects. It turned out that the kinematic construction remains the same, while the precision parameter improves. Compared to fingered grippers, larger gripping areas allow for better alignment with the grasped object. Although this may affect visibility (larger surfaces may obscure the object), the increased gripping area compensates for this problem, allowing for effective grasping of small objects without the need for a precise gripper. A precise gripper with narrow fingers would only be necessary if precise manipulation of the grasped object were required, which is not anticipated by the specification or project assumptions. To physically verify the correctness of the developed concept, it was decided to use an educational LEGO Mindstorms kit. This pragmatic approach allows for rapid creation and testing of many concepts on functional LEGO structures. Using LEGO avoids wasting materials and producing waste, as well as saving electrical energy, as power tools are not required. This also facilitates rapid experimentation and modification of solutions. Building various functional modules in LEGO, including such with dual-arm grippers, demonstrates how much flexibility and convenience LEGO solutions can provide.

The cost of this stage is limited to the purchase of the kit itself, which was acquired earlier. The benefits also include time savings due to the use of pre-made parts that are perfectly matched and do not require special tools for assembly and disassembly—just hands are sufficient. The ability to test the operation of the electric drive of the constructed mechanisms in real-time, as well as the use of the LEGO microcomputer

and graphical programming applications using so-called nodes, allows for quick verification of algorithm correctness on functioning mechanisms. This approach minimizes time, material, and energy losses, enabling the testing of countless prototype variants. The process began with building a kinematic equivalent of the ACCREA gripper using LEGO bricks. Efforts were made to maintain similar proportions and dimensions of the phalanges to test the operation of the design and compare it to the actual gripper. The goal was to establish a reference point for the costs of subsequent constructions. A functioning reference model with a drive was created, controlled by a button on a wire. The dimensions and range of motion of the fingers were close to the original, and the performance was comparable. The model differed only in the number of fingers (two instead of three) and a smaller load capacity, but it functioned well enough to be considered a reference point for future constructions. Below is a series of photos documenting the work on the gripper mechanism's design. The main goal was to achieve a kinematic system that allows for secure gripping of both large and small objects. A difference was observed between gripping with the ends of the jaws and encompassing an object with the entire jaws. The idea emerged that the external parts of the gripper could be hinged and, when gripping a small object, arrange themselves around it like pincers. This approach resulted in a concept comprising three essential features: wide gripping surfaces, which provide a large contact area with the object; two-part gripping arms, which encompass larger items; and hinged external parts that can function like pincers on small objects.

The gripper model with hinged, elastically mounted gripping parts proved effective. Rubber elements at the ends ensure proper gripping of objects. Initially, the scale of the model and the choice of bricks were insufficiently rigid, leading to significant bending of the ends when encountering the object and further pressing by the drive. Ultimately, the result was better than expected. The bending parts accumulate the drive force, meaning that the entire clamping force is not rigidly transferred to the object. The clamping process of such a design on the object differs from previously discussed grippers and lasts noticeably longer, proceeding through several phases:

- The jaws move towards the object.
- The phase when the jaws encounter the object and begin to deform through rotation on their axes while the drive continues to bring them together.
- The moment when the jaws meet at the point opposite the object, but clamping continues, and their deformation progresses more slowly.

In the second phase, a compressive force of an elastic nature acts on the object. This allows for gentle gripping of light, soft, or easily deformable items, which is an additional positive feature of this solution. One of the assumptions is to signal the contact of the gripper with the object and provide information about the clamping force. Such behavior of the gripper, where a gradually increasing force is visible through the deformation of the gripper, can serve an informative function. Observing the slow increase in force allows one to notice before high force values cause deformation of the object. The ability of the lever to tilt and autonomously and elastically adjust to the shape of the object greatly improved the grip's reliability and reduced the need for precise alignment of the gripper with the object. This solution was implemented in the final design. The concept was then developed into a version with two fingers, each with two phalanges. The pincers were mounted on short elastic sleeves, but this configuration did not work properly due to excessive free deformation in various directions.

Gripping large objects results in the fingers clamping and increasing the contact area with the object. The object is held in place due to surface friction and mechanical collisions with the fingers. It can only be moved parallel to the axis of rotation of the jaws. The operating principle is the same as in the BATEO model. Mounting the axis of rotation of the jaws at a certain distance from each other causes the gripping of medium-sized objects not to activate the clamping of the fingers. The object is moved to a triangular area between the jaws or is held only by surface friction between the outer jaws. Holding heavy objects would require very large clamping forces.

The placement of the gripper before gripping a medium cylindrical object (e.g., a soap dispenser) shows that the object is positioned between the inner phalanges. It is difficult to determine precisely where it must be located to be gripped solely by the outer phalanges. Excessive tilting of the outer phalanges can be misleading. In this model, it is evident that they are oriented more outward, similar to the JACO and BATEO models. However, the external shape of the fingers might suggest that they are straightened.

The grip functions correctly: the inner phalanges, upon encountering the object, transmit the drive to clamp the outer phalanges around the object. The object cannot slide out forward. The gripper may move across the object's surface due to insufficient friction to immobilize it in the grip. It may be necessary to use materials with greater surface friction or more elasticity. The possibilities of tilting the outer phalanges were then limited to achieve straightened fingers. This geometry significantly facilitated the visual assessment of the gripper's closing area. The inner surfaces of the jaws are now aligned, unlike the previous version. The outer phalanges still close upon encountering resistance from the inner phalanges, affecting the operation of the entire mechanism. While it is easier to grasp the object with the fingertips, it is harder to hold it due to the smaller contact areas.

