

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA

im. Jarosława Dąbrowskiego

Szkoła Doktorska WAT



DOBÓR PARAMETRÓW MANIPULATORÓW ROBOTÓW PRZENOŚNYCH
NA PODSTAWIE TECHNIK PROJEKTOWANIA TOPOLOGICZNEGO

Rozprawa doktorska

Tomasz Jacek Krakówka

promotor dr hab. inż. Andrzej Typiak, prof. WAT
promotor pomocniczy i opiekun dr inż. Maciej Cader

WARSZAWA 2025

Dobór parametrów manipulatorów robotów przenośnych na podstawie technik projektowania topologicznego

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodę doboru parametrów w procesie projektowania manipulatorów dla przenośnych robotów mobilnych, przeznaczonych do zastosowań wojskowych i antyterrorystycznych.

W rozpatrywanym zagadnieniu punktem wyjścia do dobór parametrów manipulatora są wymagania dotyczące zdolności robotów i katalog komponentów dostępnych w danym projekcie. Autor zidentyfikował lukę w dostępnej literaturze dotyczącej definicji obciążenia, w szczególności dla małych manipulatorów robotów wykorzystywanych w zadaniach Explosive Ordnance Disposal (EOD). W celu rozwiązania problemu, zaproponowano autorską metodę projektowania składającą się z trzech zasadniczych etapów. W pierwszym etapie wybierane są napędy manipulatora i parametry geometryczne. W drugim etapie przeprowadzana jest szczegółowa analiza obciążenia. W ostatnim etapie przeprowadzana jest optymalizacja topologiczna komponentów. Metodę walidowano przy użyciu wybranego przegubu manipulatora przenośnego robota przeznaczonego do zadań EOD.

Słowa kluczowe: manipulatory mobilne; definicja stanów obciążenia; optymalizacja topologiczna

Selection of parameters of portable robot manipulators based on topological design techniques

Abstract. The work presents a method for designing manipulators for man-portable UGVs (Unmanned Ground Vehicles), intended for military and counter-terrorism applications. The approach involves selecting manipulator parameters based on requirements for capabilities and a database of available components. The author identified a gap in existing literature regarding load definition, particularly for small robot manipulators used in Explosive Ordnance Disposal (EOD) tasks. To address this, a method was proposed consisting of three main stages. In the first stage, manipulator drives and geometric parameters are selected. In the second stage, detailed load analysis is performed. In the final stage, topological optimization of the components is carried out. The method was validated using a selected manipulator joint of a portable robot designed for EOD tasks.

Keywords: manipulator; load cases definition; topology optimization

Spis treści

Wykaz skrótów	7
Wykaz symboli	8
1. Wstęp	11
2. Określenie istotnych parametrów manipulatorów robotów przenośnych	13
3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych	19
3.1. Zadania i budowa manipulatorów przenośnych robotów do zadań specjalnych	19
3.2. Projektowanie systemowe w aspekcie robotów do zadań specjalnych	24
3.3. Zastosowanie metod optymalizacyjnych w projektowaniu robotów	25
3.3.1. Podstawowe metody optymalizacji	29
3.3.2. Optymalizacja nieliniowa z ograniczeniami	31
3.3.3. Optymalizacja wielokryterialna	33
3.4. Optymalizacja strukturalna	35
3.5. Metody optymalizacji topologicznej	36
3.5.1. Metody gęstościowe	37
3.5.2. Metoda zbiorów poziomowych	40
3.5.3. Metody implementacji geometrii wynikowej optymalizacji topologicznej	40
3.6. Metody projektowania i optymalizacji manipulatorów	42
3.7. Wnioski z przeprowadzonej analizy zagadnienia	52
4. Cel i zakres pracy	56
5. Określenie kluczowych parametrów manipulatorów robotów przenośnych, istotnych dla osiągnięcia wymaganych zdolności roboczych	58
5.1. Kluczowe parametry manipulatorów istotne dla osiągnięcia wymaganych zdolności	62
5.2. Podsumowanie	65
6. Badania identyfikacyjne obciążeń podczas wykonywania zadań manipulatorem robota przenośnego	67
6.1. Metodyka badawcza	68
6.2. Wyznaczanie obciążeń występujących podczas pracy manipulatora	68
6.2.1. Podnoszenie obiektów na maksymalnym zasięgu manipulatora	68
6.2.2. Podnoszenie obiektów o maksymalnej dopuszczalnej masie	69
6.2.3. Przesuwanie obiektów leżących na gruncie	71
6.3. Wnioski z badań identyfikacyjnych	73
7. Opracowanie doboru parametrów manipulatorów w aspekcie zwiększenia ich zdolności roboczych	74
7.1. Wymagania dla manipulatorów przenośnych robotów do zadań specjalnych	76

7.1.1. Parametryzacja zdolności roboczych robota	78
7.2. Biblioteka rozwiązań konstrukcyjnych dostępnych w projekcie	82
7.3. Projekt koncepcyjny manipulatora	84
7.4. Dobór podstawowych parametrów manipulatora	88
7.5. Wyznaczenie krytycznych zestawów obciążeń manipulatora	92
7.6. Weryfikacja wyselekcjonowanych komponentów dla wyznaczonych, przypadków obciążeń	96
7.7. Optymalizacja topologiczna komponentów manipulatora	97
7.8. Projektowanie ukierunkowane na wytwarzanie	98
7.9. Dostosowanie rezultatów optymalizacji topologicznej do implementacji . .	104
7.10. Badanie wpływu ilość uwzględnianych przypadków obciążeń na wynik optymalizacji topologicznej	106
8. Implementacja opracowanej metody projektowania i optymalizacji manipulatorów	110
8.1. Wymagania określone dla robota z projektowanym manipulatorem	110
8.2. Biblioteka rozwiązań dostępnych w projekcie	111
8.3. Projekt koncepcyjny manipulatora	113
8.4. Dobór podstawowych parametrów manipulatora	114
8.5. Wyznaczenie przypadków obciążeń	119
8.5.1. Obciążenie składową momentu, działającą w kierunku promieniowym przegubu	119
8.5.2. Obciążenie składową momentu, działającą w kierunku osiowym przegubu	123
8.5.3. Agregacja obciążeń	124
8.6. Weryfikacja wytrzymałości wybranego komponentu	126
8.7. Minimalizacja masy struktury manipulatora	127
8.8. Dobór liczby przypadków obciążeń	129
8.9. Optymalizacja komponentów manipulatora	132
8.10. Wnioski z implementacji metody projektowania i optymalizacji manipulatorów	136
9. Podsumowanie i wnioski końcowe	137
Bibliografia	141
Spis rysunków	157
Spis tabel	157

Wykaz skrótów

ANOVA – ang. *Analysis of variance*
BESO – ang. *Bidirectional Evolutionary Structural Optimization*
CAD – ang. *Computer Aided Design*
C-IED – ang. *Counter – Improvised Explosive Device*
COTS – ang. *Commercial off-the-shelf*
DH – ang. *Denavita-Hartenberga (notacja)*
DOF – ang. *Degree of Freedom*
EOD – ang. *Explosive Ordnance Disposal*
ESO – ang. *Evolutionary Structural Optimization*
FEA – ang. *Finite Element Analysis*
FEM – ang. *Finite Element Method*
GA – ang. *Genetic Algorithm*
GCI – ang. *Global Conditioning Index*
MBS – ang. *Multibody System*
MDCI – ang. *Modified Dynamic Conditioning Index*
MES – *Metoda Elementów Skończonych*
MMA – ang. *Method of moving asymptotes*
NSGAI – ang. *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*
NIST – ang. *National Institute of Standards and Technology*
PTZ – ang. *Pan Tilt Zoom*
SIMP – ang. *Solid Isotropic Material with Penalization*
SLI – ang. *Structural Length Index*
TO – ang. *Topology Optimization*

Wykaz symboli

m_r – Masa robota

m_{max} – Udzwig robota

m_z – Udzwig robota na maksymalnym wysięgu

Z – Wysięg manipulatora

W_1 – Wskaźnik 1

W_2 – Wskaźnik 2

$f(x)$ – Funkcja zmiennej x

L – Funkcja Lagrange'a

λ – Mnożniki Lagrange'a

$g(x)$ – Funkcja więzów nierównościowych

$h(x)$ – Funkcja więzów równościowych

$\nabla f(x)$ – Gradient - pierwsza pochodna funkcji f w punkcie x

$H_f(x)$ – Hessian - macierz drugich pochodnych funkcji f w punkcie x

K – Macierz sztywności

E – Moduł Younga

ρ – Gęstość, stopień wypełnienia materiałem

C – Podatność globalna

κ – Wskaźnik uwarunkowania

η – Wartość indeksu GCI

$f_1, f_2, f_3...$ – Funkcje dopasowania

$c_1, c_2, c_3...$ – Funkcje więzów

F – Siła wywierana na przeszkodę

$l_1, l_2, l_3...$ – długości członów

$q_1, q_2, q_3...$ – współrzędne wewnętrzne manipulatora

M_F – Moment od siły F

β – kąt obrotu układu współrzędnych

α – kąt określający kierunek badanego obciążenia

a_w – odległość kół przekładni

d_w – średnica ślimaka

d_g – średnica ślimacznicy

M_{wy} – maksymalny moment wyjściowy przekładni

m_x – moduł przekładni

u – przełożenie przekładni

z_1 – liczba zębów ślimaka

z_2 – liczba zębów ślimacznicy

m_x – kąt przyporu

μ – współczynnik tarcia

η_p – sprawność łożyskowania

γ – kąta wzniosu linii śrubowej

1. Wstęp

Roboty do zadań specjalnych to zaawansowane bezzałogowe pojazdy naziemne (UGV), wykorzystywane w działaniach takich jak rozpoznanie, nadzór, detekcja i neutralizacja zagrożeń, w tym improwizowanych ładunków wybuchowych (IED), niewybuchów (UXO), oraz zagrożeń chemicznych, biologicznych, radiologicznych i nuklearnych (CBRN). Ich konstrukcja musi spełniać szczególne wymagania operacyjne związane z pracą w środowiskach nieustrukturyzowanych, często niebezpiecznych i trudnodostępnych. W takich warunkach kluczowe znaczenie ma możliwość zdalnego działania robota przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej skuteczności operacyjnej.

Wśród elementów konstrukcyjnych tych robotów najważniejszą rolę pełni **manipulator**, który umożliwia wykonywanie złożonych czynności, takich jak przenoszenie obiektów, operowanie narzędziami specjalistycznymi, czy też wspomaganie mobilności robota przez balansowanie lub podnoszenie platformy w przypadku jej przewrócenia. Manipulator służy również jako podstawa dla efektorów oraz czujników wspierających działania z zakresu C-IED i CBRN.

W kontekście zastosowań operacyjnych, coraz większe znaczenie mają **roboty przenośne**, czyli takie, które dzięki swoim kompaktowym rozmiarom i niskiej masie mogą być transportowane ręcznie lub w plecaku. Projektowanie manipulatorów dla takich robotów stawia szczególne wyzwania: konstrukcja musi być lekka, ale jednocześnie wytrzymała i funkcjonalna, co wiąże się z koniecznością kompromisu pomiędzy masą, zasięgiem, udźwigiem i sztywnością.

Analiza dostępnej literatury wykazała, że istniejące metody projektowania manipulatorów – opracowane głównie z myślą o zastosowaniach przemysłowych – nie mogą być bezpośrednio zaadaptowane do potrzeb robotów przenośnych do zadań specjalnych. Ograniczenia te wynikają m.in. z mniejszych prędkości przegubów, pracy w nieprzewidywalnym środowisku, konieczności odporności na kolizje oraz bardziej złożonych i zróżnicowanych przypadków obciążeń. Istnieje zatem potrzeba opracowania **nowych metod projektowych**, które uwzględniają specyfikę tych zastosowań, w tym realistyczne scenariusze obciążeń i ograniczenia operacyjne.

Jednym z najistotniejszych parametrów projektowych w kontekście robotów przenośnych jest masa manipulatora. Parametr ten przekłada się bezpośrednio na mobilność, zużycie energii oraz zdolności robocze. W zależności od założonego celu projektowego masa robota może być traktowana jako parametr optymalizowany lub jako ograniczenie konstrukcyjne.

W odpowiedzi na zidentyfikowane potrzeby zaproponowano autorską metodę projektowania manipulatorów, która integruje iteracyjny dobór parametrów konstrukcyjnych z wykorzystaniem dostępnych komponentów (tzw. biblioteka rozwiązań), realistyczne modelowanie przypadków obciążeniowych oraz optymalizację topologiczną. Zapropono-

nowane podejście systematyzuje proces projektowy i umożliwia opracowanie lekkich, funkcjonalnych konstrukcji dopasowanych do konkretnych wymagań użytkownika.

W kolejnych rozdziałach przedstawiono szczegóły przyjętej metody projektowania, zakres badań, analizę wymagań i obciążeń, a także wyniki uzyskane w procesie implementacji metody na przykładzie manipulatora robota PIAP Patrol.

2. Określenie istotnych parametrów manipulatorów robotów przenośnych

Przedmiotem rozprawy jest zagadanie poprawy zdolności roboczych manipulatorów przenośnych robotów mobilnych do zadań specjalnych. Zdolności robocze są określane przez szereg wskaźników - parametrów opisujących miarę osiągnięcia celu, które mają charakter ilościowy, takie jak np. wysięg, udźwig lub stosunek udźwigu do masy urządzenia. O wartościach wymienionych wskaźników decydują parametry konstrukcji określane w procesie projektowania. Dobór tych parametrów jest procesem optymalizacji wielokryterialnej. Celem optymalizacji jest znalezienie ekstremów wskaźników opisujących zdolności robocze robotów przy ograniczeniach równościowych i nierównościowych, które wynikają z własności parametrów sterujących. Poprzez dodatkowe ograniczenia uwzględnia się także zależności pomiędzy parametrami, których spełnienie predestynuje konstrukcję do wykonywania zadań, wymaganych dla robotów do zadań specjalnych. Dla osiągnięcia wartościowych wyników przeprowadzenie optymalizacji topologicznej wymaga przygotowania licznych parametrów sterujących algorytmem, z których jednym z kluczowych jest oszacowanie obciążeń występujących podczas eksploatacji urządzenia.

Dążenie do osiągnięcia pożądaných ekstremów wskaźników efektywności manipulatorów przekłada się na szereg korzyści praktycznych. Maksymalizacja jednego z istotniejszych wskaźników, którym jest stosunek udźwigu do masy w robotach do zadań specjalnych prowadzi do znaczącej poprawy ich wydajności, mobilności i wszechstronności. Roboty z wyższym stosunkiem udźwigu do masy mogą przenosić większe ładunki w stosunku do własnej masy, co pozwala im na wykonywanie bardziej wymagających zadań, takich jak wykorzystanie cięższych i efektywniejszych sensorów i efektorów, lub przenoszenie cięższych materiałów. Osiągnięcie wysokiej wartości wysięgu może przełożyć się na zdolność do podejmowania obiektów z trudno dostępnych miejsc.

Redukcja masy robotów do zadań specjalnych przynosi liczne korzyści, w tym zwiększenie mobilności i efektywności energetycznej co czyni je bardziej skutecznymi narzędziami w różnych zastosowaniach. Lżejsze roboty są łatwiejsze do transportowania, zarówno ręcznie przez operatorów, jak i za pomocą pojazdów. Mogą być szybciej przenoszone na miejsce akcji, co jest kluczowe w sytuacjach awaryjnych. Mniejsza masa pozwala robotom na łatwiejsze poruszanie się po trudnym terenie, wspinanie się po schodach, pokonywanie przeszkód i operowanie w ciasnych przestrzeniach. Lżejsze roboty zużywają mniej energii do poruszania się, co przekłada się na dłuższy czas działania na jednym ładowaniu baterii. Dzięki mniejszej masie roboty mogą korzystać z mniejszych i lżejszych źródeł zasilania, co dodatkowo obniża ich masę, koszt i zwiększa autonomię. Mniejsza masa pozwala robotom na szybsze poruszanie się i reagowanie na zmieniające się warunki na polu bitwy, w sytuacjach ratunkowych czy podczas inspekcji. Lżejsze roboty są mniej

2. Określenie istotnych parametrów manipulatorów robotów przenośnych

narażone na uszkodzenia mechaniczne podczas upadków czy kolizji, co zwiększa ich trwałość i niezawodność.

Jednoczesne polepszanie wartości wymienionych wskaźników jest zadaniem wzajemnie sprzecznym. W praktyce oznacza to konieczność znalezienia kompromisowych rozwiązań, które spełniają określone wymagania dla wszystkich zdefiniowanych kryteriów. Jest to optymalizacja wielokryterialna, której celem jest znalezienie zbioru rozwiązań Pareto-optymalnych, gdzie poprawa jednego kryterium nie jest możliwa bez pogorszenia innego.

W wyniku zastosowania metod optymalizacyjnych przy konstruowaniu manipulatorów poprawia się zdolności robocze robotów do zadań specjalnych. Będzie miało to pozytywny wpływ na efektywność prowadzonych przez służby działań z wykorzystaniem przenośnych i plecakowych robotów mobilnych. Opracowanie robotów o polepszonych parametrach i własnościach użytkowych wpłynie korzystnie na poprawę bezpieczeństwa.

Tabela 2.1. Parametry wybranych robotów o masie do 103kg, wyposażonych w manipulatory

Model	Masa [kg] (m_r)	Udźwig [kg] (m_{max})	Udźwig na maks. wysięgu [kg] (m_z)	Wysięg manipulatora [m] (Z)	DOF
Filr Centaur[1]	80	16	8	2	5
Flir Packbot525[2]	29.1	20	5	1.87	5
Flir Packbot510[2]	26,7	20	5	1.87	5
Flir SUGV[3]	13.8	10	5.4	0.61	4
QinetiQ SPUR[4]	12	-	-	0.66	4
QinetiQ Talon VI[5]	81	-	-	1.57	5-6
AeroVinroment Telemax Evo Hybrid[6]	80	37	7.5	1.56	7
AeroVinroment Telemax Evo Pro[6]	77	20	3	1.73	7
Roboteam MTGR[7]	15.5	5	5	0.49	3
Roboteam TIGR[8]	84	15	6	1.50	5
Exail Cameleon E[9]	48	15	-	1.50	4
Exail Cameleon LG [8]	20	4.5	-	0.91	5
ICOR Mini Caliber [10]	29	6.8	-	1.32	5
ICOR Caliber T5 [11]	68	20	8	1.19	5
Ł-PIAP PIAP Fenix	20	5	2	1	3-4
Ł-PIAP PIAP Gryf	45	20	5	2	5-6
Ł-PIAP PIAP Patrol	95	40	7	2	5-6
ICP Avenger LT [12]	96	50	8	1.63	5
L3Harris T4 [13]	103	55	20	2	5

W tabeli 2.1 zestawiono przykłady konstrukcji z kategorii robotów przenośnych i

plecakowych wraz z najważniejszymi parametrami dotyczącymi masy i możliwości manipulatora. Są to roboty, które są dostępne w ofercie producentów w czasie prowadzenia badań. Wymienione roboty są wyposażone w manipulatory o liczbie stopni swobody od 3 dla najlżejszych, plecakowych do 7 dla najbardziej zaawansowanych konstrukcji, średniej wielkości robotów przenośnych. W większości przypadków stosowane są manipulatory antropomorficzne o 5 stopniach swobody.

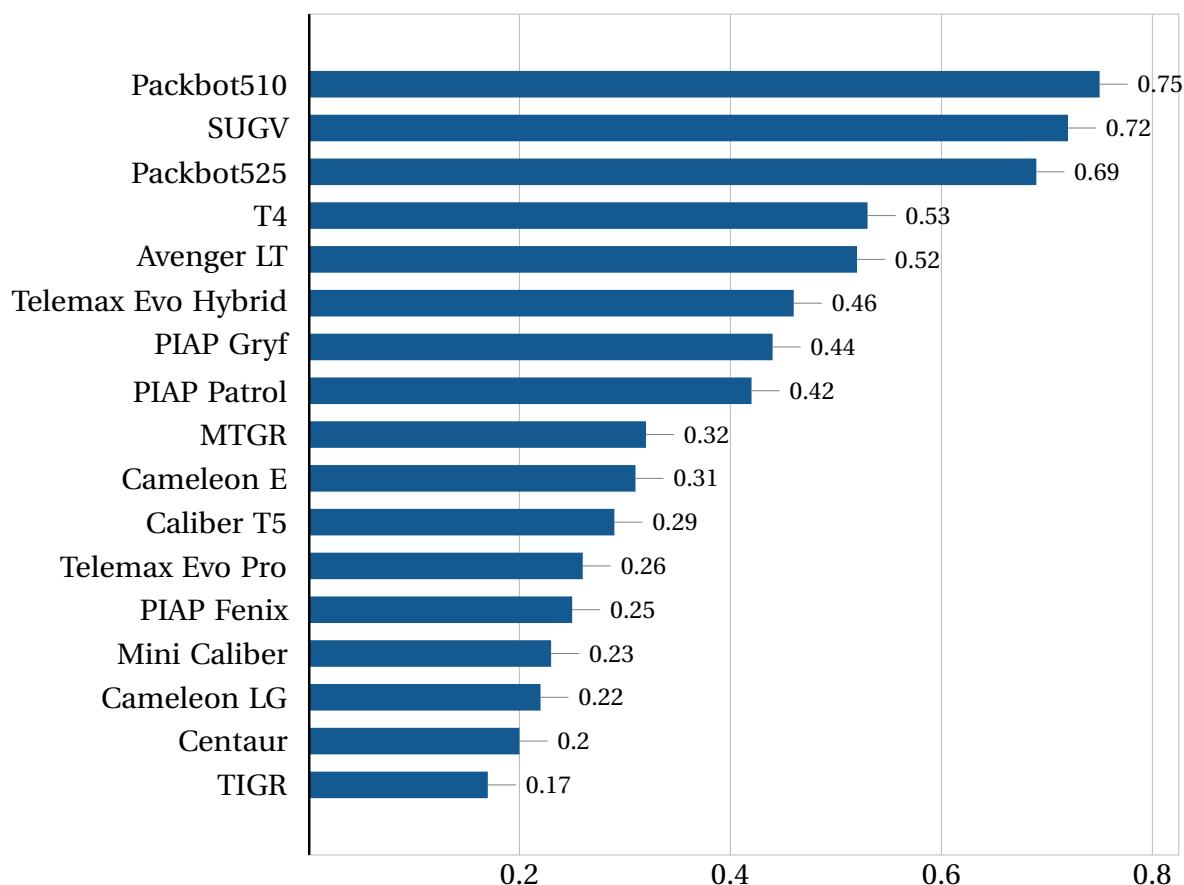
Do przybliżonego porównania możliwości przedstawionych konstrukcji można wykorzystać wskaźniki wydajności. Pierwszym wskaźnikiem W_1 jest stosunek maksymalnej masy, którą robot może unieść, do masy robota.

$$W_1 = \frac{m_{max}}{m_r} \quad (2.1)$$

gdzie:

- m_r - masa robota;
- m_{max} - udźwig maksymalny;

Wartości wskaźników dla robotów z tabeli 2.1 zilustrowane są na rys. 2.1.



Rys. 2.1. Wartości wskaźnika W_1 dla wybranych robotów.

Najkorzystniejszą wartość wskaźnika W_1 osiągają roboty Flir Packbot (rys. 2.2) i Flir

SUGV. Wysoką wartość wskaźnika roboty osiągają dzięki niskiej masie oraz zastosowaniu przekładni spiroidalnych, które mają korzystny stosunek przenoszonego momentu do masy.



Rys. 2.2. Robot Packbot 510 [14]

Drugi wskaźnik W_2 pozwala na porównanie konstrukcji robotów ze względu na zdolność podnoszenia przedmiotów na maksymalnym wysięgu.

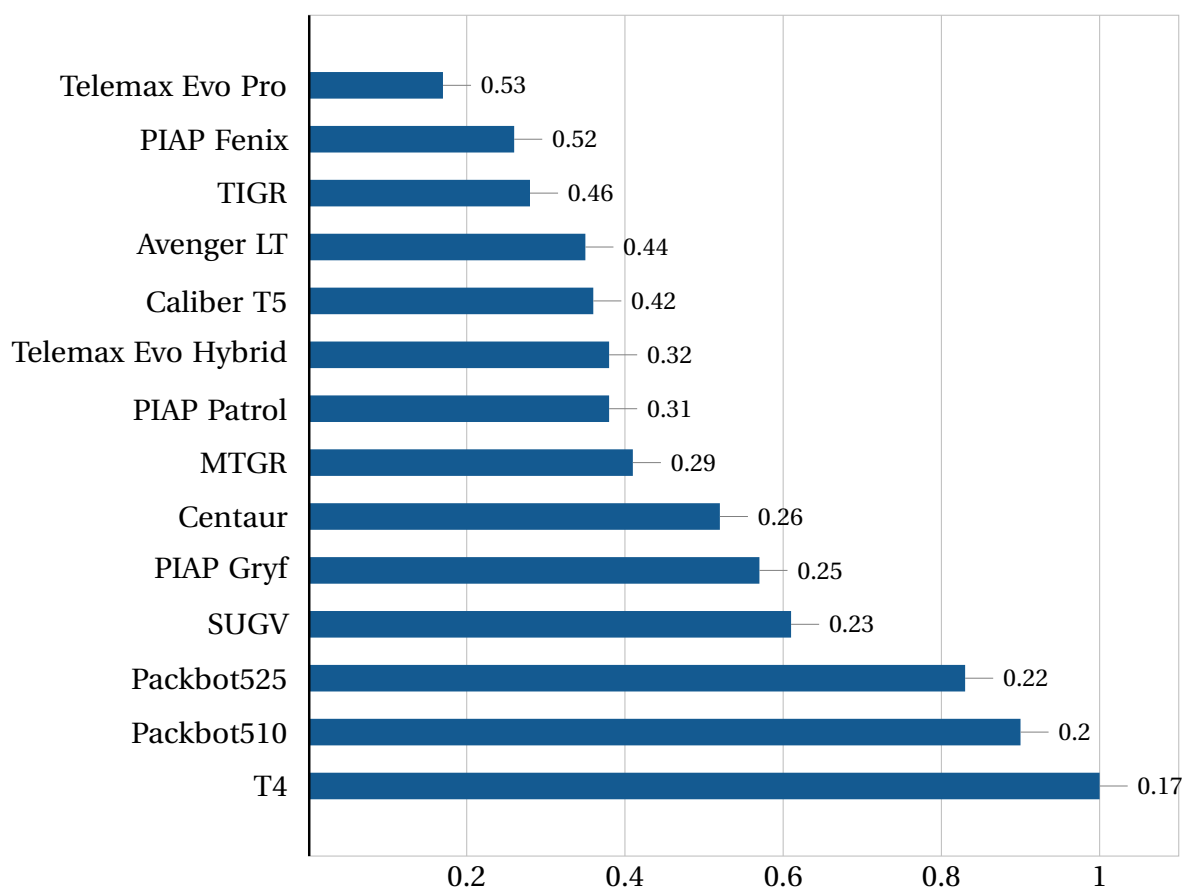
$$W_2 = \frac{Z^* \cdot m_z^*}{m_r^*} \quad (2.2)$$

gdzie:

- Z^* - znormalizowany wysięg manipulatora, odniesiony do maksymalnego wysięgu z porównywanej grupy;
- m_z^* - znormalizowany udźwig na maksymalnym wysięgu, odniesiony do maksymalnego udźwigu na maksymalnym wysięgu z porównywanej grupy;
- m_r^* - znormalizowana masa robota, odniesiona do maksymalnej masy robota z porównywanej grupy;

Wartość wskaźnika zdefiniowanego w przedstawiony sposób jest proporcjonalna do iloczynu wysięgu i masy którą robot może podnieść na maksymalnym wysięgu i odwrotnie proporcjonalna do masy robota. Parametry użyte do obliczenia wskaźnika są znormalizowane poprzez odniesienie do największych wartości tych parametrów wpośród porównywanych robotów. Wskaźnik ten w przybliżeniu odpowiada ilorazowi momentu napędzającego ramie manipulatora i masy robota. Wartości wskaźników dla robotów

z tabeli 2.1 zilustrowane są na rys. 2.3.



Rys. 2.3. Wartości wskaźnika W_2 dla wybranych robotów.

Największą wartość wskaźnika uzyskuje robot L3Harris T4 (rys.2.4), który wyposażony jest w charakterystyczne podpory, zapewniające stateczność robota podczas podejmowania ciężkich obiektów. Manipulator został zbudowany w oparciu o moduły napędów, które wykorzystują przekładnie cykloidalne [15] [16].

Uzyskanie wysokich wartości przedstawionych wskaźników, analizowane konstrukcje uzyskują dzięki wieloaspektowej optymalizacji konstrukcji. Przy budowie robotów wykorzystywane są technologie i komponenty pozwalające na uzyskanie pożądanych zdolności roboczych m.in dzięki redukcji masy. Wykorzystywane są metody optymalizacji które mogą być stosowane zarówno do doboru parametrów opisujące konstrukcję na poziomie systemu jak i do udoskonalenia poszczególnych komponentów struktury robota, np. poprzez optymalizację topologiczną. Optymalizacja topologiczna jest bardzo szybko rozwijającą się metodą optymalizacji strukturalnej, w której w sposób zautomatyzowany kształt i topologia części jest dostosowywana do zdefiniowanych warunków eksploatacji wg przyjętych w zadaniu kryteriów. Przykładowo może to być zadanie maksymalizacji sztywności dla określonej objętości komponentu. Optymalizacja topologiczna jest sto-



Rys. 2.4. Robot L3Harris T4 wyposażony w podpory zwiększające stateczność robota podczas operowania manipulatorem [13]

sowna przy projektowaniu części np. lotniczych [17] [18], samochodowych [19], [20], broni [21] a także w robotyce.

W pracy położony został nacisk na potencjał wdrożeniowy i możliwość implementacji opracowanych metod w procesie projektowania manipulatorów robotów przenośnych. Roboty przenośne stanowią grupę produktów, która jest najliczniej reprezentowana wśród opracowań Łukasiewicz PIAP. W Łukasiewicz PIAP istnieje potrzeba opracowania metody doboru parametrów projektowych która pozwoli, na projektowanie manipulatorów robotów do zadań specjalnych, o lepszych zdolnościach roboczych. Zweryfikowane zostaną możliwości które daje wykorzystanie podejścia topologicznego dla przypadku manipulatorów robotów do zadań specjalnych. Nabyte doświadczenia pozwolą za zastosowanie nowatorskiego podejścia do projektowania nowych produktów w dziedzinie robotyki do zadań specjalnych a także innych dziedzinach.

3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych

Analiza zagadnienia obejmuje trzy główne obszary które wynikają bezpośrednio z tematu pracy. Pierwszym jest obszar zastosowania i budowy manipulatorów przenośnych robotów do zadań specjalnych. Drugi obszar obejmuje podstawy projektowania i optymalizacji struktur mechanicznych w zakresie niezbędnym do realizacji niniejszej pracy. Szczególny nacisk został położony na optymalizację topologiczną struktur mechanicznych. Trzeci obszar obejmuje przykłady implementacji metod projektowania i optymalizacji w dziedzinie robotyki.

3.1. Zadania i budowa manipulatorów przenośnych robotów do zadań specjalnych

Rozważania przedstawione w pracy są ograniczone do przenośnych robotów mobilnych do zadań specjalnych. Zgodnie z [22], roboty do zastosowań specjalnych można podzielić wg możliwości ich transportu na następujące klasy:

1. Roboty przenoszone przez żołnierza to klasa UGV wystarczająco małych, aby żołnierze mogli nosić je przez dłuższy czas. W tej klasie znajdują się systemy dla pojedynczego żołnierza i roboty obsługiwane przez załogę.
2. Roboty przewożone za pomocą pojazdów jest to klasa robotów większych niż roboty przenośne, które muszą być transportowane przez inny system, na przykład w ciężarówce, na przyczepie lub holowane do miejsca misji.
3. Roboty samo-przenośne - klasa UGV wystarczająco dużych, aby mogły same transportować siebie i ładunek przez dłuższy czas.
4. Pojazdy załogowe konwertowane do pracy bezzałogowej. Pojazdy wyposażone w system sterowania bezzałogowego to pojazdy UGV ze sterowaniem od obsługi teleoperowanej lub w pełni autonomiczne, przy jednoczesnym zachowaniu możliwości transportu jak w przypadku pojazdu załogowego.

Z kolei wg [23] zaproponowany jest następujący podział UGV:

1. Roboty plecakowe Lekkie roboty o wadze do 15 kg, które można transportować w plecaku (man packable).
2. Roboty przenośne o wadze do 75 kg, które mieszczą się w przestrzeni bagażowej samochodu osobowego i mogą być ładowane przez dwie osoby. (man portable).
3. Roboty inne – nie przenoszone przez człowieka (Not man-portable).

Taka klasyfikacja pokrywa się częściowo z podziałem używanym w Polsce, gdzie dla zastosowań wojskowych wyszczególnione są platformy mobilne, dla których masy wynoszą:

- Lekki Robot Rozpoznawczy - do 15 kg;
- Robot Patrolowy Przenośny - do 75 kg;
- Średni robot EOD/IEDD - do 300 kg.

3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych

Zakres prac w niniejszej rozprawie dotyczyć będzie przede wszystkim robotów przenośnych, dla których bardzo istotne jest zachowanie niskiej masy konstrukcji. Opracowana metoda może być zaadaptowana i zaimplementowana do manipulatorów robotów pozostałych wymienionych grup.

Przenośne roboty do zadań specjalnych stosowane są w wojsku, policji, straży granicznej, straży pożarnej i innych służbach wykorzystywane są w sytuacjach, w których ze względu na zachowanie bezpieczeństwa konieczne jest zdalne przeprowadzenie wymaganych czynności. Mogą to być zadania takie jak np.: detekcja i neutralizacja ładunków wybuchowych, działania poszukiwawcze i ratownicze, działania przeciwpożarowe, wywiad, obserwacja i rozpoznanie, rozminowanie logistyka a także wsparcie bojowe.

- Detekcja i neutralizacja ładunków wybuchowych (IED, UXO)

Neutralizacja IED jest to chronologicznie pierwsze zastosowanie robotów w służbach policyjnych. Prace nad narzędziem do wsparcia pracy pirotechników przy usuwaniu bomb podłożonych przez IRA zaczęły się w Irlandii w latach 1970 [24]. Opracowano wówczas konstrukcję robota zwanego Wheelbarrow. Obecnie roboty są podstawowym narzędziem pracy pirotechnika. Robot może być wykorzystywany do takich czynności jak przeszukiwanie terenu w celu odnalezienia podejrzanego obiektu, rozpoznanie zagrożenia przy pomocy różnych sensorów, przeniesienie obiektu w celu jego neutralizacji w innym miejscu lub przeprowadzenie neutralizacji na miejscu. W wymienionych działaniach robot wykorzystuje odpowiednie końcówki robocze umieszczone na manipulatorze. Istnieją także konstrukcje wyposażone w dwa manipulatory, umożliwiające manipulacje dwuręczną.

- Działania poszukiwawcze i ratownicze (Search and Rescue)

W przypadku katastrof robot jest narzędziem wykorzystywanym do działań poszukiwawczych i oceny zagrożeń. Można wymienić zastosowania w przypadkach zdarzeń takich jak np. katastrofy budowlane podczas trzęsienia ziemi [25], [26], awarie w elektrowniach atomowych [27]. Przykładem takiego zastosowania jest ocena zniszczeń i monitorowanie promieniowania po katastrofie elektrowni w Fokuszimie. [28].

- Gaszenie pożarów

Robotyczne platformy mobilne są używane także do gaszenia pożarów [29]. Roboty takie są zabezpieczane przed wpływem wysokich temperatur przez zastosowanie mgły wodnej. Roboty te są wyposażone w zdalnie sterowane prądownice [30]. Ze względu na konieczność ciągnięcia węży są to konstrukcje stosunkowo ciężkie [31], [32].

- Przeciwdziałanie zagrożeniom CBRN

Podstawową funkcją robotów w zastosowaniach CBRN jest analizowanie stanu otoczenia za pomocą odpowiednich sensorów a także zbieranie próbek gazów, cieczy i ciał stałych do dalszej analizy. Roboty zwykle są wyposażone w manipulatory, które

3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych

pozwalają na operowania próbnikami oraz czujnikami, które wymagają zbliżenia do badanego obiektu.[33]

- Wywiad, obserwacja i rozpoznanie (ISR -Intelligence, Surveillance and Reconnaissance)

Zadania te związane są głównie z działaniami wojskowymi i policyjnymi. Roboty specjalizujące się w tych zadaniach to małe roboty - plecakowe lub przenośne, które są wyposażone w sensory wizyjne na głowicach PTZ bądź prostych manipulatorach. Dla takich robotów istotny jest długi czas pracy i możliwość skrytego działania. W zadaniach wykorzystywane są także najmniejsze roboty o masie poniżej 1 kg dostosowane do ich rzucania.

- Wsparcie bojowe (Combat Support)

Zadania wsparcie bojowego obecnie są na etapie badań, których celem jest opracowanie sposobów ich wykorzystania. Większość badanych platform są to platformy ciężkie, jednakże są także konstrukcje oparte na platformach przenośnych np MA-ARS - Modular Advanced Armed Robotic System. [34] Do takich zadań roboty są wyposażane są w zdalnie sterowane systemy uzbrojenia [35].

- Transport

Zadania logistyczne w zastosowaniach wojskowych obejmują transport wyposażenia i amunicji. Obecnie ten obszar zastosowania przenośnych robotów podlega badaniom [36].

Każde z wymienionych zadań wiąże się z specyficznymi wymaganiami dla platformy i jej wyposażenia oraz determinuje parametry takie jak m.in. wymiar i masa robota [37]. Roboty najczęściej mają budowę modułową która umożliwia przystosowanie konstrukcji i wyposażenie jej odpowiednio do prowadzonej misji. W większości zadań robotów wykorzystywane są manipulatory.

Manipulatory robotów mobilnych znacznie różnią się pod względem wymagań i parametrów od robotów przemysłowych. Na rysunku 3.1 pokazane są: klasyczny manipulator przemysłowy, manipulator współpracujący - kobot, oraz manipulator przenośnego robota pirotechnicznego z rodziny robotów Łukasiewicz PIAP. Przedstawione manipulatory mają zbliżone parametry udźwigu. Zwraca uwagę różnica mas poszczególnych rozwiązań. Manipulator przemysłowy ma masę 175 kg oraz wysięg 1.843 m, Drugi manipulator - kobot jest dużo lżejszy, jego masa wynosi 15 kg, lecz ma także dużo krótszy wysięg - 0.85 m. Pokazany jako trzeci manipulator robota pirotechnicznego ma taką samą masę - 15 kg przy wysięgu 1.55 m. Takie różnice parametrach konstrukcji wynikają z zadań. W przypadku manipulatorów robotów do zadań specjalnych parametry takie jak dokładność, powtarzalność które są powiązane z sztywnością konstrukcji, obecnością i wielkością luzów mają drugorzędne znaczenie i nie są dla tych konstrukcji określane. Jest to związane z sposobem sterowania manipulatorów które są teleoperowane i sprzężenie zwrotne jest

3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych



Rys. 3.1. Rodzaje manipulatorów: a- robot przemysłowy Kuka KR16 , b - robot współpracujący Universal Robots UR5e, c - manipulator robota pirotechnicznego z rodziny platform przenośnych Łukasiewicz PIAP

realizowane przez operatora na podstawie obrazu z kamer robota oraz ewentualnie na podstawie pozycji stopni swobody zgrubnie wizualizowanej na ekranie konsoli sterowania. Ze względu na konieczność prostej obsługi sterowanie najczęściej odbywa się we współrzędnych przegubów lub, sterowany jest punkt środka narzędzia (TCP - Tool Center Point) np. w układzie współrzędnych kartezjańskich. W niektórych konstrukcjach robotów operator ma także możliwość skorzystania z procedur automatycznych ruchów, które zapewniają przyjęcie przez układy wykonawcze zaprogramowanej pozycji lub sekwencji ruchów jak np. przy pobieraniu narzędzia z banku narzędzi. (np. Telex [6]).

3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych

Manipulatory robotów przenośnych mają od 2 do 7 stopni swobody i najczęściej zbudowane są z wykorzystaniem par kinematycznych obrotowych. Spotyka się konstrukcję wyposażoną dodatkowo w 1 parę kinematyczną postępową w postaci tzw. ramienia teleskopowego. Przykładowo takim manipulatorem o strukturze RRRPRR, jest wariant ramienia robota przenośnego PIAP Gryf lub PIAP Patrol.

Manipulatory robotów mobilnych są lżejsze i ich ruchy są wolniejsze od ruchów manipulatorów przemysłowych. Najczęściej stosowane są w nich przekładnie o osiach prostopadłych - ślimakowe (np. Med. Eng, ECA) lub spiroidalne (Flir) o dużym przełożeniu. Takie rozwiązanie pozwala na osiągnięcie wysokiego momentu przenoszzonego przez przegub i dzięki samohamowności przekładni pozwala na rezygnację z hamulców w napędach. Wadą takich rozwiązań jest obecność luzów i niska sprawność napędu.

Znane są także przykłady wykorzystania do napędu manipulatorów robotów przenośnych przekładni harmoniczných i cykloidalnych. Przekładnie te cechują się bezluzowością, niską masą i wysoką sprawnością. Brak samohamowności wymusza stosowanie hamulców na silnikach napędowych ale umożliwia pośredni pomiar momentu na przegubie bez stosowania dodatkowych czujników momentu. Funkcjonalność pomiaru obciążeń jest potrzebna przy sterowaniu haptycznym [38] (np. T4 Robotic System - L3Harris [13]).

Inną cechą różniącą manipulatory robotów mobilnych od robotów przemysłowych jest odporność na przeciążenia występujące podczas kolizji z przeszkodami. Jest to cecha wymagana ze względu na działanie w nieznanym i dynamicznym środowisku pracy robota. Podczas teleoperacji robota często dochodzi do kolizji z przeszkodami a dodatkowo obiekty którymi operator chciałby operować mogą przewyższać masą lub oporami ruchu możliwości manipulatora. Odporność na przeciążenia może być osiągnięta poprzez zastosowanie napędów o parametrach dostosowanych do obciążeń podczas kolizji bądź poprzez stosowanie w przegubach sprzęgieł przeciążeniowych. Alternatywnym rozwiązaniem które jest odporne na uszkodzenia mogło by być zastosowanie silnika o dużym momencie obrotowym np. PMSM i jednostopniowej przekładni o niskim przełożeniu, umożliwiającym transfer energii w obie strony. Przykładowo rozwiązanie takie jest stosowane w robocie krocącym Cheetah opracowanym w MIT [39]. W klasie robotów plecakowych i przenośnych do napędu manipulatora bardzo rzadko stosowane są napędy liniowe, których zastosowanie wiąże się z ograniczeniem zakresu ruchu manipulatora. Przykładem takiego manipulatora jest konstrukcja Chaos firmy Autonomous Solutions.

Konstrukcja struktury nośnej manipulatorów robotów przenośnych wykonana jest najczęściej z stopów aluminium, tworzyw sztucznych i kompozytów. Komponenty są wykonane najczęściej w technologiach, które są opłacalne dla produkcji jednostkowej lub małoseryjnej. Najczęściej części metalowe są wykonywane w technologii obróbki CNC. Stosowane są także elementy wykonane w technologii druku 3D. W przypadku najwięk-

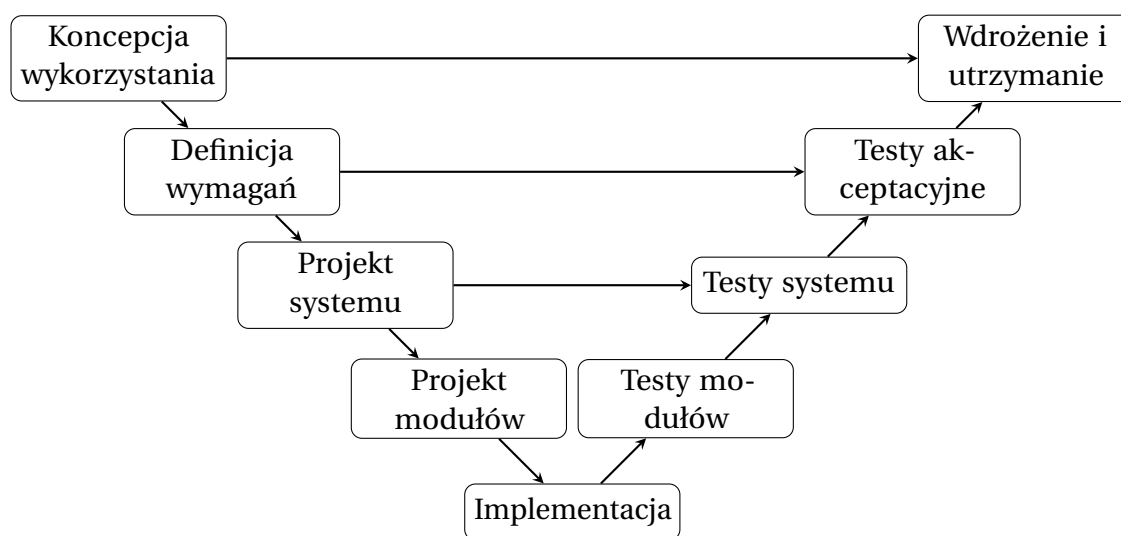
3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych

szych producentów widoczny jest większy udział elementów z tworzyw sztucznych.

3.2. Projektowanie systemowe w aspekcie robotów do zadań specjalnych

Zgodnie z [40] projektowanie jest koncepcyjnym przygotowaniem działań praktycznych, zwłaszcza systemowych i technicznych. Cechą podejścia systemowego do projektowania jest całościowe ujmowanie rzeczywistości i stosowanie wiedzy systemowej [41]. Na ostateczną postać projektowanego systemu wpływ mają takie czynniki jak: estetyka, ograniczenia technologiczne i montażowe, ergonomia, wzornictwo, możliwości technologiczne, zapotrzebowanie rynku, trendy i mody, jakość, zgodność z normami, wymagania bezpieczeństwa, wymagania eksploatacyjne, łatwość recyklingu itd. Doświadczenia po pandemii pokazują, że bardzo istotne są także czynniki takie jak dostępność komponentów i usług (bezpieczeństwo łańcucha dostaw). Systemowe podejście do projektowania pozwala uwzględnić wymienione czynniki.

Projektowanie w ujęciu systemowym może być przedstawiona w postaci tzw. modelu V cyklu życia produktu [42]. Model V jest przedstawieniem cyklu życia produktu składającego się z dwóch gałęzi (rys. 3.2) w których procesy są ułożone na kształt litery V.