The gripper closure functions correctly. The inner phalanges, upon encountering the object, transfer the remaining drive force to clamp the outer phalanges around the object. The original design assumed that the phalanges at the base would be spaced apart to limit their separation when gripping large objects. A consequence of this design is the creation of a triangular area inside the closed gripper. Currently, this area has significantly increased, making it impossible to stably hold an object within it. The gripped object will be held unstably, shifting backward and falling out. To effectively hold the object, the friction force between the phalanges and the object would need to be very high. To address this issue, it will be necessary to reduce the distance between the axes of the inner jaws, which requires developing a new method for driving the jaws and phalanges.

In Figure 113, some imperfections in the grip angles are visible, resulting from play between the bricks. This condition is shown at the maximum closure of the gripper. On the left side, during closure, the grip force is concentrated between the ends of the outer phalanges. Such a grip requires high precision and force to prevent the object from slipping out, which can easily lead to damage to delicate items. After discarding this mechanism, the focus shifted to finding the proper jaw geometry for the gripper, temporarily setting aside issues related to the drive construction. A mechanical concept emerged in which all phalanges would be axially tiltable, allowing better adaptation to the shape of objects (Figure 114). This setup includes two pairs of phalanges and rubber elements that provide elasticity to the structure. The figure shows how the outer phalanges are clamped around the object, creating a support point at the opposite ends. Tests were conducted to grasp both smaller and larger flat objects. The results showed that gripping smaller objects proceeded without problems. However, issues arose when gripping large, low objects, such as the rectangular block shown at the

bottom of Figure 115. Although the ends of the phalanges are mounted elastically on rubber bands, they lack rotational limits and can almost align parallel to each other at a 90-degree angle from the position visible in the photo. This prevents effective gripping of large objects. A positive surprise was the performance of the tiltable jaws, as shown in the photo above, where they adapted to the expanding top section of the glass. As a result, grip stability significantly improved compared to jaws that only contacted the upper edge around the glass. The attempt to grasp a cylinder revealed that the tiltable phalanges do not provide a sufficiently stable grip, as the held cylinder can rotate along the gripper's axis. During attempts to move the cylinder, it was observed that it could tilt quite freely sideways. It is concluded that too many degrees of freedom, which improve adaptation to the object, simultaneously prevent effective transport. The next step was to evaluate the idea of transferring human finger mechanics to see if this mechanism might perform better. The concept used gray bricks as bones, rubber bands as muscles, and red thread as tendons. The concept was abandoned due to its high mechanical complexity and the need to use significant force merely to overcome the resistance of the rubber bands.

A two-finger gripper model was then constructed with two different finger mechanisms simultaneously (Figure 119). This decision was made to save construction time and to allow for simultaneous comparative testing of two concepts. This model was equipped with two mechanisms that enable the automatic bending of the upper phalange upon encountering an obstacle by the lower phalange. The left variant moves the outer phalange parallel to the longitudinal axis of the gripper. This ensures that the grip covers the entire surface of the phalange, resulting in increased friction between the phalange and the gripped object.

Based on previous experience, a gripper variant utilizing FESTO technology as the outer phalange was also created. The feasibility of constructing such a gripper from a single piece was assessed. A combined variant, where the upper phalange was designed in CAD and printed in soft TPU, proved feasible. It is possible to manufacture such a component from silicone or polyurethane using molds in production. It was necessary to verify if this was the optimal solution before investing significant time in producing molds and details. It turned out that the mechanism worked very well in proportions similar to those of a finger. It stopped functioning correctly when printed in a higher version, resembling a fin, which was intended to be more appropriate.

An undeniable advantage of this solution is the maximization of the contact surface with the object and the retention of tension after clamping. Grasping small details seemed promising, though it was easy to dislodge the object. When gripping large objects, a problem arose with the tips of the flexible phalanges touching each other, which weakened the grip force. Tests showed that this combined mechanism did not work as intended. The occurrence of mutual collisions when grasping certain objects and the inability to increase the surface area led to the decision to discontinue further development of this concept.

Although a design that fully meets the requirements has not yet been developed, the work conducted has provided several valuable insights. Based on these findings, it can be assumed that the new gripping device should:

- Consist of four jaws – phalanges.
- Have internal phalanges with a common rotational axis or axes positioned close to each other.
- Ensure that closing jaws do not leave any free space inside.
- Allow the movement of the outer phalanges to be parallel.

- Enable the outer phalanges to clamp the object in a manner analogous to fingers in BATEO and JACO systems.
- Have the outer phalanges mounted elastically and capable of tilting.
- Provide a certain degree of elasticity in the jaws on the outer phalanges.

The next step is to construct the design in CAD based on previous experiences and insights.

Detailed gripper design

Work began with drafting the geometry of the gripper mechanism, considering the base dimensions and movement ranges. A simple solid model was then constructed, which was to be assembled using screws functioning as rotational axes for the parts. After adjusting the dimensions and quick optimization, the first working prototype was printed. PLA material was used for printing, and parts were assembled using readily available metric screws. To expedite the early prototyping phase using 3D printing, it was assumed that initial work would be conducted similarly to LEGO, by creating custom "blocks."

The design was planned so that each part served only one function. This allowed for quick redesign, reprinting, and assembly of any element in the prototype in case of error or damage. Old parts were not discarded immediately, in case it was necessary to revert to an earlier version of the design. The "one part - one function" approach also resulted in reduced material usage and shortened printing times.

A series of motion simulations were performed using SOLIDWORKS software, which were then replicated on the completed device. At this stage, three significant design changes were necessary. Ultimately, a gripper mechanism driven by a motor and LEGO controller was created.

The first prototype of the manually driven gripper mechanism aimed to verify the correctness of the design and its functionality as expected. At this stage, it was decided to retain the double arms forming pantographs that moved the outer jaws. However, it was observed that the push rod system occupied too much space, which required a return to the CAD environment to reduce the overall dimensions of the assembly. After modifying the design, work began on developing a solution to compensate for the progressive movement of the phalanges during the gripper's closure.

A simulation of the mechanism's operation in SolidWorks illustrates a situation where the user closes the gripper over a workbench. The red-highlighted sections are seen moving along an arc and dipping below the working surface. The next task was to convert the arc motion of the phalange end into linear motion.

The next drawing shows the design with the added mechanism for compensating the progressive movement of the fingers. The drive shaft, extended from the motor, drives the green-blue wheel and the yellow screw. During six rotations of the motor shaft, a complete process of opening or closing the fingers and moving the entire assembly forward or backward by the distance highlighted in red in the previous drawing occurs. The illustration in three steps shows how the application of this mechanism altered the operation of the gripper. As observed, the distance of the motor from the workbench remains constant, while the ends of the outer phalanges move in a straight line, simultaneously raising the mounting point of the fingers along with the blue gearbox drum. After printing and assembling the next prototype, a test was planned to confirm the correct operation of the jaw geometry. In case of incorrect operation of the mechanism,

faulty parts will be removed and replaced with improved ones.

Testing the Developed Concept

After printing the necessary components and assembling them with parts from the previous design, testing of the developed mechanism was carried out under real conditions. The test was conducted by securely attaching the gripper to a workbench. The fingers were closed, and then the distance between the housing and the tips of the outer phalanges was measured. A metal ruler was placed parallel to them, serving as the working surface (bench). In a properly functioning mechanism, when the gripper fingers open, the tips of the phalanges should move along the surface of the ruler.

Position "0": Measurements taken between the measurement line and the line passing through the tips of the gripper phalanges revealed differences. Fixing the model mimics the real situation where the user places the gripper at the correct distance from the workbench or object. The next step involves grabbing an object. At this point, there may be collisions with the object or the workbench, or the gripper fingers may clamp down on the object, requiring the user to adjust the arm's position.

Measurements at position "0" showed that the maximum distance the ruler was displaced was 9 mm. The test involved rotating the motor shaft six times, with each full rotation marking the position of the phalange tip on a yellow tape attached to the workbench. The result was surprising as the device behaved somewhat differently than in the computer simulation. The progressive movement of the fingers was reduced but only to about 9 mm from the initial 26 mm. As seen in the illustration, the marked points are positioned above and below the "0" level and are asymmetrically distributed. This indicates that the designed reduction mechanism works, but not fully effectively. Additionally, the oscillations of the gripper tips relative to the measurement line suggest a more complex nature of this phenomenon.

Doubt arises whether my expertise is sufficient to achieve the intended effect. Due to the lack of specialized engineering knowledge, it was decided to use reverse engineering, which does not delve into the essence of the problem but focuses on observing visible results. To exclude potential errors arising from dimensional tolerances and assembly imperfections, the entire process was conducted in a 3D environment. The phalanges were virtually fixed to the line along which they were supposed to move. The faulty gearbox was removed, and a chart was added, depicting the dynamics of the mechanism's position change. The previous mechanism was intended to be a straight line, but it turned out that a shape resembling a sinusoidal segment would be more appropriate. A 25 mm segment represents the range of progressive movement of the phalange tip from position "0" to full opening. The blue line on the graph, with marked points, illustrates changes in the phalange tip displacement as a function of motor rotations, specifically during 6 rotations of the drive shaft. It was then necessary to develop a mechanism that would compensate for the phalange displacement according to the presented graph.

The drawn curve was wrapped around a cylinder and duplicated three times. By embossing into the interior of the cylinder, three cam profiles were created, along which pushers equipped with rollers would travel. The finger clamping mechanism will be attached to the cylinder. The pushers will travel along the cylinder's cam profiles, moving in the same manner as the jaw tips. The reverse movement aims to counteract the unwanted progressive movement of the phalange tips, ensuring their motion along a straight line.

Due to the need to maintain structural stability and symmetrical operation, three cams and three pushers were used. However, this introduced a complication. The full closing/opening movement of the gripper takes 6 motor rotations, and the unwanted progres-

sive movement of the jaw tips over 25 mm takes the same amount of time. Meanwhile, the displacement of the pushers along the cylinder cams takes 1/3 of a motor rotation. Therefore, it is necessary to use an appropriate type of gear mechanism to synchronize both movements and enable their simultaneous execution.

Requirements

Six motor rotations correspond to 2160 degrees, while the required movement is only 120 degrees. This means a gear ratio of 18:1 is necessary. Each full rotation of the motor causes the pusher to move along a circular path by 1/18 of a rotation. Due to the need for a compact design and simplification of the construction, it was decided to use a planetary gear system in this case. The gear creator tool in SOLIDWORKS proved to be indispensable during the design process.