Rys. 3.2. Model V - model cyklu życia produktu, na podstawie [42]

W lewej gałęzi wymienione są procesy związane z etapem projektowym takie jak określenia wymagań, studium wykonalności, projekt systemu na najwyższym poziomie, podsystemów i komponentów, produkcja i integracja. W prawej gałęzi modelu dla każdego procesu lewej gałęzi znajdują się odpowiadające procesy weryfikujące zgodność z rezultatów z wymaganiami.

W procesach „kreatywnych” przedstawionych w lewej gałęzi modelu V można rozpoznać podejście do projektowania wdrożone także w zaawansowanych środowiskach CAD,

3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych

zwane top-down lub „od ogółu do szczegółu”. W tym podejściu w pierwszej kolejności jest definiowany najwyższy poziom systemu a następnie system jest dekomponowany na mniejsze podsystemy składowe i elementy, które podlegają szczegółowemu projektowaniu, wytwarzaniu i integracji. Takie podejście wspiera zachowanie zgodności rezultatów z wymaganiami. W przeciwnym podejściu do projektowania (bottom – up, od szczegółu do ogółu) w pierwszej kolejności są definiowane komponenty składowe a następnie są z nich budowane podsystemy wyższego poziomu. Efekt końcowy wynika z możliwości i cech elementów składowych. Porównanie obu rodzajów podejścia do projektowania jest przedstawione np. przez Crespi i innych [43]. Podejście top-down jest preferowane dla większych systemów i w sposób naturalny wspiera zespołowy proces projektowania. Na etapie definiowania systemu można określić cechy takie jak np. wygląd, wymiary, kształt, określić interfejsy pomiędzy podsystemami, zależności pomiędzy nimi itp. Każdy z wykonawców podsystemów jest zmuszony utrzymywać się w tak zdefiniowanych więzach projektowanych, przez co rezultat jest bardziej zbliżony do oczekiwanego wyniku. Z drugiej strony podejście bottom up pozwala na szybsze osiągnięcie wyników w przypadku kiedy mamy dostępne komponenty składowe np. tzw. COTS (commercial of the shell) - komercyjne, gotowe produkty dostępne w sprzedaży.

Projektowanie profesjonalnych systemów robotycznych to złożone zadanie realizowane zespołowo, w którym dominuje podejście "top-down". Umożliwia ono naturalne kształtowanie ostatecznego kształtu projektu, rozdzielanie zadań oraz definiowanie interfejsów pomiędzy zespołami. Z kolei podejście "bottom-up" jest podejściem pragmatycznym, które pozwala w szybkim tempie i przy niskich kosztach uzyskiwać konkretne rezultaty. W praktyce w projektach robotów są wykorzystywane gotowe komponenty na różnym stopniu szczegółowości projektu. Mogą to być komercyjne komponenty (np. gotowe zespoły napędowe lub silniki elektryczne lub do samodzielnej zabudowy zestawu stojana i wirnika silnika) a także elementy normalizowane np. złącze. Wobec tego oba podejścia przenikają się i są komplementarne.

3.3. Zastosowanie metod optymalizacyjnych w projektowaniu robotów

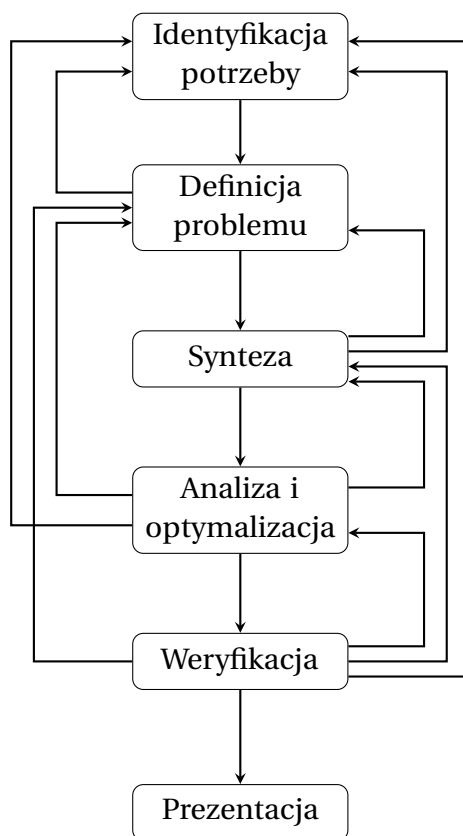
Proces projektowania jak ściśle związany z procesem optymalizacji. Osiński i Wróbel [44] sformułowali następujące zasady dotyczące procesu projektowania:

- konstrukcja powinna spełniać wszystkie podstawowe warunki konstrukcyjne w stopniu nie gorszym od założonego
- Konstrukcja powinna być optymalna w danych warunkach ze względu na podstawowe kryteria optymalizacyjne.

Pierwsza zasada stawia na pierwszym miejscu założenia konstrukcyjne które wynikają z zdefiniowanych wymagań. W drugiej zasadzie podkreślony jest fakt, że decyzje, które są podejmowane podczas projektowania są de facto procesem optymalizacji. Podobnie

3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych

Campel [45] oraz Budynas i inni [46] i M.Nowak [47] przedstawili optymalizację jako element procesu projektowania (rys. 3.3).



Rys. 3.3. Fazy projektu (opracowanie na podstawie [46])

Optymalizacja [łac. optimus ‘najlepszy’] polega na wyznaczeniu najlepszego rozwiązania jakiegoś zadania ze względu na przyjęte kryterium (wskaźnik specyficznie rozumianej jakości, np. koszt, zysk, niezawodność, dokładność, czas realizacji zadania), przy uwzględnieniu istniejących ograniczeń [48]. W ujęciu systemowym optymalizacja polega na stworzeniu modelu rzeczywistości, sformułowaniu systemu oceny rozwiązań oraz modeli problemu - fizycznego i matematycznego, znalezienie rozwiązania optymalnego dla wybranych metod matematycznych oraz jego wdrożenie [41].

Oprócz przedstawionego ujęcia holistycznego optymalizację należy także rozumieć ściśle jako poszukiwanie ekstremum funkcji, przy czym zadania są formułowane w ten sposób, żeby poszukiwane było minimum funkcji. Zadania poszukiwania maksimum funkcji są przeformułowane w ten sposób, że poszukujemy minimum odwrotności funkcji pierwotnej.

Minimum globalnym funkcji f na zbiorze W jest punkt $x_0 \in W$ jeśli:

$$f(x) \geq f(x_0) \text{ dla każdego } x \in W \quad (3.1)$$

3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych

Punkt x_0 nazywamy minimum lokalnym jeśli istnieje $\epsilon > 0$ takie, że dla kuli $B(x_0, \epsilon)$ o środku w x_0 i promieniu ϵ zachodzi

$$f(x) \geq f(x_0) \text{ dla każdego } x \in B(x_0, \epsilon) \cap W \quad (3.2)$$

W praktyce sprawdzenie osiągnięcia minimum funkcji dokonuje się poprzez sprawdzenie warunków koniecznych pierwszego i drugiego rzędu. Jeśli $x_0 \in W$ jest punktem lokalnego minimum $f : W \rightarrow R$ oraz f posiada w punkcie x_0 to dla funkcji jednej zmiennej warunek konieczny I rzędu ma postać:

$$f'(x) = 0 \quad (3.3)$$

Jeśli $f : W \rightarrow R$ jest klasy C^2 na zbiorze W i x_0 jest punktem lokalnego minimum to warunek konieczny II rzędu ma postać:

$$f''(x) = 0 \quad (3.4)$$

Jeśli $f : W \rightarrow R$ jest klasy C^2 na zbiorze W oraz $f'(x) = 0$, $f''(x) > 0$ dla pewnego $x_0 \in W$, to f ma ściśle lokalne minimum w punkcie x_0 .

Dla funkcji wielu zmiennych wektor zmiennych ma postać $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, a $f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ jest funkcją zmiennych x .

Gradient - pierwsza pochodna funkcji f wielu zmiennych ma postać

$$\nabla f(x) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n} \right) \quad (3.5)$$

Hesjan - macierz drugich pochodnych funkcji wielu zmiennych f ma postać:

$$\nabla^2 f(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Dla funkcji wielu zmiennych warunki osiągnięcia minimum mają postać.

Warunek konieczny I rzędu:

$$\nabla f(x) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n} \right) = 0 \quad (3.7)$$

przy czym punkt $x_0 \in W$ jest punktem krytycznym funkcji $f : W \rightarrow R$ oraz f jest różniczkowalna w punkcie x_0 . Warunek konieczny II rzędu.

Jeśli $f : W \rightarrow R$ jest klasy C^2 na zbiorze W i $\nabla f(x_0) = 0$ oraz $\nabla^2 f(x_0)$ jest dodatnio (ujem-

3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych

nie określona to f ma ściśle lokalne minimum (maksimum) w x_0 :

$$\det \left[\begin{pmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{pmatrix}_{x_0} - \psi \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \right] = 0 \quad (3.8)$$

Zadanie optymalizacyjne z ograniczeniami równościowymi można zapisać jako:

$$f(x^*) = \min f(x) \quad (3.9)$$

przy warunku:

$$h_k(x) = 0 \quad (3.10)$$

Zadanie to można rozwiązać z wykorzystaniem funkcji Lagrange'a

$$L(x, \lambda) = f(x) + \sum_{j=0}^{m_h} \lambda_j h_j(x) \quad (3.11)$$

Mnożniki Lagrange'a λ_j opisują wpływ ograniczeń $h_k(x)$ na funkcję Lagrange'a

Dla nieaktywnych ograniczeń mnożniki Lagrange'a są równe zero.

Problem przekształcony zostaje do zadania optymalizacji bez ograniczeń

$$\begin{cases} \frac{\partial L(x_0, \lambda_0)}{\partial x_i} = 0 & i = 1, \dots, n \\ \dots & \dots \\ \frac{\partial L(x_0, \lambda_0)}{\partial \lambda_k} = 0 & k = 1, \dots, n \end{cases} \quad (3.12)$$

Zadanie optymalizacyjne z ograniczeniami równościowymi i nierównościowymi można zapisać następująco:

$$f(x^*) = \min f(x) \quad (3.13)$$

przy warunkach:

$$g_j(x) \leq 0 \quad (3.14)$$

$$h_k(x) = 0 \quad (3.15)$$

Zadanie to można rozwiązać z wykorzystaniem funkcji Lagrange'a oraz twierdzenia Kuhna Tuckera

$$L(x, \lambda) = f(x) + \sum_{j=0}^{m_g} \lambda_j g_j(x) \quad (3.16)$$

Twierdzenie Kuhna-Tuckera mówi, że wektor x^* jest wtedy i tylko wtedy rozwiązaniem, gdy istnieje wektor λ^* taki, że

$$L(x^*, \lambda) \leq L(x^*, \lambda^*) \leq L(x, \lambda) \quad (3.17)$$

3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych

$$x^* \geq 0, \lambda^* \geq 0 \quad (3.18)$$

Funkcja $L(x, \lambda)$ musi osiągać minimum globalne ze względu na x i maksimum globalne ze względu na λ .

Warunki Kuhna-Tuckera mają postać:

$$\begin{cases} \frac{\partial L(x^*, \lambda^*)}{\partial x_i} \geq 0 \\ x_i^* \frac{\partial L(x^*, \lambda^*)}{\partial x_i} \geq 0 \\ \frac{\partial L(x^*, \lambda^*)}{\partial \lambda_j} \leq 0 \\ x_i^* \frac{\partial L(x^*, \lambda^*)}{\partial \lambda_j} \leq 0 \end{cases} \quad (3.19)$$

Minimum funkcji wielu zmiennych z ograniczeniami równościowymi i nierównościami otrzymujemy z zależności:

$$L(x, \lambda) = f(x) + \sum_{j=1}^{m_g} \lambda_j (g_j(x) + \mu_j^2) + \sum_{k=1}^{m_h} \lambda_k h_k(x) \quad (3.20)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial L(x^*, \lambda^*)}{\partial x_i} = 0, i = 1, \dots, n \\ \frac{\partial L(x^*, \lambda^*)}{\partial \lambda_j} = 0, j = 1, \dots, n \\ \frac{\partial L(x^*, \lambda^*)}{\partial \lambda_k} = 0, k = 1, \dots, n \\ \frac{\partial L(x^*, \lambda^*)}{\partial \mu_j} = 0, j = 1, \dots, n \end{cases} \quad (3.21)$$

W praktycznych zastosowaniach dominują numeryczne metody optymalizacji. Metody te można podzielić na metody systematycznego przeszukiwania, stochastyczne oraz deterministyczne w których dąży się do znalezienia optymalnego rozwiązania przy użyciu odpowiednich algorytmów. Metody deterministyczne są metodami iteracyjnymi. Ich algorytm działania jest następujący. Procedura zaczyna się od przyjęcia punktu startowego. Następnie generowany jest następny punkt w oparciu o wyznaczony kierunek i dystans od poprzedniego punktu. Metody doboru kierunku i dystansu należy dobrać do charakteru rozwiązywanego zadania. Procedura poszukiwania kończy się jeśli np. dystans pomiędzy punktami w kolejnych iteracjach lub suma różniczek cząstkowych funkcji jest poniżej założonej tolerancji. Metody deterministyczne można podzielić na bezgradientowe, gradientowe oraz newtonowskie (np metoda Newtona Raphsona).

3.3.1. Podstawowe metody optymalizacji

Jedną z podstawowych technik numerycznych stosowanych w optymalizacji oraz w rozwiązywaniu równań nieliniowych jest metoda Newtona-Raphsona. Jej główną zaletą jest szybka zbieżność do rozwiązania, zwłaszcza w pobliżu ekstremum funkcji. Jest to iteracyjna technika stosowana do znajdowania miejsc zerowych funkcji, a także do optymalizacji funkcji wielowymiarowych. Metoda ta opiera się na idei rozwinięcia funkcji w szereg Taylora i wykorzystania pochodnych w celu znalezienia punktu, w którym

3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych

funkcja osiąga minimum lub maksimum. Metoda Newtona-Raphsona może być używana do minimalizacji (lub maksymalizacji) funkcji $f(x)$, gdzie x jest wektorem zmiennych decyzyjnych. Zakładamy, że funkcja f jest dwa razy różniczkowalna.

Algorytm rozpoczyna się od początkowego punktu x_0 i iteracyjnie aktualizuje wartość zmiennej x zgodnie z następującą formułą:

$$x_{k+1} = x_k - H_f(x_k)^{-1} \nabla f(x_k) \quad (3.22)$$

gdzie:

- x_k jest wektorem zmiennych w iteracji k ,
- $\nabla f(x_k)$ jest gradientem funkcji f w punkcie x_k ,
- $H_f(x_k)$ jest hesjanem (macierz drugich pochodnych) funkcji f w punkcie x_k ,
- $H_f(x_k)^{-1}$ jest odwrotnością hesjanu.

Gradient $\nabla f(x)$ jest wektorem pierwszych pochodnych funkcji (równanie 3.5).

Hesjan $H_f(x)$ jest macierzą drugich pochodnych funkcji (równanie 3.6).

Algorytm optymalizacji przebiega według następujących kroków:

1. **Inicjalizacja:** Wybór początkowego punktu x_0 .
2. **Obliczenie gradientu i hesjanu:** Obliczenie gradientu $\nabla f(x_k)$ oraz hesjanu $H_f(x_k)$ w bieżącym punkcie x_k .
3. **Aktualizacja punktu:** Obliczenie nowego punktu x_{k+1} za pomocą formuły iteracyjnej.
4. **Sprawdzenie kryterium zatrzymania:** Sprawdzenie, czy różnica między kolejnymi iteracjami jest dostatecznie mała, lub czy norma gradientu $\|\nabla f(x_k)\|$ jest mniejsza niż ustalona tolerancja. Jeśli kryterium zatrzymania jest spełnione, następuje zakończenie algorytmu. W przeciwnym razie przejdź do kroku 2.

Metoda Newtona-Raphsona charakteryzuje się kilkoma istotnymi zaletami, które czynią ją efektywnym narzędziem w optymalizacji. Przede wszystkim wyróżnia się szybką zbieżnością, zwłaszcza w pobliżu rozwiązania, dzięki swojej kwadratowej zbieżności. Oznacza to, że w miarę zbliżania się do optymalnego punktu, liczba poprawnych cyfr w kolejnych iteracjach rośnie wykładniczo, co prowadzi do bardzo szybkiego osiągnięcia dokładnego wyniku. Ponadto metoda ta wykorzystuje informacje o krzywiznie funkcji, czyli hesjan, co pozwala na bardziej precyzyjne oszacowanie zarówno kierunku, jak i wielkości kroku iteracyjnego, zwiększając efektywność procesu poszukiwania ekstremum.

Jednakże, metoda Newtona-Raphsona ma również pewne wady, które mogą ograniczać jej zastosowanie. Przede wszystkim jest kosztowna obliczeniowo, ponieważ wymaga nie tylko obliczenia, ale także odwrócenia hesjanu, co może prowadzić do znacznych nakładów obliczeniowych. Ponadto metoda wymaga, aby hesjan był dodatnio określony i odwracalny, co nie zawsze jest spełnione, szczególnie w problemach z płaskimi lub osobliwymi obszarami funkcji celu. Dodatkowo, punkt startowy ma istotny wpływ na

3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych

zbieżność, gdyż jeśli jest on zbyt daleko od minimum, metoda może się nie zbiegać lub prowadzić do punktów siodłowych zamiast rzeczywistego ekstremum.

3.3.2. Optymalizacja nieliniowa z ograniczeniami

W praktyce inżynierskiej duża część problemów optymalizacyjnych ma charakter nieliniowy i obarczona jest dodatkowymi ograniczeniami, które wynikają z fizycznych, geometrycznych lub technologicznych uwarunkowań. Dlatego też, aby skutecznie rozwiązywać problemy projektowe, konieczne jest stosowanie metod nieliniowej optymalizacji z ograniczeniami.

Algorytmy punktu wewnętrznego [49] (ang. Interior Point Methods, IPM) to klasa algorytmów stosowanych do rozwiązywania problemów optymalizacji, takich jak programowanie liniowe (LP), programowanie kwadratowe (QP) i bardziej ogólne problemy programowania nieliniowego (NLP). Te algorytmy szukają optymalnego rozwiązania poprzez przemieszczanie się wewnątrz obszaru dopuszczalnych rozwiązań, w przeciwieństwie do metod takich jak algorytmy simplex, które operują na krawędziach tego obszaru. Algorytm punktu wewnętrznego rozwiązuje problem programowania liniowego w postaci:

$$\begin{array}{ll} \text{minimalizacja} & c^T x \\ \text{przy warunkach} & Ax = b \\ & x \geq 0 \end{array}$$

gdzie c jest wektorem kosztów, A jest macierzą współczynników, b jest wektorem ograniczeń, a x jest wektorem zmiennych decyzyjnych.

Algorytm rozpoczyna od wyboru początkowego punktu wewnętrznego x_0 , który spełnia wszystkie ograniczenia równościowe i nierównościowe. Aby zapewnić, że iteracje pozostaną wewnątrz dopuszczalnego obszaru, algorytm używa funkcji bariery. Typowa funkcja bariery dla problemu programowania liniowego to logarytmiczna funkcja bariery:

$$\phi(x) = - \sum_{i=1}^n \ln(x_i) \quad (3.23)$$

Celem jest minimalizacja funkcji celu skorygowanej o funkcję bariery:

$$\text{minimalizacja} \quad c^T x + \mu \phi(x) \quad (3.24)$$

gdzie μ jest parametrem bariery, który kontroluje wpływ funkcji bariery na proces optymalizacji. Początkowo μ jest ustawione na dużą wartość i stopniowo zmniejszane.

Algorytm punktu wewnętrznego znajduje kierunek poszukiwań poprzez rozwiązanie układu równań Karush-Kuhn-Tucker (KKT). Układ KKT dla skorygowanego problemu optymalizacji ma postać:

$$Ax = b \quad (3.25)$$

$$A^T \lambda - s = c \quad (3.26)$$

$$XSe = \mu e \quad (3.27)$$

gdzie λ są mnożnikami Lagrange'a dla ograniczeń równościowych, s jest wektorem mnożników dla ograniczeń nierównościowych, X i S to diagonalne macierze z elementami x i s , a e jest wektorem jednostkowym.

W każdej iteracji algorytm wykonuje następujące kroki:

- **Obliczanie kierunku poszukiwań:** Rozwiązywany jest układ równań KKT, aby znaleźć kierunek poszukiwań $(\Delta x, \Delta \lambda, \Delta s)$.
- **Aktualizacja zmiennych:** Wykonuje się krok w kierunku poszukiwań:

$$x_{k+1} = x_k + \alpha \Delta x$$

$$\lambda_{k+1} = \lambda_k + \alpha \Delta \lambda$$

$$s_{k+1} = s_k + \alpha \Delta s$$

gdzie α jest długością kroku, wybieraną tak, aby nowe wartości zmiennych nadal spełniały ograniczenia.

- **Zmniejszanie parametru bariery:** Parametr bariery μ jest zmniejszany, co stopniowo zmniejsza wpływ funkcji bariery i prowadzi do ostatecznego rozwiązania problemu oryginalnego.

Algorytm kończy działanie, gdy zmiany w zmiennych decyzyjnych są dostatecznie małe lub gdy wartość funkcji celu przestaje znacząco się poprawiać.

Metody punktów wewnętrznych (Internal Point, IP) znajdują szerokie zastosowanie w optymalizacji matematycznej, umożliwiając rozwiązanie różnorodnych problemów – od liniowych po nieliniowe oraz od wypukłych do niewypukłych. Ich wszechstronność sprawia, że stanowią skuteczną alternatywę dla klasycznych metod optymalizacyjnych, takich jak algorytm sympleksowy.

Jedną z kluczowych zalet algorytmów punktu wewnętrznego jest ich wysoka efektywność w przypadku dużych problemów optymalizacyjnych. W wielu zastosowaniach okazują się one bardziej wydajne niż algorytm sympleksowy, szczególnie w programowaniu liniowym i nieliniowym o dużej liczbie zmiennych i ograniczeń. Dzięki swojej konstrukcji unikają one eksploracji wierzchołków przestrzeni dopuszczalnych rozwiązań, co pozwala na bardziej efektywne poszukiwanie optymalnych wartości.

Dzięki tym właściwościom algorytmy punktu wewnętrznego znajdują szerokie zastosowanie w praktyce. Są wykorzystywane w takich dziedzinach jak finanse, inżynieria,

3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych

logistyka oraz zarządzanie łańcuchem dostaw, gdzie skuteczna i szybka optymalizacja odgrywa kluczową rolę w podejmowaniu decyzji oraz zwiększaniu efektywności procesów.

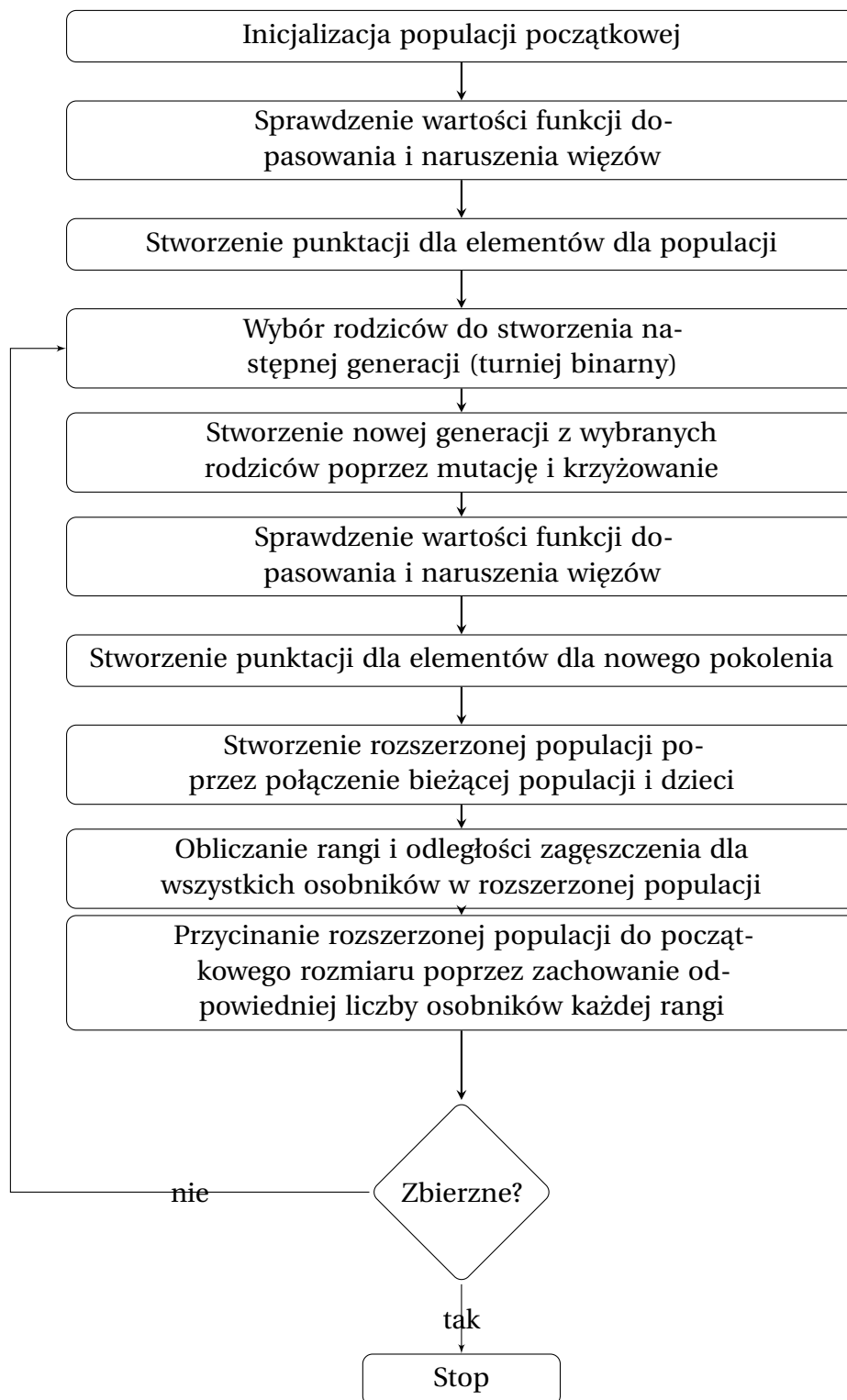
3.3.3. Optymalizacja wielokryterialna

Optymalizacja wielokryterialna (ang. multi-objective optimization) znajduje zastosowanie w przypadkach, gdy projektowany system musi jednocześnie spełniać kilka często sprzecznych ze sobą celów. W praktycznych problemach inżynierskich — takich jak projektowanie manipulatorów — konieczne jest znalezienie kompromisu między takimi kryteriami, jak masa, wytrzymałość, zasięg czy koszt, co wymaga zastosowania metod umożliwiających analizę i wybór rozwiązań optymalnych w ujęciu wielowymiarowym.

NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) jest jednym z najpopularniejszych algorytmów używanych w optymalizacji wielokryterialnej. Algorytm został przedstawiony przez K. Deb [50]. Algorytm ten jest stosowany do rozwiązywania problemów optymalizacji, gdzie istnieje więcej niż jeden cel do osiągnięcia, i cechuje się zdolnością do znalezienia dobrze rozproszonego zestawu rozwiązań Pareto-optymalnych. Algorytm działania funkcji przedstawiono na rys. 3.4.

Algorytm działa zgodnie z następującymi krokami schematu postępowania:

1. Inicjalizacja: Algorytm zaczyna od losowego wygenerowania populacji początkowej. Każdy osobnik w populacji reprezentuje potencjalne rozwiązanie problemu i jest opisany przez zestaw zmiennych decyzyjnych.
2. Ocena: Każdy osobnik w populacji jest oceniany pod kątem wartości funkcji dopasowania. W optymalizacji wielokryterialnej funkcje dopasowania są zazwyczaj więcej niż jedna, a ich wartości określają, jak dobre jest dane rozwiązanie w odniesieniu do różnych kryteriów.
3. Sortowanie według dominacji: Populacja jest sortowana na podstawie poziomów dominacji:
 - front 1 obejmuje rozwiązania, które nie są zdominowane przez żadne inne (najlepsze rozwiązania);
 - front 2 obejmuje rozwiązania, które są zdominowane tylko przez rozwiązania z Frontu 1;
 - front 3 obejmuje rozwiązania, które są zdominowane przez rozwiązania z Frontu 1 i Frontu 2;
 - kolejne fronty analogicznie.
4. Obliczanie odległości rozproszenia: dla każdego frontu obliczana jest "odległość rozproszenia" (crowding distance), która mierzy gęstość rozwiązania względem innych rozwiązań. Rozwiązania o większej odległości rozproszenia są preferowane, aby zachować różnorodność w populacji.
5. Selekcja: Algorytm NSGA-II wykorzystuje turniej binarny z dominacją i odległością



Rys. 3.4. Schemat logiczny algorytmu optymalizacji NSGA II

3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych

tlumu do selekcji osobników do reprodukcji. W turnieju binarnym losowo wybierane są dwa osobniki, a wygrywa ten z wyższym poziomem dominacji (lub większą odległością tlumu, jeśli poziomy dominacji są równe).

6. Reprodukacja: wybrane osobniki są krzyżowane (crossover) i mutowane, aby stworzyć nową populację potomną. Krzyżowanie i mutacja są operacjami genetycznymi, które wprowadzają różnorodność i pozwalają algorytmowi eksplorować przestrzeń rozwiązań.
7. Połączenie i redukcja: Populacja rodzicielska i potomna są łączone, a następnie z tej połączonej populacji wybierane są najlepsze rozwiązania (na podstawie poziomów dominacji i odległości tlumu), aby utworzyć nową populację o tej samej wielkości co populacja początkowa.
8. Iteracja: Kroki 2-7 są powtarzane przez określoną liczbę pokoleń lub do momentu osiągnięcia kryterium stopu.
9. Zakończenie: po zakończeniu algorytmu końcowa populacja zawiera rozwiązania, które reprezentują zbliżone do Pareto-optymalnych. Te rozwiązania mogą być używane do podejmowania decyzji, biorąc pod uwagę kompromisy między różnymi celami.

NSGA-II jest ceniony za swoją prostotę, efektywność i zdolność do utrzymania różnorodności populacji, co sprawia, że jest jednym z najczęściej używanych algorytmów w praktycznych zastosowaniach optymalizacji wielokryterialnej.

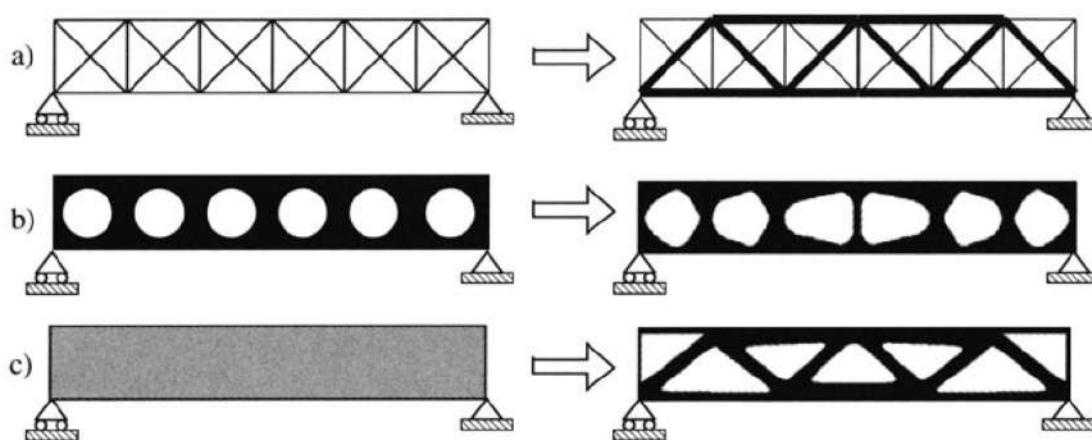
3.4. Optymalizacja strukturalna

Optymalizacja strukturalna jest dziedziną inżynierii zajmującą się poszukiwaniem najlepszej możliwej geometrii, rozkładu materiału lub konfiguracji konstrukcji w celu spełnienia określonych wymagań projektowych, takich jak minimalna masa, maksymalna sztywność czy ograniczone naprężenia – przy zachowaniu wymaganej funkcjonalności i bezpieczeństwa.

Prace nad optymalnym rozmieszczeniem materiału w konstrukcjach prowadził m.in. Michell [51]. W roku 1904 opublikował pracę [52] w której przedstawił teorię, w której opisał jak w optymalny sposób przenieść zadane obciążenie na podpory poprzez konstrukcję kratownicową. W przeciwieństwie do tradycyjnego podejścia do optymalizacji konstrukcji, gdzie tylko wybrane parametry są uważane za niewiadome, w teorii Michella cała konstrukcja jest traktowana jako zmienna projektowa. Wobec tego możliwe jest wyciągnięcie ogólnych wniosków na temat optymalnego układu, topologii i geometrii optymalnej konstrukcji, w tym połączeń prętów, kierunków i wymiarów. Wg teorii Michella w optymalnych konstrukcjach zginanie jest całkowicie wyeliminowane, a pojedyncze elementy są całkowicie obciążone siłami rozciągającymi lub ściskającymi. Wynikowa konstrukcja kratownicowa jest doskonale dostosowana do przyłożonego obciążenia zewnętrznego, wymaga minimalnej ilości materiału i ma minimalną masę całkowitą. W kolei O. Sigmund

3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych

i inni [53] wykazują, że w pewnych sytuacjach, rozszerzenie poszukiwań rozwiązania poza konstrukcje kratownicowe pozwala na znalezienie korzystniejszych rozwiązań. M.P Bendsoe i O.Sigmund [54] rozróżnili następujące rodzaje optymalizacji konstrukcji: optymalizacja wymiarów, optymalizacja kształtu i optymalizacja topologiczna (rys. 3.5). W optymalizacji wymiarów, dobierane są zgodnie z przyjętą funkcją celu, parametry opisujące geometrię konstrukcji jak np. grubości powłoki, wymiary belki. Postać konstrukcji jest z góry założona. W optymalizacji kształtu modyfikowany jest kształt domeny konstrukcji, jednakże topologia nie ulega zmianie. Dopiero optymalizacja topologiczna pozwala na znalezienie optymalnego kształtu łącznie z określeniem takich cech jak liczba, położenie i kształt otworów.



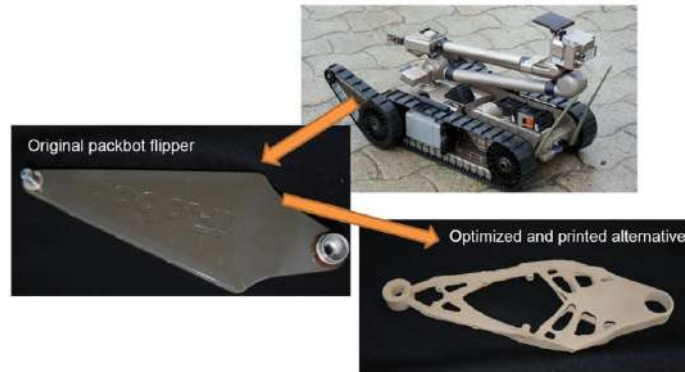
Rys. 3.5. Rodzaje optymalizacji strukturalnej [54]: a-optymalizacja wymiarów, b-optymalizacja kształtu, c-optymalizacja topologiczna

3.5. Metody optymalizacji topologicznej

Optymalizacja topologiczna jest jednym z kluczowych narzędzi inżynierii obliczeniowej umożliwiającym projektowanie lekkich i wytrzymałych struktur poprzez optymalne rozmieszczenie materiału w zadanej przestrzeni. Optymalizacja topologiczna jest metodą optymalizacji rozkładu materiału w danej przestrzeni, wg przyjętych kryteriów oceny jakości rozwiązania, przy założonych ograniczeniach. W odróżnieniu od optymalizacji kształtu topologia rozwiązania nie jest założona, lecz jest także wynikiem działania algorytmu. Sigmund i inni przedstawili i porównali najczęściej stosowane metody optymalizacji topologicznej [55], [56]. Pierwsze publikacje optymalizacji topologicznej Bendsoe i Kikuchi [57] dotyczyły metody homogenizacji. Obecnie najczęściej wykorzystywane są takie metody optymalizacji topologicznej jak: metody gęstościowe (density based methods) [58] oraz metody poziomic (Level set methods). Inne metody to metody różnic topologicznych (topological derivative), metody pól fazowych (phase field) oraz metody ewolucyjne (BESO). Do najczęściej stosowanych metod optymalizacji topologicznej są: metoda Solid

3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych

Isotropic Material with Penalization (SIMP) oraz Level Set Method . Przykład zastosowania optymalizacji topologicznej dla części robota przenośnego przedstawia ilustracja 3.6.



Rys. 3.6. Przykład zastosowania optymalizacji topologicznej do podpory robota przenośnego [59]

3.5.1. Metody gęstościowe

Optymalizacja topologiczna metodą SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) jest jedną z najczęściej stosowanych i dobrze udokumentowanych technik projektowania lekkich, a zarazem wytrzymałych konstrukcji. Metoda SIMP została zaproponowana w pracach [58] [60]. W metodzie przestrzeni optymalizacji jest dyskretyzowana na elementy skończone. SIMP opiera się na pojęciu interpolacji gęstości materiału, gdzie każdy element siatki posiada ciągłą wartość gęstości $\rho \in [0, 1]$, określającą stopień wypełnienia materiałem. Aby uniknąć powstawania struktur o wartościach pośrednich, stosuje się funkcję kary (penalizacji), która promuje rozwiązania binarne, tj. ρ dąży do wartości 0 (brak materiału) lub 1 (pełny materiał). Moduł Younga każdego elementu jest wyznaczany z zależności:

$$E_e = E_{min} + \rho_e^p (E_0 - E_{min}) \quad \rho \in [0, 1] \quad (3.28)$$

gdzie:

p - wartość potęgi funkcji kary, zwykle przyjmowana jest wartość 3;

E_{min} - wartość modułu Younga dla $\rho_e = 0$, która jest różna od 0;

E_0 - wartość modułu Younga materiału.

Macierz sztywności każdego elementu ma postać:

$$K_e(\rho_e) = E_e(\rho_e) K_e^0 \quad (3.29)$$

gdzie: K_e^0 - jest macierzą sztywności elementu dla modułu Younga równego 1.

Globalna macierz sztywności jest składana standardowymi metodami.

Problem modelowany przez SIMP ma standardową postać programowania nieliniowego:

$$f(\rho^*) = \min f(\rho) \quad (3.30)$$

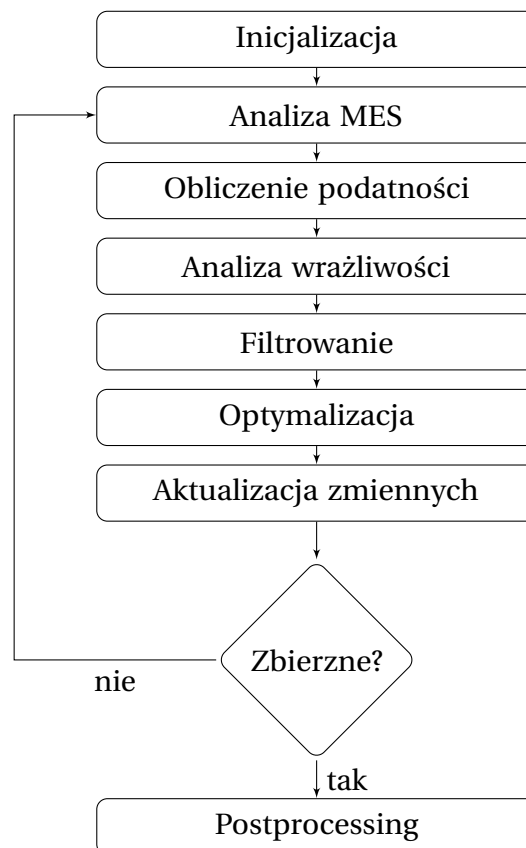
3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych

przy ograniczeniach:

$$g_j(\rho) \leq 0$$

$$h_k(\rho) = 0$$

gdzie $f(\rho)$ jest funkcją celu, a $g_j(\rho)$ i $h_k(\rho)$ są więzami nierównościami i równościami optymalizacji. Proces optymalizacji topologicznej przebiega według schematu pokazanego na rysunku 3.7.



Rys. 3.7. Algorytm optymalizacji topologicznej metodą SIMP, (opracowanie w oparciu o [61])

Algorytm optymalizacji, poprzez proces iteracyjny, dobiera gęstości elementów, które są zmiennymi projektu optymalizacji, które minimalizują np. globalną podatność konstrukcji dla założonej ilości usuniętej masy. W pierwszym kroku następuje przygotowanie modelu problemu. Na etapie inicjalizacji określana jest przestrzeń optymalizacji, która dzielona jest na elementy skończone, określane są warunki brzegowe jak np. więzy, obciążenia, a także np. przestrzenie pasywne, które nie będą zmieniane przez działanie algorytmu. Budowana jest macierz sztywności modelu. W następnym kroku następuje analiza w celu znalezienia odkształceń, a następnie obliczane są podatności elementów. Podatność jest miarą elastyczności lub "miętkości" konstrukcji i jest odwrotnością sztywności. Globalna podatność jest równa sumie energii sprężystego odkształcenia elementów. Minimalizowanie globalnej podatności C jest równoznaczne z maksymalizacją

3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych

globalnej sztywności. Podczas każdej iteracji algorytm optymalizacji przeprowadza analizę wrażliwości w celu oceny wpływu zmiany gęstości materiału na funkcję celu, którą jest maksymalizacja sztywności. Matematycznie analizę wrażliwości wyraża się jako pochodną funkcji celu po gęstości materiału:

$$\frac{dC}{d\rho_e} = -p(\rho_e)^{p-1} [u_e]^T [K_e] [U_e]; \quad (3.31)$$

Podczas analizy wrażliwości elementy ważone niskimi współczynnikami gęstości materiału ostatecznie tracą swoje znaczenie strukturalne i są eliminowane podczas dalszych iteracji. Pochodne oblicza się metodą sprzężoną (adjoint method) która pozwala na obliczenie wrażliwości dla wszystkich zmiennych w jednej iteracji, minimalizując koszt obliczeniowy. Metoda różnic skończonych, ze względu na bardzo duży koszt obliczeniowy dla dużej ilości zmiennych w optymalizacji topologicznej nie jest stosowana.

Jeśli wrażliwość zostanie policzona dla każdego elementu niezależnie i nie weźmie się pod uwagę sąsiednich elementów, może to prowadzić do nieciągłości materiału. Nazywa się to efektem szachownicy. Aby zredukować ten efekt, stosowane może być filtrowanie przy założonym promieniu wpływu elementu i uśrednia się czułość każdego elementu. Informację o wrażliwości są wykorzystane w gradientowej procedurze optymalizacyjnej, w celu uaktualnienia wartości zmiennych. W optymalizacji topologicznej najczęściej stosowaną metodą jest MMA (Method of moving asympthots) [62]. Ta metoda opracowana przed Svanberga jest bardzo sprawnym narzędziem, dostosowanym do zadań z bardzo dużą ilością zmiennych. Ponadto metoda jest odporna na przypadki kiedy początkowy punkt optymalizacji jest poza zbiorem rozwiązań dopuszczalnych. MMA tworzy lokalne, separowalne aproksymacje funkcji celu i ograniczeń za pomocą funkcji poszczególnych zmiennych projektowych. Aproksymacje te są zazwyczaj wypukłe i zdefiniowane w ograniczonym zakresie wartości zmiennych. Kluczowym elementem metody MMA są poruszające się asymptoty, które definiują dolne i górne ograniczenia dla każdej zmiennej projektowej. Asymptoty te są dynamicznie aktualizowane w każdej iteracji w zależności od poprzednich wartości zmiennych, co pozwala na elastyczność w zakresie przeszukiwania przestrzeni projektowej. W każdej iteracji metoda MMA rozwiązuje prosty problem optymalizacji, oparty na lokalnych aproksymacjach, co pozwala na poprawienie wartości funkcji celu przy jednoczesnym zachowaniu ograniczeń. Proces iteracyjny trwa, aż do osiągnięcia zbieżności, czyli gdy zmiany wartości funkcji celu i zmiennych projektowych są poniżej zadanych progów tolerancji.

Metoda SIMP znalazła szerokie zastosowanie w projektowaniu komponentów mechanicznych, w tym lekkich manipulatorów robotycznych, gdzie redukcja masy przy jednoczesnym zachowaniu odpowiedniej sztywności i wytrzymałości jest kluczowa. Dzięki zastosowaniu tej metody możliwe jest uzyskanie zoptymalizowanych konstrukcji nadających się do wytwarzania przyrostowego (Additive Manufacturing), co dodatkowo zwiększa

3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych

jej praktyczną wartość w robotyce mobilnej. SIMP pozwala również na włączenie dodatkowych ograniczeń, takich jak minimalna grubość elementów, ograniczenia produkcyjne oraz kierunkowość obciążenia, co czyni ją niezwykle elastycznym narzędziem optymalizacyjnym.

3.5.2. Metoda zbiorów poziomicowych

Inną metodą optymalizacji topologicznej jest metoda zbiorów poziomicowych (Level Set Method, LSM), która wykorzystuje funkcję poziomicową do reprezentowania i ewolucji granicy projektowanego obiektu ([63]). W przeciwieństwie do metod opartych na optymalizacji gęstości materiału, takich jak metoda SIMP, podejście LSM umożliwia płynne i naturalne ewoluowanie geometrii konstrukcji bez konieczności stosowania dodatkowych filtrów eliminujących nierealistyczne przejścia między materiałem a pustką ([64]).

W metodzie LSM powierzchnia graniczna konstrukcji jest opisywana jako poziom zerowy funkcji odległości (signed distance function), która podlega iteracyjnym modyfikacjom na podstawie równań Hamiltona-Jacobiego. Ewolucja tej powierzchni zachodzi zgodnie z gradientem funkcji celu, co pozwala na efektywne usuwanie nieefektywnych obszarów materiału oraz kształtowanie struktury optymalnej pod względem wytrzymałości, sztywności lub innych parametrów inżynierskich. Dodatkowo, metoda ta umożliwia włączenie ograniczeń produkcyjnych, takich jak minimalna grubość elementów czy kierunkowość procesów wytwarzania. Zaletą metody zbiorów poziomicowych jest jej zdolność do zapewnienia topologicznie poprawnych i płynnych geometrii, co ułatwia przejście od modelu optymalizacyjnego do rzeczywistej produkcji, szczególnie w technologiach takich jak druk 3D oraz wytwarzanie przyrostowe. W porównaniu z innymi metodami optymalizacji topologicznej, LSM lepiej radzi sobie z problemami zmieniającej się topologii i nie wymaga dodatkowych operacji interpolacyjnych w celu uniknięcia tzw. półmateriałów.