Such a large gear ratio necessitated the use of two gear stages because, in the prototype manufacturing technology—using FDM printing with PLA material and limiting the gripper diameter to 70 mm—achieving the required gear ratio proved impossible. Therefore, the first stage of the gear system provides a 6:1 ratio, and the second a 3:1 ratio. The entire construction was successfully enclosed in a compact volume. The crown with pushers, mounted on top of the gear system, rotates at the appropriately reduced speed. A direct drive shaft from the motor passes through the planetary gear system and the cam cylinder, driving the second gear system responsible for the gripper jaw mechanism.

Red arrows indicate the direct drive from the motor, while the orange arrow shows the drive from the gear system. The motor drives the screw through a long cross-section shaft, which is responsible for moving the mechanism that actuates the finger pushers. A two-stage planetary gear system at the motor shaft drives the pusher crown. The pushers move along the cam drum (depicted transparently in the illustration), to which the gripper jaw bracket is attached. Inside the bracket is a screw and the mechanism for moving the fingers.

This stage took more time than initially expected, and developing a properly functioning mechanism required numerous iterations. The validity of using a modular concept was confirmed, allowing for minimized material usage and reduced waste in the development process. The parts visible in the photo are defective elements that were placed in a plastic waste container.

After developing the key construction necessary for this project, the design of the overall shape of the device was initiated. The developed mechanisms were used in sketches to maintain realistic proportions in the drawings.

Initially, three hypothetical development directions were considered. I am internally convinced that the new gripper should immediately convey the impression of being a safe and functional device.

- Structural Enclosure - The structural enclosure should be designed so that visible, raw construction parts are visually simplified, creating an aesthetically pleasing three-dimensional composition. It is important that the enclosure does not undergo formal deconstruction during use, as the device performs its functions in both assembled, disassembled, and intermediate states. Therefore, there is no need to particularly emphasize any of these states.
- Rigid Enclosure - For the resulting mechanical construction.
- Soft Enclosure - A smooth, organic form that fluidly changes shape.

Design of the aesthetic form

Work began on giving an aesthetic form to the raw mechanical construction to make it more user-friendly and visually appealing without the need for additional enclosures. Inspiration in this area came from designs where the construction serves an aesthetic function, such as chairs or bicycle frames, especially those made from carbon fiber.

Although the results were occasionally interesting, the overall effect suggested that a delicate form might be unsuitable for tools and devices used directly. The stark contrast between such a form and the bulky arm, along with numerous moving parts, could cause concern. Consequently, it was decided to halt further work on this concept and revisit it if none of the subsequent options proved better.

A major challenge in designing the enclosure is the need to divide it into parts to accommodate the changing shape of the device during use. This requires consideration of many sliding elements that must be sealed or, conversely, separated to avoid fluid accumulation and facilitate the removal of contaminants.

The possibility of joining rigid parts of the enclosure—shells—using injected elastomer or employing waterproof fabric, which could function both as hinges and seals, was considered. Although the effect could be spectacular, given the amount of work, material experimentation, and overall complexity of the project, it was concluded that the final solution might pose difficulties in assembly, maintenance, and repair in case of damage to any part.

An intermediate enclosure variant, consisting of rigid and flexible parts, could be implemented as a flexible monolith with varying wall thicknesses. This would allow for the free movement of thicker and stiffer parts. This approach would resolve the issue of troublesome and unreliable material joining.

A new challenge would be the production method for such an enclosure, let's call it a "glove," in low-volume manufacturing. A solution emerged soon: a mold similar to a lost-core mold, with the difference that the core would be durable and located inside the glove, forming the thinned sections in the walls responsible for material bending. The outer mold would be multi-part to allow for its removal after filling with elastomer and curing. The finished glove would be removed from the core.

A problem that I couldn't visualize or design in CAD was the controlled bending and stretching of the glove material in specific areas. I conducted a quick online search for similar solutions and came across a research and development project resulting in a bionic hand.

Initially, I was impressed with the creators, but over time I noticed that they had struggled with the aesthetics of the solution in various finger configurations. Despite programmed bends, the material deformed uncontrollably in different areas on the surface, leading to an effect of a too-loose rubber glove. After sketching several such coverings in the context of my own mechanics, I ultimately decided to abandon further work on this idea. A solution was needed that would behave predictably and over which complete control was possible.

The third direction for the gripper's form seems to have already been explored by the concept of a rubber glove. However, the results so far have not been fully satisfying. The ideas were interesting, but their implementation proved overly complicated. From the beginning of the project, there was an internal conviction that the device should be cheaper, more accessible, and as simple to produce as possible for a small company. Creating high-quality molds from aluminum or assembling parts under a magnifying glass did not meet these requirements.

Exploration of fabric for the gripper

In search of inspiration, the BMW Gina concept, created by Chris Bangle's team from 2001 to 2008, was recalled. Bangle's argument for using fabric instead of metal for the car's outer shell dispelled any remaining doubts. According to Bangle, visible body panels do not serve a structural function and can therefore be replaced with any material. Although this concept has much deeper significance, the practical use of flexible fabric seems convincing. It could solve most of the existing problems. Despite not expecting spectacular results, it was decided to give it a try.

The first prototype of the enclosure was made from a pair of cotton socks. Although it did not resemble a BMW, a subjective and objective critique of this concept yielded the following conclusions:

- The enclosure lacks moving parts,
- There are no mounting gaps that collect dirt,
- There are no gaps that could cut the skin of another person,
- No paint chipping,
- The form is minimalist, almost organic, and can be modified by the internal construction,
- Scratch resistance of the enclosure and surrounding equipment was achieved,
- The fabric can be hydrophobicized, making it waterproof,
- All these features remain unchanged in both open and closed states.