Dzięki swoim właściwościom metoda LSM znajduje zastosowanie w projektowaniu lekkich i wytrzymałych manipulatorów robotycznych, gdzie kluczowe jest jednoczesne spełnienie wymagań dotyczących masy, sztywności oraz wytrzymałości. Możliwość precyzyjnego definiowania ograniczeń optymalizacyjnych oraz uzyskiwania konstrukcji o dobrze zdefiniowanych krawędziach czyni tę metodę jednym z najbardziej zaawansowanych narzędzi w inżynierii optymalizacyjnej ([65]).

3.5.3. Metody implementacji geometrii wynikowej optymalizacji topologicznej

Rezultaty optymalizacji topologicznej do dalszego wykorzystania wymagają dalszej obróbki (post-processing). Oprogramowanie do optymalizacji strukturalnej, z założenia, opiera się na numerycznych metodach analizy strukturalnej. Metody te, z dominującym podejściem Metodą Elementów Skończonych, wymagają dyskretyzacji analizowanego obszaru. Prowadzi to do dyskretyzowanych wyników optymalizacji strukturalnej — powierzchniowej lub objętościowej siatki elementów skończonych. Metody produkcji addy-

3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych

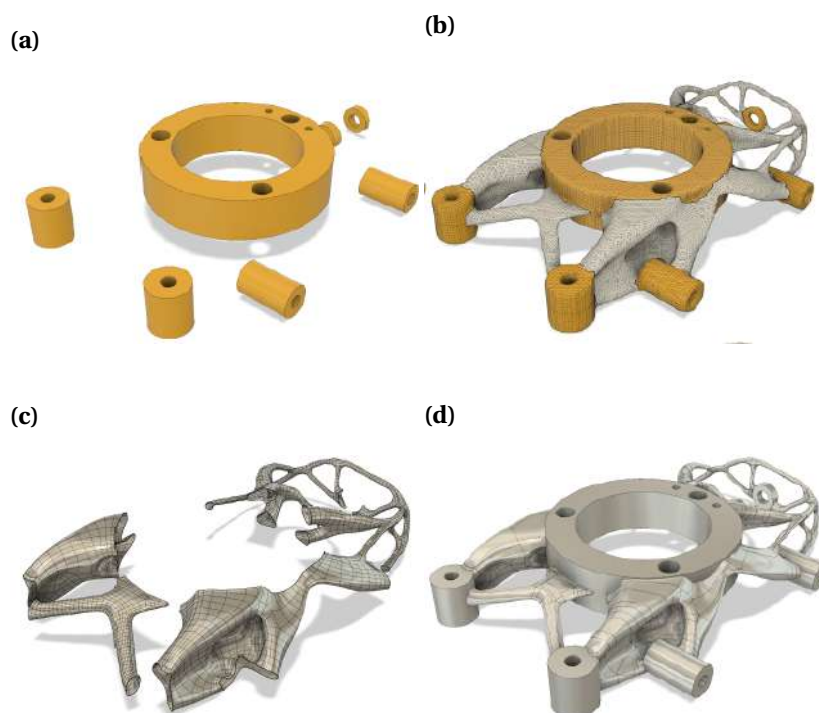
tywnej mogą ograniczyć post-processing wyników optymalizacji strukturalnej wyłącznie do wygładzania powierzchni siatki. Jednak w wielu praktycznych przypadkach, w szczególności gdy po optymalizacji dalszy projekt wymaga modelu parametrycznego, istnieje potrzeba przeniesienia wyników optymalizacji strukturalnej do systemu CAD. Wymaga to zbudowania modelu parametrycznego.

Choć coraz częściej integrowane są metody optymalizacji topologicznej (TO) z systemami komputerowego wspomagania projektowania (CAD) do projektowania mechanicznego i konstrukcyjnego, zwykle proces przekształcania surowych wyników TO w zoptymalizowane modele 3D CAD często jest wymagający, angażując użytkownika i wymagając znaczącego doświadczenia. Wg Subedi i innych [66] metody obróbki wyników TO można podzielić na takie które odtwarzają geometrię z prymitywów np belek, dopasowują powierzchnie i upraszczają siatkę lub bazują na dekompozycji i aproksymacji brył.

Znane są propozycje w pełni zautomatyzowanych metod generowania zoptymalizowanych modeli CAD 3D na podstawie wyników TO. Cuilliere i inni [67] zaprezentował metodę ukierunkowaną na tworzenie struktur belkowych. W ramach procesu surowe wyniki TO są początkowo przekształcane w gładką siatkę. Następnie, generowany jest szkielet krzywej, który po normalizacji służy do opracowania modelu CAD złożonego z zestawu standardowych prostych belek konstrukcyjnych.

J. Ploak i inni [68] przedstawili zautomatyzowany system rozpoznawania cech oparty na szkieletyzacji, przeznaczony do integracji z wynikami biomimetycznej optymalizacji strukturalnej. System umożliwia ponowne wprowadzenie wyników optymalizacji do środowiska CAD jako zestawu sparametryzowanych geometrii. Dane wyjściowe z procesu optymalizacji strukturalnej są przekształcane w zestaw podstawowych cech CAD, takich jak cylindry i sfery, co pozwala na dalszą pracę projektową w natywnym formacie CAD. Zaprojektowany w pełni zautomatyzowany system przyjmuje obiekty 3D jako dane wejściowe, wykorzystując szkieletyzację siatki do generowania początkowego rozwiązania. Rozwiązanie to jest następnie udoskonalane przy użyciu ewolucyjnego algorytmu rekonstrukcji geometrii 3D. System działa jako końcowy etap procesu optymalizacji strukturalnej, zachowując kluczowe cechy podejścia, takie jak możliwość wykluczenia części domeny z optymalizacji.

Marinov i inni [69] zaprezentowali metodę przetwarzania wynikowych geometrii optymalizacji topologicznej na modele CAD. Na ilustrcji 3.8 pokazane są poszczególne kroki metody. Wynikowy model jest otrzymywany na podstawie geometrii wejściowych (rys. 3.8a) i siatki wynikowej optymalizacji (rys. 3.8c). Model jest otrzymywany z połączenie siatki przekształconej w powierzchnie T-NURBCC oraz geometrii początkowej. Larsen i inni [70] przedstawili metodę przekształcania wynikowej siatki w model parametryczny CAD, dzięki czemu po optymalizacji topologicznej konstrukcja może podlegać dodatkowej optymalizacji parametrycznej.



Rys. 3.8. Poszczególne kroki przekształcenia wynikowej geometrii w model CAD [69]

3.6. Metody projektowania i optymalizacji manipulatorów

Przygotowując proces optymalizacji konieczne jest określenie parametrów, które będą wykorzystane jako zmienne np. do definicji więzów optymalizacji a także jak wskaźniki pozwalające ocenić jakość rozwiązania. W robotyce zdefiniowane zostały liczne analityczne parametry i wskaźniki, służące do opisu konstrukcji i ich własności. Poniżej przedstawiono najczęściej wykorzystywane parametry wykorzystywane do optymalizacji manipulatorów. Podstawowymi parametrami opisującymi konstrukcje pod względem kinematycznym są:

- **Struktura kinematyczna**

Struktura kinematyczna jest określona przez określenie relacji geometrycznych pomiędzy wykorzystanymi parami kinematycznymi. Człony manipulatora są połączone poprzez pary kinematyczne tworząc tzw. łańcuch kinematyczny. Sąsiednie człony połączone ze sobą za pomocą par kinematycznych – najczęściej pary obrotowe V klasy – obrotowe lub liniowe. Do opisu struktury kinematycznej oprócz schematów kinematyki najczęściej jest stosowana notacja Denavita Hartenberga [71].

- **Liczba stopni swobody**

Liczba stopni swobody jest to ilość zmiennych położenia, jaką należy podać w celu jednoznacznego określenia układu w przestrzeni.

- **Ruchliwość manipulatora**

3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych

Liczba stopni swobody łańcucha kinematycznego mechanizmu z unieruchomioną podstawą;

- Manewrowość manipulatora

Liczba stopni swobody łańcucha kinematycznego mechanizmu z unieruchomionymi: członem – podstawą i członem – ostatnim w łańcuchu kinematycznym

- Przestrzeń robocza

Przestrzeń, w obrębie której przemieszcza się konstrukcyjne zakończenie ostatniego, wolnego, ale nierozdzielnie związanego z mechanizmem jednostki kinematycznej członu (chwytaka). W optymalizacji manipulatorów można się spotkać z wykorzystaniem objętości przestrzeni roboczej jako kryterium optymalizacji.

- Zwinność (dexterity) manipulatora

Przestrzeń, w obrębie której przemieszcza się zakończenie chwytaka, dla której możliwe jest przybranie dowolnej orientacji chwytaka. Ze względu na ograniczenia kinematyczne, które zwykle występują w konstrukcjach manipulatorów w praktyce stosuje warianty tego wskaźnika [72].

- Dokładność pozycjonowania

Dokładność z jaką robot wykonuje operację umiejscowienia końcówki roboczej w przestrzeni roboczej, podana we współrzędnych przestrzeni roboczej.

Skonstruowana zostały także bardziej złożone wskaźniki wykorzystywane do oceny działania manipulatorów:

- Wskaźnik uwarunkowania (Condition number)

Wskaźnik uwarunkowania jest wykorzystywany jako wskaźnik opisujący dokładność i zręczność(zwinność) [73] [74] (dexterity) manipulatora a także jako wskaźnik bliskości aktualnej pozycji manipulatora do pozycji osobliwej. Wskaźnik uwarunkowania zdefiniowany jest jako

$$\kappa = \frac{\sigma_{\max}(J)}{\sigma_{\min}(J)} \quad (3.32)$$

gdzie $\sigma_{\max}$ i $\sigma_{\min}$ to największa i najmniejsza wartość osobliwa Jakobianu manipulatora J . Jakobian J jest macierzą, która pozwala przekształcić prędkości w przestrzeni wewnętrznej manipulatora $\dot{q}$ manipulatora na prędkość końcówki roboczej $\dot{x}$ w przestrzeni kartezjańskiej.

$$\dot{x} = J\dot{q} \quad (3.33)$$

- GCI (Global Performance Index)

Index GCI został zdefiniowany przez C.Gosselin i J. Angeles [75] jest jako stosunek całki odwrotności wskaźnika uwarunkowania κ w przestrzeni roboczej W do

3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych

Objętości przestrzeni roboczej W :

$$\eta = \frac{A}{B} \quad (3.34)$$

gdzie A jest odwrotnością

$$A = \int_W \left(\frac{1}{k}\right) dW \quad (3.35)$$

$$B = \int_W dW \quad (3.36)$$

- Manipulacyjność (Manipulability)

T. Joshikawa [76] określił wskaźnik Manipulacyjności (manipulability), który mierzy zdolność manipulatora do równomiernego poruszania się we wszystkich kierunkach. W punktach osobliwych manipulator traci jeden lub więcej stopni swobody. Innymi słowy, niektórych zadań nie można wykonać w punktach osobliwych lub w ich pobliżu.

- Zdolność do przenoszenia siły

Inną miarą zdolności robota jest odwrotność Manipulacyjności (Manipulability), którą nazywa się zdolnością do przenoszenia siły.

- SLI (structural length index) Mierzy efektywność projektu pod względem wygenerowanej przestrzeni roboczej. Definiuje się go jako stosunek sumy długości manipulatora do pierwiastka sześciennego objętości obszaru roboczego.

Patel i inni [77] opracowali zestawienie wskaźników manipulatorów. Wskaźniki zostały podzielone na kinematyczne i dynamiczne, lokalne i globalne, wewnętrzne i zewnętrzne. Oprócz wymienionych parametrów, w procesie optymalizacji wykorzystywane są parametry opisujące własności struktury nośnej jak masa, sztywność konstrukcji, która często jest określana jako wielkość ugięcia końcówki roboczej są wpływem obciążenia. Innym wykorzystywanym miernikiem sztywności konstrukcji jest częstotliwość drgań własnych.

W literaturze występują liczne przykłady optymalizacji podstawowych parametrów robotów oraz wymiarów, kształtu i topologii konstrukcji nośnej.

Przykładem doboru struktury kinematycznej jest praca S. Kusuk i Z. Bindul [78]. Autorzy wykorzystują wskaźniki GCI, SLI, manipulacyjność i wskaźnik uwarunkowania do doboru struktury kinematycznej manipulatora o 3 stopniach swobody. Celem optymalizacji jest maksymalizacja przestrzeni roboczej manipulatora oraz maksymalizacja jednego z wymienionych wskaźników. Autorzy porównują wyniki optymalizacji które otrzymali przy wykorzystaniu różnych wskaźników zdolności manipulatora.

W pracy [79] S. Singh i E. Singla zaproponowali metodę projektowania manipulatorów

3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych

w której konstrukcje były dopasowywane do wykonywanych zadań. Dobierali parametry DH manipulatora szeregowego zbudowanego z modułów (3.9).



Rys. 3.9. Manipulator o 6 stopniach swobody o parametrach dostosowanych do realizacji zadań w serwerowni. [79]

Autorzy skonstruowali funkcję celu w której mierzona była suma odległości końcówki roboczej od założonych punktów do których robot musiał dosięgnąć. Jednocześnie badane były kolizje elementów budowanego manipulatora z obiektami w środowisku pracy oraz ograniczenia kinematyczne wykorzystanych modułów. Do optymalizacji autorzy wykorzystali algorytm symulowanego wyżarzania.

W pracy [77] dobierali wartości parametrów DH manipulatora analizując możliwość osiągnięcia pozycji manipulatora wymaganej dla wykonania zadania, biorąc pod uwagę ograniczenia kinematyczne.

Galan-Urbe i Morales-Velazquez [80] przeprowadzili optymalizację manipulatora przemysłowego w celu poprawienia efektywności energetycznej podczas wykonywania wytypowanych zadań. Autorzy dobierali parametry manipulatora wykorzystując w procesie takie wskaźniki jak GCI (Global Condition Index) oraz SLI (Structural Length Index).

Hwand i inni [81] użyli algorytmu genetycznego, żeby zoptymalizować parametry manipulatora o 7 stopniach swobody. Celem obliczeń było poprawienie efektywności energetycznej manipulatora. Jako kryteria do przeprowadzenia optymalizacji autorzy posłużyli się takimi wskaźnikami jak SLI, GCI, oraz MDCI (Modified Dynamic Conditioning Index).

Lim i inni [82] zaprezentowali procedurę i wyniki optymalizacji wielokryterialnej manipulatora 7DOF. Kryteriami optymalizacji było GCI (Global Condition Index) oraz SLI (Structural Length Index). Autorzy przeprowadzili analizę wpływu długości członów manipulatora na wskaźniki manipulatora poprzez analizę wariancji (ANOVA).

Mashali i inni [83] dobierali długości ramion manipulatora typu SCARA w celu minimalizacji energii potrzebnej do wykonywania zadania pakowania przedmiotów na linii produkcyjnej.

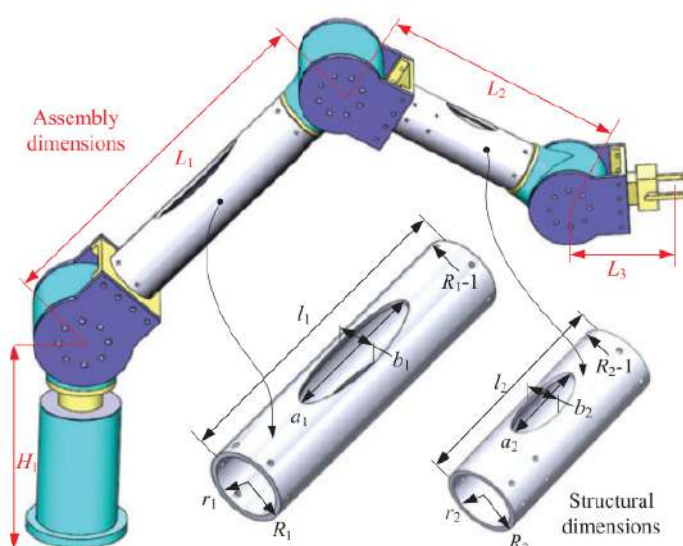
Z. Du, i inni [84] przeprowadzili optymalizację wielokryterialną manipulatora, której celem było zminimalizowanie stosunku masy manipulatora do masy podnoszonego ładunku

3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych

oraz maksymalizacja częstotliwości drgań własnych manipulatora. Parametrami które były modyfikowane były parametry geometrii manipulatora oraz parametry układów napędowych. Wykorzystany został algorytm NSGA II.

Hu i inni [85] przeprowadzili wielokryterialną optymalizację manipulatora podczas której modyfikowane były parametry geometryczne i parametry układów napędowych. Celem optymalizacji było zwiększenie sztywności, częstotliwości drgań własnych oraz obniżenie masy.

H. Yin i inni [86] zaproponowali metodę projektowania manipulatora, w której optymalizowane są parametry konstrukcyjne i napędów manipulatora. Zminimalizowano masę manipulatora przy zachowaniu ograniczeń wynikających z założonej dynamiki robota. Optymalizację parametryczną przeprowadzono w programie Ansys, a do doboru napędów wykorzystano model manipulatora symulowany w systemie ADAMS, która pozwala na dobór parametrów oraz układów napędowych.



Rys. 3.10. Parametry komponentów ramion optymalizowanego manipulatora [86].

W [87] C. Lanni i inni zoptymalizowali manipulator minimalizując jego wymiary i maksymalizując objętość przestrzeni roboczej. Xu Q. i in. [88] zoptymalizował długości ramion manipulatora antropomorficznego. Autorzy zdefiniowali wskaźnik wydajności, który uwzględnia manipulacyjność, wskaźnik uwarunkowania macierzy Jakobianu i sztywność końcówki manipulatora.

W literaturze można znaleźć także wiele przykładów, gdzie w procesie optymalizacji manipulatorów autorzy wykorzystali optymalizację topologiczną lub połączyli optymalizację topologiczną konstrukcji z optymalizacją parametrów opisujących geometrię.

Yao i in. [89] przedstawił proces optymalizacji górnego ramienia manipulatora przemysłowego wykorzystywanego w procesie spawania. Autorzy przeprowadzili optymalizację topologiczną w celu zmniejszenia masy i zwiększenia częstotliwości drgań własnych

3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych konstrukcji.

(a)



(b)



Rys. 3.11. Ramie manipulatora: a - konstrukcja oryginalna, b-konstrukcja po optymalizacji [89].

Kouritem i in. [90] przedstawił wielokryterialną optymalizację manipulatora przemysłowego, której celem była minimalizacja kosztów początkowych i eksploatacyjnych.

Wang X. i in. [91] zoptymalizował manipulator szeregowy, integrując optymalizację topologii i optymalizację parametryczną systemu. Naukowcy najpierw skonstruowali model sztywności manipulatora, a następnie określili typowe obciążenie i konfiguracje obciążenia. Optymalizację topologii przeprowadzono na poziomie części. Na poziomie układu przeprowadzono optymalizację parametryczną, która posłużyła do określenia podziału masy na poszczególne składowe.

Według [91], [92], redukując masę konstrukcji, najlepsze wyniki redukcji masy można osiągnąć poprzez połączenie optymalizacji parametrycznej i topologicznej.

Bien X.D. [93] analizował wpływ optymalizacji topologicznej górnego ramienia manipulatora przemysłowego na obciążenia w układach napędowych. Podkreślony został korzystny wpływ redukcji masy na czas życia urządzenia.

M.Kumaran i V.Senthilkumar [94] redukowali masę komponentu górnego ramienia manipulatora przemysłowego poprzez optymalizację topologiczną. Część była dostosowana do wykonania metodą addytywną (AM) przy wykorzystaniu procesu PBF (Powder Bed Fusion). Autorzy uzyskali 50% redukcji masy względem części oryginalnej.

A. Albers i J. Ottnad [95] przedstawili kompleksowy proces optymalizacji komponentów robota humanoidalnego. Autorzy w iteracyjnej procedurze połączyli analizy MBS, FEM,

3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych

symulacje systemu sterowania oraz optymalizację topologiczną komponentów. Rezultaty działania algorytmu zostały pokazane na przykładzie części struktury ramienia i przedramienia robota (rys. 3.12). Symulowane były ruchy manipulatora pomiędzy zaprogramowanymi konfiguracjami. Analizy MBS oraz FEM pozwoliły na wytypowanie przypadków obciążenia, dla których energie odkształcenia komponentów jest największa. Te przypadki obciążenia zostały wykorzystane do przeprowadzenia optymalizacji topologicznej części kończyny robota. Po tym kroku przechodzi się do następnej iteracji procedury która jest wykonywana dla nowych zoptymalizowanych komponentów. Zmniejszone masy konstrukcji powodują zmniejszenie momentów napędów i co za tym definiowane są nowe przypadki obciążeń.

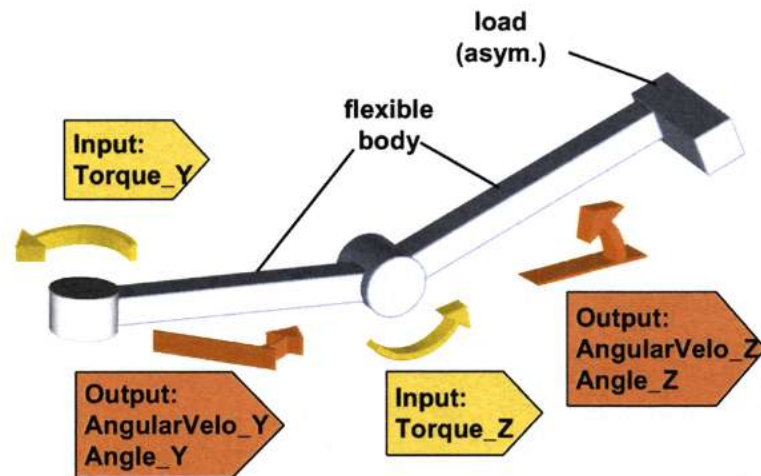
Z. Paska i inni [96] przeprowadzali optymalizację topologiczną manipulatora robota mobilnego przygotowywanego do realizacji misji podczas międzynarodowych zawodów European Rover Challenge (ERC). Autorzy uwzględnili w optymalizacji obciążenia statyczne oraz dynamiczne, wynikające z nagłego zatrzymania napędów, manipulatora pracującego pod nominalnym obciążeniem. Do skonstruowania przypadków obciążenia dynamicznego zostały wykonane pomiary przyspieszeń podczas realizacji ruchu poszczególnymi stopniami swobody. Na podstawie uzyskanych przyspieszeń została policzona działająca siła działająca przez końcówkę roboczą na górne ramie manipulatora. Ostatecznie siły dynamiczne i statyczne zostały zsumowane dla uzyskania obciążeń uwzględnionych w optymalizacji topologicznej. Element górnego ramienia manipulatora został poddany optymalizacji topologicznej przy użyciu metody SIMP (rys. 3.13). Autorzy podkreślili, jak istotny w obliczeniach jest odpowiedni dobór obciążeń. To jest zagadnienie, które często nie jest uwzględniane, lub problem rozwiązywany jest poprzez przyjęcie odpowiednio wysokiego współczynnika bezpieczeństwa.

W literaturze można znaleźć także inne przykłady pogłębionej analizy doboru obciążeń do optymalizacji, najczęściej na przykładach manipulatorów przemysłowych. W pracy [97] Srinivas i Javed przeprowadzili optymalizację topologiczną ramienia manipulatora przemysłowego, biorąc pod uwagę zmienność kierunku obciążenia podczas obrotu ramienia. Autorzy założyli, że ramię obciążone jest na końcu siłą pionową. W przeprowadzonej optymalizacji uwzględniono obciążenia przy obrocie ramienia od kąta od 0 do 170, z rozdzielczością 10 stopni.

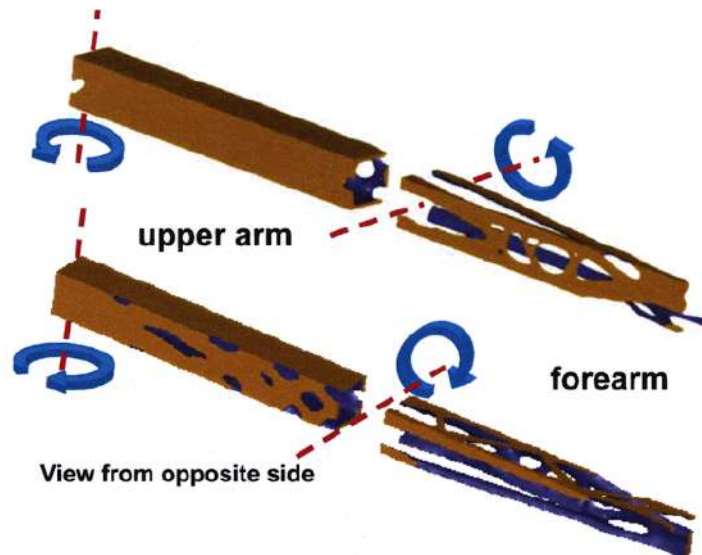
W pracy [98] autorzy zajęli się minimalizacją masy ramienia manipulatora przemysłowego za pomocą optymalizacji topologicznej. Autorzy zaproponowali metody uwzględnienia wielu warunków obciążenia w optymalizacji topologicznej gęstości poprzez wprowadzenie sum ważonych gęstości materiałów uzyskanych dla różnych przypadków obciążenia.

W publikacjach [97] i [99] autorzy zaproponowali metodę rozwiązania podobnie zdefi-

(a)



(b)



Rys. 3.12. Optymalizacja komponentów manipulatora: a- model do analizy MBS, b- struktura ramienia po optymalizacji topologicznej ([95])

niowanego problemu opartą na przetwarzaniu wynikowej topologii utworzonej poprzez nałożenie rozwiązań dla poszczególnych kątów obciążenia.

W [100] obejmuje optymalizację topologiczną elementów egzoszkieletu kończyny górnej przy użyciu dwóch metod. Autorzy przeprowadzili optymalizację dla pojedynczej konfiguracji, dla której naprężenia konstrukcji są największe. Założono, że ramiona są wyprostowane poziomo, a jako obciążenia przyjęto maksymalne przyspieszenia osiągane przez stawy ramion.

W pracy [101] autorzy przedstawili proces projektowania manipulatora o konstrukcji

(a)



(b)



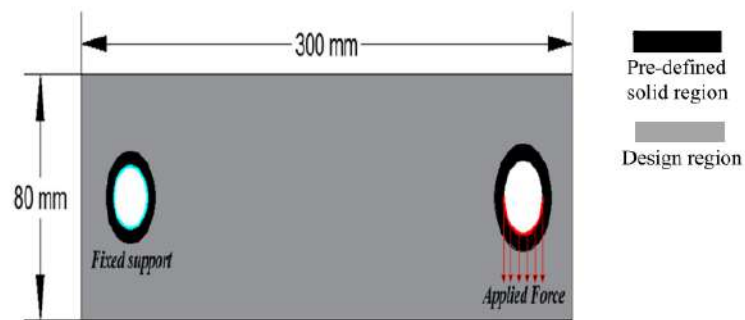
Rys. 3.13. Przykład zastosowania optymalizacji topologicznej do ramienia manipulatora: a - oryginalny komponent ramienia manipulatora (211g), b - nowy komponent ramienia, po optymalizacji topologicznej (139g) ([96])

równoległej przeznaczonego do paletyzacji. Aby przyjąć obciążenia do optymalizacji topologicznej, przeanalizowano obciążenia w poszczególnych przegubach manipulatora dla pełnego zakresu ruchu prętów przy założonym przenoszonym ciężarze. Do optymalizacji autorzy przyjęli jeden wybrany stan obciążenia.

W pracy [102] autorzy przedstawili metodę optymalizacji lekkiego manipulatora antropomorficznego. Przeanalizowano typowe konfiguracje i warunki obciążenia, aby zidentyfikować obciążenia ramion. Do optymalizacji komponentów wykorzystano różne obciążenia. Każdy przypadek obciążenia został podzielony na obciążenia zginające, ścinające i rozciągające (rys. 3.15)

3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych

(a)



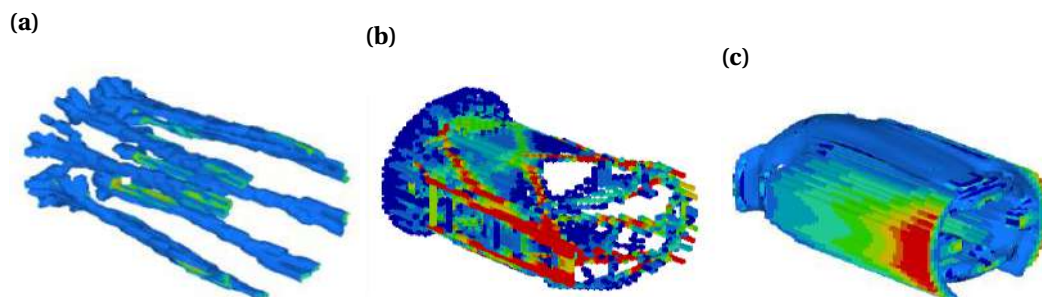
(b)

AP	Topology	Max Stress (MPa)	Max Def (mm)
0		3.07366	0.007973
10		3.769653	0.007925
20		5.540738	0.008503
30		6.049187	0.009191
40		18.38805	0.009787
50		25.10066	0.018552
60		15.98333	0.018214
70		26.65435	0.027416
80		19.52533	0.025668
90		13.31952	0.019893

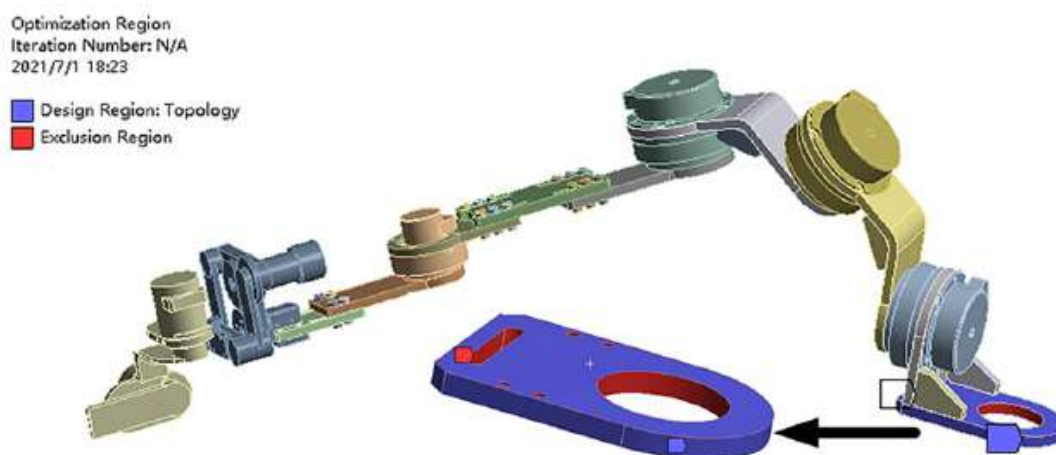
Rys. 3.14. Optymalizacja ramienia manipulatora: a-przestrzeń robocza optymalizacji topologicznej, b-wyniki optymalizacji topologicznej [97]

B.Liu i inni [103] zastosowali optymalizację topologiczną do zmniejszenia masy manipulatora współpracującego (Cobota) (rys.3.16. Autorzy przedstawili podejście nazwane optymalizacją topologiczną opartą na eksperymencie ortogonalnym i zademonstrowali metodę na manipulatorze 7DOF. W zaprezentowanej metodzie projektowania przewidziane są następujące kroki: W pierwszym kroku następuje wyznaczenie elementów tabeli złożonej z punktów przestrzeni współrzędnych wewnętrznych manipulatora. Wyznaczane

3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych



Rys. 3.15. Wyniki optymalizacji topologicznej komponentu manipulatora przeprowadzone dla trzech przypadków obciążeń: a- obciążeń rozciągających, b- obciążeń zginających, c- obciążeń ścinających [102].



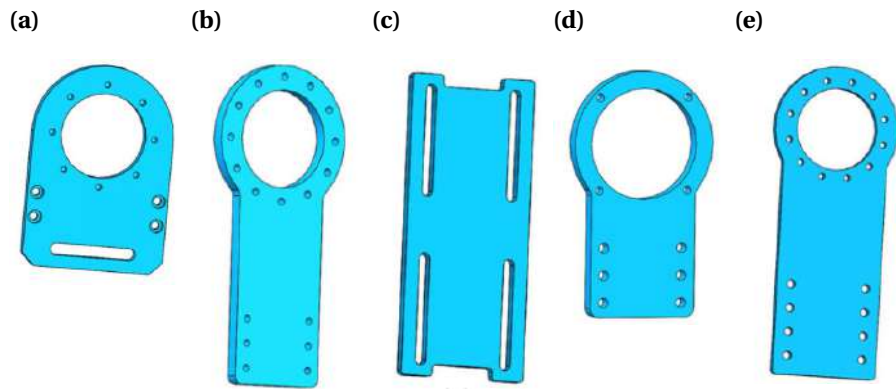
Rys. 3.16. Model manipulatora współpracującego o 7 stopniach swobody z zaznaczonym optymalizowanym komponentem podstawy [103].

były punkty krańcowe i pośrednie. Następnie wykonywane są analizy mes manipulatora w konfiguracjach wg tabeli. Podczas symulacji zadane są obciążenia wynikające z przenoszenia maksymalnego dopuszczalnego obciążenia oraz przyspieszenia napędów przegubów. W ostatnim kroku przeprowadzana jest optymalizacja topologiczna komponentów manipulatora

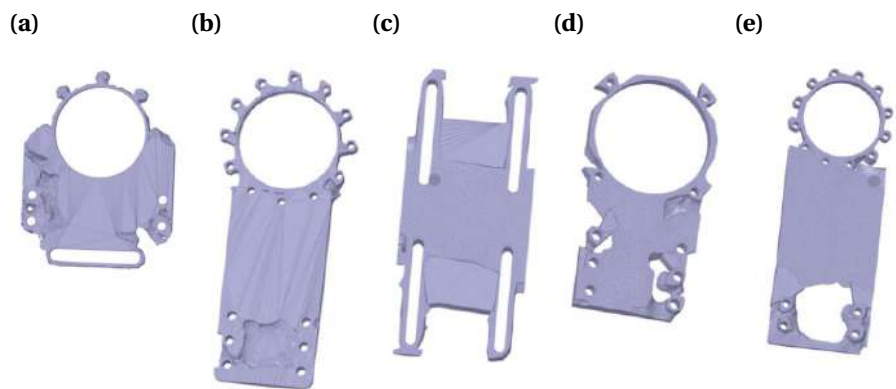
3.7. Wnioski z przeprowadzonej analizy zagadnienia

Metody optymalizacji, zarówno wymiarów, jak i topologicznej, są często stosowane w projektowaniu systemów robotycznych. Optymalizacja parametryczna umożliwia precyzyjne dostrajanie kluczowych cech konstrukcyjnych, takich jak długości członów, wielkości napędów czy kąty przegubów, w celu osiągnięcia zadanych parametrów użytkowych. Z kolei optymalizacja topologiczna pozwala na racjonalne rozmieszczenie materiału w

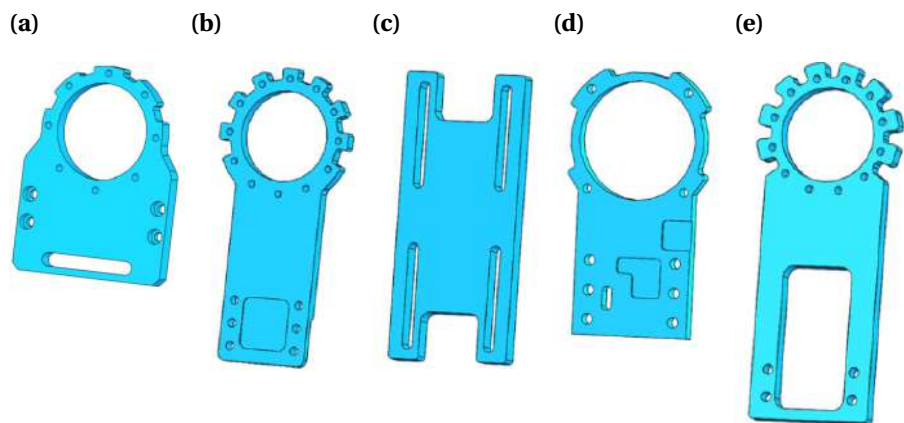
3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych



Rys. 3.17. Optymalizowane komponenty manipulatora [103].



Rys. 3.18. Modele komponentów manipulatora współpracującego po optymalizacji topologicznej [103].



Rys. 3.19. Wynikowe modele komponentów manipulatora dostosowane do metody produkcji [103].

3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych

przestrzeni konstrukcyjnej, prowadząc do znaczącej redukcji masy przy zachowaniu wymaganej sztywności i wytrzymałości — co jest szczególnie istotne w robotyce mobilnej.

Jednakże przeprowadzona analiza wykorzystania metod optymalizacyjnych, w szczególności optymalizacji topologicznej, w projektowaniu manipulatorów robotów przenośnych do zadań specjalnych wykazała, że metody przedstawione w literaturze nie mogą być bezpośrednio zastosowane do tego typu konstrukcji. Wynika to z odmiennych parametrów i specyfiki wykorzystania tych manipulatorów.

Przeprowadzona analiza wykorzystania metod optymalizacyjnych, w szczególności optymalizacji topologicznej, w projektowaniu manipulatorów robotów przenośnych do zadań specjalnych wykazała, że metody przedstawione w literaturze nie mogą być bezpośrednio zastosowane do tego typu konstrukcji. Wynika to z odmiennych parametrów i specyfiki wykorzystania tych manipulatorów. Jednym z kluczowych czynników różniących roboty stacjonarne od robotów do zastosowań specjalnych jest sposób sterowania. Manipulatory robotów mobilnych do zadań specjalnych są obsługiwane zdalnie przez operatora, z zastosowaniem wizyjnego sprzężenia zwrotnego, co sprawia, że sztywność konstrukcji oraz luzy w przegubach mają mniejsze znaczenie dla precyzji ruchów. W przeciwieństwie do robotów stacjonarnych, gdzie pozycja końcówki narzędzia jest określana na podstawie konfiguracji robota i jego osprzętu, w robotach mobilnych operator uzyskuje informację zwrotną na podstawie obserwacji końcówki roboczej, co pozwala na odpowiednio dokładne określenie położenia narzędzia w przestrzeni.

Kolejną istotną różnicą jest prędkość kątowa w przegubach manipulatora. W przypadku robotów mobilnych manipulatory charakteryzują się stosunkowo niskimi prędkościami ruchu, co wynika z konieczności zapewnienia precyzyjnego sterowania manualnego oraz bezpiecznego wykonywania operacji. W szczególności, podczas realizacji zadań EOD, gdzie manipulacja ładunkami wybuchowymi wymaga najwyższej ostrożności, zarówno szybkie, jak i gwałtowne ruchy są wysoce niepożądane, ponieważ mogą zwiększać ryzyko przypadkowej detonacji.

Z powyższych powodów metody projektowe dedykowane dla zapewnienia szybkich ruchów robotów stacjonarnych nie mogą być bezpośrednio zastosowane do manipulatorów robotów mobilnych. W przypadku optymalizacji manipulatorów do zastosowań specjalnych kryteria oceny, takie jak maksymalizacja prędkości i sztywności, mają mniejsze znaczenie i ustępują miejsca parametrom związanym z nośnością oraz odpornością na obciążenia i uderzenia.

W konstrukcjach manipulatorów przemysłowych przyjmuje się, że projektowane urządzenia mają na tyle wysokie współczynniki bezpieczeństwa, że nawet w przypadku kolizji nie dochodzi do uszkodzenia struktury nośnej. Natomiast w robotach mobilnych do zadań specjalnych istotne jest uzyskanie maksymalnego stosunku masy podnoszonego ładunku do masy własnej urządzenia, co wiąże się z redukcją współczynników bezpieczeństwa.

3. Analiza zagadnienia w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych

Takie podejście wymaga jednak szczegółowej analizy obciążeń, aby zapewnić odpowiednią wytrzymałość struktury nośnej manipulatora.

W większości analizowanych prac naukowych obciążenia optymalizowanych konstrukcji dobierane są na podstawie najmniej korzystnych zidentyfikowanych przypadków. W niektórych rozwiązaniach, jak wskazano w pracy [103], wprowadza się dodatkowe obciążenia równoważne, aby uwzględnić efekty dynamiczne. Przeprowadzona dokładniejsza analiza wpływu obciążeń w różnych konfiguracjach manipulatora na wyniki optymalizacji topologicznej została przedstawiona w pracach Srinivasa [97]–[99].

Jednak nawet w tych opracowaniach uwzględniane są wyłącznie obciążenia wynikające z przenoszenia obiektów chwytakiem, co jest uzasadnione w kontekście manipulatorów przemysłowych, gdzie kolizje traktowane są jako sytuacje awaryjne. W przypadku robotów mobilnych do zadań specjalnych wszystkie możliwe stany pracy manipulatora należy uznać za potencjalnie występujące. W związku z tym konieczne jest opracowanie dedykowanych procedur projektowych, które uwzględnią szerokie spektrum warunków eksploatacyjnych. Zgodnie z wiedzą autora, w literaturze brak jest dotychczas kompleksowej metodyki projektowania manipulatorów dla robotów przenośnych, co podkreśla potrzebę dalszych badań w tym zakresie.

4. Cel i zakres pracy

Analiza zagadnienia przeprowadzona na bazie dostępnej literatury z obszaru optymalizacji manipulatorów wykazała, że brak jest opracowań poświęconych robotom przenośnym do zastosowań specjalnych. Dlatego też, z uwagi na fakt, że jest to istotne zagadnienie dla Łukasiewicz PIAP podjęto się tej tematyki badawczej. Celem pracy jest opracowanie metody doboru parametrów projektowych, która pozwoli na projektowanie lekkich manipulatorów robotów do zadań specjalnych o wymaganych zdolnościach roboczych. Realizacja przyjętego celu umożliwi poprawę jednego z ważniejszych wskaźników takiego rodzaju robotów, którym jest stosunek udźwigu manipulatora do masy robota co w konsekwencji zwiększy możliwości operacyjne robotów. W pracy zweryfikowane zostaną możliwości które daje wykorzystanie podejścia projektowania z wykorzystaniem optymalizacji topologicznej dla przypadku manipulatorów robotów do zadań specjalnych.

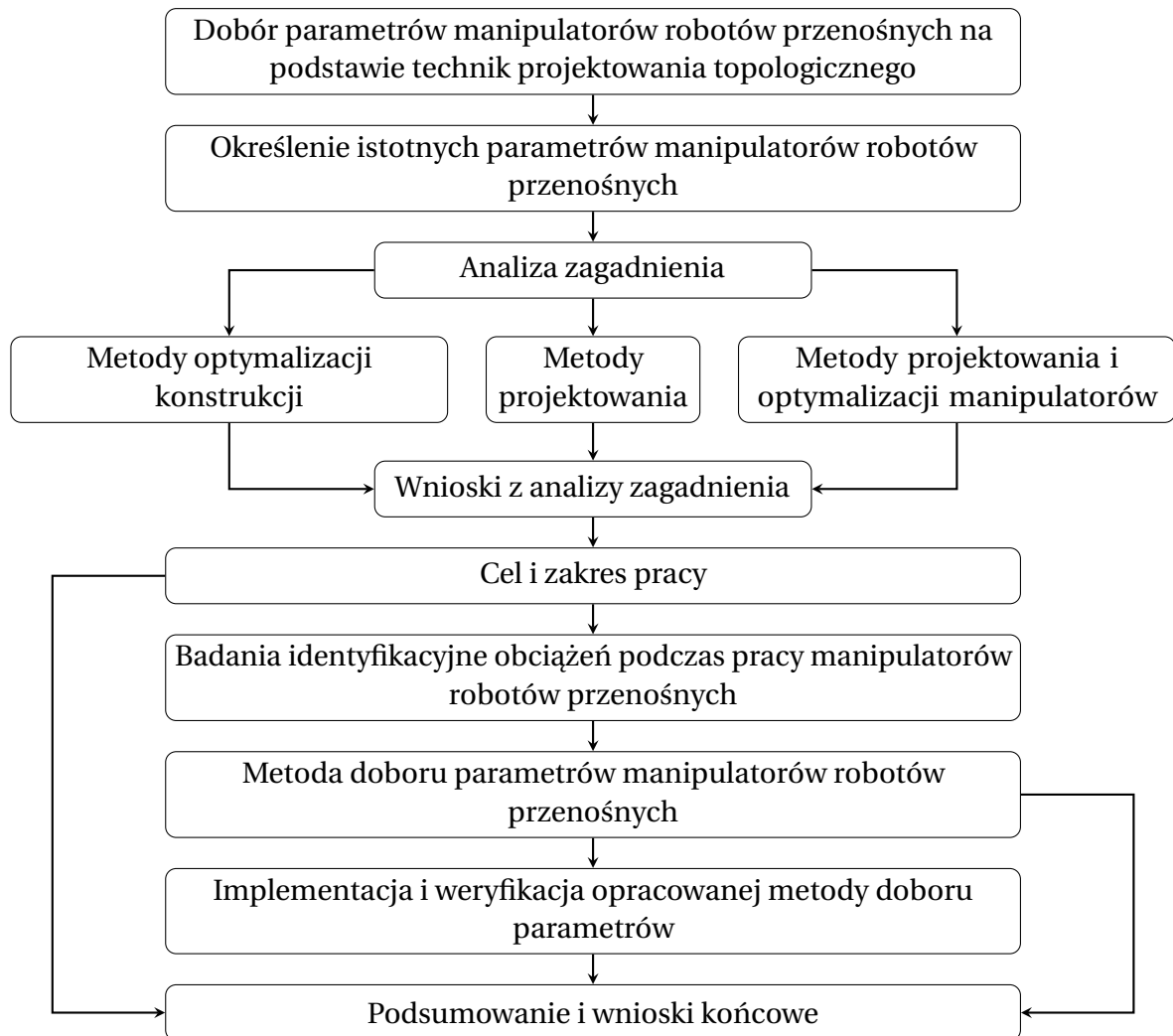
Praca została ukierunkowana na potencjał wdrożeniowy i możliwość implementacji opracowanych metod w procesie projektowania manipulatorów robotów przenośnych. Roboty przenośne stanowią grupę produktów, która jest najliczniej reprezentowana wśród opracowań Łukasiewicz PIAP. W Łukasiewicz PIAP istnieje potrzeba opracowania metody doboru parametrów projektowych która pozwoli, na projektowanie manipulatorów robotów do zadań specjalnych, o lepszych zdolnościach roboczych. Wykonanie opracowanego programu badawczego umożliwi zweryfikowanie możliwości które daje wykorzystanie podejścia topologicznego dla przypadku manipulatorów robotów do zadań specjalnych. Nabycie doświadczenia pozwoli na zastosowanie nowatorskiego podejścia do projektowania nowych produktów w dziedzinie robotyki do zadań specjalnych a także innych dziedzinach.