It seems like a promising idea. However, the aesthetics of this solution are not fully convincing. It is important that by designing the way the fabric drapes over protruding edges, the form can be controlled. The shape appears to be proportional.

The next step is to determine the parameters the fabric for the gripper should meet. This was surprising, as the use of textiles was not anticipated in this project, and textile materials were also outside the scope of previous professional interests. Considering the aesthetics of the project, a result resembling a high-end computer mouse or a modern prosthetic limb was expected.

The fabric requirements are:

- Elastic and stretchable in two directions, but offers minimal resistance to stretching to avoid trying to close the gripper. This would require a stronger drive to overcome the additional resistance posed by the material.
- Resistant to permanent deformation,
- Impermeable, does not allow water through, and has no seams,
- Relatively inexpensive and readily available,
- Should be black to match the rest of the arm, but it would also be beneficial if it came in other colors.

A review of materials and fabrics with characteristics close to the needs was conducted, and samples were ordered. Several types of fabrics were received, such as artificial leather, spandex, latex, lycra, elastane, satin, and various cotton blends. After testing for elasticity, water resistance, stains, abrasions, etc., adhesive tests were also performed.

The decision was made to use a matte finish for the fabric surface, without visible cellular texture. Cotton-blend materials were the most pleasant to the touch and offered the most aesthetically pleasing light distribution on the surfaces. Unfortunately, stretching revealed gaps in the weave, which, despite the use of impregnating agents, could lead to water seepage. A mid-range material was selected, characterized by a reasonable balance between durability and surface aesthetics. It was decided that starting with sewing the material and later finding another way to ensure impermeability would be the most appropriate approach.

First prototype and testing

The first prototype was outfitted with a spandex glove. Visible were random internal mechanisms and paper tape imitating flexible elements. At the back, a manual drive wheel was visible, used for testing the gripper's mechanism. After creating the prototype with the target material, it was possible to verify the properties of this solution, such as:

- Ease of fitting the covering onto the structure: This proved crucial for the solution.
- Degree of material fitting to the gripper structure.
- Perfect filling of spaces between moving parts.
- Waterproofness.
- Resistance to stains and dirt.
- Remarkable resistance to surface damage.
- Protection against damage to surrounding objects.
- Simple yet non-trivial overall form.
- Interesting light distribution on the fabric surface.
- And finally, the sensation of extraordinary simplicity of the solution. Someone who does not see all the internal mechanics might think it works so simply and naturally.

These observations, particularly the last one, confirm that the design is objectively good. The chosen design path, though complex, allowed reaching the goal. When gripping a bottle, the way the fabric conforms to the structure is visible. It looks debatable but promising. Further verification of the solution's effectiveness was necessary.

Gripping tests showed high stability and no weakening of the drive force. The grip quality improved due to increased friction between the fabric and the object, although rubber overlays had not yet been applied. The functioning of the tilting parts was correct; the gripper does not open on its own and holds the object securely once gripped. A test involving exposure to a water stream was conducted. Users of such arms often test them this way, so this test was also performed. The goal was to fill a glass with water and retract the arm. By mistake, the arm moved forward under the water stream, remaining there for 5 seconds before being retracted. The result was predictable: the material did not allow water through. Concerns were about water permeability through the handmade seam, which was directly under the water stream. This issue was noticed too late to react. As a result, a few drops of water seeped inside, but the leak occurred at a point distant from the electrical components, i.e., the motor.

Compared to existing grippers such as ACCREA and KINOVA, which have an IPX2 water resistance rating, this solution is a few classes higher. IPX2 indicates protection against water dripping from various directions at an angle of up to 15 degrees. This needs to be tested in a laboratory, but according to the table and personal experience in designing

waterproof enclosures, this solution might achieve an IPX4 or IPX5 rating. This translates directly into device safety in case of accidental contact with a water stream.

Initially, a surface modeling application was used to build geometry corresponding to the effect achieved in reality. In the first phase of the project, a way to eliminate protruding edges of the raw enclosure was sought. However, it was noticed that they naturally appear only in two places around the perimeter, and where they adjoin rectangular side elements, they disappear due to increased fabric tension. It was decided to leave these edges, adjusting their shape so that instead of straight lines, they formed curved arcs towards the end. The ends of the arcs were to correspond with the longitudinal edges on the sides.

To achieve a slight rounded edge at the junction of the gripper jaws, it was necessary to symmetrically insert parts on both sides that would shape the fabric accordingly. Next, a different shape was sought for the protruding side elements that cover the mechanical parts and serve as bumpers. The previous shape in the open state too closely resembled a hand in a glove, which evoked negative connotations. It was undesirable for the object to have direct associations with the human body.

The next step involved modifying the bumper design to achieve the desired shape of the covering. After printing samples, the shape and attachment method of the gripper overlays were refined. Using the covering in the form of a glove automatically solved the problem of hiding and sealing the bending points of the gripper jaws. The fabric also allowed the ends of the gripper to tilt freely to the sides, which is the greatest advantage of this type of covering.

The external side of the gripper overlay, which also serves as a bumper in collisions, was also modified and simplified. Several 3D visualization trials were carried out to see the character of the resulting form and how it might change with different materials and colors.

The results were surprising, and the gripper shape in these views looked a bit like a futuristic boat or a jet racer... Definitely not like a gripper. The form's character interestingly changes depending on the chosen materials. This is a useful feature for later facelifts or customer-modified versions.

Through achieving consistency between the device surface and the arm, and primarily due to the organically changing shape, a decision was made for a distinct animation of the new device. Its shape somewhat resembled a bird's beak. Seeking similarities in nature, photographs of emperor penguins were encountered. Their beauty and color scheme, especially the designer orange accent, were captivating. The light distribution on their black feathers somewhat resembles that on the gripper material. The elastic parts responsible for gripping objects and serving as bumpers were given an orange color to communicate their functions. The final element is a translucent glowing ring made using 3D printing with PETG with visible ribbing. The use of a larger nozzle diameter and thicker print layer resulted in a higher-quality surface and better light transmission. The entire assembly is topped with a black glossy ring concealing the gripper's mounting screws.

4.3 FUNCTIONAL AND USABILITY DESIGN

Assumption 1:

The device is intuitive to operate.

How to achieve this? What functions will realize this goal?

Objects in our environment are most often placed on a flat horizontal surface (table, shelf). To grasp them, the gripper needs to be oriented either vertically or horizontally.

Function 01: Auto-Mapping of Gripper Movement Directions

The software continuously adjusts the actual movements and rotations of the gripper to match the actual movements of the joystick. If the gripper is rotated, for example, around the vertical axis by 90 or 180 degrees, the computer will translate the previous movement directions into those corresponding to the actual orientation of the gripper.

Assumption 2:

The device communicates with the user through visual and auditory signals.

How to achieve this? What functions will realize this goal?

The need to use an application with movement direction prompts arises primarily from how the movement directions of the gripper are mapped onto the joystick and the lack of device status information within the user's field of view when they are focused on operation. Furthermore, the messages displayed in the application require user interpretation.

Function 02: Status Indication and Feedback

The gripper includes an RGB LED module with a BT communication module. It connects with a mobile application and indicates the selected movement set and status, such as force level, collision, or drive overload, through light and color on the gripper. By remembering the color associated with the movement set, the user will not need to constantly refer to instructions.

Assumption 3:

The device relieves the user from typical repetitive operations.

How to achieve this? What functions will realize this goal?

Objects in our environment are most often placed on a flat horizontal surface (table, shelf). To securely grasp them, the user must manually level the gripper.

Function 03: Auto-Rotation of the Gripper

The controlling computer automatically adjusts the gripper to be either horizontal or vertical during arm movement, depending on which angle is closer in a given situation. An exception occurs when the gripper has auto-leveled itself, and then the user changes its position and grasps something. In this case, the function will not be executed during movement. If a collision occurs with an object in the environment, the auto-stop function will activate. The next step in such a situation is to avoid the obstacle; thus, the user must manually adjust the gripper's movement set to enable this.

Function 04: Auto-Switching of Functions Upon Collision

If the user releases the joystick after the gripper automatically stops upon contact with an obstacle, the computer will interpret this as a collision and automatically switch to navigation in a plane perpendicular to the direction of movement. This will be indicated by a specific color and sound.

Assumption 4:

The device responds to obstacles.

How to achieve this? What functions will realize this goal?

Collisions occur due to poor distance estimation, limited visibility, navigation errors, excessive gripper movement speed, or incorrect stopping moment of the drive.

Function 05: Auto-Stop on Collision

If the user moves the gripper and does not release the joystick before colliding with a surface, wall, or heavier object, the gripper will stop upon contact with the obstacle and slightly retract. If the user does not release the joystick, the computer will interpret this as a command to push or move, and after a moment, the gripper will continue in the indicated direction.

Assumption 5:

The device does not require precision from the user.

How to achieve this? What functions will realize this goal?

Precise positioning of the gripper is always needed when grasping objects and sometimes when setting them down. Asymmetrical grippers with three fingers struggle with symmetrical force distribution on the object. It is often observed that grasping occurs with only two not fully opposing fingers, leading to accidental adjustments of the object relative to the surface from which it was picked up.

Function 06: Symmetrical Universal Gripper

The design allows effective grasping of objects from a surface in any imprecise gripper orientation. The gripper's shape communicates the range and direction of jaw movements. The materials and colors indicate the functional parts of the device.

Users often struggle with symmetrical alignment of the gripper relative to the object being grasped. With improper alignment, the object may shift or tip over. It is easiest to grasp objects from above, with the gripper oriented towards the user, allowing them to see the object and two opposing fingers of the gripper. However, when grasping a cup to drink from, it is necessary to align the gripper parallel to the table.

Function 07: Auto-Positioning of the Gripper Relative to the Object

The gripper is equipped with distance sensors. When the gripper approaches an object, the computer automatically adjusts its position relative to the object.

How to achieve this? What functions will realize this goal?

While aligning the gripper vertically or horizontally is relatively simple, aligning the gripper's rotational angle is challenging due to often lacking reference points. The gripper can also be oriented differently relative to the user, making it difficult to gauge the rotation angle.

Function 08: Rotation Snapping to Preset Angles

The user tilts the joystick, and the gripper rotates in the desired direction. The gripper stops at the nearest preset angle, such as 0, 45, 90, 135 degrees, etc. The user releases

the joystick once the drive has stopped. There is no need to capture the exact stopping moment or adjust its position.