Układ pracy przedstawiono na rysunku 4.1. Po wprowadzeniu w rozdziale drugim przeprowadzono analizę zagadnienia, obejmującą trzy kluczowe obszary tematyczne. W pierwszej kolejności przeanalizowano zadania realizowane przez manipulatory przenośnych robotów do zadań specjalnych. Następnie zrealizowano opracowanie teoretycznych podstaw optymalizacji, niezbędnych do sformułowania i rozwiązania badanego problemu, ze szczególnym uwzględnieniem optymalizacji struktur mechanicznych oraz kryteriów oceny manipulatorów. W dalszej części dokonano przeglądu dostępnej literatury w zakresie metod projektowania i optymalizacji konstrukcji manipulatorów. Na zakończenie tej części sformułowano wnioski, w których zidentyfikowano ograniczenia dotychczasowych metod optymalizacji w kontekście projektowania manipulatorów przenośnych robotów do zadań specjalnych.

Na podstawie przeprowadzonych analiz oraz uwzględniając rzeczywiste potrzeby wdrożeniowe, sformułowano cel i zakres pracy. W kolejnych rozdziałach zrealizowano analizę prowadzącą do identyfikacji kluczowych parametrów manipulatora niezbędnych do osiągnięcia wymaganych zdolności roboczych. Wykonano badania identyfikacyjne obciążeń działających na manipulator, bazując zarówno na pomiarach wykonanych na

rzeczywistym obiekcie, jak i na wynikach symulacji. Na podstawie tych wyników opracowano metodę doboru kluczowych parametrów manipulatora, opisaną w kolejnym rozdziale.

W dalszej części rozprawy zrealizowano i opisano wieloetapową metodę doboru parametrów manipulatora, w której kolejne kroki prowadzą do przygotowania danych wejściowych do optymalizacji topologicznej jego komponentów. Przeprowadzono implementację tej metody, projektując komponenty manipulatora dopasowanego do platformy mobilnej robota PIAP Patrol. Pracę zamykają podsumowanie oraz wnioski końcowe.



Rys. 4.1. Podział zagadnień przedstawionych w rozprawie

5. Określenie kluczowych parametrów manipulatorów robotów przenośnych, istotnych dla osiągnięcia wymaganych zdolności roboczych

Wymagania dotyczące robotów do zadań specjalnych wynikają z konieczności osiągnięcia zdolności roboczych, które zapewniają pożądany poziom wykonywanych operacji. W przypadku robotów przeznaczonych do neutralizacji ładunków wybuchowych (EOD), manipulator odgrywa kluczową rolę, umożliwiając realizację różnorodnych zadań. Jego podstawową funkcją jest przenoszenie obiektów, zarówno tych potencjalnie niebezpiecznych, jak i elementów infrastruktury, które mogą stanowić przeszkodę w wykonywaniu zadania.

Roboty te często są wykorzystywane do manipulacji w złożonym środowisku operacyjnym, co obejmuje otwieranie drzwi, usuwanie przeszkód, oraz wykonywanie prac ziemnych, takich jak odsłanianie, kopanie i rycie w poszukiwaniu ukrytych ładunków wybuchowych lub przewodów. W wielu sytuacjach konieczne jest także przesuwanie i przeciąganie ciężkich obiektów, co wymaga od manipulatora odpowiedniej wytrzymałości i precyzji ruchów.

Dodatkowym zakresem zastosowań są operacje wymagające ingerencji w strukturę materiałów, takie jak przecinanie przewodów, drutów czy prętów, a także przebijanie opon i wybijanie szyb. W przypadkach, gdy konieczna jest neutralizacja zagrożenia, manipulator może być wykorzystywany do obsługi strzelb gładkolufowych lub wyrzutników pirotechnicznych. Działania te często wspomagane są przez wykorzystanie urządzeń RTG, umożliwiających prześwietlanie podejrzanych obiektów, oraz technologii zamrażania ładunków za pomocą ciekłego azotu.

Zastosowanie manipulatora obejmuje także pobieranie próbek i wykonywanie pomiarów przy użyciu czujników CBRN, a także podkładanie ładunków pośrednich w celu przeprowadzenia kontrolowanych detonacji. Ponadto, na manipulatorze mogą być instalowane kamery, głowice PTZ, mikrofony kierunkowe oraz inne sensory, które umożliwiają prowadzenie rozpoznania i obserwacji terenu w czasie rzeczywistym.

Manipulatory są również wykorzystywane do poprawy stabilności robota w trudnym terenie. Manipulator może pełnić funkcję podporową, stabilizując platformę mobilną podczas pokonywania przeszkód. W przypadku przewrócenia się robota, umożliwia on jego ponowne ustawienie w pozycji roboczej, co zwiększa autonomię i skuteczność operacyjną systemu. Wymienione zadania można pogrupować wg rodzaju pracy i obciążeń. Poniżej pogrupowano zadania z uwzględnieniem rodzaju obciążeń, które są generowane podczas wykonywania zadań.

- Przenoszenie obiektów.

Podczas normalnej pracy manipulatorów robotów do zadań specjalnych obciążenia mogą być uznawane za quasi-statyczne i wynikają głównie z podnoszenia oraz

5. Określenie kluczowych parametrów manipulatorów robotów przenośnych, istotnych dla osiągnięcia wymaganych zdolności roboczych

przemieszczania obiektów za pomocą chwytaka lub narzędzia roboczego. Dla tego typu robotów często definiuje się dwa kluczowe parametry: maksymalną masę, jaką manipulator może unieść w pozycji poziomo wyprostowanej, oraz maksymalną masę możliwą do podniesienia w pobliżu platformy mobilnej. Parametry te stanowią podstawę do doboru oraz optymalizacji układów napędowych manipulatora.

W praktyce jednak obiekty, które operator chce podjąć, nierzadko przekraczają dopuszczalne możliwości udźwigu manipulatora lub ograniczenia wynikające ze stateczności robota. W związku z tym w przegubach manipulatorów do zadań specjalnych często stosuje się sprzęgła przeciążeniowe, które – po przekroczeniu granicznej wartości momentu – poddają się, ograniczając przenoszony moment działający w kierunku osiowym. Dodatkowym ograniczeniem eksploatacyjnym jest możliwość utraty stateczności platformy mobilnej w wyniku przeciążenia lub niekorzystnego rozmieszczenia mas.

- Przesuwanie obiektów manipulatorem

Podczas realizacji zadań robotem zdarzają się sytuacje kiedy konieczne jest przesunięcie ciężkiego obiektu stojącego np. na ziemi. W takiej sytuacji obiekt jest popychany lub ciągnięty np. końcówką roboczą manipulatora. Obiekt może być przesuwany poprzez odpowiedni ruch przegubów manipulatora ale też poprzez ruch platformy mobilnej. Przykładami ruchów i obciążeń, które należy wziąć pod uwagę są: np. przesuwanie obiektów po gruncie chwytakiem poprzez obrót pierwszej-pionowej osi lub obrót platformy w miejscu, ciągnięcie chwytakiem obiektu poprzez wykorzystanie układu napędowego platformy robota co ma miejsce np. podczas przeciągania samochodu, napór końcówką roboczą np. podczas przebijania opony lub wybijania szyby samochodowej.

- Otwieranie drzwi

Zadaniem podobnym charakterze obciążeń jest otwieranie drzwi. Zadanie to, jest łatwiejsze do wykonania gdy w konstrukcji manipulatora są wprowadzone elementy podatne. [104]. Czynność ta może być zrealizowana także poprzez stosowanie dodatkowych narzędzi dedykowanymi do tego celu [105].

- Kopanie i rycie w gruncie

Jednym z zadań robotów może być detekcja i wydobywanie obiektów zakopanych w gruncie. W takim wypadku wykorzystywany jest zarówno ruch manipulatora jak i platformy mobilnej. Obciążenia mogą być podobnie zdefiniowane i porównywane z obciążeniami z punktu 4.2

- Obciążania wynikające z wykorzystania końcówek roboczych

Na manipulatorach mogą być mocowane i używane akcesoria generujące dynamiczne obciążenia podczas pracy. Mogą to być np. wyrzutniki pirotechniczne (rys.5.1) lub strzelby gładkolufowe. Podczas wystrzałów generowane są znaczne siły w krótkim czasie [106] [107]. Konstrukcja manipulatora musi być odporna na tego typu

5. Określenie kluczowych parametrów manipulatorów robotów przenośnych, istotnych dla osiągnięcia wymaganych zdolności roboczych

obciążenia, np. poprzez zabezpieczenie sprzęgłami przeciążeniowymi. Operatorzy robotów są szkoleni, żeby podczas wykonywania strzałów zachować odpowiednią konfigurację manipulatora, która pozwala na rozproszenie energii wystrzału w sprzęgłach przeciążeniowych co odpowiada konfiguracji o wysokiej manipulacyjności. W przypadku robotów o wymaganej nośności podczas wykonywania działań jako



Rys. 5.1. Robot PIAP Gryf podczas wystrzeau z działka bezdrutowego

końcówki robocze mogą być wykorzystane nożyce elektrohydrauliczne. Narzędzie służy do cięcia lub rozpierania np. elementów karoserii pojazdów. W zależności od użytego modelu generowane są siły tnące rzędu np. 700kN [15]. Podczas operowania takim narzędziem robotem trudno jest optymalnie dobrać kąt przyłożenia ostrzy i podczas wykonywania cięcia narzędzie ma tendencję do układania się w pozycji, w której ma mniejszy opór. Manipulator musi dostosować się do wymuszonej końcówką roboczą pozycji. Częściowo efekt jest redukowany poprzez wykorzystanie uchwyty z elementami podatnymi.

- Podnoszenie i podpieranie robota

Dla przenośnych robotów do zadań specjalnych wymagane jest, żeby robot był w stanie sam się podnieść w przypadku przewrotki. Przy użyciu manipulatora operator może ustawić platformę mobilną do pozycji pracy. Manipulator może także być wykorzystany do podparcia platformy w trakcie pokonywania przeszkód terenowych. Roboty Ł-PIAP wyposażone są w tym celu w dodatkowe koło umieszczone w osi nadgarstka (rys. 5.2).

- Przenoszenie robota

Pomimo że roboty są wyposażone w odpowiednie uchwyty transportowe, przewróconego robota najszybciej i najłatwiej jest przywrócić do pozycji roboczej chwytając za elementy manipulatora. Generuje to znaczące obciążenia konstrukcji, które także należy uwzględnić podczas projektowania.

5. Określenie kluczowych parametrów manipulatorów robotów przenośnych, istotnych dla osiągnięcia wymaganych zdolności roboczych



Rys. 5.2. Podparcie robota na kole zamontowanym na przegubie chwytaka

- Obciążenia dynamiczne

Platformy mobilne robotów podczas pracy poruszają się po przeszkodach terenowych, krawężnikach, schodach itp: Biorąc pod uwagę, że niektóre platformy mogą się poruszać z prędkościami 10 km/h lub więcej, wymuszony ruch manipulatora może generować obciążenia, które należy uwzględnić w konstrukcji. Zdarza się także, że wymagana jest odporność urządzenia na upadek z zadanej wysokości. Platformy mobilne często mają bardzo prosty układ zawieszenia, pozbawiony elementów sprężystych lub tłumiących. Podczas poruszania się takich platform mobilnych może dochodzić do drgań manipulatora wynikających z występowania na bieżniku opon lub segmentów układu gąsienicowego platformy mobilnej.

- Kolizje manipulatora

Praca robota w nieznanym i dynamicznym środowisku powoduje, że podczas teleoperacji robota dochodzi do kolizji z przeszkodami lub wywrotek. Kolizja może być z obiektem statycznym lub przemieszczającym się, co może potęgować jej skutki. Jest to zwykle powodowane ograniczoną orientacją sytuacyjną operatora.

Przygotowując proces optymalizacji manipulatora wymienione zadania podlegają analizie i transformowaniu na odpowiednie zależności traktowane na późniejszym etapie jako funkcje celu lub więzy optymalizacji.

Analiza wymagań dotyczących manipulatorów robotów przeznaczonych do zadań specjalnych wykazała, że ich projektowanie musi uwzględniać szeroki zakres zastosowań operacyjnych oraz związane z nimi obciążenia. Manipulatory pełnią kluczową rolę w realizacji misji EOD, umożliwiając precyzyjne manipulowanie obiektami, usuwanie przeszkód oraz wykonywanie specjalistycznych operacji, takich jak neutralizacja ładunków

5. Określenie kluczowych parametrów manipulatorów robotów przenośnych, istotnych dla osiągnięcia wymaganych zdolności roboczych

wybuchowych, prześwietlanie podejrzanych obiektów, czy pobieranie próbek do analiz CBRN. Zadania wykonywane przez manipulator można sklasyfikować według rodzaju generowanych obciążeń. Wśród nich wyróżnić można operacje quasi-statyczne, takie jak przenoszenie i podnoszenie obiektów, a także zadania dynamiczne, jak przeciążenia wynikające z użycia narzędzi pirotechnicznych czy działanie sił inercyjnych podczas ruchu robota. Kluczowym aspektem konstrukcyjnym jest zapewnienie odpowiedniego udźwigu, stabilności oraz wytrzymałości na przeciążenia, przy jednoczesnym zachowaniu kompaktowych wymiarów i mobilności. Podczas pracy w trudnym terenie manipulator pełni dodatkową funkcję stabilizującą, umożliwiając robotowi pokonywanie przeszkód, a w razie wywrotki – jego przywrócenie do pozycji operacyjnej. Wysoka odporność na kolizje i dynamiczne obciążenia, wynikające z interakcji z otoczeniem, jest kluczowa dla zapewnienia niezawodności i bezpieczeństwa użytkowania. Zidentyfikowane wymagania stanowią podstawę do opracowania metody optymalizacji manipulatora, w której szczególny nacisk kładzie się na analizę i modelowanie przypadków obciążeń. Podejście to pozwala na dostosowanie konstrukcji do specyficznych warunków eksploatacyjnych, co przekłada się na zwiększenie efektywności działań oraz poprawę bezpieczeństwa operatorów.

5.1. Kluczowe parametry manipulatorów istotne dla osiągnięcia wymaganych zdolności

Zdolności robocze odnoszą się do możliwości i efektywności, z jaką urządzenie może wykonywać swoje zadania lub operacje. Zdolność robocza jest kluczowym aspektem oceny wydajności i przydatności danego urządzenia w zastosowaniach. W procesie projektowania i optymalizacji, zdolność robocza jest analizowana i dostosowywana, aby spełniała określone wymagania operacyjne i zapewniała maksymalną efektywność działania urządzenia. Zdolności mogą być definiowane przez różne wskaźniki - parametry mierzące osiągnięcie celu, które mają charakter ilościowy. Zdolność robocza manipulatora może obejmować wskaźniki takie jak:

1. Wysięg: Maksymalna odległość, na jaką robot może sięgnąć.
2. Udźwig: Maksymalna masa, jaką robot może podnieść i przenieść.
3. Udźwig na maksymalnym wysięgu: Maksymalna masa, jaką robot może podnieść i przenieść na maksymalnym poziomym wysięgu manipulatora.
4. Stosunek udźwigu do masy robota: Wskaźnik określający efektywność robota w kontekście masy, jaką może podnieść w stosunku do swojej własnej masy.
5. Precyzja: Dokładność, z jaką robot może wykonywać swoje zadania.
6. Szybkość: Czas, w jakim robot może wykonywać swoje operacje.

W kontekście przenośnych robotów do zadań specjalnych najistotniejszymi wskaźnikami to wysięg, udźwig, udźwig na maksymalnym wysięgu oraz stosunek wysięgu do masy urządzenia.

Parametry robocze związane z udźwigiem są najczęściej ograniczone przez stabilność

5. Określenie kluczowych parametrów manipulatorów robotów przenośnych, istotnych dla osiągnięcia wymaganych zdolności roboczych

statyczną układu platforma – manipulator. Ze względu na niskie prędkości przegubów manipulatorów do przybliżonych obliczeń można pominąć momenty bezwładności członów i obciążenia zewnętrznego manipulatora. Wartość graniczna udźwigu jest zależna od masy i położenia środka masy konstrukcji względem najbliższego skrajnego punktu podparcia platformy. Można spotkać rozwiązania, które pozwalają stale monitorować stabilność robota np. przedstawione przez M. Tosa i K. Berns [108].

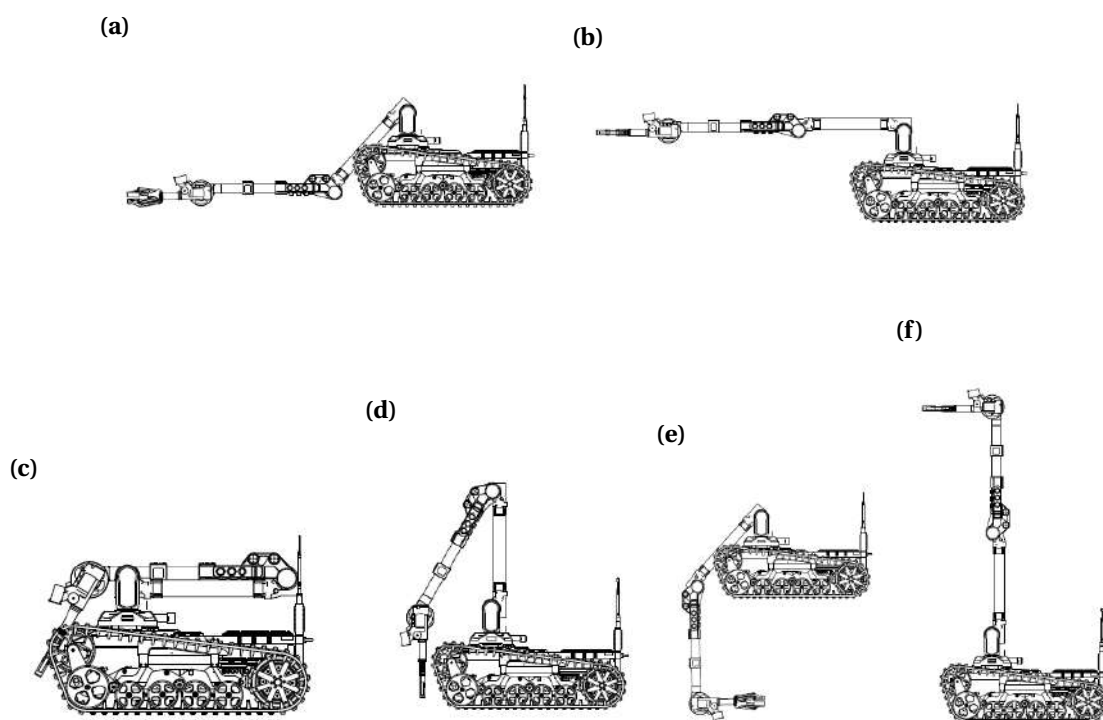
Istnieją rozwiązania platform mobilnych w których możliwe jest przesunięcie lub dołożenie punktu podparcia zwiększającego stabilność robota. Mogą to być ruchome dodatkowe gaśienice „tzw flipery”, zmienna geometria napędu gaśienicowego lub dodatkowe ramiona podpierające. Wprawny operator robota może także podejmować ciężkie ładunki, przekraczając możliwości statyczne platformy mobilnej, dzięki podparciu przegubów robota np. na gruncie do skrócenia ramienia działania siły od podnoszonego ciężaru. W robocie PIAP Gryf są w tym celu na manipulatorze zamocowane dodatkowe koła podporowe, które chronią części manipulatora przed uszkodzeniem.

Dla robotów do zadań specjalnych istnieje także grupa zdolności roboczych, które określają możliwość wykonania, wymaganych dla urządzenia, określonych czynności. Mogą to być możliwości sięgnięcia po obiekt:

- znajdujący się na półce, która znajduje się na określonej wysokości;
- leżący na gruncie, znajdujący się za przeszkodą o określonej wysokości;
- przymocowany do podwozia samochodu;
- znajdujący się w samochodzie np. w bagażniku, na siedzeniu lub podłodze;
- znajdujący się poniżej gruntu w przepuście drogowym;

Wymienione zdolności mogą być zdefiniowane w postaci konfiguracji geometrycznych manipulatora, których spełnienie gwarantuje możliwość wykonania wymaganych zadań. Wartości wymienionych wskaźników zależą od parametrów konstrukcji. Dobór tych parametrów odbywa się poprzez optymalizację wielokryterialną, której celem jest znalezienie ekstremalnych wartości wskaźników opisujących zdolności robocze robotów, przy uwzględnieniu ograniczeń równościowych i nierównościowych wynikających z właściwości parametrów sterujących. Wymienione wskaźniki można pogrupować na zależne jedynie od parametrów geometrycznych manipulatora oraz na zależne zarówno od parametrów geometrycznych jak i od parametrów określających obciążenia, które manipulator jest w stanie wytrzymać. Parametry geometryczne są to parametry określające kinematykę robota - liczbę stopni swobody, odległości pomiędzy poszczególnymi przegubami manipulatora. Parametry określające zdolność do przenoszenia obciążeń są to parametry określające siły i momenty dopuszczalne w parach kinematycznych manipulatora i ich napędach, masy elementów oraz wytrzymałość komponentów manipulatora. Na rysunku 5.3 pokazane zostały przykładowe konfiguracje manipulatora podczas wykonywania zadań. Na podstawie konfiguracji określone są wymagane parametry manipulatora.

5. Określenie kluczowych parametrów manipulatorów robotów przenośnych, istotnych dla osiągnięcia wymaganych zdolności roboczych



Rys. 5.3. Wybrane konfiguracje manipulatora podczas realizacji zadań: a - inspekcja podwozia samochodowego, b - podnoszenie obiektu na maksymalnym zasięgu horyzontalnym, c - transport robota, d - podnoszenie ładunku o maksymalnej masie, e - inspekcja przepustu drogowego, f - podejmowanie obiektu umieszczonego na wysokości odpowiadającej maksymalnemu zasięgowi pionowemu manipulatora

5. Określenie kluczowych parametrów manipulatorów robotów przenośnych, istotnych dla osiągnięcia wymaganych zdolności roboczych

W niniejszej pracy jako kluczowe wyznaczone zostały następujące parametry, decydujące o własnościach manipulatora:

- długości członów manipulatora;
- wielkości przegubów, wybierane z palety dostępnych rozwiązań;
- parametry określające zdolność do przenoszenia obciążeń i masy korpusów przegubów, które są gęstościami elementów przestrzeni w której są poszukiwane rozwiązania optymalizacji topologicznej;

Dla oceny zdolności robotów a także dla możliwości porównania robotów mobilnych do zadań specjalnych stworzone zostały standardowe testy, pozwalające wykazać słabe i mocne cechy konstrukcji. W NIST (Narodowe Centrum Standardów i technologii) w USA opracowany został szereg testów [109] [110] pozwalających na ocenę zdolności konstrukcji pod względem takich aspektów jak mobilność na różnego rodzaju przeszkodach, w ograniczonej przestrzeni, możliwość przeprowadzenia inspekcji, manipulacji, rozpoznania przy wykorzystaniu sensorów. Z założenia opracowane procedury będą pomocne przy formułowaniu wymagań w postępowaniach zakupowych [111] a także wykorzystywane są przy szkoleniach operatorów robotów [112]. Organizowane są także praktyczne testy, których celem jest sprawdzenie aktualnego stanu badań z zakresu robotyki mobilnej, w warunkach zbliżonych do prawdziwych misji. Przykładem takich przedsięwzięć są: RoboCUP [113], Darpa [114], Elrob [115], Eurathlon [116], FEX, HEDI OPEX [36].

5.2. Podsumowanie

W niniejszym rozdziale przedstawiono kluczowe wymagania oraz parametry, które muszą spełniać manipulatory przenośnych robotów przeznaczonych do zadań specjalnych. Analizując różnorodne zadania realizowane przez manipulatory, takie jak przenoszenie obiektów, otwieranie drzwi, czy neutralizacja zagrożeń za pomocą narzędzi pirotechnicznych, zidentyfikowano istotne obciążenia i wymagania operacyjne, które determinują projektowanie tych urządzeń. Główne parametry robocze manipulatorów, takie jak wysięg, udźwig, stosunek udźwigu do masy, precyzja oraz szybkość działania, zostały szczegółowo omówione jako kluczowe wskaźniki efektywności i funkcjonalności robotów EOD. Podkreślono, że masa komponentów manipulatora znacząco wpływa na te parametry, co wymusza zastosowanie zaawansowanych metod optymalizacyjnych, takich jak optymalizacja topologiczna. Metodologia ta pozwala na redukcję masy manipulatora przy jednoczesnym zachowaniu lub nawet poprawie kluczowych wskaźników wydajności. Dodatkowo, omówiono znaczenie stabilności robota oraz wpływ dynamicznych obciążeń wynikających z szybkich ruchów czy kolizji na konstrukcję manipulatora. Wskazano na konieczność wprowadzenia mechanizmów bezpieczeństwa oraz rozwiązań konstrukcyjnych, które zapewniają niezawodność operacyjną w trudnych warunkach terenowych. Zakończenie rozdziału podkreśla, że zdefiniowane parametry oraz zastosowane metody optymalizacyjne nie tylko zwiększają efektywność i bezpieczeństwo operacji EOD, ale

5. Określenie kluczowych parametrów manipulatorów robotów przenośnych, istotnych dla osiągnięcia wymaganych zdolności roboczych

także umożliwiają elastyczne dostosowanie manipulatorów do zmieniających się wymagań i specyficznych scenariuszy misji. Stworzenie standardowych testów oraz biblioteki rozwiązań stanowi fundament dla przyszłych badań i rozwoju w dziedzinie robotyki mobilnej, umożliwiając porównywanie różnych konstrukcji oraz optymalizację procesów projektowych.

6. Badania identyfikacyjne obciążeń podczas wykonywania zadań manipulatorem robota przenośnego

Zestaw czynności które wykonuje się manipulatorem robota dla zapewnienia zdolności roboczych został przeanalizowany pod kątem obciążeń, które są generowane podczas ich wykonywania. Podstawową funkcjonalnością robota jest przenoszenie manipulatorem obiektów. Dla robotów do zadań specjalnych określa się maksymalną masę, którą robot może unieść na manipulatorze w pozycji wyprostowanym poziomo oraz maksymalną masę, którą robot może podnosić blisko krawędzi platformy mobilnej. Są to istotne parametry, które są podstawą do doboru i optymalizacji układów napędowych manipulatora. Jednakże, często obiekty które operator chciałby podjąć mogą przekraczać możliwości udźwigu manipulatora, lub stateczność robota. W takich wypadkach obciążenia manipulatora są ograniczane poprzez zadziałanie sprzęgieł przeciążeniowych lub poprzez utratę stateczności platformy mobilnej. Zdarzają się także sytuacje, kiedy konieczne jest przesunięcie ciężkiego obiektu stojącego np. na ziemi. W takim przypadku obiekt może być popychany lub ciągnięty z wykorzystaniem np. końcówki roboczej manipulatora. Mogą to być: przeszkody, które trzeba usunąć, żeby udrożnić drogę dla robota; drzwi, które trzeba otworzyć lub samochód, który należy przeciągnąć w inne miejsce. Obiekt może być przesuwany poprzez odpowiedni ruch przegubów manipulatora albo poprzez ruch napędów platformy mobilnej. Wymienione zadania zostały wybrane jako te które mogą powodować maksymalne obciążenia w konstrukcji i dla tych zadań wykonano analizę ruchów i występujących podczas ich realizacji obciążeń. Prace nad szacowaniem obciążeń podczas pracy manipulatora rozpoczęto od przygotowania stanowiska badawczego. Do pomiarów wykorzystano robota pirotechnicznego PIAP Patrol w konfiguracji z lekkim manipulatorem o możliwości podnoszenia do 23 kg. Jest to robot o napędzie gąsienicowym o masie platformy 72 kg. Manipulator ma 5 stopni swobody. Udźwig maksymalny manipulatora wynosi 7 kg przy maksymalnym wysięgu 1940 mm oraz 22 kg w pobliżu bazy mobilnej. Robot ten wyposażony jest w manipulator o typowej, najczęściej stosowanej w tej klasie urządzeń strukturze kinematycznej, opartej na parach obrotowych. Do robota podłączony został komputer z oprogramowaniem CANalyzer, który umożliwił rejestrowanie komunikacji pomiędzy węzłami sterowników robota. Umożliwiło to rejestrację przebiegu położenia przegubów robota z wykorzystaniem zintegrowanych w przegubach absolutnych czujników położenia. Przebiegi były rejestrowane z częstotliwością 200Hz a rozdzielczość pomiarów wynosiła 8 bitów.

Podstawowe parametry członów manipulatora zostały umieszczone w tabeli 6.1 .

Dodatkowo, w oprogramowaniu Multi Body System (MBS) przygotowano model 3D robota wyposażonego w testowany manipulator. Wykorzystano Moduł Mechanism Dynamics Option (MDO) dla pakietu CAD PTC Creo. Algorytmy wykorzystywane w symulacjach dynamicznych dla zastosowanego oprogramowania opisane zostały przez K.W. Buffintona

Tabela 6.1. Podstawowe parametry manipulatora

Człon nr	Masa [kg]	Długość [mm]
0	2.12	71
1	2.2	125
2	2.8	583
3	3.86	696
4	2.81	110
5	1	290

w [117]. Modele geometryczne zostały wygenerowane na podstawie dokumentacji konstrukcyjnej robota wobec czego wiernie odpowiadały testowanej konstrukcji. Modele CAD posłużyły także do wyznaczenia parametrów masowych podzespołów manipulatora.

6.1. Metodyka badawcza

Podczas realizacji badań rejestrowane były przebiegi wartości współrzędnych wewnętrznych przegubów manipulatora podczas realizacji zadań. Sterowanie manipulatorem odbywało się manualnie, przy użyciu joysticka. Konsola sterowania została skonfigurowana w ten sposób, że osie lewego joysticka odpowiadała za ruch osi 2 i 3, a osie prawego joysticka odpowiadały za ruch osi 1 i 4 manipulatora. Operator podczas wielokrotnej realizacji zadania starał się powtórzyć realizowane ruchy. Zarejestrowane przebiegi czasowe położenia członów manipulatora posłużyły do zdefiniowania ruchów manipulatora w środowisku do symulacji dynamiki mechanizmów typu Multi Body System (PTC Creo). Na podstawie przebiegów położenia obliczane były momenty w przegubach manipulatora, potrzebne do realizacji zakładanego ruchu manipulatora.

Zarejestrowano po 10 przebiegów czasowych dla każdego zadania.

6.2. Wyznaczanie obciążeń występujących podczas pracy manipulatora

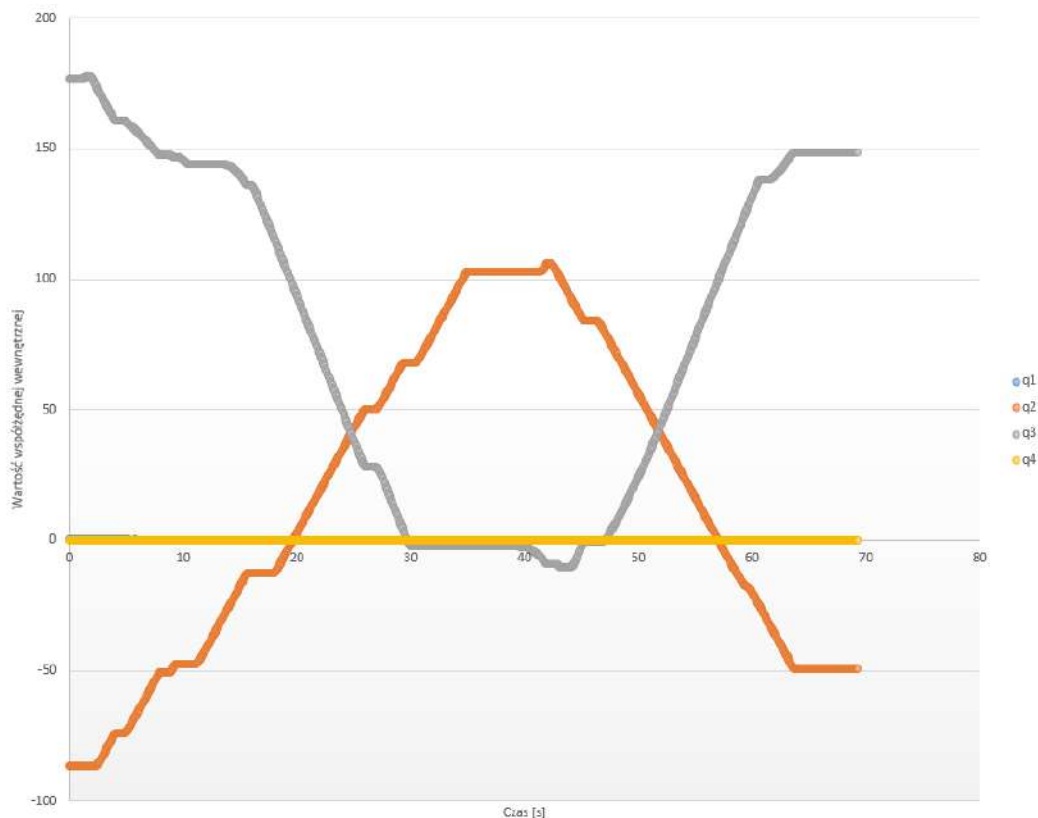
W czasie pomiarów wykonywane były ruchy realizujące wybrane zadania, które wg. wstępnych założeń powinny generować największe obciążenia konstrukcji robota. Wśród typowych zadań wybrane były: podejmowanie chwytakiem przedmiotu z podłoża, na maksymalnym wysięgu, podejmowanie przedmiotu o maksymalnej masie z podłoża na minimalnym wysięgu oraz ruchy odzwierciedlające przepychanie chwytakiem obiektu leżącego na podłożu.

6.2.1. Podnoszenie obiektów na maksymalnym wysięgu manipulatora

Podczas realizacji zadania manipulator wykonywał ruch z pozycji transportowej do pozycji wyprostowanej, przy czym kąt dolnego ramienia wynosił około 10 stopni, co umożliwiało podjęcie obiektu z poziomego gruntu. Następnie manipulator poruszał się z powrotem do pozycji wyjściowej. Na rysunku 6.1 pokazany jest przebieg współrzędnych

6. Badania identyfikacyjne obciążeń podczas wykonywania zadań manipulatorem robota przenośnego

konfiguracyjnych. Ruch realizowany był przegubami 2 i 3 co pokazuje przebieg współrzędnych q_2 i q_3 . Przeguby 1 i 4, odpowiedzialne odpowiednio za obrót manipulatora wokół osi pionowej i obrót chwytaka nie były poruszane więc współrzędne q_1 i q_4 nie zmieniają się w czasie.



Rys. 6.1. Przebieg współrzędnych konfiguracyjnych podczas realizacji zadania 1.

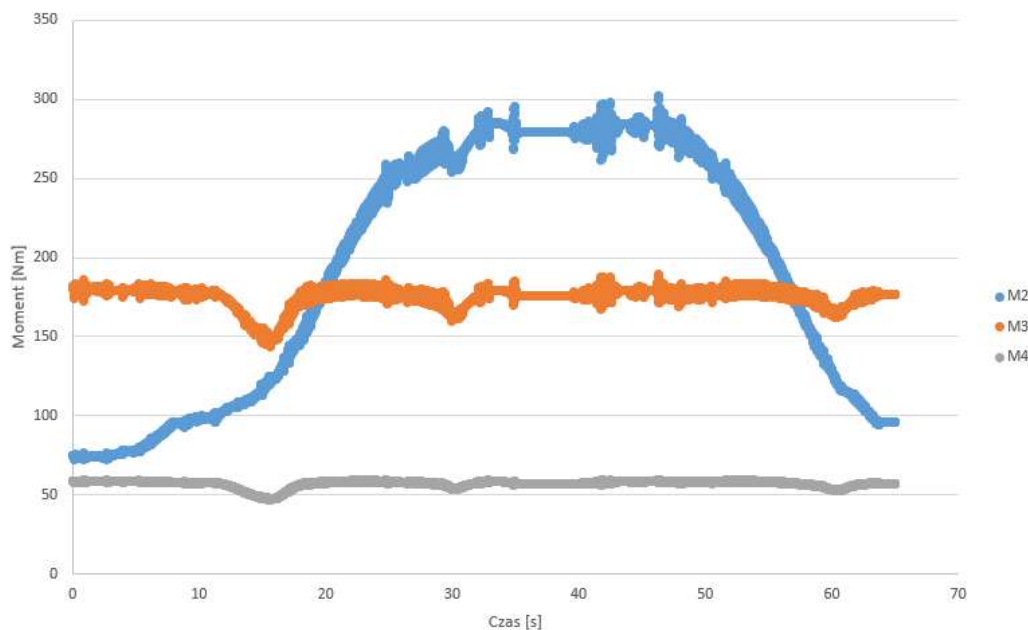
Na podstawie zarejestrowanych przebiegów zostały wykonane symulacje dynamiczne ruchu manipulatora. Otrzymane wyniki przebiegów momentów napędowych przedstawiono na rysunku 6.2.

Ponieważ podczas wykonywania zadania nadgarstek i ramię górne manipulatora były utrzymywane w pozycji poziomej wartości momentów w tych osiach pozostawały na tym zbliżonym poziomie. Zmiany wartości tych momentów wynikają z braku precyzji w sterowaniu. Moment osiowy w przegubie ramienia dolnego osiąga maksymalną wartość 280 Nm dla pozycji manipulatora wyprostowanej.

6.2.2. Podnoszenie obiektów o maksymalnej dopuszczalnej masie

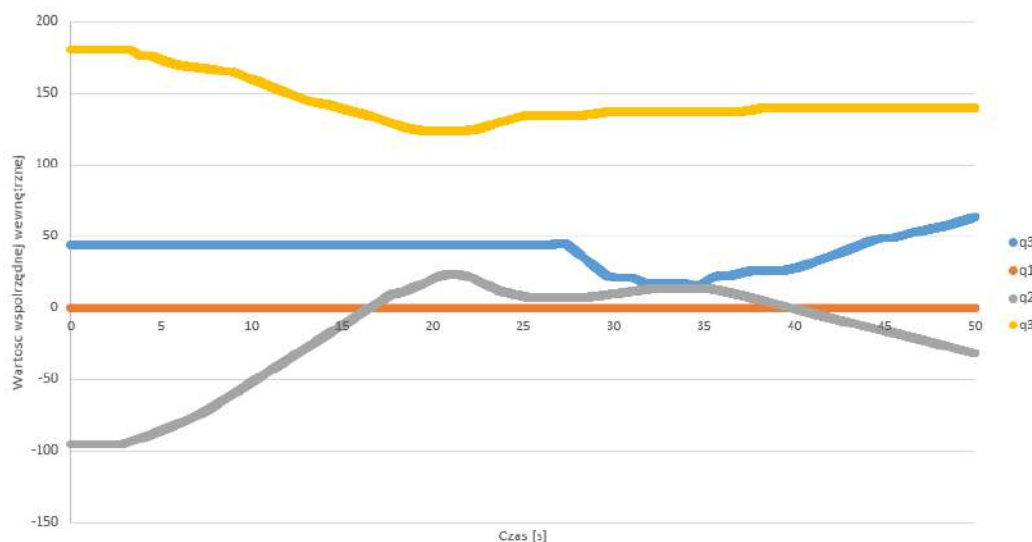
Podczas realizacji zadania manipulator wykonywał ruch z pozycji transportowej do pozycji w której możliwe było podjęcie obiektu z gruntu. Obiekt był oddalony na dystans 0.5 m od przedniej krawędzi korpusu platformy mobilnej. Manipulator następnie podnosił obiekt do osiągnięcia wysokości 0.5 m. Na rysunku 6.3 pokazany jest przebieg współrzędnych konfiguracyjnych. Ruch realizowany był przegubami 2, 3 i 4 co przedstawione jest na

6. Badania identyfikacyjne obciążeń podczas wykonywania zadań manipulatorem robota przenośnego



Rys. 6.2. Przebieg momentów osiowych w przegubach manipulatora podczas realizacji zadania 1.

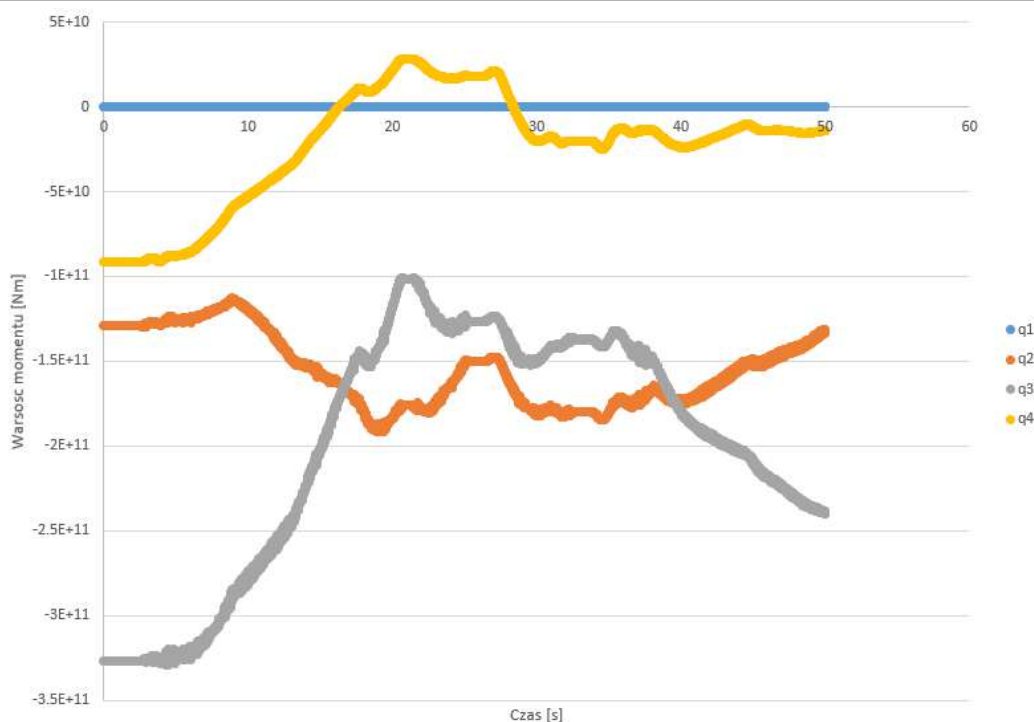
przebiegu współrzędnych q_2 , q_3 i q_4 . Przegub 1, odpowiedzialny za obrót manipulatora wokół osi pionowej nie był poruszany więc współrzędne q_1 nie zmieniają się w czasie.



Rys. 6.3. Przebieg współrzędnych konfiguracyjnych podczas realizacji zadania 2.

Na podstawie zarejestrowanych przebiegów zostały wykonane symulacje dynamiczne ruchu manipulatora. Otrzymane wyniki przebiegów momentów napędowych przedstawiono na rysunku 6.4.

6. Badania identyfikacyjne obciążeń podczas wykonywania zadań manipulatorem robota przenośnego



Rys. 6.4. Przebieg momentów osiowych w przegubach podczas realizacji zadania 2.

6.2.3. Przesuwanie obiektów leżących na gruncie

Doświadczenie polegało na wyznaczeniu momentów w przegubach manipulatora dla konfiguracji, która była konieczna do przyjęcia podczas przesuwania obiektu, który znajduje się na podłodze, poprzez obrót pierwszej osi manipulatora.

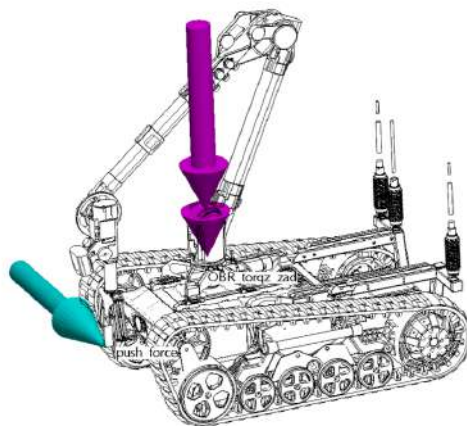


Rys. 6.5. Robot PIAP Patrol realizujący ruch przesuwania obiektu po podłodze

Zostały wykonane dodatkowe analizy podczas których sprawdzane były momenty w przegubach manipulatora podczas napierania chwytakiem na przeszkodę w różnych konfiguracjach (rys.6.6). Symulowana była sytuacja w której dla manipulatora skierowanego na wprost platformy mobilnej podejmowana jest próba obrócenia pierwszej osi poprzez

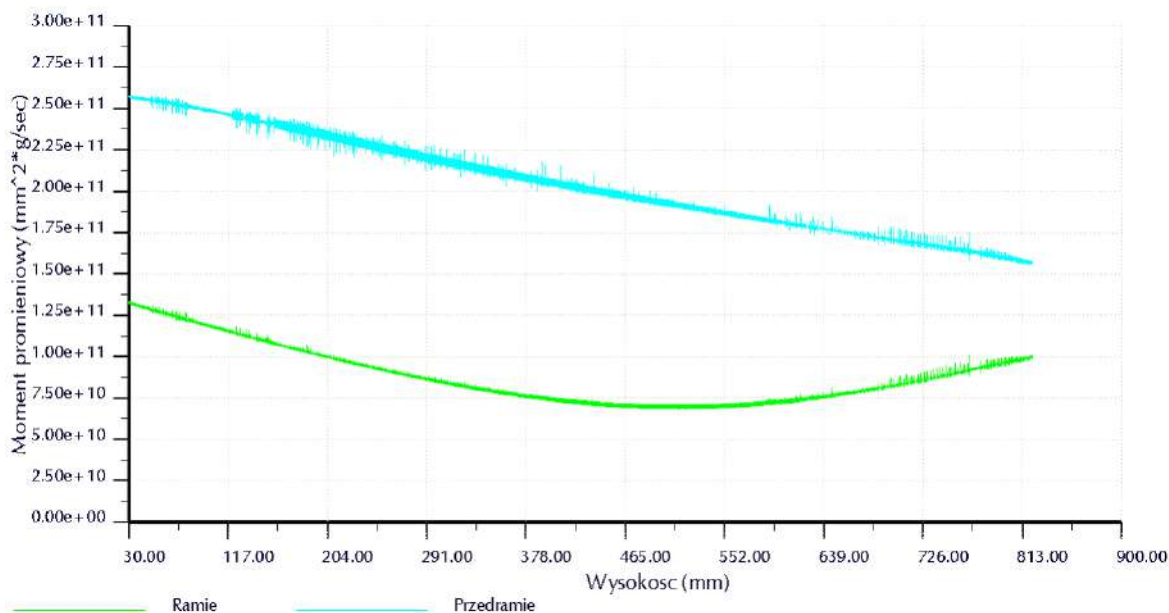
6. Badania identyfikacyjne obciążeń podczas wykonywania zadań manipulatorem robota przenośnego

przyłożenie momentu, oznaczonego na rysunku 6.6 podwójną strzałką. Ruch manipulatora jest zablokowany poprzez ukrytą na rysunku ścianę na którą napiera punkt związany z końcówką szczęk chwytaka. Siła reakcji od ściany jest pokazana na ilustracji pojedynczą strzałką. Manipulator wykonywał ruch w którym końcówka robocza manipulatora wykonuje ruch podnoszący w kierunku pionowym, do góry. Przedstawiony rysunek 6.7 ilustruje



Rys. 6.6. Siły wymuszenia i reakcji, naniesione w model Robota PIAP Patrol.

przebieg momentu obciążającego przegub przedramienia momentem promieniowym podczas napierania manipulatora o przeszkodę z maksymalnym momentem który może wygenerować napęd podstawy manipulatora. Widoczne obciążenia osiągające wartość do 250 Nm są większe niż maksymalne obciążenia osiowe dla przegubu.