Assumption 6:**The device "forgives" user errors.**

How to achieve this? What functions will realize this goal?

User errors typically involve moving the gripper in the wrong direction and/or at excessive speed. This requires additional position corrections or may cause collisions with the surroundings.

Function 09: Smooth Start of Drives

A programmed smooth start for the drives in the initial phase of movement extends the user's reaction time and ensures that during short movements, the arm moves smoothly. After covering a few centimeters, it will gradually reach the target speed. It is possible to introduce a smooth stop function after releasing the joystick to further soften the movement. However, this would require real-world testing, as the movement would continue for a few centimeters after releasing the joystick, requiring the user to anticipate.

Assumption 7:**The device adapts to the user's habits.**

How to achieve this? What functions will realize this goal?

One of the basic requirements for the device is to enable independent drinking and eating. Users also frequently move containers with liquids or use the gripper near running water from a faucet.

Function 10: Device Resistant to Water Spills

The casing is sealed, or the gripper's electrical components are sealed, allowing liquid to flow freely through the structure without accumulating inside. The device's construction is resistant to corrosion.

Observations have shown that object movement functions without the need for grasping are performed even though devices are not adequately adapted for this purpose. Users naturally facilitate and speed up tasks.

Function 11: Device Adapted for Sliding and Levering Objects

The gripper has bumpers for performing sliding and levering operations on doors, drawers, etc. The construction is appropriately rigid and durable for these purposes concerning the forces exerted by the arm's drives rather than absolute values.

When liquid spills from a cup onto the gripper, it collects in the joints and penetrates the finger mechanisms. It is impossible to fully dry these constructions, and flushing the grippers risks damaging them. Over time, grippers become dirty.

Function 12: Device Easy to Clean

The shapes of the casing and its parts prevent dirt accumulation or allow washing in water. Hydrophobic chemical agents can be applied to the gripper's surface and other parts to prevent permanent dirt adhesion.

The introduction of the "auto-stop on collision" function will not work if the user does not have the new software version for the arm, nor will it work if the arm is off, and the cart with the user moves and collides with furniture or a doorframe.

Function 13: Device Resistant to Mechanical Damage

Despite all the new protective functions proposed in the project, it must be assumed that users will be more creative or that unforeseen accidents may occur. Therefore, the gripper's design should be developed with a reasonable safety margin.

USER INSTRUCTIONS

The instructional application is currently essential for users to operate the assistive arm independently. Its primary value lies in displaying directional arrows for the gripper's movement when switching functions. However, its major drawback is that the on-screen visualization of the arm does not correspond to its actual orientation relative to the user. Displaying arrows with directional cues requires users to have spatial imagination and adapt these directions to the real position of the gripper. The most significant challenges and uncertainties arise when controlling the gripper relative to a virtual point. Users repeatedly experiment to determine which joystick movement corresponds to which gripper motion. Accurate replication of real movements is not feasible in this case.

The concept aims to ensure that the arm's visualization in the application is realistic, and the displayed arrows correspond to the actual directions of the gripper and joystick movements. Each set of movements will be assigned a distinct color. When changing movement sets, the color of the large, prominent arrows on the display will also change, and the LED on the gripper will emit the same color. Since BATEO requires only four function switches, users will quickly learn which color signals correspond to specific real movements of the gripper. The goal is for users to be able to operate the device without needing to refer to the instructions after a brief learning period. Switching movement functions will change the light color on the gripper. Additional functions will also be signaled both on the gripper and the display simultaneously.

4.4 Concept of Movement Direction Mapping

This section proposes a change in the method of mapping movement directions and the sequence of movement sets, based on observations and experiences. The following will explain what the new navigation model might look like.

The directions of joystick movement have been marked by color and applied to the arm model. Rotation of the gripper around its own axis will be achieved by tilting the joystick left and right. In this setup, the directions represented by the controller align with the gripper's movement directions.

To enhance the visibility of the object to be grasped, the gripper has been rotated 90 degrees to the left on the horizontal plane. Consequently, the directions of the controller and gripper are as follows: moving the joystick forward results in moving the entire "gripper object" rotated to the left, and the movement directions diverge from the gripper's sides. To rotate the gripper around its longitudinal axis to the left (i.e., in this setup, "backward, towards the user"), the joystick should be tilted left according to the original direction representation. In reality, this rotation does not occur around the green axis but around the orange axis rotated 90 degrees to the left. Would it be more intuitive to perform this rotation by pulling the joystick backward, in accordance with the expected direction of movement?

If the gripper is rotated another 90 degrees to the left, towards the user, this might result from intentional adjustment or automatic reconfiguration of the arm during movement. The joystick movement directions have been marked by color and applied to the arm model. Movement of the joystick forward still moves the arm away from the user, and moving it towards the user brings it closer. Lateral movements are consistent. However, the gripper's rotation axis has been reversed. To rotate the gripper in the same direction as previously (i.e., "to the left" as illustrated "from left to right"), the joystick should be tilted left.

During testing, it was observed that some settings and spatial transformations were performed intuitively, while in other cases, errors occurred that resulted in the opposite of the intended action. Moments when the device functioned as expected were experienced as relief, whereas others were accompanied by stress and impatience. As noted by Don Norman in his book, to achieve the correct effect when using a controller, the relationships between the controller and the behavior to be controlled must be correctly mapped. Mapping directions as: up/front, back/down, right/front (progress), left/back (regress) seems natural.