Rys. 6.7. Przebieg momentów promieniowych w przegubach ramienia i przedramienia, podczas realizacji zadania.

6.3. Wnioski z badań identyfikacyjnych

Badania identyfikacyjne umożliwiły zarejestrowanie i wyznaczenie obciążeń w kluczowych węzłach konstrukcji, podczas wykonywania zadań w których konieczne było podnoszenie obiektów na maksymalnym i małym wysięgu oraz przesuwanie obiektów po gruncie. Wyniki zadania 1 pokazują, że podczas realizacji zadania najbardziej obciążony jest przegub dolnego ramienia. Jest to oczywisty wynik, który wynika z działania siły obciążającej na największym ramieniu. Podczas realizacji zadania 2 manipulator podnosił ładunek o maksymalnym dopuszczalnej masie, który podejmowany był z gruntu, 0.5 m od krawędzi platformy mobilnej. Podczas realizacji tego zadania robot znajdował się w konfiguracji, przy której największe obciążenie występuje w przegubie odpowiedzialnym za ruch górnego ramienia. Różnice w stopniu obciążenia przegubów manipulatora w zadaniu 1 i 2 pokazują że optymalizacja manipulatorów do wykonywania opisanych zadań musi być procesem optymalizacji wielokryterialnej. W zadaniu 3 były wykonywane próby podczas których przy pomocy chwytaka przesuwany był obiekt znajdujący się na podłożu. Analiza obciążeń podczas tego zadania wykazała, że przeguby manipulatora są obciążane znacznymi momentami działającymi w kierunku promieniowym. Jest to istotna różnica ponieważ skutki przeciążeń działających w tym kierunku nie mogą być zniwelowane poprzez zastosowanie sprzęgieł przeciążeniowych w napędach. Wartość ograniczająca obciążenia przegubów w kierunkach promieniowych zależy od kinematyki manipulatora. W przypadku manipulatorów o najczęściej stosowanej kinematyce antropomorficznej o 5 stopniach swobody istnieją takie konfiguracje dla których wartość maksymalna obciążeń struktury nośnej jest ograniczana jedynie w przypadkach utraty stateczności lub przyczepności robota. Przeprowadzone testy obejmowały tylko obciążenia dla wybranych, użytecznych i najbardziej prawdopodobnych konfiguracji manipulatora. Jednak opracowując konstrukcję należy ją uodpornić na wszystkie, nieoczywiste, ale możliwe do zrealizowania konfiguracje. Wobec tego zaproponowana została metodyka projektowania, w której rozpatrywane są wszystkie możliwe do osiągnięcia konfiguracje i uwzględniane są te, które powodują największe obciążenia w różnych kierunkach.

7. Opracowanie doboru parametrów manipulatorów w aspekcie zwiększenia ich zdolności roboczych

Rodzina produktów to zbiór powiązanych ze sobą elementów, które opierają się na wspólnych zasobach projektowych, ale jednocześnie posiadają unikalne cechy dostosowane do różnych specyficznych potrzeb klientów. Każdy produkt należący do tej grupy jest określany jako wariant produktu. Dzięki koncepcji rodziny produktów przedsiębiorstwa mogą wykorzystywać sprawdzone zasady projektowe, wcześniej opracowane rozwiązania techniczne lub identyczne podzespoły i moduły w wielu produktach. Takie podejście umożliwia lepsze dostosowanie oferty do różnych oczekiwań rynkowych oraz szybkie reagowanie na zmieniające się potrzeby klientów, co przekłada się na przewagę konkurencyjną.

Wykorzystanie rodziny produktów pozwala firmom skrócić czas potrzebny na opracowanie nowych rozwiązań oraz czerpać korzyści z efektu skali, co przyczynia się do obniżenia kosztów produkcji i do rozwoju. Dodatkowo, wprowadzenie wariantowości w ramach jednej linii produktowej może wzmacniać lojalność klientów wobec marki. Jednakże strategia ta wiąże się również z pewnymi wyzwaniami. Do potencjalnych zagrożeń należą m.in. ryzyko powielania tych samych wad konstrukcyjnych w różnych produktach, możliwość wzajemnej konkurencji pomiędzy wariantami w obrębie tych samych segmentów rynku, a także zwiększona złożoność procesów projektowania, produkcji i zarządzania.

Produkt może być od początku projektowany jako rodzina produktów lub w realizacji procesu badawczego, może ewoluować stopniowo tworząc nowe warianty konstrukcji [118]. Opracowana metoda jest narzędziem, które wspiera projektanta w opracowywaniu nowych wariantów manipulatorów na podstawie wcześniejszych rozwiązań. Metodyka projektowania umożliwia uzyskanie konstrukcji o optymalnych zdolnościach roboczych przy jednoczesnym spełnieniu wymagań użytkownika. Zdolności robocze są określane przez parametry definiujące funkcjonalność robota.

Proponowane podejście łączy w sobie cechy metodologii typu top-down oraz bottom-up. W podejściu top-down punktem wyjścia są wymagania użytkownika, na podstawie których definiowany jest ogólny zarys systemu. W miarę postępu prac projektowych następuje jego uszczegółowienie i dopracowanie. Z kolei w podejściu bottom-up projekt bazuje na konkretnych komponentach, które są wykorzystywane do budowy bardziej złożonej struktury. Dzięki połączeniu obu strategii implementacja procedury projektowej prowadzi do uzyskania urządzenia o wymaganych zdolnościach roboczych, przy jednoczesnym wykorzystaniu wcześniej zdefiniowanych podzespołów.

W opracowanej metodyce konieczny jest podział konstrukcji na moduły, co znacząco ułatwia proces projektowania, produkcji i późniejszej eksploatacji manipulatora. Modułarna budowa pozwala na łatwiejsze dostosowanie konstrukcji do zmieniających się

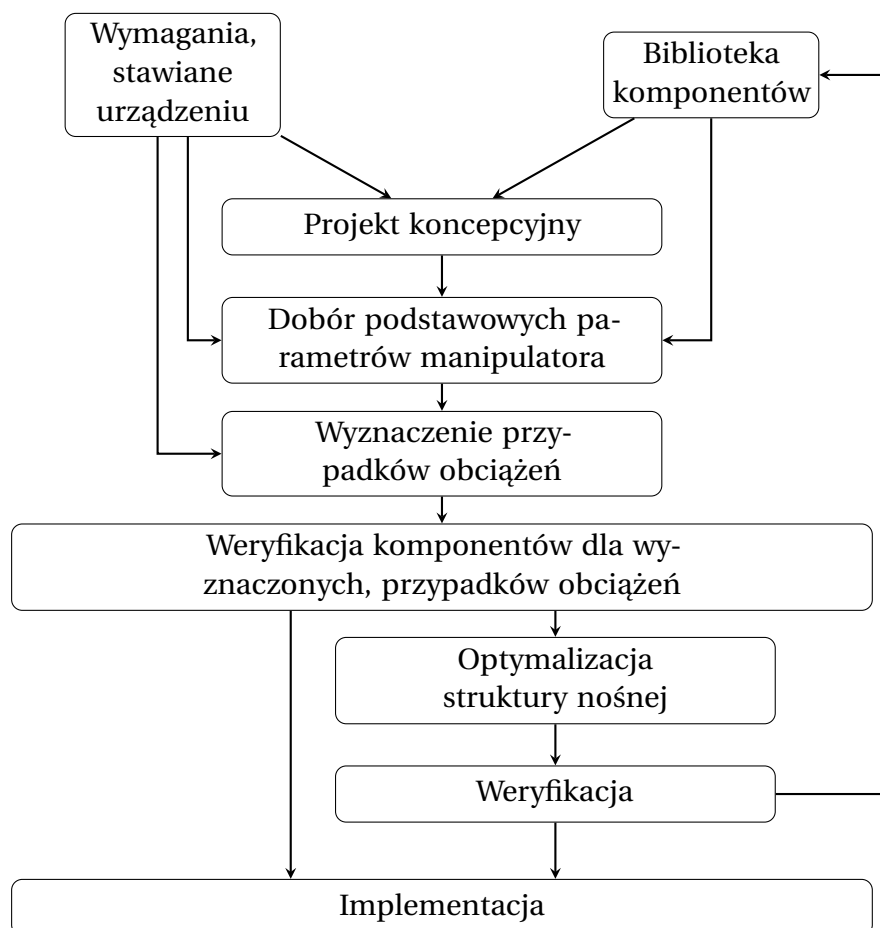
7. Opracowanie doboru parametrów manipulatorów w aspekcie zwiększenia ich zdolności roboczych

wymagań operacyjnych oraz umożliwia wymianę lub modernizację poszczególnych komponentów bez konieczności przeprojektowywania całego systemu. Ponadto, podział na moduły sprzyja standaryzacji elementów i redukcji kosztów produkcji, a także usprawnia serwisowanie urządzenia.

Opracowana procedura wpisuje się w przedstawiony w analizie zagadnienia model V, który opisuje proces rozwoju produktów. W ścieżce nazwanej „kreatywną”, proces rozpoczyna się od analizy scenariuszy wykorzystania. Scenariusze te podlegają szczegółowej analizie, a na ich podstawie opracowywana jest architektura systemu oraz definiowane są wymagania dla systemu. Dzięki temu podejściu projektowanie manipulatora odbywa się w sposób uporządkowany, zapewniając zgodność końcowego rozwiązania z założonymi wymaganiami operacyjnymi.

Powodem przyjęcia takiej metodologii jest specyfika analizowanego produktu, jakim są roboty do zadań specjalnych, oraz fakt, że optymalizacja ta realizowana jest z myślą o wdrożeniu przemysłowym, a nie wyłącznie w celach badawczych.

Ogólny schemat działania przedstawiony został na rysunku 7.1.



Rys. 7.1. Schemat logiczny algorytmu optymalizacji struktur mechanicznych manipulatorów lekkich robotów do zadań specjalnych

W opracowanej metodyce punktem wyjścia do dalszego działania jest zestaw wymagań

7. Opracowanie doboru parametrów manipulatorów w aspekcie zwiększenia ich zdolności roboczych

stawiane konstrukcji oraz znajomość komponentów, które można wykorzystać w danym projekcie. Komponenty te są umieszczone w "Bibliotece rozwiązań". Znając wymagania dla konstrukcji i wiedząc jakimi środkami, mogą być realizowane prace następuje etap, który został nazwany "Projektem koncepcyjnym". W tym etapie powstaje ogólny zarys systemu. W następnym etapie dobierane są podstawowe parametry manipulatora. Parametrami tymi są długości członów manipulatora oraz wielkości napędów manipulatora, które są umieszczone w poszczególnych przegubach manipulatora. Kryteria doboru parametrów zależne są od wymagań. W następnym kroku metody wyznaczane są przypadki obciążeń. Jest to kluczowy element metody, który jest szczególnie dopasowany dla manipulatorów, które pracują w niestrukturyzowanym środowisku, a w szczególności, ze względu na realizowane zadania, dla manipulatorów robotów do zadań specjalnych. Wyróżnikiem opracowanej metody jest wykorzystanie w tym etapie metod optymalizacyjnych do wyznaczenia maksymalnych możliwych w konstrukcji obciążeń. W następnym kroku następuje weryfikacja pod względem wytrzymałościowym wybranych komponentów z biblioteki. W przypadku spełnienia przez dotychczasową konstrukcję wymagań wytrzymałościowych, dodatkowo sprawdzana jest zasadność wprowadzania zmian. Narzędziem, które pomaga w tej ocenie jest procedura wyznaczająca wpływ zmiany masy wybranych komponentów na podlegające ocenie zdolności konstrukcji. Jeśli pierwotnie przyjęte komponenty nie spełniają wymagań wytrzymałościowych, lub jeśli zmniejszenie masy poprawi możliwości robota następuje optymalizacja topologiczna rozważanych komponentów. W wyniku działania procedury otrzymuje się gotowe do implementacji modele komponentów manipulatora.

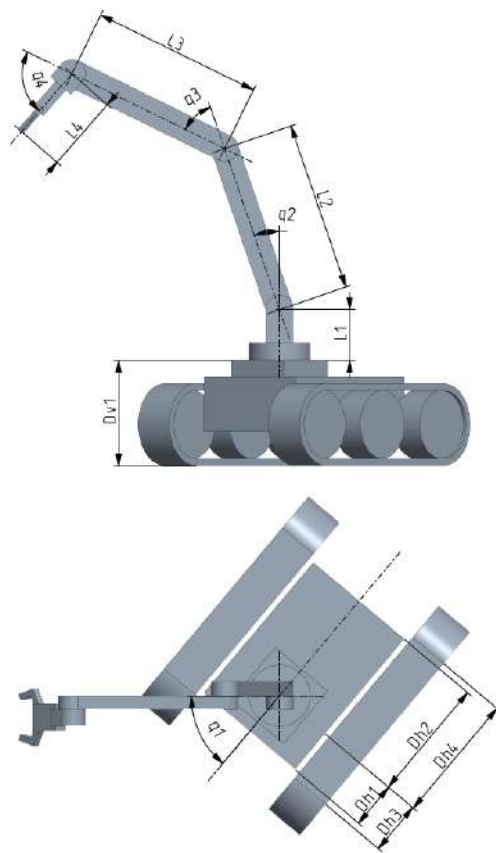
W dalszej części rozdziału zostaną szczegółowo przedstawione poszczególne kroki metody.

7.1. Wymagania dla manipulatorów przenośnych robotów do zadań specjalnych

Zgodnie z podejściem "top-down", które także cechuje etap projektowania w modelu V rozwoju produktu, punktem wyjścia do projektowania są wymagania stawiane konstrukcji. Wymagania mogą być przedstawione w sposób jawny lub mogą one wynikać z przedstawionych koncepcji operacji (CONOPS), np. [119]. Zestaw danych wejściowych w projekcie może być kombinacją wymagań dla parametrów oraz zdolności, które urządzenie powinien posiadać. Żeby możliwe było zastosowanie usystematyzowanego podejścia do projektowania, wg opracowanej metody, wymagane parametry i zdolności należy poddać analizie w celu zbudowania modelu matematycznego. W tym celu wymagania podlegają parametryzacji i zostają opisane w postaci odpowiednich relacji. Relacje mogą dotyczyć geometrii, sił a także dynamiki. Na rysunku 7.2 przedstawiono architekturę typowego robota wyposażonego w manipulator o najczęściej stosowanej strukturze antropomorficznej (5DOF) wraz z parametrami opisującymi geometrię robota. Robot o takiej strukturze będzie stosowany do zilustrowania procedury, jednakże sposób postępowania jest taki sam

7. Opracowanie doboru parametrów manipulatorów w aspekcie zwiększenia ich zdolności roboczych

dla manipulatorów o innej kinematyce. Do przeprowadzenia analizy wymagań wprowadza



Rys. 7.2. Robot o 5 stopniach swobody manipulatora

się następujące oznaczenia:

- $Dh_{F_{max}}$ - Wysięg manipulatora, mierzony od osi obrotu pierwszego przegubu, dla którego określany jest maksymalny udźwig;
- Dh_{max} - Wysięg manipulatora, mierzony od osi obrotu pierwszego przegubu, dla którego określany jest maksymalny udźwig;
- F_{max} - Siła ciężkości dla maksymalnej masy podnoszonej przez robota, podnoszonej w pobliżu platformy robota;
- FDh_{max} - Siła ciężkości dla maksymalnej masy podnoszonej przez robota na maksymalnym wysięgu;
- m_n - Siła ciężkości przegubu n ;
- ml_n - Siła ciężkości łącznika pomiędzy przegubami o jednostkowej długości dla członu n ;
- M_n - Wartość momentu w przegubie n ;
- M_{max-n} - Wartość maksymalna momentu w przegubie n ;
- D_n - Wymiar charakterystyczny przegubu n ;
- L_n - Długość członu n ;

7. Opracowanie doboru parametrów manipulatorów w aspekcie zwiększenia ich zdolności roboczych

- q_n - Wartość współrzędnej wewnętrznej manipulatora dla przegubu n ;
- $s_1, s_{12}, s_{123}, \dots$ - uproszczony zapis $\sin(q_1), \sin(q_1 + q_2), \sin(q_1 + q_2 + q_3), \dots$
- $c_1, c_{12}, c_{123}, \dots$ - uproszczony zapis $\cos(q_1), \cos(q_1 + q_2), \cos(q_1 + q_2 + q_3), \dots$
- Dv_1 - Wysokość platformy mobilnej, na której posadowiony jest manipulator;
- Dh_1 - Odległość od osi obrotu pierwszego przegubu do przedniej krawędzi platformy mobilnej;
- Dh_2 - Odległość od osi obrotu pierwszego przegubu do tylnej krawędzi platformy mobilnej;
- Dh_3 - Odległość od osi obrotu pierwszego przegubu do najdalej wysuniętej krawędzi podparcia platformy mobilnej podczas sięgania do przodu;
- Dh_4 - Odległość od osi obrotu pierwszego przegubu do najdalej wysuniętej krawędzi podparcia platformy mobilnej podczas sięgania do tyłu;
- $A, B, C, D, \dots$ - Parametry charakteryzujące otoczenie robota (zgodnie z rys.7.5, rys. 7.6, rys. 7.7);

Analizę wymaganych zdolności robota należy przeprowadzić pod kontem geometrii oraz sił.

7.1.1. Parametryzacja zdolności roboczych robota

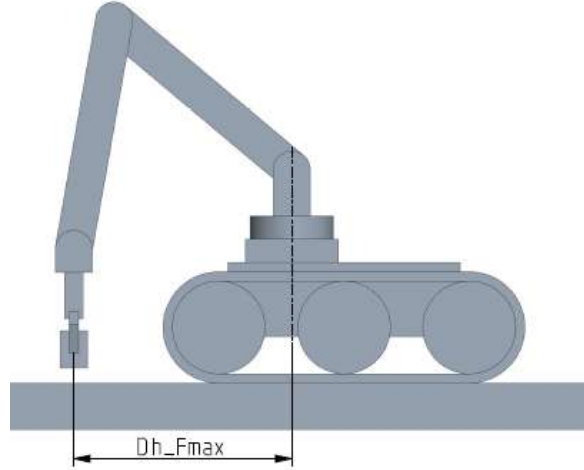
Podstawową zdolnością robota jest podnoszenie i przenoszenie przedmiotów. Podstawowymi parametrami określającymi te zdolności są:

- maksymalna masa, którą robot może podnieść manipulatorem;
- maksymalna masa, którą robot może podnieść na pełnym wysięgu manipulatora;
- wysięg manipulatora;

Maksymalna masa, którą robot może podnieść manipulatorem Wartość maksymalnej masy, którą robot może podnieść manipulatorem definiuje się dla określonego wysięgu w pobliżu przedniej krawędzi platformy mobilnej (rys. 7.3). Konieczne jest sprawdzenie czy dla wybranych parametrów manipulatora możliwe jest osiągnięcie końcówką roboczą do pozycji, która pozwala na podjęcie przenoszonego obiektu. W tym celu konieczne jest rozwiązanie odwrotnego zadania kinematyki manipulatora. Jeśli rozwiązanie istnieje, w wyniku rozwiązania zadania, uzyskuje się wartości współrzędnych wewnętrznych q_n które pozwalają na sięgnięcie do zadanego punktu w przestrzeni.

Masa, którą robot może unieść uzależniona jest od obciążeń, które mogą przenieść przeguby, konstrukcja manipulatora oraz od stateczności robota. W przypadku generycznego robota z manipulatorem 5DOF, przedstawionego na rys.7.2 zależności te można opisać następującymi zależnościami:

- Ograniczenia wynikające z momentów przenoszonych przez przeguby.
Wartości momentów w poszczególnych przegubach nie mogą przekroczyć wartości maksymalnej dla danego przegubu. W przypadku kinematyki przykładowego robota siła obciążenia działa w kierunku równoległym do osi przegubu 1. Wobec czego nie



Rys. 7.3. Robot podczas podnoszenia przedmiotu na bliskim wsięgu

obciąża napędu tego przegubu. Dla przegubu 2 moment od podnoszonej masy oraz moment od masy elementów manipulatora nie mogą przekroczyć maksymalnej wartości którą przegub może przenieść. Wychodząc z warunku równowagi momentów, można równanie zapisać w następującej postaci:

$$L1A = \frac{\frac{(L_3^2 * m l_3 * c23)}{2} - M_{max2} + \frac{(L_2^2 * m l_2 * c2)}{2} + L_2 * c2 * m r_{34} + l_3 * c23 * m r_4}{l_3 * c2 + l_2 * c2}; \quad (7.1)$$

gdzie:

$m r_{34} = m_4 + m_3 + L_3 * m l_3 + m_4 * m l_4$ - suma mas członu 3 i 4;

$m r_4 = m_4 + l_4 * m l_4$ - masa członu 4.

Analogicznie dla przegubu 3 warunek przyjmuje następującą postać:

$$L1B = - \frac{\frac{(m l_3 * c23) * l_3^2}{2} + c23 * m r_4 * l_3 - M_{max3}}{l_3 * c23}; \quad (7.2)$$

Człon 4 podczas realizowania tego zadania jest skierowany pionowo w dół, więc napęd przegubu 4 nie jest obciążony.

- Ograniczenia wynikające z stateczności robota.

Z warunku równowagi momentów względem punktu podparcia robota wynika zależność, która określa ładunek o maksymalnej masie, która może być uniesiona, ze względu na stateczność robota.

$$L1C = \frac{P1}{2 c_2 l_2 - 2 d h_3 + 2 c_{23} l_3} \quad (7.3)$$

7. Opracowanie doboru parametrów manipulatorów w aspekcie zwiększenia ich zdolności roboczych

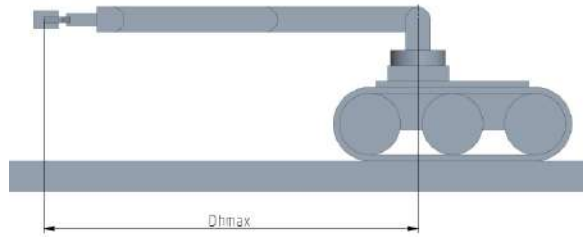
gdzie:

$$\begin{aligned}
 P1 = & 2 dh_3 m_2 + 2 m_3 (dh_3 - c_2 l_2) - 2 (m_4 + l_4 ml_4) (c_2 l_2 - dh_3 + c_{23} l_3) \\
 & + mp (dh_3 + dh_4) + 2 l_2 ml_2 \left(dh_3 - \frac{c_2 l_2}{2} \right) + 2 dh_3 l_1 ml_1 \\
 & - 2 l_3 ml_3 \left(c_2 l_2 - dh_3 + \frac{c_{23} l_3}{2} \right)
 \end{aligned} \quad (7.4)$$

Najmniejsza wartość z parametrów pomocniczych $L1A, L1B, L1C$, otrzymanych z równań 7.1, 7.2, 7.3 pozwalają określić ciężar który może być uniesiony przez robota o zadanej konfiguracji:

$$L1 = \min(\{L1A, L1B, L1C\}) \quad (7.5)$$

Maksymalna masa, którą robot może podnieść na pełnym wysięgu manipulatora Maksymalna masa, którą robot może podnieść manipulatorem w konfiguracji w która wykorzystuje pełny horyzontalny wysięg manipulatora. (rys.7.4). Analogicznie jak w zadaniu



Rys. 7.4. Robot podczas podnoszenia przedmiotu na maksymalnym wysięgu

poprzednim masa, którą robot może unieść uzależniona jest od maksymalnych obciążeń, które mogą komponenty manipulatora oraz od stateczności robota dla konfiguracji robota z wyprostowanym poziomo manipulatorem. Analizowane będą zdolności przegubów manipulatora do przenoszenia obciążeń. W przypadku generycznego robota z manipulatorem 5DOF, przedstawionym na rys.7.2 zdolność można opisać następującymi zależnościami:

- Ograniczenia momentów przenoszonych przez przeguby.

Ze względu na ograniczenia przegubu 4 maksymalne obciążenie manipulatora w rozpatrywanej konfiguracji wynosi:

$$L2A = \frac{M_{\max 4} - \frac{l_4^2 ml_4}{2}}{l_4} \quad (7.6)$$

Ze względu na ograniczenia przegubu 3 maksymalne obciążenie wynosi:

$$L2B = \frac{l_3 (m_4 + l_4 ml_4) - M_{\max 3} + \frac{l_4^2 ml_4}{2} + \frac{l_3^2 ml_3}{2}}{l_4 + l_3} \quad (7.7)$$

Ze względu na ograniczenia przegubu 2 maksymalne obciążenie wynosi:

$$L2C = \frac{l_3 (m_4 + l_4 m l_4) - M_{\max 2} + \frac{l_4^2 m l_4}{2} + \frac{l_2^2 m l_2}{2} + \frac{l_3^2 m l_3}{2} + l_2 (m_4 + m_3 + l_3 m l_3 + l_4 m l_4)}{l_4 + l_2 + l_3} \quad (7.8)$$

Podczas realizowania bieżącego zadania wszystkie działające siły działają wzdłuż osi przegubu 1 więc napęd tego przegubu nie jest obciążony. W tym zadaniu nie będą uwzględniane ograniczenia napędu przegubu 1.

- Ograniczenia stateczności robota.

Z warunku równowagi momentów względem punktu podparcia robota wynika równanie, które określa maksymalną masę ładunku, który może być uniesiony, ze względu na stateczność robota.

$$L2D = \frac{P2}{2 (l_2 - dh_3 + l_3 + l_4)} \quad (7.9)$$

gdzie:

$$P2 = 2 m_3 (dh_3 - l_2) - 2 m_4 (l_2 - dh_3 + l_3) + m_p (dh_3 + dh_4) + 2 dh_3 (m_1 + m_2) - 2 l_3 m l_3 \left(l_2 - dh_3 + \frac{l_3}{2} \right) + 2 l_2 m l_2 \left(dh_3 - \frac{l_2}{2} \right) - 2 l_4 m l_4 \left(l_2 - dh_3 + l_3 + \frac{l_4}{2} \right) \quad (7.10)$$

Najmniejsza wartość z parametrów pomocniczych $L2A, L2B, L2C, L2D$, otrzymanych z równań 7.6, 7.7, 7.8, 7.9 pozwalają określić masę ładunku który może być uniesiony przez robota o zadanej konfiguracji:

$$L2 = \min(\{L2A, L2B, L2C, L2D\}) \quad (7.11)$$

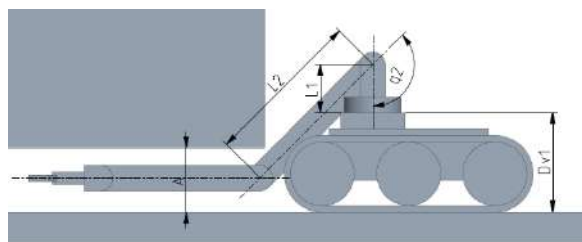
Wysięg manipulatora Parametr wysięgu horyzontalnego manipulatora definiowany może być na różne sposoby. Najczęściej jest to odległość mierzona w poziomie, w konfiguracji wyprostowanej równolegle do podłoża, od najdalej wysuniętego elementu szczek chwytaka, do osi obrotu pierwszego przegubu lub do najdalej wysuniętego do przodu elementu platformy. W obliczeniach wysięgu stosowana była pierwsza metoda pomiaru. Tak zdefiniowany wysięg dla przykładowego manipulatora obliczany jest następująco:

$$W = l_2 + l_3 + l_4 \quad (7.12)$$

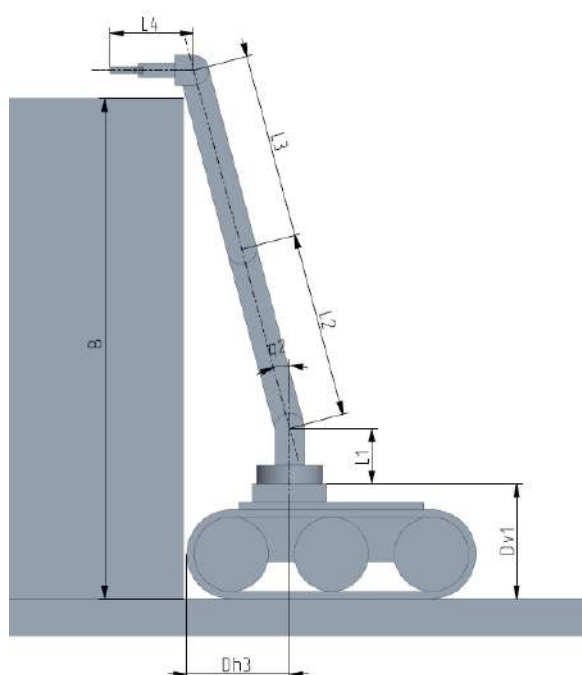
Dla robotów mogą być określane dodatkowe wymagania określające zdolności do podejmowania obiektów z takich miejsc jak np. bagażnik, siedzenie, podwozie samochodu (rys. 7.5), półka o zadanej wysokości (rys. 7.6) lub z miejsc zasłoniętych przeszkodami (rys. 7.7). Każde z tych wymagań, można uwzględnić w dalszym postępowaniu poprzez odpowiednią parametryzację. Dla przykładu wymaganie podejmowania obiektów spod

7. Opracowanie doboru parametrów manipulatorów w aspekcie zwiększenia ich zdolności roboczych

samochodowego podwozia o określonym prześwicie można opisać zależnością która narzuca możliwość umieszczenia przegubu manipulatora przy powierzchni podłoża.



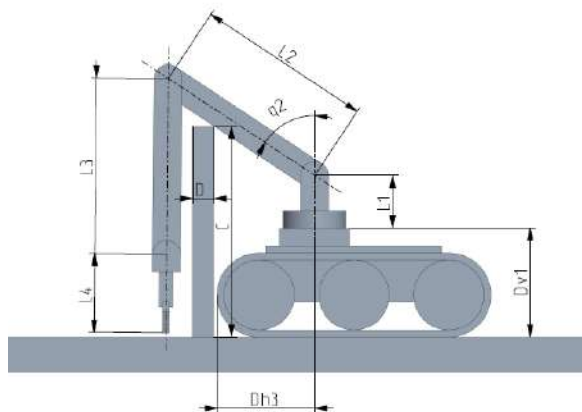
Rys. 7.5. Konfiguracja manipulatora podczas sprawdzania podwozia samochodu.



Rys. 7.6. Konfiguracja manipulatora podczas podejmowania obiektu znajdującego się na zadanej wysokości.

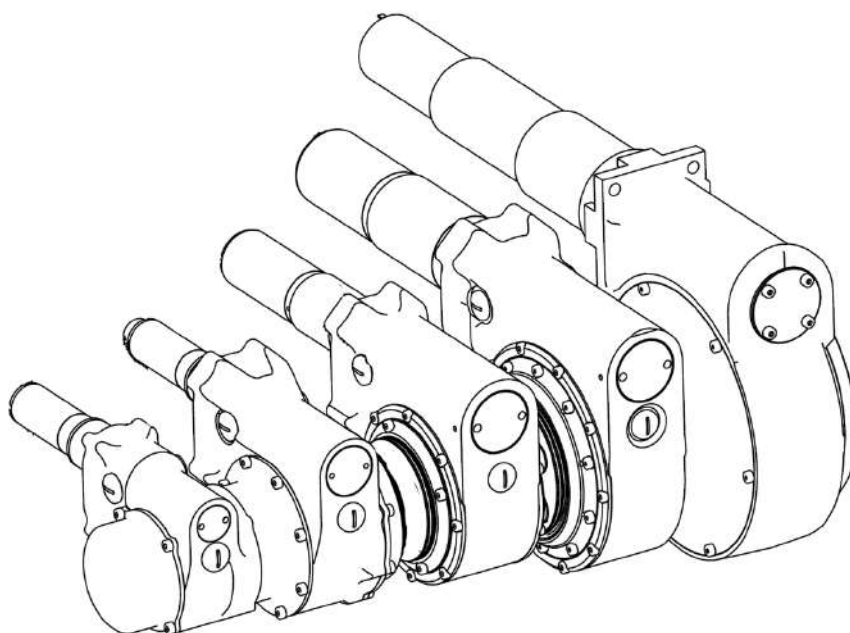
7.2. Biblioteka rozwiązań konstrukcyjnych dostępnych w projekcie

W opracowanej metodzie założono, że w projekcie możliwy jest swobodny dobór szeregu komponentów i rozwiązań konstrukcyjnych, z których należy wybrać najlepszy do skonstruowania danego manipulatora. W diagramie 7.1 została pokazana biblioteka rozwiązań i komponentów, które mogą być wykorzystane w danym projekcie. W bibliotece znajduje się rodzina komponentów, której elementy mają zdefiniowane parametry, wykorzystywane w procesie oceny rozważanych rozwiązań. Przykładową rodziną komponentów jest zbiór przegubów manipulatora, z których każdy ma zdefiniowane parametry takie jak



Rys. 7.7. Konfiguracja manipulatora podczas podejmowania obiektu znajdującego się za przeszkodą.

masa i parametr określający zdolność do przenoszenia obciążeń. Dodatkowo określone mogą być dodatkowe parametry np geometryczne, które będą wykorzystywane w relacjach określających osiągnięcie zdolności.



Rys. 7.8. Przykładowe elementy biblioteki komponentów - rodzina przegubów manipulatora o różnej nośności i masie

Należy zwrócić uwagę, że biblioteka rozwiązań może oprócz podstawowych parametrów elementów rodziny części może zawierać dodatkowe informacje. Mogą to być np. wstępnie przygotowane modele które na późniejszym etapie posłużą do przeprowadzenia optymalizacji topologicznej komponentów. Mogą też to być generyczne programy wyko-

7. Opracowanie doboru parametrów manipulatorów w aspekcie zwiększenia ich zdolności roboczych

rzysztowane na etapie produkcji komponentów np. programy do obrabiarek cnc oraz inne elementy związane z technologią wytwarzania.

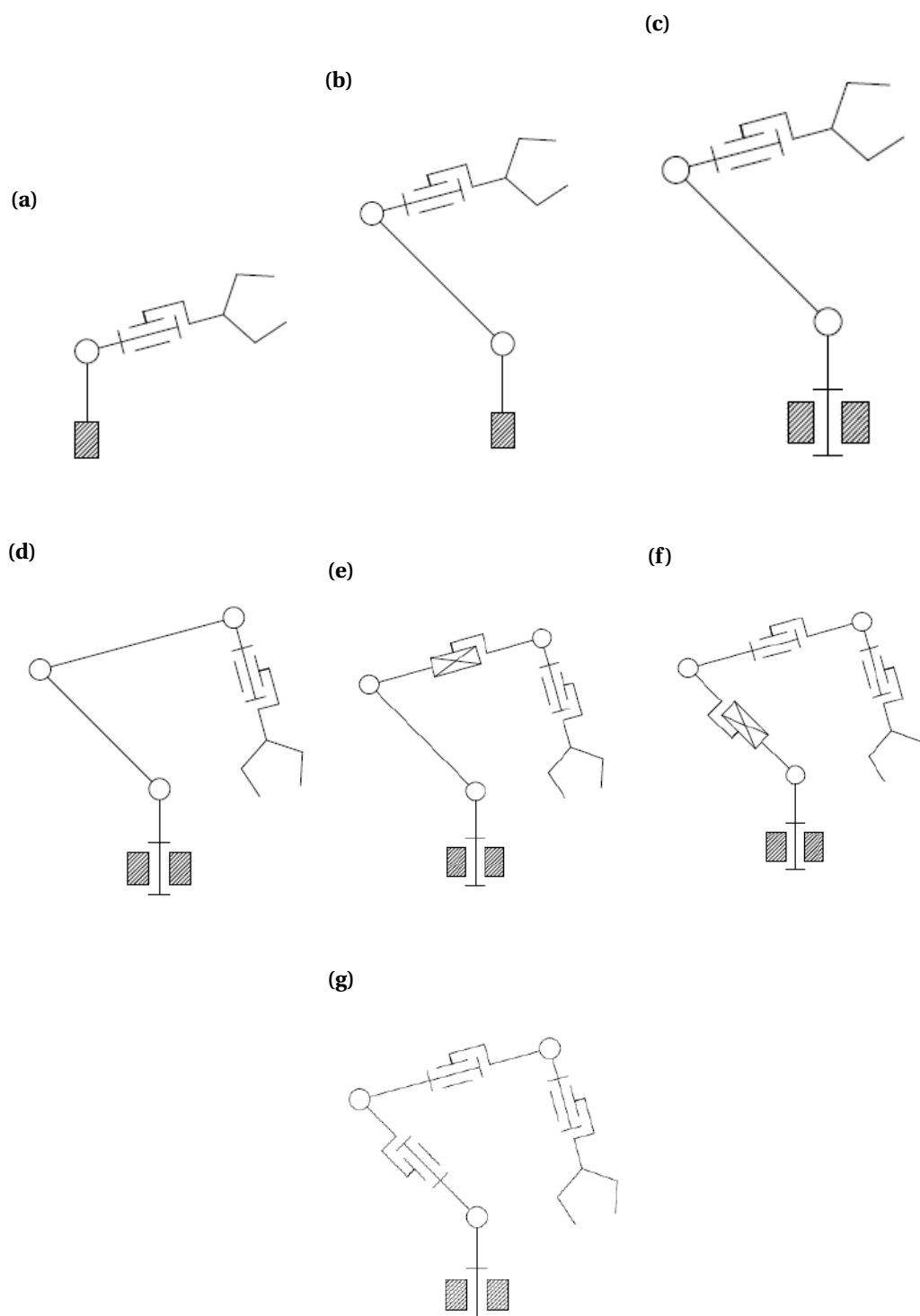
7.3. Projekt koncepcyjny manipulatora

Na podstawie wymagań dla konstrukcji i znajomości dostępnych komponentów jest opracowywany "Projekt koncepcyjny", który jest ogólnym zarysem systemu. Jest wysoko poziomowy pomysł realizacji systemu z uwzględnieniem rodziny komponentów i wymagań. Na tym etapie ustalane są takie parametry jak m.in. kinematyka manipulatora, w tym liczba stopni swobody oraz sposób podziału konstrukcji na moduły, stosowane rozwiązania napędów itp. Dla pełnego obrazu tematyki optymalizacji manipulatorów zarysowana zostanie problematyka doboru kinematyki oraz napędów manipulatora. Choć znane są przykłady w których do doboru liczby stopni swobody manipulatora zaprzęgnięte były także algorytmy optymalizacyjne [120] to w opracowanym algorytmie przyjęto, że ten parametr będzie ustalany na podstawie doświadczenia projektanta i tzw. dobrych praktyk. Dla manipulatorów przemysłowych najczęściej wykorzystywana jest struktura kinematyczna o 6 stopniach swobody, pozwalająca na osiągnięcie w przestrzeni roboczej wymaganej orientacji końcówki roboczej. Zgodnie z Hollerbach [121] korzystniejsze jest wykorzystanie struktury kinematycznej redundantnej. Autor zaproponował strukturę antropomorficzną o 7 stopniach swobody (rys. 7.9g). Dzięki temu możliwe jest eliminacja pozycji osobliwych oraz ominięcie przeszkód w przestrzeni roboczej. Struktura taka jest wykorzystywana także w zaawansowanych manipulatorach do zadań EOD np. Remotec Andros.

W przypadku manipulatorów robotów mobilnych osiągnięcie wymaganej pozycji i orientacji może być możliwe także dla prostszych manipulatorów o mniejszej ilości stopni swobody. Wybór struktury kinematycznej manipulatorów wynika przede wszystkim z wymaganych zdolności roboczych a także parametrów platformy mobilnej. Dla platform wystarczająco dużych manipulatory mogą mieć 6 i więcej stopni swobody. Na rys.7.9f pokazany jest schemat kinematyczny manipulatora zastosowanego np. w robocie Telerob Telex [6], o 7 stopniach swobody. Jednak często stosowane są rozwiązania kompromisowe, o mniejszej ilości stopni swobody. Pokazana na rys.7.9e struktura jest o 5 DOF zastosowana w wielu konstrukcjach i w pracy będzie traktowana jako generyczna.

Dla najmniejszych robotów do najprostszych zadań wystarczające są lekkie i proste manipulatory o 1-2 stopniach swobody. Takie manipulatory pozwalają np. na chwycenie obiektu (np. podejrzana torba) i przeciągnięcie go w inne miejsce, lub przyniesienie i postawienie obiektu.

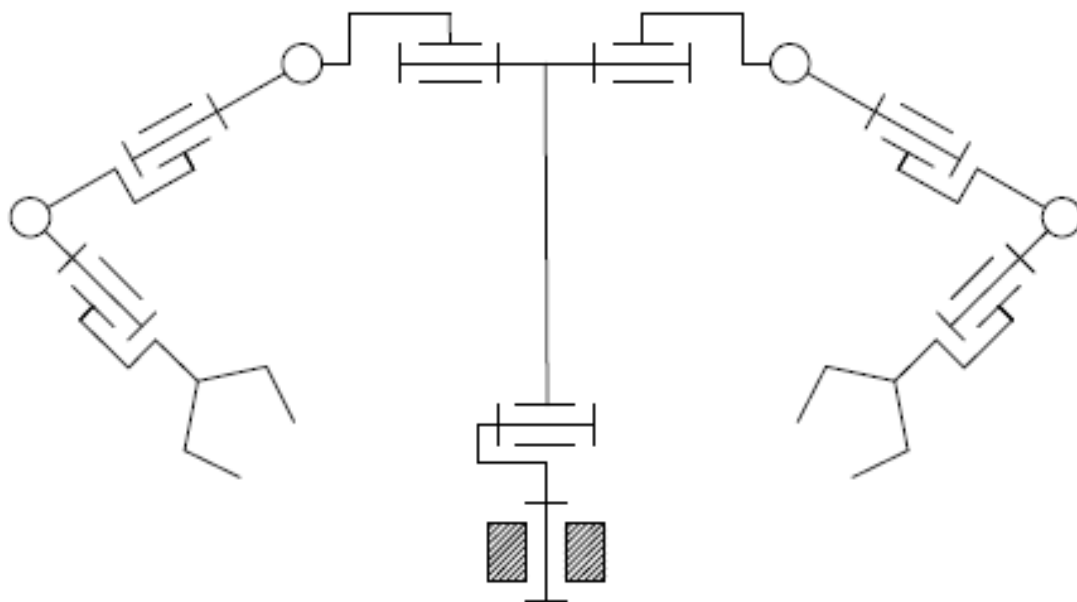
Z drugiej strony są też zadania które wymagają zaawansowanego manipulatora. Do takich zadań należą przekręcanie zaworów, inspekcja rur, sięganie do otworu. Część zadań wymaga manipulacji dwuręcznej przykładem takiego zadania jest otwieranie torby, które to zadanie wymaga przytrzymania torby jednym chwytakiem kiedy drugi chwytak otwiera



Rys. 7.9. Struktury kinematyczne manipulatorów robotów do zadań specjalnych (a) - 2DOF RR, (b) - 3DOF RRR, (c) - 4DOF RRRR, (d) - 5DOF RRRRR, (e) - 6DOF RRRPRR, (f) - 7DOF RRPrrrr, (g) - 7DOF RRRrrrr

7. Opracowanie doboru parametrów manipulatorów w aspekcie zwiększenia ich zdolności roboczych

zamek. Znane są przykłady robotów, na których zamontowane zostały dwa standardowe manipulatory [122] [123] a także rozwiązania w których są stosowane konstrukcje dedykowane do manipulacji dwuręcznej.



Rys. 7.10. Struktura kinematyczne manipulatora dwuramiennego

Manipulatory o strukturze kinematycznej szeregowo – równoległej są bardzo rzadko spotykane w klasie robotów przenośnych i plecakowych ze względu na ograniczony zakres ruchów. Takie rozwiązanie było przedstawione przez firmę Autonomous Solutions dla robota Chaos [124].

We wstępnym etapie projektu konieczne jest ustalenie dopuszczalnych rozwiązań napędów. Jest to kluczowa decyzja ponieważ masa układu napędowego stanowi znaczną część masy manipulatorów. W 3 dolnych członach manipulatora robota PIAP Patrol masa komponentów napędowych (silników, przekładni i łożysk) stanowi 20% masy tych członów.

W przegubach manipulatorów robotów do zadań specjalnych e względu na wymagane wysokie momenty nie są znane przypadki zastosowania napędów bezpośrednich. Napędy quasi bezpośrednie [125] nazywane także proprioceptywnymi, także nie są do tej pory stosowane w robotach do zadań specjalnych. Jednakże te napędy, ze względu na niską impedancję mechaniczną mają zwiększoną odporność na obciążenia dynamiczne, więc są predysponowane do zastosowań w dynamicznym środowisku. Napędy tego typu są stosowane w napędach robotów koczających [39].

W robotach do zadań specjalnych stosowane są układy napędowe składające się z silnika elektrycznego oraz przekładni o dużym przełożeniu. Najczęściej stosowane są prze-

kładnie o osiach prostopadłych ślimakowe (np. Med. Eng, ECA, Ł-PIAP) lub spiroidalne (Flir) o dużym przełożeniu. Goldfrap i inni porównywali cechy wymienionych przekładni [126]. Autorzy nie wskazali przewagi jednego z rozwiązań lecz wskazali, że każda z tych przekładni może być preferowana przy określonych warunkach projektowania, produkcji i eksploatacji.

Znane są także przykłady wykorzystania do napędu manipulatorów robotów do zadań specjalnych przekładni harmonicznych i cykloidalnych (HDT [15]). Petrovic [127] porównał stosowane w robotyce napędy z przekładniami planetarnymi, harmonicznymi i cykloidalnymi. Wskazał przekładnie harmoniczne jako te o najmniej masie. Jednocześnie analizy wskazują, że przekładnie cykloidalne mają wysoką odporność na przeciążenia. [128]

Garcia w [129] wymienia także bardziej nowatorskie rozwiązania napędów dla robotów, które mogą mieć także zastosowanie w robotyce do zadań specjalnych. Wymienionych jest szereg rozwiązań opartych na topologii przekładni planetarnej, wynalezionej przez Ulrich Wolfroma, która umożliwia osiągnięcie wysokich przełożeń przekładni [130].

Od rodzaju przekładni zależeć będzie konstrukcja modułów napędowych i całego manipulatora.

Jedną z decyzji, którą należy podjąć na etapie projektu koncepcyjnego jest umiejscowienie napędów względem napędzanych przegubów. Może to być rozwiązanie w którym napędy są umieszczone w przegubach i napędzają przeguby bezpośrednio. Takie rozwiązanie pozwala w łatwy sposób dzielić konstrukcję na moduły. Innym rozwiązaniem jest umiejscowienie napędów w na członie bliższym podstawie manipulatora i przeniesienie napędu przy pomocy np. przekładni pasowej, łańcuchowej, dźwżkiem, wałem napędowym lub innym sposobem. Argumentem przemawiającym za zastosowaniem takiego rozwiązania jest przeniesienie ciężkich elementów bliżej podstawy manipulatora a także możliwość zredukowania obciążenia niżej położonego napędu co pozwala na zmniejszenie jego rozmiaru. Przykładem takiego rozwiązania są napędy kiści manipulatorów przemysłowych firm Kuka, Fanuc lub ABB. W przypadku robotów do zadań specjalnych także jest stosowane takie rozwiązanie co szczególnie jest widoczne w manipulatorze robota Talon IV firmy Qinetiq gdzie napęd górnego ramienia (przedramienia) jest umieszczony na przeciw napędu dolnego ramienia (ramienia) i jest połączony z górnym ramieniem łańcuchem. Należy jednak podkreślić, że każdy przypadek należy rozpatrywać indywidualnie. W przypadku manipulatorów robotów przenośnych istotna jest całkowita masa urządzenia. Może się okazać, masa elementów przeniesienia napędu zniweluje uzyskane na napędach korzyści.

Wybierając elementy układu napędowego należy wziąć pod uwagę dodatkowe aspekty. Dla robotów do zadań specjalnych konieczne jest utrzymanie pozycji w przypadku utraty zasilania napędów. Dodatkowo należy wziąć pod uwagę że niedopuszczalne jest sto-

7. Opracowanie doboru parametrów manipulatorów w aspekcie zwiększenia ich zdolności roboczych

sowanie, bez kontroli operatora, automatycznych ruchów w celu zerowania czujników położenia po uruchomieniu urządzenia.

Na etapie projektu wstępnego może nastąpić zawężenie rodziny dostępnych rozwiązań jak np decyzja o wykorzystywaniu przegubów z napędami wykorzystującymi przekładnie harmoniczne i wykluczenie z procesu innych rozwiązań np. z przekładniami spiroidalnymi i ślimakowymi. W wyniku działań przeprowadzonych na tym etapie zdefiniowana jest struktura manipulatora w postaci parametrów określających kinematykę manipulatora np. w postaci struktury złożonej z parametrów Denavita Hartenberga oraz ewentualnie następuje zawężenie zbioru dostępnych w bibliotece rozwiązań.

7.4. Dobór podstawowych parametrów manipulatora

Etap doboru podstawowych parametrów manipulatora jest pierwszym krokiem algorytmu, który w swojej procedurze wykorzystuje procedury optymalizacyjne. Na podstawie wymagań, które przyjmują postać funkcji celu, ograniczeń równościowych i nierównościowych, definiowany jest proces optymalizacji. W procesie dobierane są wartości parametrów DH z zdefiniowanej wcześniej struktury opisującej kinematykę manipulatora, oraz wybierane są z biblioteki komponenty, które zostaną użyte do realizacji projektu. Element opracowanej metody został przedstawiony w [131].

Ogólną strukturę poszukiwanych parametrów manipulatora o n stopniach swobody można zapisać jako:

$$Config = [J_1, \dots, J_n, l_1, \dots, l_n] \quad (7.13)$$

gdzie:

L_n oznacza parametr DH odpowiadający za długość ramienia n manipulatora.

J_n oznacza indeks - wskazanie na moduł przegubu z biblioteki komponentów, który jest wykorzystany w przegubie n manipulatora. Przegub w bibliotece komponentów jest opisany przez strukturę:

$$Joint = [J_{ID}, J_T, J_m, \dots] \quad (7.14)$$

gdzie: J_{ID} – indeks modułu w rodzinie części przegubów,

J_T – przypisany do modułu przegubu maksymalny przenoszony moment,

J_m - masa modułu, - opcjonalnie inne parametry.

Parametry i relacje określone na wcześniejszym etapie będą wykorzystane w definicji procesu optymalizacyjnego. Niektóre zależności mogą być wykorzystane jako funkcje celu lub do zdefiniowania więzów. Przykładowo w proces optymalizacyjny określić można w sposób w którym minimalizowania będzie masa manipulatora, przy zapewnieniu wymaganego wysięgu i udźwigów manipulatora. Wychodząc tych samych relacji proces może zostać zdefiniowany jako maksymalizacja wysięgu i udźwigów manipulatora przy zachowaniu

waniu limitu masy. Ten przypadek, który jest przykładem optymalizacji wielokryterialnej będzie rozpatrywany. Ze względu na charakter parametrów zadania do rozwiązania został wybrany został algorytm NSGA-II. Algorytm NSGA2 wybrano ze względu na globalny charakter poszukiwań, bez konieczności wyznaczania gradientów a także ze względu na nieciągły charakter części poszukiwanych parametrów. Poszukiwane parametry są strukturą składającą się zarówno z liczb rzeczywistych dla parametrów DH manipulatora jak i liczb naturalnych, które są indeksami wskazującymi na wykorzystywane w rozwiązaniu elementy z biblioteki rozwiązań.

Określone zostały 3 funkcje dopasowania:

1. Maksymalizacja udźwigu maksymalnego manipulatora. Za maksymalizację udźwigu maksymalnego manipulatora odpowiada funkcja:

$$f1 = -L1 \quad (7.15)$$

gdzie $L1$ to limit masy ładunku podnoszonego dla danej konfiguracji, który jest określony poprzez zależność 7.5. $L1$ jest funkcją parametrów platformy mobilnej, oraz zmiennych parametrów manipulatora - mas przegubów m_{l1}, m_2, m_3, m_4 , mas łączników pomiędzy przegubami (ramion) $m_{l1}, m_{l2}, m_{l3}, m_{l4}$, długości ramion l_1, l_2, l_3, l_4 , oraz maksymalnych momentów przenoszonych przez przeguby manipulatora $M_{max2}, M_{max3}, M_{max4}$. Ponieważ wykorzystywany algorytm umożliwia poszukiwanie minimum funkcji, zadanie poszukiwania maksimum zostało zamienione na zadanie poszukiwania minimum poprzez zmianę znaku funkcji dopasowania.

Każdorazowo podczas sprawdzenia wartości funkcji dopasowania dla elementów populacji najpierw wykonywane jest obliczenie wymienionych parametrów manipulatora na podstawie parametrów 7.14 na które wskazuje sprawdzana konfiguracja 7.13.

2. Maksymalizacja udźwigu na maksymalnym wsięgu manipulatora. Analogicznie do pierwszej funkcji dopasowania za maksymalizowanie udźwigu na maksymalnym wsięgu odpowiada funkcja:

$$f2 = -L2 \quad (7.16)$$

gdzie $L2$ to limit masy ładunku podnoszonego dla danej konfiguracji, który jest określony poprzez zależność 7.11.

3. Maksymalizacja wsięgu maksymalnego manipulatora. Do maksymalizowania wsięgu wykorzystana jest funkcja:

$$f3 = -L3 \quad (7.17)$$

gdzie $L3$ to wsięg dla danej konfiguracji, który jest określany poprzez zależność 7.11.

W zadaniu określono więzami procesu optymalizacji w postaci następujących zależności:

7. Opracowanie doboru parametrów manipulatorów w aspekcie zwiększenia ich zdolności roboczych

1. Warunek ograniczenia masy. Warunek narzuca maksymalną masę manipulatora, które wynosi M_m

$$c1 = M_m - (m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_{l1} \cdot l_1 + m_{l2} \cdot l_2 + m_{l3} \cdot l_3 + m_{l4} \cdot l_4) \quad (7.18)$$

2. Warunek zapewniający zdolność do sięgnięcia po obiekt leżący na podłożu w bliskiej odległości od platformy mobilnej.

Jest to warunek który jest spełniony jeśli istnieje rozwiązanie odwrotnego zadanie kinematyki dla sprawdzanej konfiguracji manipulatora.

3. Warunek zapewniający zdolność manipulatora do sięgnięcia pod podwozie samochodu. Warunek został określony poprzez zależność dla długości ramion 1 i 2, która umożliwia dosięgnięcie przegubem 3 manipulatora do podłoża dla skrajnej dolnej wartości współrzędnej q_2 wynoszącej q_{2liml}

$$c2 = D_{v1} + L_1 - l_2 \cdot \sin(q_{2liml}) \quad (7.19)$$

4. Warunek zapewniający zdolność manipulatora do sięgnięcia do okna samochodu. W analogiczny sposób został skonstruowany warunek umożliwiający dosięgnięcie 3 przegubem manipulatora ponad krawędź okna samochodu. Dla wymaganej wysokości wynoszącej D_w warunek ma postać

$$c3 = D_w - (D_{v1} + L_1 + \sqrt{l_2^2 - D_{h5}^2}) \quad (7.20)$$

5. Warunek określający najmniejszy napęd który można zastosować do pierwszego przegubu manipulatora. W warunku określane jest, jaki musi być moment napędowy w pierwszym przegubie, który odpowiada za obrót manipulatora wokół osi pionowej. Zależność wynika z wymagania, które określa maksymalny kąt wzniesienia po którym robot powinien być zdolny do jazdy bokiem. Wartość momentu napędowego w pierwszej osi wynika z masy ładunku, który manipulator może podnieść oraz kąta bocznego przechylenia robota α_b .

Dla maksymalnego wysięgu zależność określająca obciążenie pierwszej osi ma postać

$$L_{pa} = \frac{l_3 (m_4 + l_4 m_{l4}) - M_{max2} + \frac{l_4^2 m_{l4}}{2} + \frac{l_2^2 m_{l2}}{2} + \frac{l_3^2 m_{l3}}{2} + l_2 (m_4 + m_3 + l_3 m_{l3} + l_4 m_{l4})}{l_4 + l_2 + l_3} \cdot \sin(\alpha_b) \quad (7.21)$$

Dla maksymalnej masy podnoszonej blisko platformy mobilnej równanie ma postać.

$$L_{pb} = \frac{\frac{(L_3^2 \cdot m_{l3} \cdot c_{23})}{2} - M_{max2} + \frac{(L_2^2 \cdot m_{l2} \cdot c_2)}{2} + L_2 \cdot c_2 \cdot m_{r34} + l_3 \cdot c_{23} \cdot m_{r4}}{l_3 \cdot c_2 + l_2 \cdot c_2} \cdot \sin(\alpha_b); \quad (7.22)$$

gdzie:

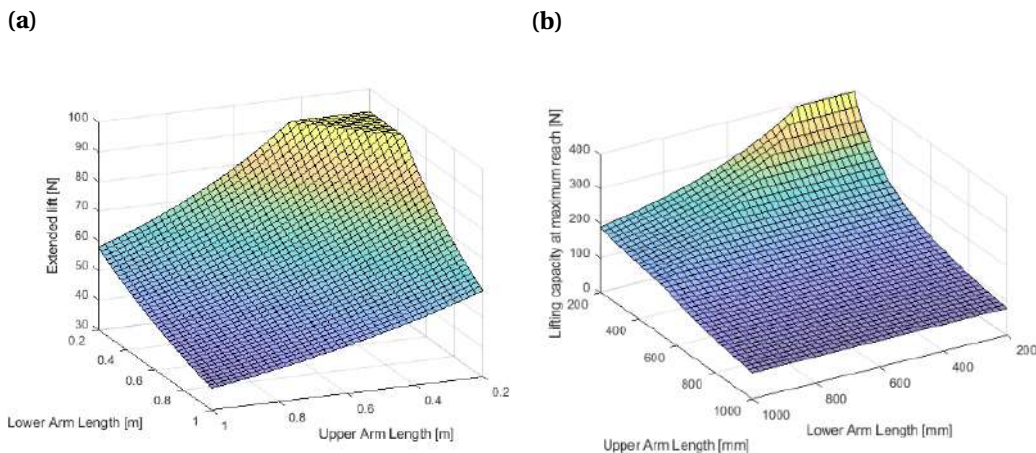
$m_{r34} = m_4 + m_3 + L_3 \cdot m_{l3} + m_4 \cdot m_{l4}$ - suma mas członów 3 i 4;

$mr_4 = m_4 + l_4 * ml_4$ - masa członu 4.

c_2, c_{23} - cosinusy kątów q_2 i $q_2 + q_3$ dla pozycji robota w której podnosi obiekt z podłoża na określonej, bliskiej odległości od platformy mobilnej. Wartości współrzędnych konfiguracyjnych q_2 i q_3 należy obliczyć z zadania odwrotnego kinematyki.

Warunek narzuca minimalny wymiar modułu przegubu 1 wybierając najmniejszy przegub o nośności wystarczającej do przeniesienia obu wyznaczonych obciążeń.

Przykładowo, dla ustalonych pozostałych parametrów manipulatora, na rysunku 7.11 przedstawiono wartości sił podnoszenia osiągane przez manipulator przy maksymalnym wysięgu w zależności od długości ramienia i barku. Na rysunkach pokazane są wyniki dla dwóch wybranych konfiguracji parametrów manipulatora.



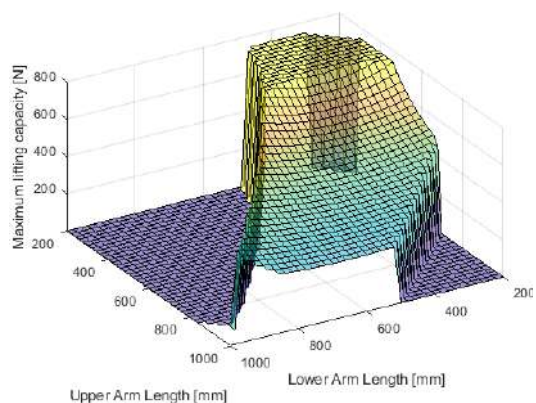
Rys. 7.11. Siły podnoszenia osiągane przez manipulator przy maksymalnym wysięgu w zależności od długości ramienia i przedramienia, dla dwóch różnych konfiguracji manipulatora

Analizując charakter wykresów, można zauważyć, że dla różnych długości ramion maksymalna siła podnoszenia jest ograniczana przez różne czynniki. Wprowadzono modyfikację w równaniach celu, polegającą na tym, że po przekroczeniu wartości granicznych funkcja nie przyjmowała wartości ujemnych, lecz była zerowana. Na rysunku 7.12 widać, że dla niektórych konfiguracji siła nośna wynosiła zero. W ten sposób oceniano przypadki, w których manipulator nie był w stanie unieść żadnego obciążenia lub – przy danej kombinacji parametrów – nie był w stanie dosięgnąć do przedmiotu.

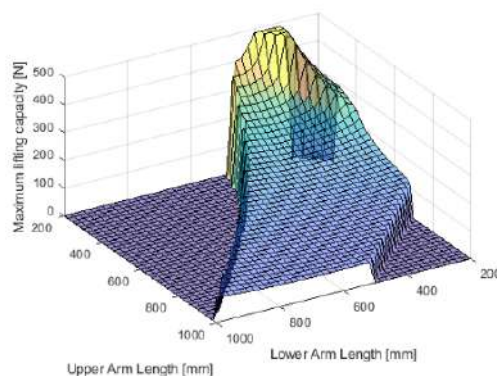
W wyniku działania procedury optymalizacyjnej otrzymywany jest zbiór rozwiązań struktury *Config* który stanowi front Pareto, zwany również granicą Pareto. Front Pareto reprezentuje zbiór rozwiązań, które są Pareto-optymalne. Rozwiązanie jest uznawane za Pareto-optymalne, jeśli nie istnieje inne rozwiązanie, które poprawia jeden z kryteriów bez pogorszenia co najmniej jednego innego kryterium. Oznacza to, że nie można znaleźć lepszego rozwiązania, które dominuje rozwiązania należące do frontu Pareto. Na podstawie otrzymanego frontu Pareto projektant musi podjąć decyzję o wyborze konkretnego rozwiązania, uwzględniając kompromisy między różnymi celami.

7. Opracowanie doboru parametrów manipulatorów w aspekcie zwiększenia ich zdolności roboczych

(a)



(b)



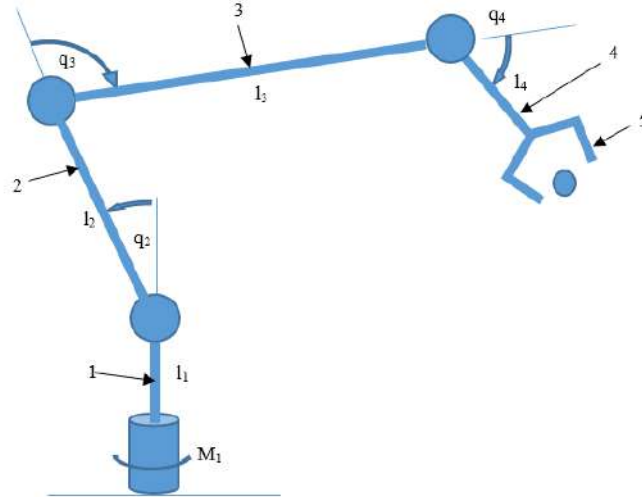
Rys. 7.12. Maksymalne siły podnoszenia osiągnięte przez manipulator w zależności od długości ramienia i przedramienia, dla dwóch konfiguracji manipulatora

7.5. Wyznaczenie krytycznych zestawów obciążeń manipulatora

Obciążenia manipulatora wynikają z wymaganych zdolności i parametrów użytkowych a także z warunków eksploatacyjnych. Wyznaczenie przypadków obciążeń jest konieczne dla weryfikacji wytrzymałości dobranych napędów oraz do optymalizacji konstrukcji. Dla przegubów manipulatora przydatne jest wyróżnienie 2 składowych obciążającego momentu. Składowa momentu działająca w kierunku osiowym działa na korpus przegubu za pośrednictwem komponentów układu napędowego zaś składowa działająca w kierunku promieniowym nie obciąża układu napędowego. Rozróżnienie jest szczególnie istotne dla manipulatorów, w których w napędach przegubów zastosowane są sprzęgła przeciążeniowe. Maksymalny moment który może przenieść sprzęgło przeciążeniowe określa maksymalną składową osiową obciążającego momentu. Po przekroczeniu tej wartości następuje poślizg sprzęgła i manipulator pod obciążeniem ustępuje. W przypadku kiedy nie są stosowane sprzęgła przeciążeniowe obciążenie może się zwiększać do momentu w którym robot straci stateczność lub najslabszy element ulegnie zniszczeniu.

Przeprowadzone badania pokazały, że składowe momentów działające w kierunku promieniowym mogą stanowić znaczną część obciążenia [132]. W opracowanej metodzie przyjęto założenie w którym podstawą do określenia przypadków obciążeń jest analiza obciążeń podczas działania napędów manipulatora z maksymalną możliwą wartością osiąganego momentu. Maksymalny osiągany moment w przegubie wynika z limitu sprzęgła przeciążeniowego lub z maksymalnego momentu który jest możliwy do uzyskania przez napęd. Analizując dany przegub brane są pod uwagę obciążenia, które wynikają z działania napędu w tym przegubie oraz w pozostałych przegubach. Analizowana jest sytuacja w której ruch manipulatora jest blokowany poprzez przeszkodę na którą napiera końcówka chwytaka. Wyznaczenie maksymalnych obciążeń w przypadku takiej kolizji z

przeszkodą można wyznaczyć poprzez poszukiwanie konfiguracji manipulatora, która przy zablokowaniu możliwości ruchu końcówki roboczej spowoduje maksymalne obciążenia podczas próby ruchu przegubami z maksymalnym momentem. Dla najczęściej



Rys. 7.13. Wyznaczanie obciążenia przegubu 3 momentem promieniowym w kierunku α

wykorzystywanej kinematyki 5DOF (rys. 7.13) można zauważyć, że po zablokowaniu możliwości ruchu chwytaka momenty generowane w osiach 2, 3 i 4 nie mają w tych osiach składowych promieniowych a składowe osiowe nie mogą być większe niż maksymalny moment przenoszony przez sprzęgła przeciążeniowe tych przegubów. Inaczej jest w przypadku działania momentu napędowego w osi 1, który po zablokowaniu końcówki roboczej generuje obciążenia w przegubach 2,3 i 4 o składowych promieniowych, które przy założeniu przyłożenia maksymalnego momentu które może przenieść oś 1, są zależne tylko od konfiguracji manipulatora. Te składowe obciążenia przegubów 2,3 i 4 nie są ograniczone sprzęgłami przeciążeniowymi lecz po przekroczeniu granicznego obciążenia robot będzie się przewracał co zapobiegnie dalszemu wzrostowi obciążenia. Na przykładzie przegubu 3 manipulatora zostanie pokazany sposób obliczania obciążenia w interesującym nas kierunku.

Założmy, że napęd 1 manipulatora działa z momentem M_1 a chwytak opiera się o przeszkodę wobec czego ruch jest zablokowany. Wartość siły F która jest wywierana na przeszkodę wynosi:

$$F = \frac{M_1}{l_2 * s_2 + l_3 * s_{23} + l_4 * s_{234}} \quad (7.23)$$

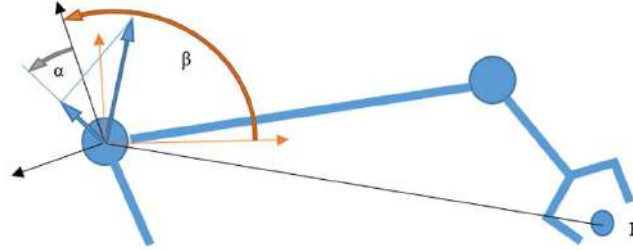
gdzie:

l_2, l_3, l_4 - odległości pomiędzy przegubami 2 i 3, 3 i 4 oraz 4 a końcówką chwytaka (rys. 7.13).

7. Opracowanie doboru parametrów manipulatorów w aspekcie zwiększenia ich zdolności roboczych

s_2, s_{23}, s_{234} - uproszczony zapis $\sin(q_1), \sin(q_1 + q_2), \sin(q_1 + q_2 + q_3)$
 q_2, q_3, q_4 - współrzędne wewnętrzne manipulatora

W przegubie 3 moment od siły F działającej na ramieniu równym odległości przegubu 3 od końca chwytaka (rys. 7.14), oznaczony jako M_{F3} wynosi:



Rys. 7.14. Wyznaczanie obciążenia przegubu 3 momentem promieniowym w kierunku α

$$M_{F3} = \begin{bmatrix} -F * (l_3 * c_{23} + l_4 * c_{234}) \\ F * (l_3 * s_{23} + l_4 * s_{234}) \end{bmatrix} \quad (7.24)$$

wyznaczony w globalnym układzie współrzędnych.

Innym sposobem na wyznaczenie momentów działających w interesujących nas miejscach w strukturze manipulatora jest wykorzystanie Jakobianu. Znając Jakobian manipulatora można w prosty sposób wyznaczyć momenty konieczne do zrównoważenia zewnętrznej uogólnionej siły działającej na końcówkę roboczą poprzez zależność:

$$M = J^T * F \quad (7.25)$$

Ponieważ tą metodą można wyznaczyć jedynie momenty występujące w osiach przegubów, do wyznaczenia momentów promieniowych przegubów lub w innych interesujących nas lokalizacjach, konieczne jest stworzenie modelu manipulatora z sztucznie dodanymi osiami, które posłużą jako czujniki momentów.

Następnie wyznaczone momenty należy przekształcić i odwzorować w układzie współrzędnych badanego węzła konstrukcji. Na przykład dla wyznaczenia momentu w układzie współrzędnych związanym z interesującym nas przegubem 3 należy dokonać obrotu o kąt beta który wynosi

$$\beta = \text{atan2}(l_3 * c_{23}, l_3 * s_{23}) \quad (7.26)$$

Przedstawiając M_{F3} w układzie współrzędnych związanym z ramieniem 3 - M_{F33} otrzymujemy

$$M_{F33} = \begin{bmatrix} F * \sin(\beta)\sigma_1 - F * \cos(\beta)\sigma_2 \\ F * \sin(\beta)\sigma_2 + F * \cos(\beta)\sigma_1 \end{bmatrix} \quad (7.27)$$

, where:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= l_3 * s_{23} + l_4 * s_{234}, \\ \sigma_2 &= l_3 * c_{23} + l_4 * c_{234}. \end{aligned} \quad (7.28)$$

Ponieważ do weryfikacji i dalszej optymalizacji topologicznej korpusu przegubu potrzebne jest wyznaczenie największych obciążeń które mogą być osiągnięte w wybranych kierunkach wprowadzony został parametr kąta α którym będziemy kontrolować kąt w którym są poszukiwane największe obciążenia. Poszczególne przypadki obciążeń będą konstruowane dla różnych kątów α . Po zrzutowaniu wektora momentu na interesujący nas kierunek obrócony o kąt α otrzymujemy moment promieniowy w przegubie 3 w kierunku α wynoszący:

$$M_{F33\alpha} = \begin{bmatrix} \frac{\cos(\alpha)*\sigma_1}{|\cos(\alpha)|^2+|\sin(\alpha)|^2} \\ \frac{\sin(\alpha)*\sigma_1}{|\cos(\alpha)|^2+|\sin(\alpha)|^2} \end{bmatrix} \quad (7.29)$$

, gdzie:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \cos(\alpha) * (F * \sin(\beta) * \sigma_2 - F * \cos(\beta) * \sigma_3) + \\ &\quad \sin(\alpha) * (F * \sin(\beta) * \sigma_3 + F * \cos(\beta) * \sigma_2) \\ \sigma_2 &= l_3 * s_{23} + l_4 * s_{234} \\ \sigma_3 &= l_3 * c_{23} + l_4 * c_{234} \end{aligned} \quad (7.30)$$

W celu znalezienia największych momentów promieniowych w przegubie 3 posłużono się procedurą optymalizacyjną w której parametrami poszukiwanymi były współrzędne q_2, q_3, q_4 dla których wartość funkcji celu, którą jest $MF33\alpha$, w interesującym nas kierunku α była największa.

$$M_{F33\alpha}^* = f(q_2^*, q_3^*, q_4^*, \alpha) = \max f(q_2, q_3, q_4, \alpha) \quad (7.31)$$

,

Wprowadzono ograniczenia wynikające z więzów geometrycznych i siłowych w postaci więzów nierównościowych: Wprowadzono minimalne i maksymalne wartości współrzędnych wewnętrznych (położeń krańcowych) jako więzy wynikające z geometrii oraz wyeliminowano konfiguracje, w których przeguby i końcówka chwytaka kolidowały z platformą mobilną. W ramach więzów nierównościowych wynikających ze statyki ograniczona została maksymalna siła, jaką można przyłożyć do przeszkody, co wynika z określonej maksymalnej siły tarcia platformy robota o podłoże oraz ograniczenie momentu wynikającego z działania tej siły na przeszkodę. Wprowadzono ramię, wynikające z przyjętej

7. Opracowanie doboru parametrów manipulatorów w aspekcie zwiększenia ich zdolności roboczych

konfiguracji manipulatora. Zakładano, że po pewnym momencie platforma zacznie się przewracać lub obracać. Ograniczenia można zapisać w następujący sposób:

$$\begin{aligned}q_{imin} \leq q_i \leq q_{imax} \\abs(T_i) \leq T_{imax} \\M_{min} \leq M \leq M_{max} \\F_{1xy} \leq F_{max}\end{aligned}\tag{7.32}$$

gdzie:

$$\begin{aligned}q_{imin}, q_{imax} &- \text{ograniczenia zakresu ruchu przegubów } i \\T_i &- \text{moment w przegubie } i \\T_{imax} &- \text{maksymalny moment w przegubie } i \\M_{1r} &- \text{moment promieniowy w przegubie 1} \\M_{1rmax} &- \text{maksymalny moment promieniowy w przegubie 1} \\F_{1r} &- \text{siła promieniowa w przegubie 1} \\F_{1max} &- \text{maksymalna siła promieniowa w przegubie 1}\end{aligned}\tag{7.33}$$

Obliczenia wykonane zostały przy wykorzystaniu funkcji *Fmincon* w oprogramowaniu Matlab. Procedura w celu znalezienia wartości optymalnej nieliniowej funkcji z ograniczeniami nierównościami wykorzystuje algorytm punktu wewnętrznego.

Zastosowany w funkcji *Fmincon* algorytm umożliwia znalezienie minimum lokalnego funkcji dlatego dla znalezienia minimum globalnego funkcji *MF33α* w algorytmie wprowadzona została modyfikacja która powodowała wielokrotne uruchomienie poszukiwania z różnych punktów startowych losowy wybranych w przestrzeni współrzędnych q_i . Dodatkowo jako jeden z punktów startowych stosowana była konfiguracja wynikowa dla poszukiwania optimum dla poprzedniego kąta działania momentu. Zabieg ten zapewnił, że odnajdywane wyniki dla poszczególnych kątów miały zbliżone rozwiązania. W wyniku działania algorytmu otrzymane zostały konfiguracje, które generowały największe obciążenia momentem promieniowym dla kierunków określonych kątem α .

7.6. Weryfikacja wyselekcjonowanych komponentów dla wyznaczonych, przypadków obciążeń

W opracowanej metodzie projektowania nowe rozwiązania mogą być tworzone poprzez ewolucję dotychczasowych komponentów wybranych z biblioteki rozwiązań. Należy rozważać także przypadek kiedy dotychczasowe rozwiązanie jest wystarczające pod względem wytrzymałości dla projektu nowego manipulatora. Na podstawie uzyskanych przypadków obciążeń należy przeprowadzić analizę wytrzymałościową wykorzystanych komponentów. Wynik analiz MES może przesądzić o konieczności przeprowadzenia

optymalizacji dla nowych warunków obciążeń analizowanego komponentu. Nawet jeśli analizy wykażą odpowiednią wytrzymałość zastosowanych z biblioteki komponentów należy poddać analizie czy możliwe jest zmniejszenie masy komponentu oraz jaki będzie miało to wpływ na oceniane zdolności robota.

W celu oceny zasadności optymalizacji konstrukcji w celu redukcji masy komponentów można wykorzystać badanie wpływu zmiany masy komponentów na wartość funkcji określających zdolności robota. Wartość funkcji celu, określonych zależnościami 7.5 i 7.11 zależą m.in. od mas komponentów manipulatora. Do określenia wpływu redukcji masy przegubu n w przypadku funkcji $L1$ określającej udźwig maksymalny robota:

$$s_{1n} = \frac{L1(m_n) - L1(m_n + \Delta m_n)}{\Delta m_n} \quad (7.34)$$

oraz dla funkcji $L2$ określającej udźwig na maksymalnym wysięgu:

$$s_{1n} = \frac{L2(m_n) - L2(m_n + \Delta m_n)}{\Delta m_n} \quad (7.35)$$

7.7. Optymalizacja topologiczna komponentów manipulatora

Proces optymalizacji topologicznej obejmuje szereg etapów, zarówno na etapie przygotowania, jak i analizy wyników, co pozwala na uzyskanie struktury spełniającej określone wymagania inżynierskie. Pierwszym krokiem jest przygotowanie modelu CAD, w którym tworzona jest geometria obszaru projektowego przeznaczonego do optymalizacji. W tym samym etapie definiowany jest również obszar pasywny, który mimo że znajduje się w strefie projektowej, nie podlega modyfikacjom podczas procesu optymalizacji. Model musi uwzględniać powierzchnie stanowiące interfejsy między komponentami oraz uwzględniać miejsce na elementy takie jak napędy, elektronika i przewody. Jeśli zespół ma być odporny na warunki środowiskowe, konieczne jest uwzględnienie szczelności obudowy poprzez odpowiednie ukształtowanie obszaru pasywnego. Przyjęta metodyka zakłada, że obszar pasywny stanowi funkcjonalny model komponentu, który jednak nie został zoptymalizowany pod kątem wytrzymałości i jest zbudowany z cienkościennych prymitywów.

Kolejnym etapem jest definicja warunków brzegowych, co obejmuje określenie sposobu zamocowania lub podparcia struktury oraz uwzględnienie wszystkich sił, momentów i obciążeń działających na analizowany komponent. W przypadku manipulatorów robotów należy uwzględnić wiele przypadków obciążenia, wynikających specyfiki zadań operacyjnych. W przyjętej metodologii obciążenia te określone są na podstawie analizy sił obliczonych w poprzednich etapach oraz dodatkowych czynników, takich jak siły wynikające z przenoszenia ładunków chwytakiem czy masa samego robota. Warto również zwrócić uwagę, że w zależności od konstrukcji przegubów, obciążenia mogą oddziaływać na różne powierzchnie analizowanych komponentów. W kolejnym kroku następuje defi-

7. Opracowanie doboru parametrów manipulatorów w aspekcie zwiększenia ich zdolności roboczych

nicja celów i ograniczeń optymalizacji. W zależności od założeń projektowych może to być minimalizacja masy, maksymalizacja sztywności lub redukcja naprężeń. Dodatkowo określane są ograniczenia dotyczące przestrzeni projektowej, dopuszczalnych naprężeń, maksymalnych przemieszczeń czy wymogów związanych z technologią wytwarzania.

Aby przeprowadzić realistyczne symulacje, konieczne jest określenie właściwości materiałów użytych w procesie optymalizacji. Następnie przystępuje się do przygotowania modelu siatki elementów skończonych (MES). W tym etapie model CAD jest dzielony na elementy skończone. Jakość siatki bezpośrednio wpływa na dokładność analiz wytrzymałościowych oraz efektywność algorytmów optymalizacyjnych. Optymalizacja topologiczna wymaga również wyboru algorytmu optymalizacyjnego. W zależności od charakterystyki problemu mogą to być metody gradientowe, algorytmy genetyczne, metody Monte Carlo lub inne techniki heurystyczne. Wybór algorytmu determinuje także parametry obliczeniowe, takie jak maksymalna liczba iteracji czy kryteria zbieżności. Po przygotowaniu modelu i określeniu warunków wstępnych, przeprowadzana jest symulacja obciążeń, w której testowane są zadane warunki brzegowe. Na tym etapie analizowane są odkształcenia i naprężenia w strukturze, co pozwala ocenić, czy spełnione zostały założone cele optymalizacyjne. Jeśli wyniki nie spełniają oczekiwań, przeprowadzane są iteracyjne poprawki modelu, obejmujące modyfikację geometrii, warunków brzegowych lub parametrów symulacji. Proces ten powtarza się do momentu uzyskania optymalnego rozwiązania.

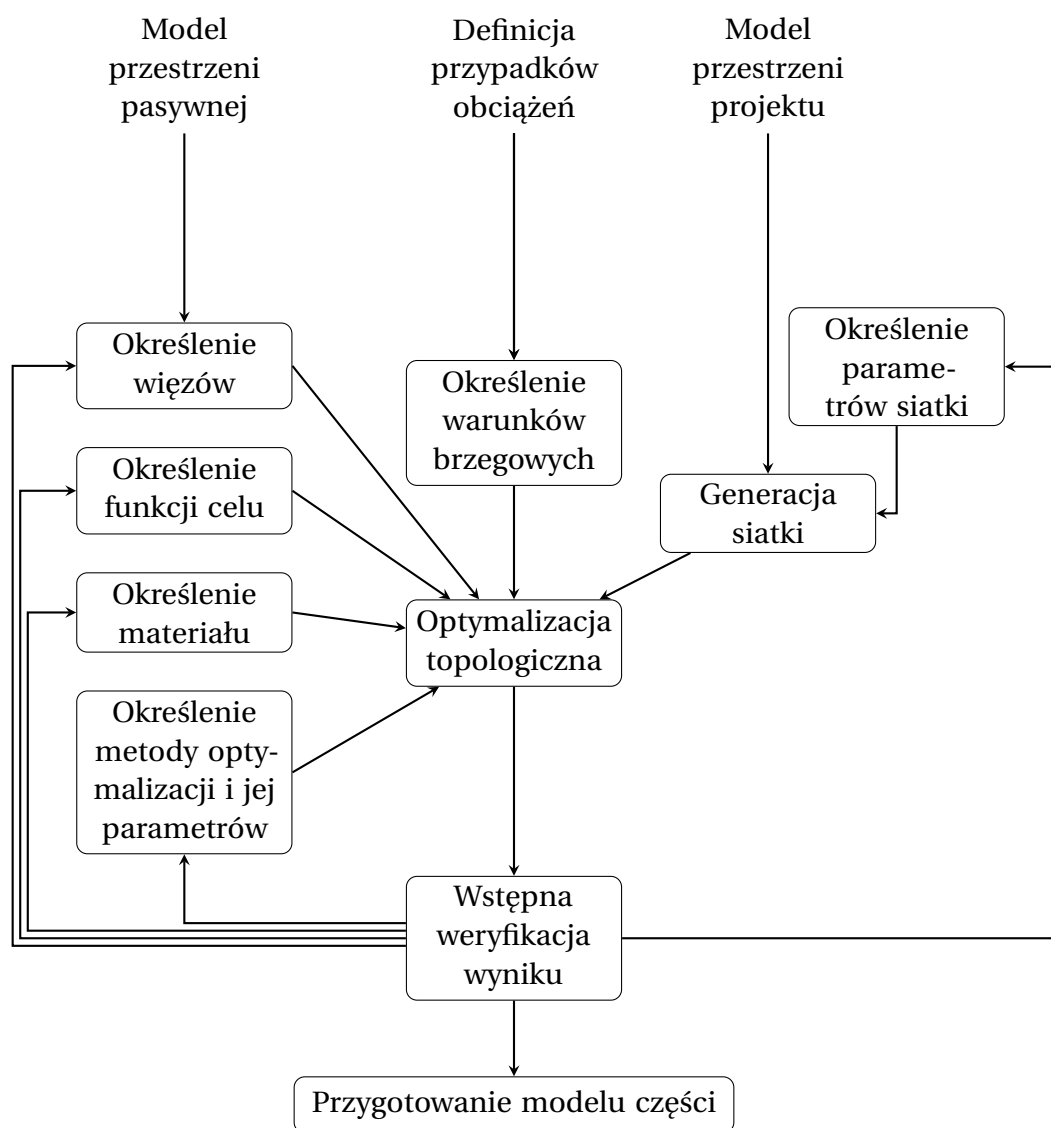
Gdy wyniki optymalizacji są satysfakcjonujące, przechodzi się do etapu weryfikacji i walidacji. Obejmuje on zarówno symulacje wytrzymałościowe, jak i testy fizycznych prototypów, jeśli jest to możliwe.

Ostatecznym etapem jest dokumentacja i implementacja wyników optymalizacji. Opracowywana jest pełna dokumentacja techniczna, zawierająca wyniki analiz, wnioski i zalecenia projektowe. Po zakończeniu tego procesu zoptymalizowany projekt może zostać przekazany do dalszych etapów produkcji lub wdrożenia, w zależności od przeznaczenia i specyfiki produktu.

Zdefiniowanie ograniczeń: Mogą to być ograniczenia dotyczące przestrzeni projektowej, maksymalnych przemieszczeń, dopuszczalnych naprężeń itp.

7.8. Projektowanie ukierunkowane na wytwarzanie

Optymalizacja topologiczna ukierunkowana na metody wytwarzania jest zaawansowanym podejściem do projektowania, które łączy techniki optymalizacji strukturalnej z ograniczeniami i możliwościami technologicznymi procesu wytwarzania. Celem jest stworzenie struktur, które nie tylko spełniają określone kryteria wytrzymałościowe i funkcjonalne, ale są również dostosowane do efektywnego i ekonomicznego wytwarzania. W tradycyjnej optymalizacji topologicznej struktury są projektowane głównie z myślą o ich właściwościach mechanicznych, bez pełnego uwzględnienia ograniczeń związanych z procesem produkcji. Optymalizacja ukierunkowana na wytwarzanie integruje te



Rys. 7.15. Elementy procesu przygotowania optymalizacji topologicznej

7. Opracowanie doboru parametrów manipulatorów w aspekcie zwiększenia ich zdolności roboczych

aspekty, zapewniając, że projektowane struktury są nie tylko optymalne pod względem wytrzymałości, ale również wykonalne z punktu widzenia technologii wytwarzania. Opracowanych zostało szereg metod uwzględnienia ograniczeń technologicznych podczas optymalizacji topologicznej komponentów. Ograniczenia te są określane jako dodatkowe więzy określane na etapie definiowania procesu optymalizacji. Do podstawowych więzów należą:

1. Kontrola minimalnego rozmiaru elementu

Minimalna wielkość elementu jest kontrolowana poprzez penalizację zbyt małych struktur.

2. Kontrola maksymalnego rozmiaru elementu

Ogranicza tworzenie nadmiernie dużych elementów poprzez nałożenie kar za przekroczenie określonego limitu. Kontrola ta nie jest zależna od kierunku – spełnienie wymagań następuje, jeśli w dowolnej osi element mieści się w dopuszczalnym zakresie. Jest to szczególnie istotne w projektowaniu części odlewanych, gdzie kluczowe jest zarządzanie grubością żeber konstrukcyjnych.

3. Dostosowanie projektu do technologii odlewania

W procesie odlewania istotnym ograniczeniem jest możliwość usunięcia materiału tylko w kierunku ruchu formy. Optymalizacja topologii często generuje wnęki i układy geometrii, które są niemożliwe do wykonania metodą odlewania. Przekształcenie takiego projektu w wersję nadającą się do produkcji może być skomplikowane lub wręcz niemożliwe, a każda modyfikacja może znacząco wpłynąć na optymalność rozwiązania. Dodatkowo, zastosowanie tego ograniczenia eliminuje możliwość powstawania wewnętrznych otworów w strukturze.

4. Dostosowanie do technologii wytłaczania

Zastosowanie ograniczeń produkcyjnych związanych z procesem wytłaczania w optymalizacji topologii pozwala na generowanie projektów o stałym przekroju poprzecznym. W niektórych przypadkach konieczne jest zaprojektowanie elementu, którego przekrój pozostaje niezmienny wzdłuż całej jego długości – jest to szczególnie ważne w produkcji metodą wytłaczania. Co więcej, tego rodzaju ograniczenia mogą być wykorzystywane także w badaniach koncepcyjnych, niekoniecznie związanych bezpośrednio z wytłaczaniem, ale wymagających geometrii o określonej strukturze. Przykładem może być konieczność zapewnienia ciągłości żeber przez całą objętość elementu.

5. Powtarzanie wzoru

Metoda umożliwiająca tworzenie układów topologicznych o powtarzalnych strukturach poprzez odpowiednie łączenie komponentów konstrukcyjnych.

6. Symetria planarna

W wielu przypadkach pożądaną jest, aby projekt charakteryzował się symetrią. Niestety, nawet jeśli zarówno przestrzeń projektowa, jak i warunki brzegowe mają syme-

tryczny charakter, tradycyjne metody optymalizacji topologii nie zawsze zapewniają idealnie symetryczny wynik.

7. Symetria cykliczna

Projekt może być zoptymalizowany w taki sposób, aby zachowywał symetrię cykliczną. Można to osiągnąć poprzez zastosowanie powtarzalnych wzorców, w których geometria jest replikowana wokół osi centralnej określoną liczbę razy. W dodatkowym wariacie możliwe jest także wymuszenie symetrii wewnętrznej każdego powtarzanego segmentu, co zapewnia jeszcze większą regularność i przewidywalność kształtu konstrukcji.

8. Dostosowanie geometrii do obróbki CNC

Projekt może być dostosowany do obróbki ubytkowej [133], [134] [135]. Więzy zapewniają, że generowana geometria dostępna jest dla narzędzi w operacjach frezowania na maszynach 3 i 5 osiowych.

7. Opracowanie doboru parametrów manipulatorów w aspekcie zwiększenia ich zdolności roboczych

Tabela 7.1. Tabela kompatybilności więzów produkcyjnych w oprogramowaniu nTopology: A - Symetria, B - Obszar pasywny, C - Odpowiedź, D - Wyciągnięcie, E - Minimalny wymiar cechy, F - Nawis, G - Powtórzenie wzoru, H - Wyciągnięcie powierzchni, I - Przemapowanie, J - Maksymalny wymiar cechy, K - Rozformowanie, L - Obróbka cnc

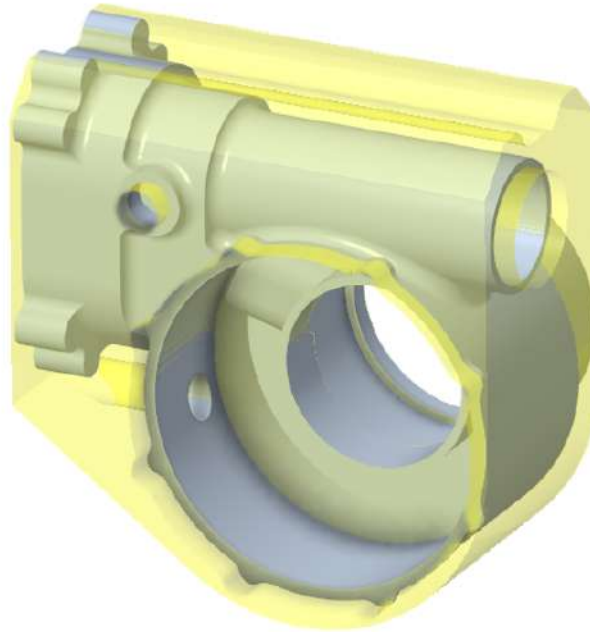
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
A	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1
B	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
D	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
E	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
F	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0
G	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1
H	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
I	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
J	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

9. Dostosowanie geometrii do obróbki addytywnej. Więzy mogą zapewnić dla uzyskanie geometrii która pozwala na minimalizowanie ilości podpór lub pozwalającej na wytwarzanie bez konieczności wykorzystywania materiału podporowego. Jest to uzyskiwane poprzez dopasowanie maksymalnych kątów powierzchni które dla danego kierunku wytwarzania są powierzchniami dolnymi. Optymalizacji może podlegać także orientacja drukowanego obiektu w komorze [136]. Podczas optymalizacji może być także brana pod uwagę anizotropia materiału [137]. Znana jest też metoda optymalizacji wydruku w celu wyeliminowania materiału podporowego z wewnętrznych komór gdzie byłyby trudne do usunięcia [138].

W tabeli 7.1 zestawiono, możliwe kombinacje więzów w optymalizacji topologicznej w oprogramowaniu nTopology.

Poniżej przedstawione są wyniki optymalizacji topologicznej korpusu przegubu manipulatora przy zastosowaniu różnych więzów technologicznych. Przestrzeń projektu oraz przestrzeń pasywna została przygotowana w postaci modeli pokazanych pokazana na rys.7.16. Masa przestrzeni projektu wynosiła 932g, masa w przestrzeni pasywnej 232g. Rozmiar elementu wynosił 1.034mm, liczba elementów 301937. Optymalizacja była wykonywana w oprogramowaniu Creo. Minimalizowania była masa komponentów, przy warunku zachowania współczynnika bezpieczeństwa na poziomie nie mniejszym niż 2. W każdym przypadku model był obciążony w użyciu 4 przypadków obciążenia.