To move the gripper in three dimensions, it is necessary to control it along three axes/directions: forward-backward, right-left, and up-down. Movement of the gripper in the first two directions occurs on the horizontal plane (A), which is always parallel to the ground. Moving the joystick in the forward-backward and right-left directions results in moving the gripper in the same manner. To lift the gripper or bring it closer to the floor, the function button must be used to change the movement plane (B) to one perpendicular to the ground and parallel to the user's face. In this configuration, joystick movements forward-backward and right-left will result in gripper movements up-down and right-left. To move the gripper forward again (towards the user), the function button must be used once more to reset to the horizontal movement plane (A). It is also possible to change the movement plane to one perpendicular to the ground and perpendicular to the user's face (C). In this case, joystick movements forward-backward and right-left will result in gripper movements up-down and forward-backward, respectively.

At this point, a pattern of mapping the gripper's movement directions to joystick movements can be identified. Although technically correct, it may not be intuitive for every user. One movement plane of the joystick can become one of the three movement planes of the gripper. This can be easily visualized by imagining the joystick's movement plane as a sheet of paper lying on a desk in front of the user. On this sheet, the forward-backward and right-left directions are real – the joystick and gripper move in the same way. If we change the movement plane to the second one (B), we intuitively mark up-down and right-left directions, even though the plane of the paper is at a 90-degree angle to the actual gripper movement plane. In reality, moving forward on the paper corresponds to moving up, while right-left still corresponds to actual movements. Conversely, if we switch to the third movement plane of the gripper (C), we observe that moving right on the paper corresponds to the gripper moving forward, and moving forward on the paper corresponds to the gripper moving up. In this case, none of the actual hand movements align with the gripper's real movements.

Nevertheless, there is a pattern that our brain can quickly learn to navigate the device in space correctly. However, some inconsistency may be bothersome and lead to errors. The first plane (A) corresponds 100% to reality, and joystick movements are performed intuitively. In the second case, only 50% corresponds to reality, and 50% requires transposition. In the third case, every movement requires transposition, but the situation is more abstract and does not mix two different systems.

Adding the capability for the gripper to rotate right-left and the rotating axes in space

may complicate navigation. Individuals without well-developed spatial imagination may encounter more difficulties operating the device or may require more time to learn. It is also possible that for some people, the representation will differ, and on the diagram, movement to the right will correspond to movement backward.

Undoubtedly, the issue of movement mapping in such a device is very interesting and requires further research with user groups. However, I have decided not to delve into this topic in this work, focusing instead on issues related to the gripper device that can be addressed in other ways.

Organizing the representation of directions in space seems to be a key task for the effective use of the arm.

4.5 SUMMARY

The undertaken project work consisted of several key stages, each contributing significantly to the final solution. The first chapter presented the problem and characterized existing solutions, highlighting the issues encountered. This allowed for a thorough understanding of the discussed technical system.

The second chapter, representing the research phase of the work, defined the research objectives and methods. This chapter includes a review of user studies and a detailed analysis of them. Comparative and usability tests of devices were also discussed. This chapter provides a substantial amount of observations and conclusions, which were used to define detailed assumptions for the project.

The third chapter synthesized the conclusions and design hypotheses from the previous chapters. The architecture of the new system was defined, and the project guidelines were grouped by areas they would affect: mechanics, navigation, and software. This chapter includes the accepted design assumptions, material choices, and applied technologies.

The fourth chapter documents the design work on the gripper construction. The conducted experiments provided rapid feedback, allowing for the transition to CAD modeling with a pre-tested mechanism. Although the developed construction is fully functional, it may be subject to further optimization, particularly in terms of adapting to the final production technology of the device.

The fifth chapter presents the completed design of the multifunctional gripper for the robotic arm. It includes visualizations of the final design and discusses all aspects of the new solution.

This study successfully diagnosed the causes of recurring damage and failures in arms and grippers. Analyses and research showed that users interact with these devices in the most convenient way for them, which does not always align with the designers' expectations. The gathered conclusions led to the creation of an entirely new functional and usability framework for such a gripper. Observations of the difficulties users faced with robotic arms led to the development of a set of functions automating the arm's operation. Implementing these functions in the device's controller code would significantly improve the usability of the new generation of the device.

The design, materials used, and usability enhancements contributed to the development of a distinctive device style. Despite its unique character, the device's aesthetics harmonize with the existing arm, which remains unchanged.

The idea of using a programmable Lego Mindstorms set to build early prototypes was positively evaluated. It allowed for the construction of prototypes and immediate

testing. The ability to verify the correctness of automated function algorithms was facilitated by the easy programming and testing of solutions on built prototypes.

The issue of mapping movement directions was developed only to a limited extent and only in the theoretical layer. The accurate diagnosis of the importance of this area for shaping user experience was undoubtedly valuable for the project. It is believed that this issue deserves deeper exploration and user research.

It was not possible to test the final form of the project with users. This would require the involvement of a team of mechanical engineers and programmers in a non-commercial project, and the potential costs of preparing a working prototype and software would repeatedly exceed financial capabilities. However, only such a form of project validation can provide true feedback on the quality of the project work.

The solution created addresses real user needs, and the designed device features unique characteristics that current grippers do not possess.

The realization of this project was at times very challenging but also brought a great deal of satisfaction. The need to surpass personal limitations, expand knowledge and skills to prove that it is possible to go further and do something better, means that working on each new project is also working on oneself.