Analizując wyniki optymalizacji korpusu (rys. 7.17 - 7.20) uwagę zwraca fakt, że dodanie w optymalizacji dodatkowych więzów pozwoliło w 2 przypadkach na uzyskanie mniejszej masy korpusu niż można było uzyskać bez tych więzów. Uwidacznia to problem



Rys. 7.16. Przestrzeń projektu oraz przestrzeń pasywna przygotowana do optymalizacji korpusu



Rys. 7.17. TO bez więzów wykonawczych. Masa wynikowa 401g. Czas obliczeń 42g 7min



Rys. 7.18. TO z narzuconym minimalnym promieniem krzywizny 3mm. Masa wynikowa 372g. Czas obliczeń 42g 11min

lokalnego charakteru znalezionych rozwiązań. Uzyskanie wyniki zależą od takich czynników jak wielkość elementów siatki, rodzaju siatki, więzów, geometrii początkowej i innych parametrów wejściowych. Celem optymalizacji było zminimalizowanie masy części, przy zachowaniu wymaganego współczynnika bezpieczeństwa więc jest to ograniczenie narzucone na maksymalne naprężenia w konstrukcji. Taki sposób definicji zadania jest dużo bardziej wymagający obliczeniowo ze względu na zwielokrotnienie liczby poszukiwanych parametrów. Po czasie obliczeń można też zauważyć problemy ze zbieżnością algorytmu (rys.7.19).



Rys. 7.19. TO z więzem rozformowania. Masa wynikowa 381g. Czas obliczeń 81g 2min



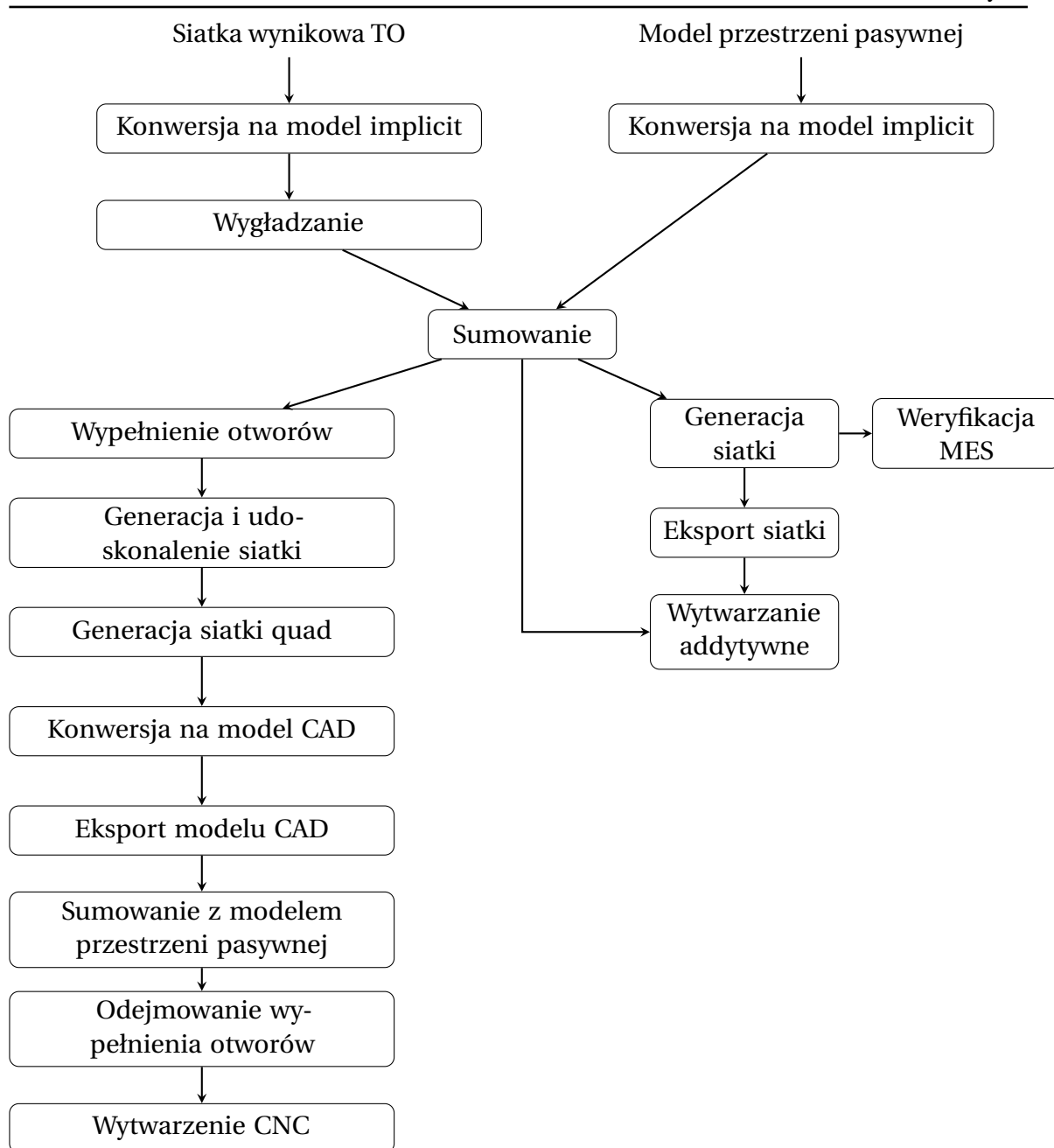
Rys. 7.20. TO z więzem rozformowania i minimalnym promieniem krzywizny 3mm. Masa wynikowa 480g. Czas obliczeń 27g 28min

7.9. Dostosowanie rezultatów optymalizacji topologicznej do implementacji

Optymalizacja topologiczna generuje wyniki w postaci rozkładu materiału w analizowanej domenie, często przedstawione jako mapa gęstości materiału. Te wyniki pokazują, gdzie materiał powinien być rozmieszczony (obszary o wysokiej gęstości) i gdzie może zostać usunięty (obszary o niskiej gęstości). Wyniki optymalizacji topologicznej mogą być początkowo trudne do bezpośredniego wytworzenia. Dlatego konieczne jest ich dalsze przetwarzanie jak np: wygładzanie i segmentacja. Proces wygładzania geometrii polega na usunięciu nieregularności i artefaktów, które mogą wystąpić w surowych wynikach optymalizacji. Techniki wygładzania, takie jak filtracja gęstości, mogą być stosowane do uzyskania bardziej regularnej i estetycznej powierzchni. W niektórych przypadkach wyniki są binarne (materiał obecny lub nieobecny). Segmentacja pozwala na wyraźne zdefiniowanie granic między materiałem a przestrzenią pustą.

Aby wyniki optymalizacji mogły zostać wykorzystane w rzeczywistym procesie projektowania i produkcji, konieczna jest konwersja wyników do formatu CAD. Proces ten obejmuje konwersję wygładzonych wyników optymalizacji do modelu CAD. Narzędzia CAD umożliwiają dokładne odwzorowanie optymalizowanych kształtów i tworzenie parametrycznych modeli, które mogą być łatwo modyfikowane i analizowane. Można przeprojektować uzyskane kształty, aby dostosować je do specyficznych wymagań produkcyjnych i technologicznych, takich jak minimalna grubość ścianek, tolerancje produkcyjne, czy aspekty związane z montażem. W opracowanej metodzie zaproponowano procedurę przygotowania modelu wynikowego optymalizacji topologicznej pokazaną na rysunku 7.21.

Schemat opisuje sposób obróbki modeli uzyskanych w rezultacie optymalizacji topologicznej w zależności od pożądanego rezultatu. Przewidziano w schemacie obróbkę w zelach produkcji elementu metodą obróbki CNC oraz metodami addytywnymi oraz



Rys. 7.21. Schemat procesu przygotowania modelu uzyskanego po optymalizacji topologicznej do dalszej obróbki

obróbkę do celu weryfikacji modelu za pomocą MES. Należy zwrócić uwagę, że szczegóły postępowania zależą od wykorzystywanego oprogramowania.

7.10. Badanie wpływu ilość uwzględnianych przypadków obciążeń na wynik optymalizacji topologicznej

W klasycznej optymalizacji topologicznej metoda gęstościowa SIMP (*Solid Isotropic Material with Penalization*) lub metoda poziomicowa (*Level Set Method*) wykorzystuje pojedynczy przypadek obciążenia jako funkcję celu. Jednak w rzeczywistych zastosowaniach konstrukcje są narażone na wiele różnych konfiguracji sił i momentów. Aby uwzględnić te warianty, optymalizacja topologiczna stosuje agregację wielu przypadków obciążeń do wspólnej funkcji celu [139].

Niech N oznacza liczbę przypadków obciążeń, a $\mathbf{F}_i$ i $\mathbf{U}_i$ odpowiednio wektory sił i przemieszczeń dla i -tego przypadku. Całkowita podatność (*compliance*) konstrukcji jest sumą podatności dla każdego przypadku:

$$C_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N w_i C_i = \sum_{i=1}^N w_i \mathbf{F}_i^T \mathbf{U}_i \quad (7.36)$$

gdzie w_i to współczynniki wagowe przypisane każdemu przypadkowi obciążenia, umożliwiające uwzględnienie ich różnej istotności.

Podczas optymalizacji, każda iteracja algorytmu MES (*Metody Elementów Skończonych*) musi uwzględniać wiele macierzy sztywności $\mathbf{K}(\rho)$ dla różnych przypadków obciążeń:

$$\mathbf{K}(\rho) \mathbf{U}_i = \mathbf{F}_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (7.37)$$

Optymalizacja przebiega tak, aby zminimalizować sumaryczną podatność przy jednoczesnym ograniczeniu całkowitej objętości materiału:

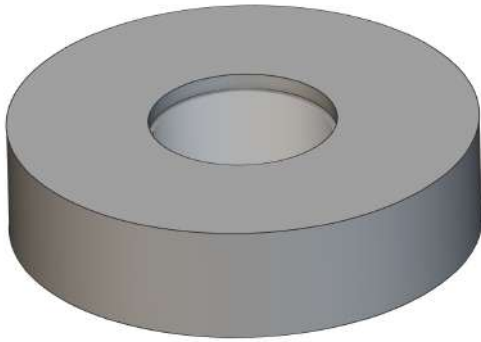
$$\sum_{e=1}^M \rho_e v_e \leq V_{\text{max}} \quad (7.38)$$

gdzie M oznacza liczbę elementów skończonych, ρ_e to gęstość materiału przypisana do elementu e , a v_e to jego objętość.

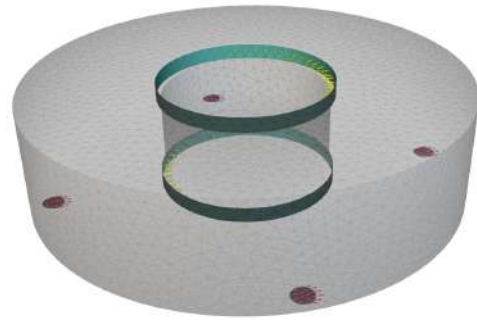
W kontekście manipulatorów robotów, gdzie obciążenia zmieniają się w czasie w wyniku ruchu ramion, konieczne jest stosowanie metod pozwalających na uwzględnienie obciążeń obrotowych. Przykładowo, w przypadku optymalizacji manipulatora z uwzględnieniem różnych pozycji ramion, można podzielić zakres kątów na dyskretne przedziały i wyznaczyć obciążenia dla każdej z tych pozycji, co pozwala na zachowanie integralności konstrukcji dla całego zakresu ruchu.

Badanie ilości koniecznych przypadków obciążeń zostało przeprowadzone na testowym modelu 7.22, którym był krążek o średnicy 200mm i wysokości 50mm, utwierdzony na 4 podporach.

W środku krążka znajdował się otwór w którym na przeciwległych końcach znajdowały się powierzchnie o średnicy 80mm przez które było przenoszona obciążenie. Krążek

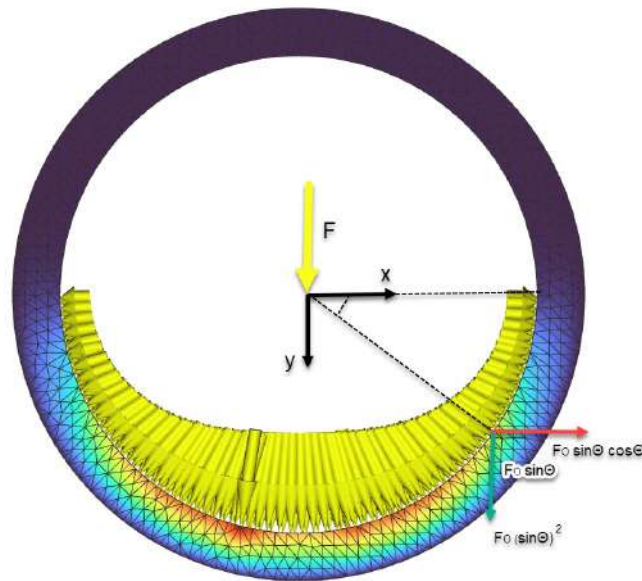


Rys. 7.22. Model testowy



Rys. 7.23. Siatka i warunki brzegowe modelu testowego

był obciążany momentem, którego wektor był prostopadły do osi otworu. Moment był rozłożony na parę sił działających na wymienione powierzchnie poprzez obciążenie typu łożyskowego. W wykorzystanym oprogramowaniu NTopology obciążenie łożyskowe jest modelowane poprzez rozkład sinusoidalny (rys. 7.24).



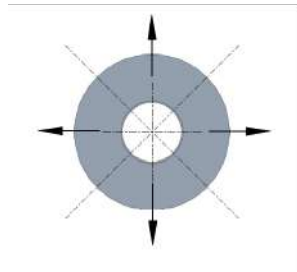
Rys. 7.24. Rozkład sił w obciążeniu łożyskowym, modelowane w oprogramowaniu Ntopology [140]

Przeprowadzono optymalizację strukturalną testowego modelu, w której minimalizowana była podatność konstrukcji, przy narzuconym stopniu redukcji objętości modelu. Przyjęto materiał - stop aluminium 7075-T6. Jako przestrzeń pasywną określono powierzchnie otworu w modelu. Obliczenia były przeprowadzane dla 3 rodzajów przypadków obciążeń (ryc. 7.25). Zaznaczone na rysunku strzałki pokazują wektory momentu obciążającego model. W pierwszym uwzględniane były 4 przypadki obciążenia - 4 momenty działające w kierunkach promieniowych, w każdym przypadku moment był obrócony o

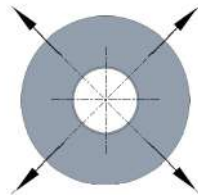
7. Opracowanie doboru parametrów manipulatorów w aspekcie zwiększenia ich zdolności roboczych

90 stopni (rys.7.25a), w drugim - 4 przypadki obciążenia, co 90 stopni lecz obrócone o 45 stopni (rys.7.25a), w trzecim - osiem przypadków obciążenia, co 45 stopni (rys.7.25a).

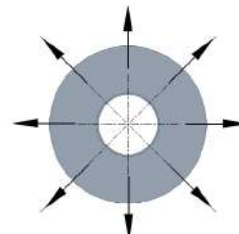
(a)



(b)



(c)



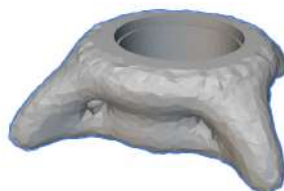
Rys. 7.25. Uwzględniane przypadki obciążenia dla modelu testowego: a - 4 przypadki obciążenia, co 90 stopni, b - 4 przypadki obciążenia, co 90 stopni, obrócone o 45 stopni, c - Osiem przypadków obciążenia, co 45 stopni

W celu zmniejszenia czasu obliczeń obliczenia zostały podzielone na 2 etapy. W pierwszym etapie przyjęto siatkę o długości krawędzi 5 mm, co dało siatkę o liczbie elementów 79611. W wyniku optymalizacji zgrubnej otrzymano 3 podobne siatki (rys. 8.17), które zo-

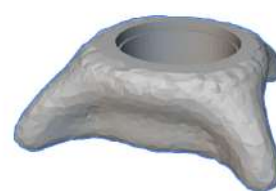
(a)



(b)



(c)



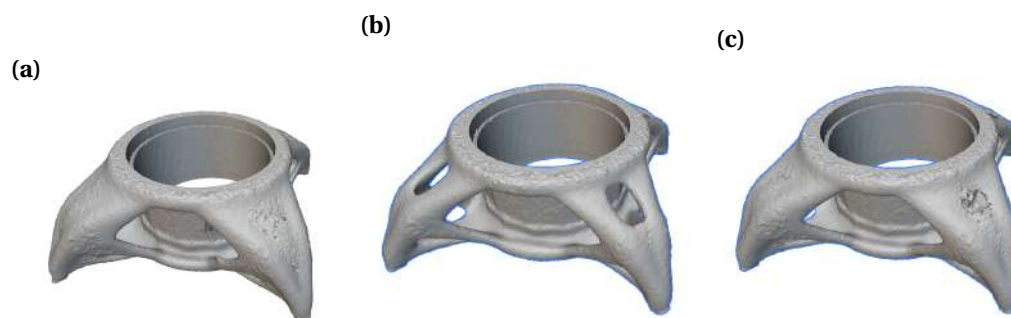
Rys. 7.26. Wyniki pierwszego etapu optymalizacji dla trzech konfiguracji obciążeń.

stały przekształcone w przestrzeń projektową dla następnego kroku optymalizacji. Masa części na tym etapie została zredukowana z pierwotnych 3610g do odpowiednio: 1133g, 1125g i 1131g. Wyniki optymalizacji zgodnie z obraną metodyką zostały przekształcone w modele implicit, następnie ponownie zostały wykonane siatki, o długości krawędzi 1.5mm. Otrzymano odpowiednio siatki o liczbie elementów: 1220751, 1199869 i 1215904.

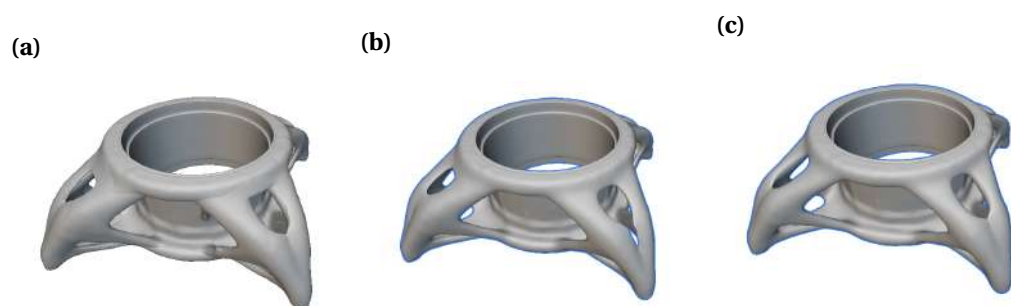
W drugim kroku minimalizowana była podatność komponentów przy narzuceniu redukcji objętości do 0.3 objętości wyjściowej. W wyniku optymalizacji otrzymano modele pokazane na rysunku 8.18

W kolejnym kroku wykonano wygładzenie krawędzi (rys 8.19

Uwzględnienie wielu przypadków obciążeń w optymalizacji topologicznej pozwala na uzyskanie struktur bardziej odpornych na zmienne warunki eksploatacyjne. Wstępne



Rys. 7.27. Wyniki drugiego etapu optymalizacji dla trzech konfiguracji obciążeń.

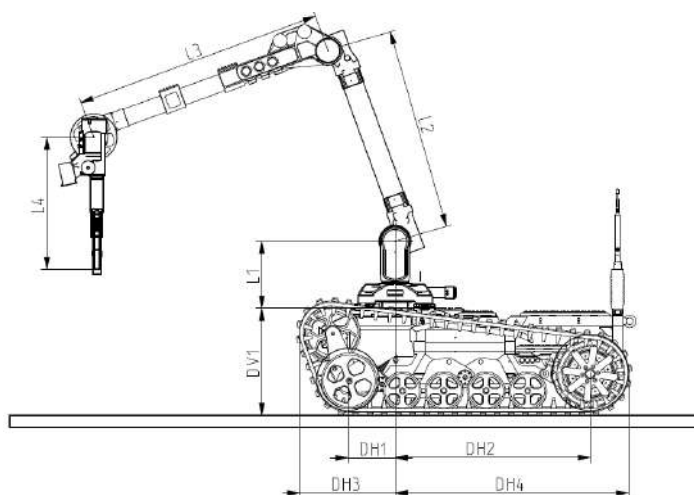


Rys. 7.28. Wyniki optymalizacji po wygładzaniu powierzchni, dla trzech konfiguracji obciążeń.

badania symulacyjne wykazują że dla rozpatrywanej klasy modeli wystarczające jest uwzględnienie 4 przypadków obciążenia momentem działającym w kierunku promieniomym, co 90 stopni.

8. Implementacja opracowanej metody projektowania i optymalizacji manipulatorów

Działanie opracowanej metody zostało sprawdzone na przykładzie projektu manipulatora do robota PIAP Patrol. Robot PIAP Patrol to urządzenie opracowane przez Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP. Jest to mobilny robot przeznaczony do działań związanych z zapewnianiem bezpieczeństwa publicznego, głównie w kontekście zagrożeń związanych z materiałami wybuchowymi. Urządzenie jest zaprojektowane do rozpoznawania, neutralizacji i usuwania zagrożeń wybuchowych. Robot może być wykorzystywany przez służby mundurowe jak policję, wojsko i służby specjalne do operacji związanych z rozpoznawaniem i neutralizacją zagrożeń wybuchowych. Może być używany przez straż pożarną i jednostki ratownictwa technicznego do operacji ratunkowych. Może być używany w miejscach publicznych, takich jak lotniska, dworce kolejowe, centra handlowe, oraz w działaniach wojskowych i policyjnych. Oznaczenia przyjęte z obliczeniach pokazano na ilustracji robota PIAP Patrol z manipulatorem o 5 stopniach swobody. 8.1.



Rys. 8.1. Oznaczenia parametrów manipulatora 5 DOF zainstalowanego na robocie PIAP Patrol

8.1. Wymagania określone dla robota z projektowanym manipulatorem

Projektowany manipulator będzie wykorzystany w robocie na zadań EOD. Manipulator musi wykazać się następującymi zdolnościami:

- podejmowanie i przenoszenie obiektów,
- otwieranie drzwi i usuwanie przeszkód,
- odsłanianie, kopanie i rycie w poszukiwaniu np. ładunków wybuchowych lub przewodów,
- przesuwanie i przeciąganie obiektów,
- przecinanie przewodów, drutów, prętów, przebijanie opon, wybijanie szyb,

- przeprowadzanie neutralizacji strzelbą lub wyrzutnikiem pirotechnicznym,
- prześwietlanie obiektów przy pomocy urządzenia RTG,
- zamrażanie obiektów ciekłym azotem,
- pobieranie próbek i pomiary czujnikami CBRN,
- podkładanie ładunków pośrednich,
- prowadzenie rozpoznania i obserwacji zainstalowanymi na manipulatorze kamerami, głowicami PTZ i mikrofonem kierunkowym i innymi sensorami
- balansowanie i podpieranie platformy mobilnej podczas pokonywania przeszkód,
- podnoszenie platformy do pozycji roboczej w wypadku wywrotki

Dodatkowo należy uwzględnić następujące wymagania:

- Masa manipulatora nie może przekroczyć 15 kg;
- Robot musi być w stanie wykonać zadania takie jak: inspekcja podwozia samochodowego, bagażnika i wnętrza, inspekcja przepustu drogowego;
- Robot powinien mieć maksymalny możliwy zasięg manipulatora;
- Robot musi być w stanie podnosić największe możliwe ciężary na maksymalnym zasięgu oraz zasięgu minimalnym.

8.2. Biblioteka rozwiązań dostępnych w projekcie

W bibliotece rozwiązań dostępnych dla projektu umieszczona została rodzina zespołów przegubów z zintegrowanymi przekładniami ślimakowymi oraz szereg łączników pomiędzy przegubami. W projekcie stosowane będą przeguby w których są zintegrowane napędy wyposażone w przekładnie ślimakowe. Przekładnie te są napędzane silnikami elektrycznymi poprzez przekładnie planetarne. W zespole przegubu manipulatora są zintegrowane sterowniki silników. Przegub jest wyposażony w sprzęgło przeciążeniowe cierne o regulowanym momencie trzymającym. Ze względu na możliwe występowanie poślizgów w sprzęgle wyposażono napęd zarówno w czujnik położenia absolutnego związany z wałem wyjściowym, jak i enkoder zintegrowany z silnikiem napędowym.

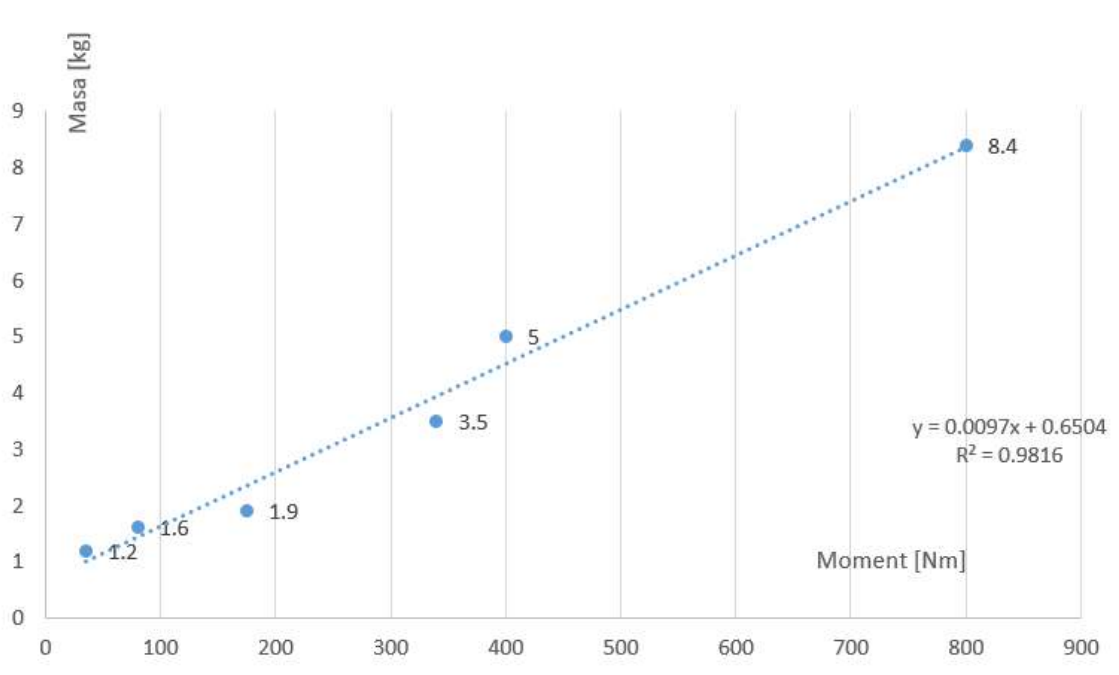
Rodzina przegubów zawiera używane we wcześniejszych projektach przykłady rozwiązań przegubów a także inne potencjalne, dopuszczalne do zrealizowania elementy rodziny, których wielkość i parametry wynikają z dostępności komponentów. Przedstawione maksymalne wartości momentu obrotowego wynikają z ograniczenia momentu obrotowego sprzęgłem przeciążeniowym. Masę elementów rodziny części przedstawioną w tabeli oszacowano na podstawie analizy istniejących przykładów modułów przegubów manipulatorów. Oprócz elementów przekładni – ślimaka i koła ślimakowego, w skład masy przegubów wchodzi korpus, wały, łożyska, uszczelnienia, sprzęgło cierne przeciążeniowe, sprzęgło, silnik z przekładnią planetarną, czujniki położenia i sterowniki. Na rysunku 8.1 przedstawiono punkty, z których wyznaczono zależność, która przybliży masę połączeń w zależności od momentu maksymalnego. Przyjęto postać liniową funkcji regresji. Funkcja

8. Implementacja opracowanej metody projektowania i optymalizacji manipulatorów

ta ma postać:

$$y = 0.0097x + 0.6504 \quad (8.1)$$

Współczynnik determinacji wynosi 0.9816.



Rys. 8.2. Zależność pomiędzy przenoszonym momentem a masą modułu napędowego

Na podstawie parametrów dotychczas wykorzystywanych modułów oraz przewidywanych parametrów modułów, o które jest możliwe rozszerzenie biblioteki stworzona została rodzina rozwiązań w której nośność i masy są przedstawione w tabeli 8.1.

Tabela 8.1. Tabela parametrów przekładni dostępnych w bibliotece.

J_ID	J_T	J_m
	Joint torque [Nm]	Joint mass [kg]
1	26	0,90
2	29	0,93
3	35	0,99
4	38	1,02
5	79	1,42
6	96	1,58
7	153	2,14
8	173	2,33
9	230	2,88
10	306	3,62
11	398	4,51
12	610	6,56
13	722	7,65

8.3. Projekt koncepcyjny manipulatora

Na podstawie wymaganych zdolności można utworzyć parametry i zależności, które będą wykorzystane w procesie projektowania i optymalizacji manipulatora. Parametry i zależności te można pogrupować na geometryczne oraz siłowe. W przyjętej metodyce na obecnym etapie brane są pod uwagę tylko te wymagania siłowe, które przekładają się na dobór układów napędowych manipulatora. Ze zbioru zadań wybrano zadania charakterystyczne, które mają największy wpływ na parametry manipulatora. Kryteria podzielono na kinematyczne i statyczne. Kryteria kinematyczne odpowiadają za zapewnienie możliwości przyjęcia odpowiedniej konfiguracji do planowanych zadań i wpływają głównie na długości członów manipulatora. Kryteria statyczne odpowiadają za to, aby ładunki mogły zostać podjęte w wybranych pozycjach. Brano pod uwagę następujące kryteria kinematyczne:

1. Maksymalizacja zasięgu sięgania pod samochód (rys.5.3a).
2. Maksymalny zasięg poziomy (rys.5.3b).
3. Minimalizacja wymiarów robota w pozycji złożonej (rys.5.3c).
4. Zmaksymalizować zasięg, sięgając poniżej poziomu gruntu (rys.5.3e).
5. Maksymalny zasięg pionowy podnoszenia ładunku (rys.5.3f).

Podczas obsługi w ciasnych przestrzeniach np inspekcja podwozia (rys.5.3a) korzystne jest, gdy chwytak jest możliwie krótki, więc jego długość została wykluczona z procesu optymalizacji. Długość przyjęto na podstawie analizy istniejącej konstrukcji. Założono, że ze względu na konieczność zachowania minimalnych wymiarów podczas transportu wysokość pierwszego członu manipulatora powinna być możliwie minimalna i została określona na podstawie analizy istniejącej konstrukcji. Zapewnia to minimalizację wysokości złożonego robota (rys. 5.3c). Ponieważ długość podstawy manipulatora i chwytaka została ustalona, dalszej optymalizacji podlegała długość ramienia i przedramienia manipulatora. Pozwoliło nam to zawęzić kryteria 8.3 i 5. Obydwa wymagania: maksymalizacja zasięgu poziomego i maksymalizacja zasięgu pionowego pokrywały się, ponieważ oba oznaczały, że im dłuższa jest suma L_2 i L_3 , tym lepiej. Kryteria te sprowadzono do jednego kryterium – maksymalizacji zasięgu poziomego. Aby móc dokonać oględzin podwozia samochodu (wymóg 8.3), dodano warunek dotyczący długości ramienia, zapewniający możliwość opuszczenia przegubu 3 manipulatora na podłoże. Przypadek kryteriów nie był już rozpatrywany, ponieważ przekłada się on na taką samą zależność jak przypadki i. Nie uwzględniano możliwości obrotu pierwszej – pionowej osi manipulatora oraz piątej osi odpowiedzialnej za obrót chwytaka wokół jego osi. W tym przypadku zadanie doboru parametrów można potraktować jako dwuwymiarowe. Jako kryteria statyczne przyjęto następujące funkcje celu:

- maksymalizacja udźwigu przy maksymalnym zasięgu (rys.5.3b);
- maksymalizacja nośności przy podnoszeniu ładunku w określonej minimalnej odległości od korpusu platformy mobilnej (rys.5.3d).

Z warunków zapewnienia możliwości przeniesienia obciążenia przez poszczególne przeguby oraz warunku zachowania stabilności platformy mobilnej robota zbudowano funkcje celu służące do maksymalizacji udźwigu robota w wybranych zadaniach.

8.4. Dobór podstawowych parametrów manipulatora

Zgodnie z zaproponowaną metodyką na podstawie analizy wymagań i dostępnych komponentów dobierane są parametry manipulatora takie jak odległości pomiędzy przegubami oraz wielkości napędów (przenoszone momenty) konieczne do zapewnienia wymaganej funkcjonalności przy utrzymaniu narzuconego limitu masy. Przyjęte oznaczenia parametrów wykozystywanych w funkcjach dopasowania pokazano na rysunku 8.1.

Dla wymienionych w poprzednim rozdziale funkcji celu przeprowadzono wielokryterialną optymalizację parametrów opisujących konfigurację manipulatora zapisanego w wektorze *Config* (7.13), przy założeniu dodatkowych ograniczeń:

- masa manipulatora nie może przekraczać przyjętego limitu 15kg;
- pierwszy przegub manipulatora (z osią pionową) musi przenosić obciążenie powstałe w wyniku poruszania się po rampie o nachyleniu bocznym 30 stopni przy całkowicie wysuniętym manipulatorze, przy maksymalnym obciążeniu, jakie może przenieść pozostałe stopnie wolności;
- długości ramion musi umożliwiać podniesienie przedmiotu w określonej odległości od przodu platformy mobilnej na określoną wysokość.
- długości ramion musi pozwolić na przyjęcie pozycji umożliwiającej inspekcję i podniesienie ładunku spod samochodu
- długości ramion musi umożliwić inspekcję i przejęcie ładunku przez okno samochodu osobowego na określonej wysokości.

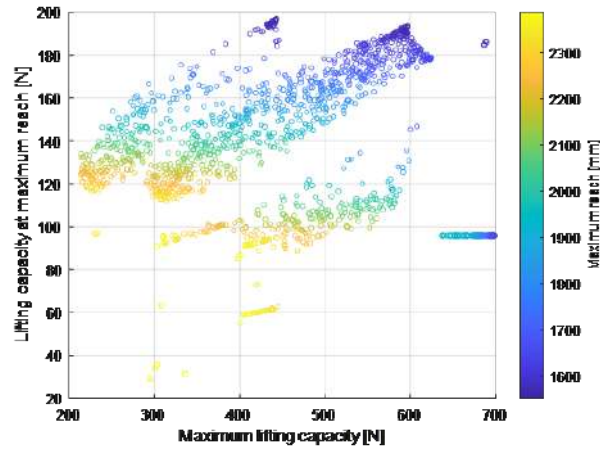
Do doboru parametrów manipulatora wykorzystano algorytm optymalizacji wielokryterialnej NSGA-II w wersji zaimplementowanej w funkcji Matlab *gamultiobj*.

Dla liczebności populacji 2000 algorytm po 206 pokoleniach osiągnął kryterium końcowe obliczeń, którym było uzyskanie różnicy średniej odległości punktów należących do frontu Pareto poniżej założonej tolerancji. Otrzymany wynik to chmura punktów w przestrzeni trójwymiarowej, która jest trudna do wizualizacji w dwóch wymiarach. Rysunek 8.3 przedstawia trzy wykresy tych samych wartości funkcji dopasowania f_1 (równanie 7.15), f_2 (równania 7.16), f_3 (równanie 7.17) dla ostatecznej generacji działania algorytmu. Wartości funkcji w trzecim wymiarze zostały zakodowane kolorem.

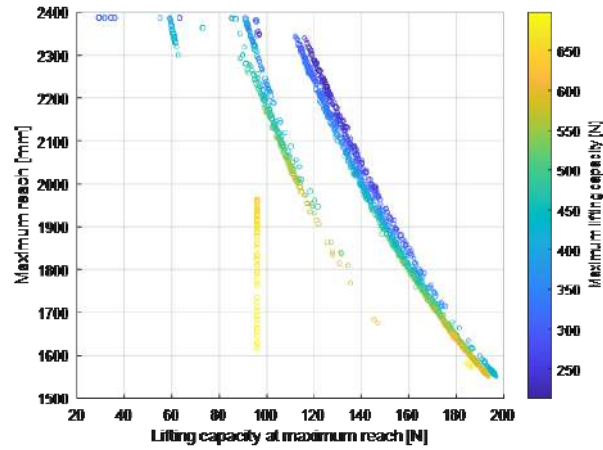
Można zauważyć, że wyniki podzielone są na grupy punktów rozmieszczonych na powierzchniach, co jest szczególnie widoczne na rysunku 8.3b.

Na rysunkach 8.4a i 8.4b przedstawiono te same grupy wartości funkcji przystosowania, jednak zaznaczono kolorem maksymalny moment przenoszony przez przegub 3 ramię manipulatora.

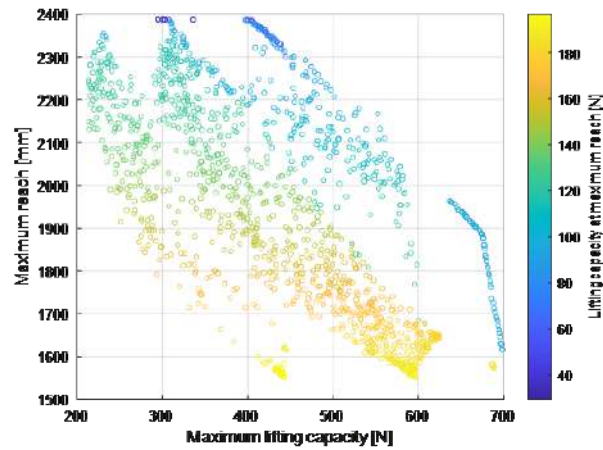
(a)



(b)

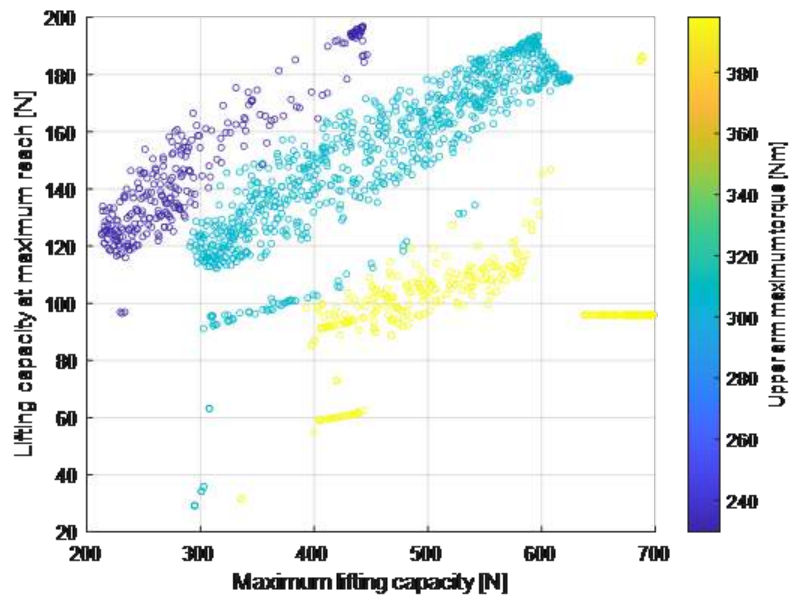


(c)

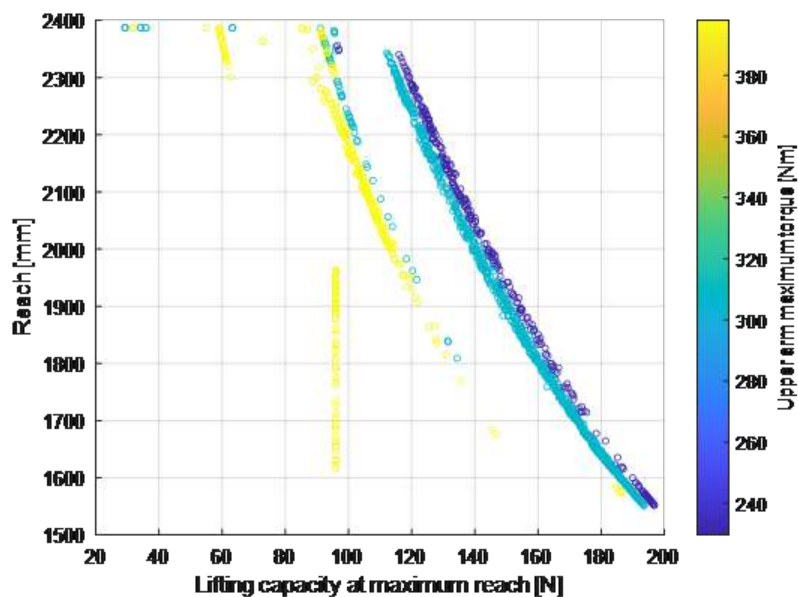


Rys. 8.3. Wartości trzech funkcji przystosowania dla ostatniej generacji parametrów manipulatora, pokazane odpowiednio na osiach X i Y wykresu, oraz wartość trzecia, zakodowana kolorem: a - $f_1 - f_2 - f_3$, b - $f_2 - f_3 - f_1$, c - $f_1 - f_3 - f_2$

(a)

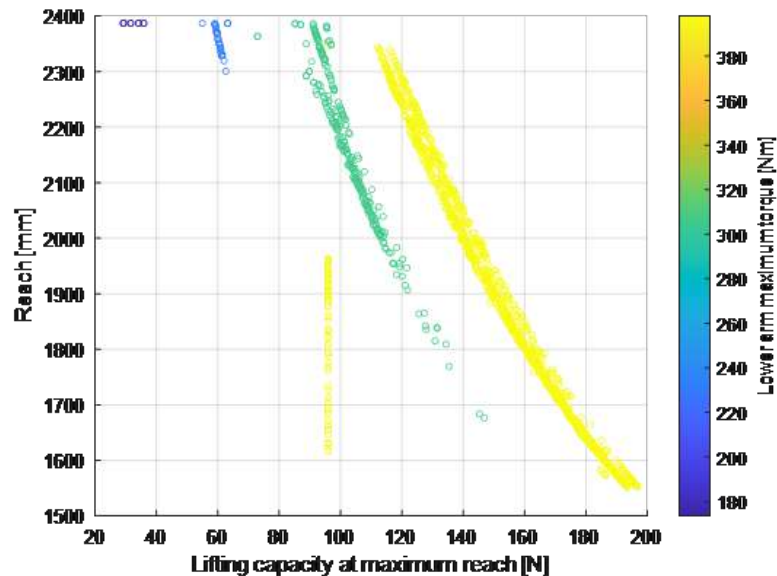


(b)



Rys. 8.4. Wartości trzech funkcji przystosowania dla ostatniej generacji parametrów manipulatora, pokazane, odpowiednio na osiach X i Y oraz zakodowane kolorem maksymalne momenty w przegubach manipulatora: a - $f_1 - f_2 - M_{max3}$, b $f_2 - f_3 - M_{max3}$

Na rysunku 8.5 przedstawiono warstwy punktów reprezentujących wartości funkcji przystosowania przy maksymalnym momencie obrotowym ramienia manipulatora, co jest oznaczone kolorem. Można zauważyć, że istnieje grupa wyników, które mają stały udźwąg przy maksymalnym wysięgu. Okazało się, że w tej grupie wyników udźwąg jest ograniczony momentem obrotowym chwytaka.



Rys. 8.5. Wartości funkcji przystosowania dla ostatniej generacji parametrów manipulatora. Wykres $f_1 - f_2 - M_{max2}$

Poszczególne grupy rozwiązań umiejscowione są na powierzchniach, które grupują rozwiązania ze względu na wybrane rozmiary przegubów łokcia i barku. Na wykresach widać, że w końcowej generacji wyników konfiguracji manipulatora zastosowano 3 rozmiary stawów łokciowych i 4 rozmiary stawów barkowych. Wybrane konfiguracje i wartości funkcji przystosowania dla rozwiązań z frontu Pareto przedstawiono w tabeli 8.2.

Można zauważyć, że najlepsze oceny funkcji przystosowania udźwigu na maksymalnym wysięgu występują w konfiguracjach, w których największe przeguby znajdują się w stawie barkowym, a kolejne stopnie swobody są coraz mniejsze. W przypadku funkcji dopasowania odpowiedzialnej za maksymalizację udźwigu manipulatora najlepsze oceny uzyskały konfiguracje, w których przekładnie napędzające przedramię były równie duże lub większe niż koła zębate napędzające ramię. W pozycjach, jakie musi przyjąć manipulator podczas podnoszenia z podłoża cięższych ładunków, najbardziej obciążony jest staw ramienia. Można także zauważyć, że masy manipulatorów w zaproponowanych konfiguracjach wynikowych wykorzystują niemal cały limit mas.

W wyniku działania procedury otrzymywany jest front Pareto rozwiązań, wśród których należy wybrać to rozwiązanie, które będzie podstawą do działań w dalszej części procedury.

Tabela 8.2. Wybrane rozwiązania z frontu Pareto

ID	Udźwig przy maksymalnym zasięgu [N]	maksymalny udźwig [N]	Wysięg [mm]	Maksymalny moment przegubu nadgarstka [Nm]	Maksymalny moment przegubu przedramienia [Nm]	Maksymalny moment przegubu ramienia [Nm]	Maksymalny moment przegubu podstawy [Nm]	Długość chwytaka [mm]	Długość przedramienia [mm]	Długość ramienia [mm]	Długość podstawy [mm]	Masa [kg]
1	186	578	1602	79	306	398	230	396	523	683	211	14.1
2	178	599	1651	79	306	398	230	396	520	735	211	14.1
3	172	524	1703	79	306	398	230	396	581	726	211	14.2
4	166	528	1750	79	306	398	230	396	589	765	211	14.2
5	164	339	1800	79	230	398	230	396	658	746	211	13.5
6	155	431	1850	79	306	398	230	396	696	759	211	14.3
7	151	368	1902	79	306	398	230	396	791	715	211	14.4
8	148	307	1952	79	230	398	230	396	733	823	211	13.6
9	118	478	1983	79	306	306	230	396	689	899	211	13.5
10	140	399	2001	79	306	398	230	396	764	842	211	14.5
11	113	559	2004	79	398	306	230	396	737	871	211	14.5
12	111	466	2050	79	398	306	230	396	834	820	211	14.5
13	134	277	2103	79	230	398	230	396	816	891	211	13.8
14	102	469	2150	79	398	306	173	396	852	902	211	14.1
15	98	473	2201	79	398	306	173	396	861	943	211	14.1
16	123	229	2250	79	230	398	230	396	944	910	211	13.9
17	63	444	2301	38	398	230	173	396	917	988	211	12.9
18	89	422	2350	35	398	306	173	396	960	994	211	13.8
19	29	295	2387	153	306	173	230	396	992	999	211	13.2

8.5. Wyznaczenie przypadków obciążeń

W dalszych działaniach przyjęto parametry zbliżone do dostępnego manipulatora robota PIAP Patrol. Zgodnie z metodą wyznaczano maksymalne obciążenia, które występują po zablokowaniu ruchu chwytaka o przeszkodę, uwzględniając obciążenia wynikające z składowej osiowej momentu obciążającego oraz ze składowej działającej w kierunku promieniowym.

8.5.1. Obciążenie składową momentu, działającą w kierunku promieniowym przegubu

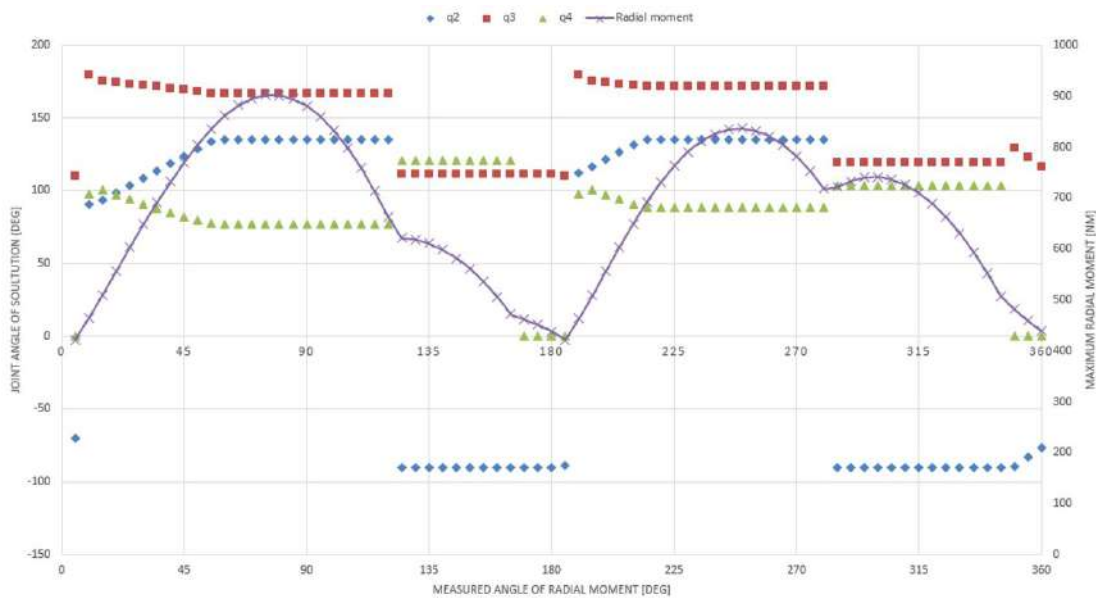
Wyznaczenie maksymalnych obciążeń w przypadku kolizji chwytaka manipulatora z przeszkodą można wyznaczyć poprzez poszukiwanie konfiguracji manipulatora, która dla zablokowania możliwości ruchu końcówki roboczej spowoduje maksymalne obciążenia podczas próby ruchu przegubami z maksymalnym momentem. Można zauważyć, że po zablokowaniu możliwości ruchu chwytaka momenty generowane w osiach 2, 3 i 4 (7.13) nie mają w tych osiach składowych promieniowych a składowe osiowe nie mogą być większe niż maksymalny moment przenoszony przez sprzęgła przeciążeniowe tych przegubów. Inaczej jest w przypadku działania momentu napędowego w osi 1, który po zablokowaniu końcówki roboczej generuje obciążenia w przegubach 2,3 i 4 o składowych promieniowych, które przy założeniu przyłożenia maksymalnego momentu które może przenieść oś 1, są zależne tylko od konfiguracji manipulatora. Te składowe obciążenia przegubów 2,3 i 4 nie są ograniczone sprzęgłami przeciążeniowymi lecz po przekroczeniu granicznego obciążenia robot będzie się przewracał co zapobiegnie dalszemu wzrostowi obciążenia. Na przykładzie przegubu 3 manipulatora w rozdziale xx został pokazany sposób obliczania obciążenia w interesującym nas kierunku.

Po zaimplementowaniu opracowanego algorytmu otrzymane zostały konfiguracje, które generowały największe obciążenia momentem promieniowym w kierunkach określonych kątem α . Dla przegubu 3, którego wyniki są najciekawsze, przebieg maksymalnego momentu promieniowego w zależności od kąta poszukiwań α przedstawiony został na rysunkach 8.6 oraz 8.7.

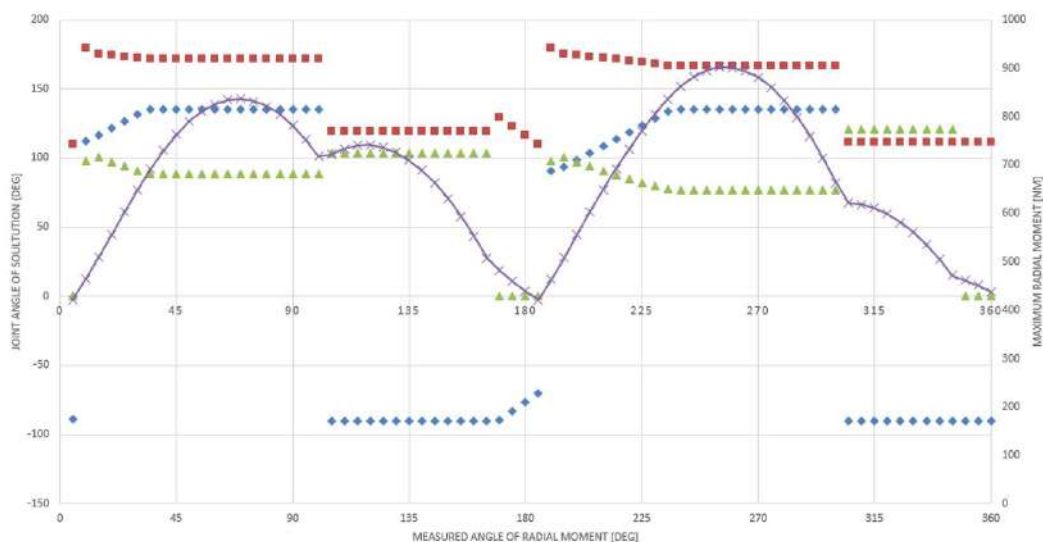
Na rysunku 8.7 pokazane są maksymalne momenty promieniowe w przegubie 3, w zależności od kąta α uzyskane po uwzględnieniu największych wartości z dwóch kierunków obrotów.

Moment M_1 z którym, podczas symulacji, oddziaływał przegub w osi 1 wynosił 70Nm. Można zauważyć, że zostały znalezione konfiguracje położenia manipulatora przy których zablokowanie ruchu chwytaka przy takim momencie w podstawie manipulatora może generować nawet do 900Nm momentu w kierunku promieniowym w przegubie 3 manipulatora. Czyli w przy tych przełożenie momentów jest blisko trzynastokrotne. Wybrane konfiguracje manipulatora które generują największe obciążenia momentem działającym w różnych kierunkach promieniowych pokazane zostały na rysunku 8.8. Podstawa manipulatora jest umieszczona w punkcie (0,0) układu współrzędnych. Jasno niebieskie linie

(a)



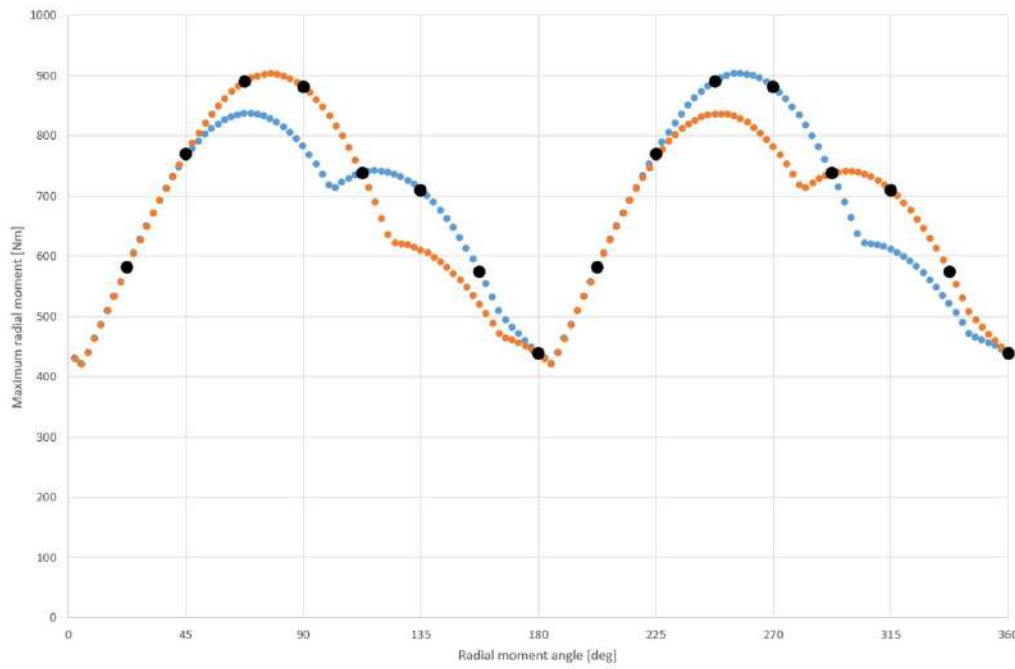
(b)



Rys. 8.6. Maksymalne momenty promieniowe w przegubie 3 w zależności od kąta pomiaru α oraz odpowiadające im konfiguracje współrzędnych wewnętrznych: a - kierunek obrotu pierwszej osi dodatni, b - kierunek obrotu pierwszej osi ujemny.

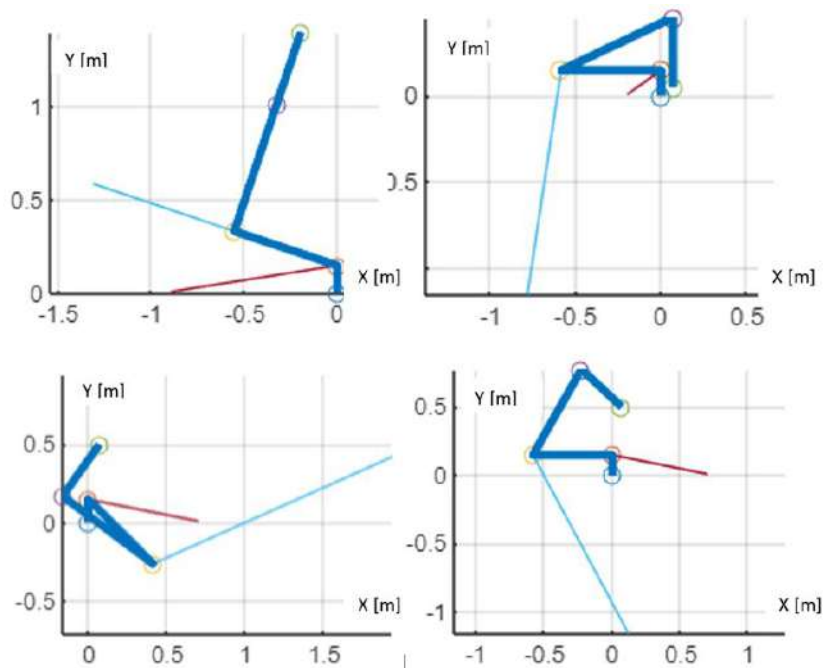
ilustrują moment obciążający przegub 3, Czerwone linie lustrują moment działający w przegubie 2. Można zauważyć, że konfiguracje, które zostały znalezione jako generujące największe momenty promieniowe w przegubie 3 manipulatora, działające w wybranych kierunkach charakteryzują się tym, że punkty końcówki chwytaka umiejscowione są blisko osi obrotu przegubu 1, wobec czego zbliżają się do punktów osobliwych. Oczywiście siła z jaką chwytak napiera na przeszkodę w tak postawionym zadaniu dąży do nieskończoności

8. Implementacja opracowanej metody projektowania i optymalizacji manipulatorów



Rys. 8.7. Maksymalne momenty promieniowe w przegubie 3 w zależności od kąta pomiaru α

w miarę zbliżania się punktu kontaktu do osi przegubu 1, jednakże utrata przyczepności lub stateczności robota ogranicza wzrost sił ponad wartości graniczne.



Rys. 8.8. Konfiguracje manipulatora, dla których momenty promieniowe działające w wybranych kierunkach, w przegubie 3, są największe.

Momenty wyznaczone w opisaney procedurze należy uwzględnić przy definiowaniu poszczególnych przypadków obciążeń, które zostaną wykorzystane w kolejnym etapie,

8. Implementacja opracowanej metody projektowania i optymalizacji manipulatorów

podczas optymalizacji topologicznej korpusu złącza. Poszczególne przypadki obciążeń tworzone są poprzez sumowanie obciążeń uzyskanych w opisanej procedurze z pozostałymi obciążeniami.

8.5.2. Obciążenie składową momentu, działającą w kierunku osiowym przegubu

W przypadku rozpatrywanego przegubu obciążenia wynikające z obciążenia składową osiową momentu są tożsame z obciążeniami, które są powodowane pracą przekładni ślimakowej z maksymalnym momentem. Rozkład obciążenia w przekładni ślimakowej wyznacza się ogólnie znanymi metodami przedstawionymi np. w pracach [141] oraz [46]. Dla przykładowej przekładni, przyjęto do obliczeń następujące parametry wejściowe:

- $a_w = 45mm$ - odległość kół przekładni;
- $d_w = 19.5mm$ - średnica ślimaka
- $d_g = 70.5mm$ - średnica ślimaka
- $M_{wy} = 77Nm$ - maksymalny moment wyjściowy przekładni;
- $m_x = 2$ - moduł przekładni;
- $u = 47$ - przełożenie przekładni;
- $z_1 = 1$ - liczba zębów ślimaka;
- $z_2 = 47$ - liczba zębów ślimacznicy;
- $m_x = 2$ - kąt przyporu;
- $\mu = 0.02$ - współczynnik tarcia;
- $\eta_p = 0.96$ - sprawność łożyskowania;
- $\gamma = 4.399^\circ$ - kąta wzniosu linii śrubowej;

Obliczenie sprawność przekładni:

$$\rho' = \arctan\left(\frac{\mu}{\cos\alpha_n}\right) = 1.219^\circ - \text{pozorny kąt tarcia} \quad (8.2)$$

$$\eta_z = \frac{tg\gamma}{tg(\gamma + \rho')} = 0.782 - \text{sprawność zazębienia} \quad (8.3)$$

$$\eta = \eta_z * \eta_p = 0.75 - \text{sprawność przekładni} \quad (8.4)$$

Obliczenie wymaganego momentu wejściowego przekładni:

$$M_{we} = \frac{M_{wy}}{u * \eta} = 2Nm \quad (8.5)$$

Obliczenie sił międzyzębnych przekładni:

$$F_1 = \frac{2 \cdot M_{we}}{d_w} = 225N - \text{siła obwodowa ślimaka} \quad (8.6)$$

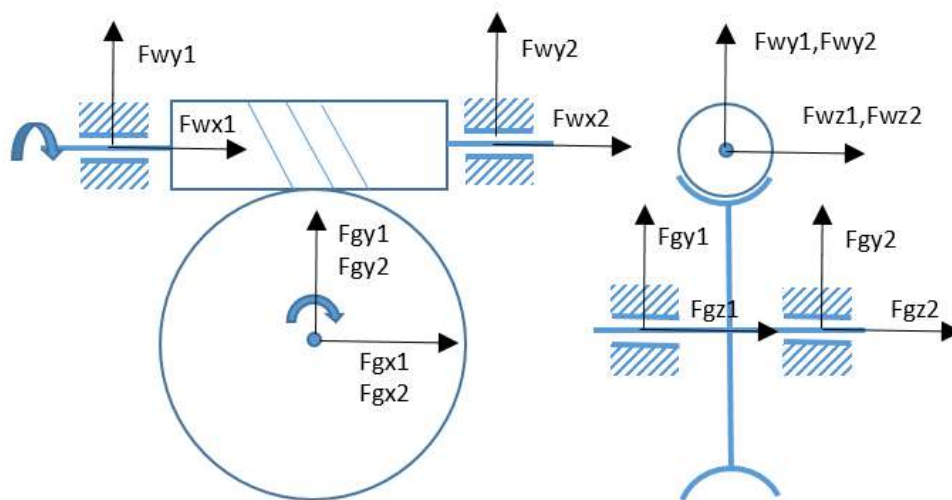
$$F_{x1} = \frac{F_1}{tg(\gamma + \rho')} = 2294N - \text{siła osiowa ślimaka} \quad (8.7)$$

$$F_{r1} = F_{x1} \cdot tg\alpha_x = 837N - \text{siła promieniowa ślimaka} \quad (8.8)$$

gdzie:

$$\alpha_x = \arctan\left(\frac{tg\alpha_n}{\cos\gamma}\right) = 20.054^\circ - \text{kąt zarysu w przekroju osiowym} \quad (8.9)$$

. Znając siły międzyzębne można przejść do obliczenia reakcji wałów przekładni. Oznaczenia poszczególnych sił zostały przedstawione na rys. 8.9.



Rys. 8.9. Siły występujące w przekładni przegubu manipulatora

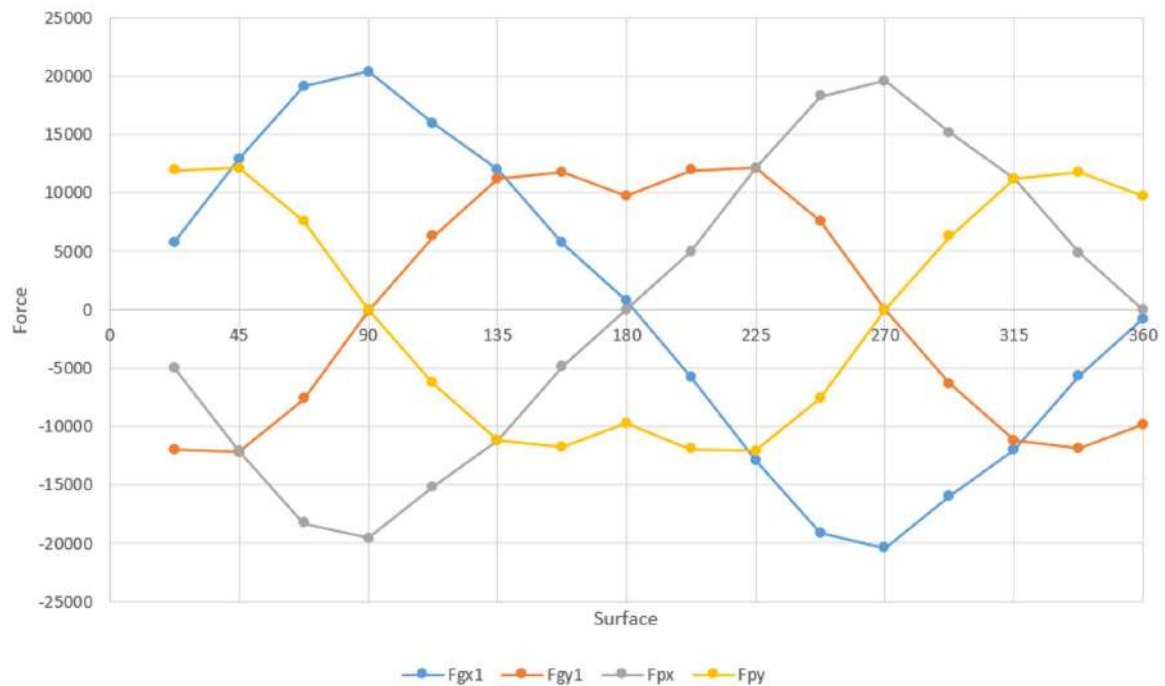
Znając siły międzyzębne z równań równowagi momentu należy obliczyć reakcje łożysk wałów przekładni, które będą agregowane z siłami uzyskanymi z wcześniejszego punktu.

8.5.3. Agregacja obciążeń

Suma sił wynikających z działania przekładni oraz sił zmieniających się w zależności od rozpatrywanego kierunku obciążenia definiuje poszczególne stany obciążenia. Rozkład maksymalnych sił w łożyskach kół ślimakowych w zależności od kąta promieniowego momentu obrotowego działającego na przegub 3 pokazano na rysunku 8.10.

Na podstawie uzyskanych wyników zdefiniowano 16 stanów obciążenia. W tabeli 8.3 przedstawiono składowe siły działające na łożyska ślimacznicy przekładni.

Pozostałe obciążenia w przekładni obciążenia łożysk ślimaka były wspólne dla wszystkich przypadków obciążenia i wynikały one z największych obciążeń podczas działania przekładni przy ruchu w obie strony.



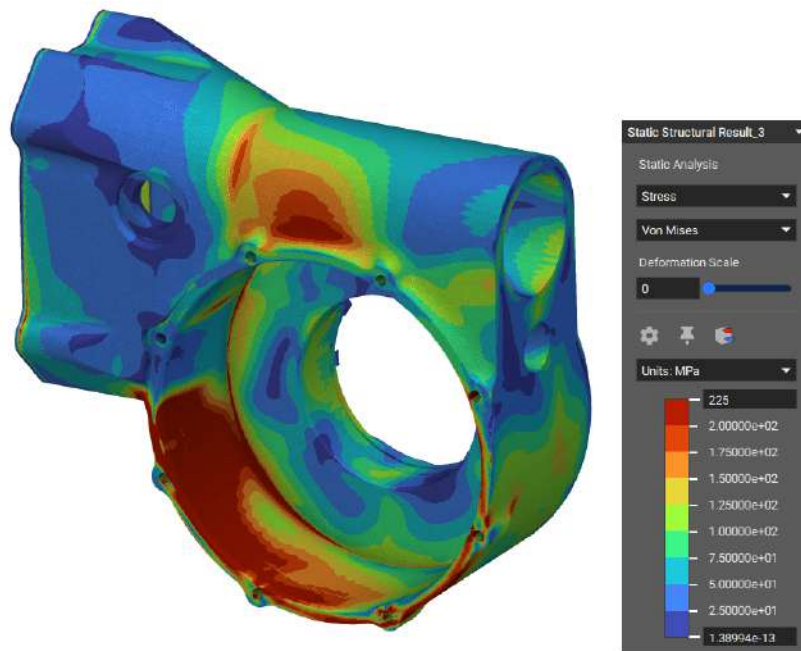
Rys. 8.10. Siły działające na wybrane powierzchnie przegubu 3, w zależności od kąta poszukiwania maksymalnego momentu promieniowego.

Tabela 8.3. Siły wywierane na korpus przez łożyska ślimacznicy przegubu - 16 przypadków obciążenia

kąt [°]	Fgx1 [kN]	Fgy1 [kN]	Fpx [kN]	Fpy [kN]
22.5	5.759	-12.008	-4.941	11.929
45	12.920	-12.181	-12.102	12.102
67.5	19.084	-7.646	-18.266	7.566
90	20.389	-0.080	-19.571	0
112.5	15.961	6.273	-15.144	-6.273
135	11.973	11.156	-11.156	-11.156
157.5	5.701	11.788	-4.883	-11.788
180	0.818	9.763	0	-9.763
202.5	-5.759	11.929	4.941	-11.929
225	-12.920	12.102	12.102	-12.102
247.5	-19.084	7.566	18.266	-7.566
270	-20.389	0	19.571	0
292.5	-15.961	-6.352	15.144	6.273
315	-11.973	-11.235	11.156	11.156
337.5	-5.701	-11.868	4.883	11.788
360	-0.818	-9.842	0	9.763

8.6. Weryfikacja wytrzymałości wybranego komponentu

Uzyskane przypadki obciążeń pozwalają sprawdzić czy elementy wybrane z biblioteki komponentów spełniają wymagania wytrzymałościowe. Przeprowadzono analizy mes standardowego korpusu wykorzystywanej przekładni. Na rysunku 8.11 pokazane są naprężenia zredukowane, dla stanu obciążenia odpowiadającego kątowi α równym 22.5 stopnia. Ilustracja pokazuje, że standardowy korpus nie ma wystarczającego współczyn-



Rys. 8.11. Naprężenia zredukowane modelu oryginalnej części korpusu

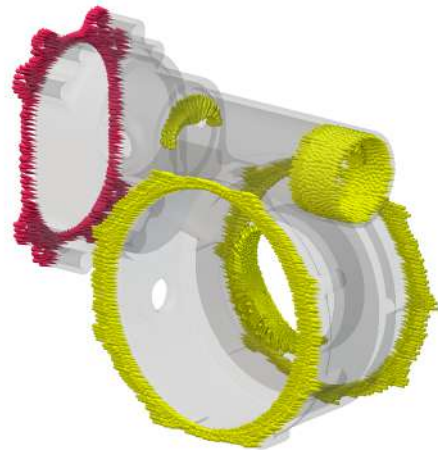
nika bezpieczeństwa dla wybranego stanu obciążenia i konieczne jest przeprowadzenie optymalizacji korpusu lub wyeliminowanie możliwości obciążenia w takim stopniu. W tym przypadku przeprowadzenie optymalizacji topologicznej będzie korzystne, nawet jeśli nie zostanie uzyskana redukcja masy.

8.7. Minimalizacja masy struktury manipulatora

Siły obliczone w poprzednim etapie zostaną wykorzystane do zdefiniowania przypadków obciążeń w optymalizacji topologicznej elementów robota. Dalszy proces optymalizacji zostanie zaprezentowany na przykładzie korpusu przegubu manipulatora 3. Dla wybranego korpusu zdefiniowano przestrzeń optymalizacyjną, w której poszukiwano rozwiązania problemu oraz przestrzeń pasywną, która nie podlega modyfikacji podczas optymalizacji (rys. 8.12)



Rys. 8.12. Przestrzeń projektowa (przezroczysta) i przestrzeń pasywna (szara) korpusu przegubu manipulatora



Rys. 8.13. Warunki brzegowe przy optymalizacji korpusu przegubu (czerwone oznaczenia - utwierdzenie modelu, żółte oznaczenia - siły przyłożone do elementów modelu)

Przestrzeń projektu (rys. 8.12) została skonstruowana tak, aby jej objętość była jak najmniejsza, ale nie ograniczała działania algorytmu optymalizacyjnego. Przestrzeń ta została również odpowiednio wycięta, aby w powstałym elemencie zapewnić miejsce na elementy przekładni, kable i układy elektroniczne. Przestrzeń pasywna została zbudowana z cienkościennych prymitywów. Przestrzeń ta definiuje interfejsy do mocowania komponentów złącza, do których zostaną również zastosowane wiązania i obciążenia; Przestrzeń pasywna została zbudowana w taki sposób, aby zapewnić szczelność powstałej konstrukcji oraz zagwarantować możliwość poprowadzenia kabli pomiędzy poszczególnymi przedziałami nadwozia. Przestrzeń pasywna jest funkcjonalnie pełnoprawnym modelem korpusu przekładni, jednak nie uwzględnia wymagań wytrzymałościowych. Optymalizacja topologiczna ma na celu taką modyfikację modelu, aby spełniało ono również warunki wytrzymałościowe. Należy zaznaczyć, że modele przestrzeni pasywnej i przestrzeni projektowej są powiązane z daną przekładnią o danej nośności i zgodnie z przyjętą metodologią definiowane są na poziomie biblioteki części. Warunki brzegowe pokazane są w przestrzeni pasywnej (rys. 8.13). Część jest mocowana na lewej powierzchni (oznaczenia czerwone), a obciążenia przykładane są na powierzchnie stykające się z

łożyskami i innymi elementami (znaki żółte). Rysunek przedstawia jeden z przypadków obciążenia, w którym maksymalny moment promieniowy występuje pod kątem 90 stopni.

Obliczenia zostały przeprowadzone metodą SIMP w oprogramowaniu nTopology [142].

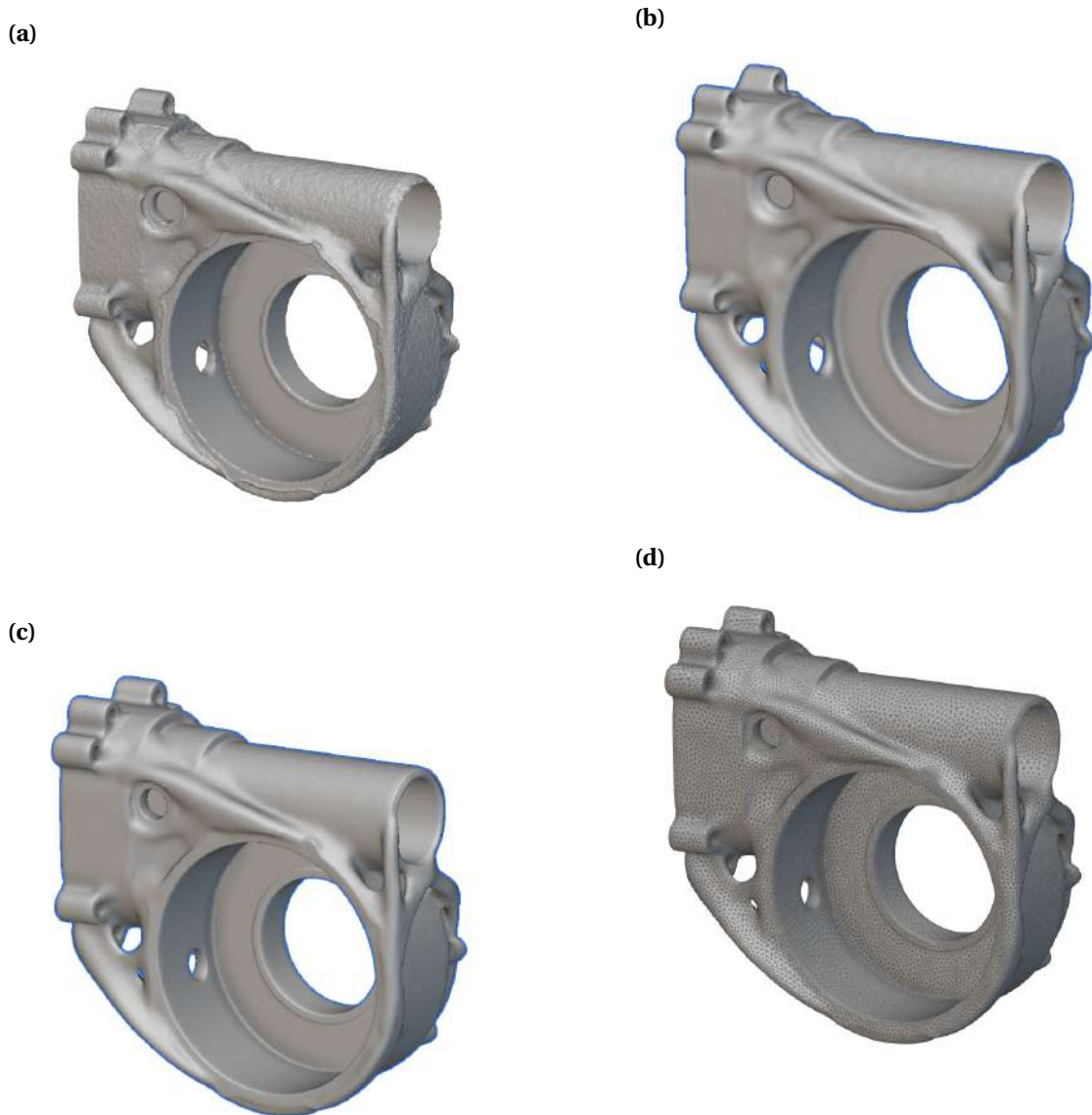
W pierwszej kolejności przeprowadzono obliczenia z siatką o niższej rozdzielczości. Masę zminimalizowano przy więzach wynikających z maksymalnych naprężeń. Wyniki pokazały, że możliwe jest zmniejszenie masy części do 25% masy początkowej przestrzeni projektowej. Następnie przeprowadzono optymalizację na siatce o wyższej rozdzielczości. Aby skrócić czas obliczeń, zmieniono ustawienia optymalizacji tak, aby zmaksymalizować sztywność konstrukcji przy narzuconym warunku redukcji masy wynoszącym 25% masy przestrzeni projektowej. Materiał korpusu to EN AW-7075. Nie definiowano więzów produkcyjnych. Geometria wynikowa po optymalizacji pokazana jest na rysunku 8.14.



Rys. 8.14. Wynik optymalizacji topologicznej korpusu przegubu manipulatora

Uzyskana geometria (rys. 8.15) została przekształcona na model implicit, wygładzona a następnie zsumowana z modelem obszaru pasywnego. Dla tak uzyskanego modelu wygenerowana została siatka, która została wykorzystana do weryfikacji wyników metodą MES. Masa uzyskanego modelu wyniosła 343g.

Dla uzyskanego modelu przeprowadzono weryfikację metodą MES. Na rys. ?? pokazany jest wynik weryfikacji dla przypadku obciążenia $\alpha = 22.5^\circ$.



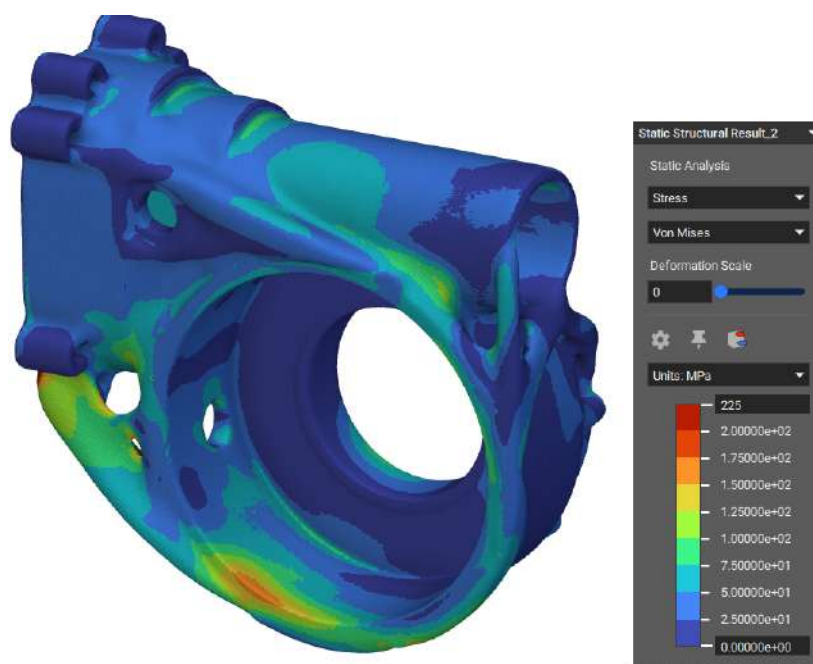
Rys. 8.15. Obróbka siatki wynikowej optymalizacji topologicznej. (a) - siatka TO, (b) - wygładzony model implicit, (c) - model implicit zsumowany z modelem przestrzeni pasywnej, (d) - siatka wygenerowana z modelu (c)

8.8. Dobór liczby przypadków obciążeń

Dla weryfikacji postawionej w opisie metody tezy, która mówi, że wystarczające jest rozpatrzyć 4 przypadki obciążenia, wykonano obliczenia dla różnej liczby stanów obciążenia różniących się kątem działania maksymalnego momentu promieniowego w przegubie (tabela 8.3). Rozważano następujące warianty obliczeń:

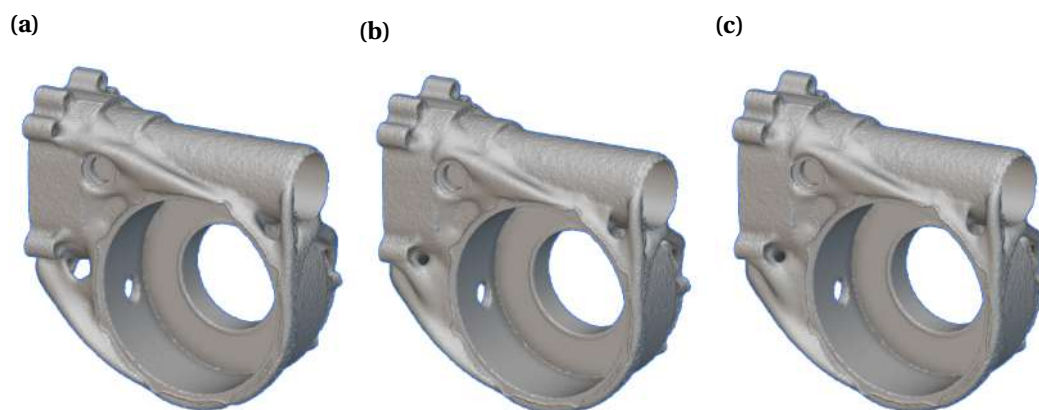
1. 4 stany obciążenia różniące się kierunkiem działania siły co 90 stopni,
2. 8 stanów obciążenia różniących się kierunkiem działania siły co 45 stopni,
3. 16 stanów obciążenia zmieniających się w kierunku działania siły co 22,5 stopnia,

Podczas optymalizacji minimalizowana była podatność konstrukcji i narzucony był waru-



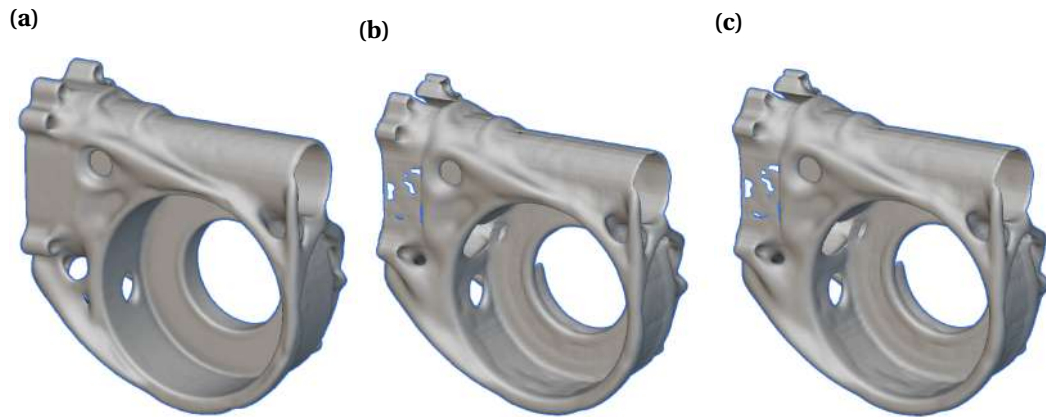
Rys. 8.16. Naprężenia zredukowane modelu wynikowego optymalizacji topologicznej

nek ograniczenia objętości do 25% objętości przestrzeni projektu. Wielkość siatki 1mm. Przestrzeń projektu miała 2 276 066 elementów. Założono materiał EN-AW7075. Nie narzucano więzów wykonawczych.

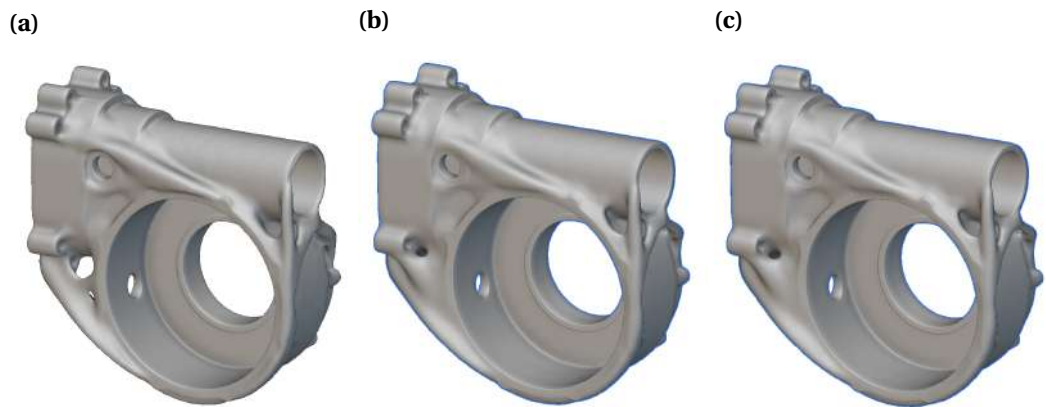


Rys. 8.17. Wyniki optymalizacji dla różnej liczby przypadków obciążeń: a - 4, b - 8, c - 16

Na rysunku 8.17 , można zauważyć, wyniki optymalizacji są zbliżone niezależnie od liczby uwzględnionych przypadków obciążeniowych. Rysunki 8.18 oraz 8.19 pokazują modele po procesie wygładzenia przygotowania zgodnie z obraną metodą. Analiza pokazuje, że objętości uzyskanych składowych pokrywają się w 95,5% dla porównania wyników 1 i 2 oraz w 99,6% dla porównania wyników 2 i 3. Ponadto rezultat uzyskany przy rozpatrywaniu 8 cechował się mniejszą sztywnością niż rezultat uzyskany dla 4 przypadków obciążenia (podatność ważona wzrosła o 5%). Dla rozwiązania uzyskanego

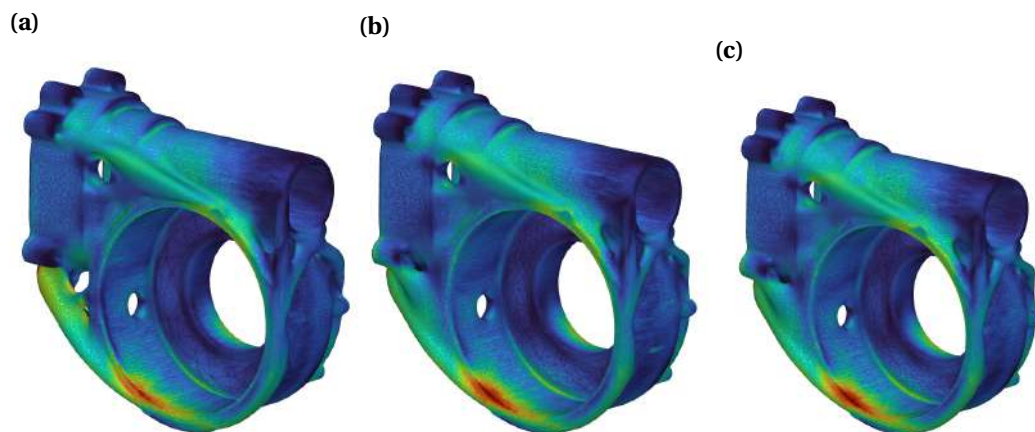


Rys. 8.18. Modele implicit dla różnej liczby przypadków obciążeń: a - 4, b - 8, c - 16



Rys. 8.19. Modele implicit zsumowane z modelami przestrzeni pasywnych dla różnej liczby przypadków obciążeń: a - 4, b - 8, c - 16

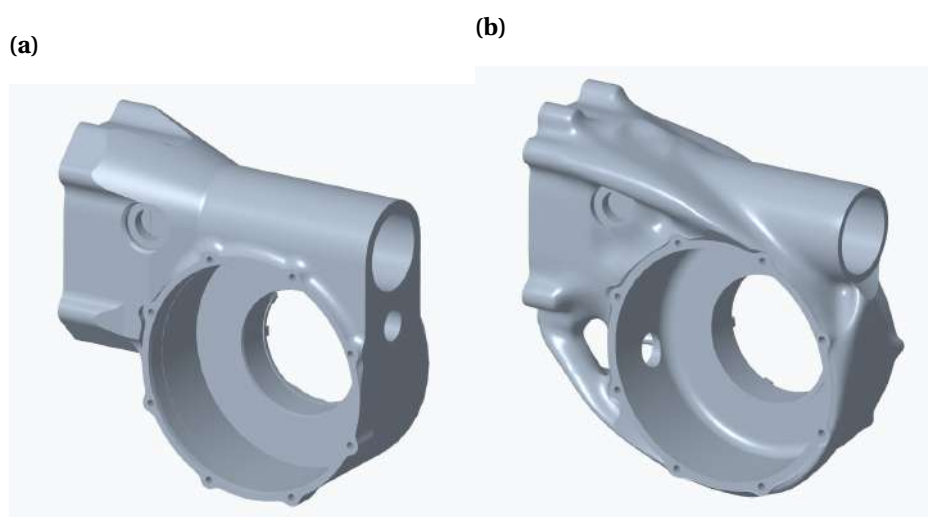
przy rozpatrywaniu 16 przypadków obciążenia uzyskano sztywność mniejszą o 3 procent. Przeprowadzona analiza MES dla uzyskanych modeli (rys. 8.20) wykazała, że naprężenia w częściach są akceptowalne dla każdego rozpatrywanego przypadku i bardzo do siebie zbliżone. Otrzymane wyniki potwierdzają, że dla tego typu konstrukcji wystarczające jest przyjąć przypadki obciążenia odpowiadające obciążeniu momentem promieniowym co 90° . Należy jednak podkreślić, że wyniki optymalizacji topologicznej mogą się różnić w zależności np. od przestrzeni projektowej i rozmiaru siatki, jest to więc proces, w którym warto przetestować wiele rozwiązań metodą prób i błędów. Ponadto znalezione rozwiązania mają charakter lokalnie optymalny. Okazało się, że dodanie ograniczeń produkcyjnych pozwoliło na uzyskanie lepszego wyniku z punktu widzenia funkcji celu.



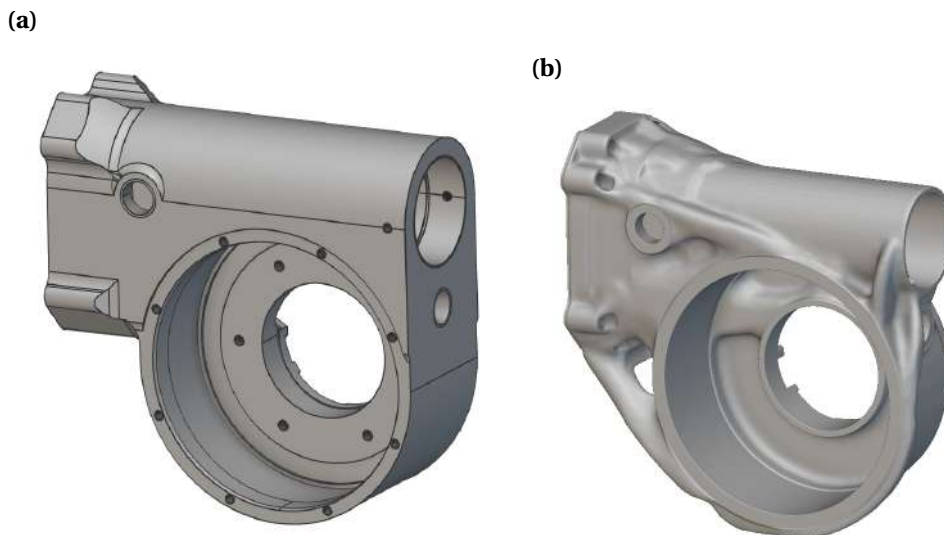
Rys. 8.20. Naprężenia w korpusie pod wpływem obciążenia $\alpha = 45^\circ$ dla różnych przypadków obciążeń: a - 4, b - 8, c - 16

8.9. Optymalizacja komponentów manipulatora

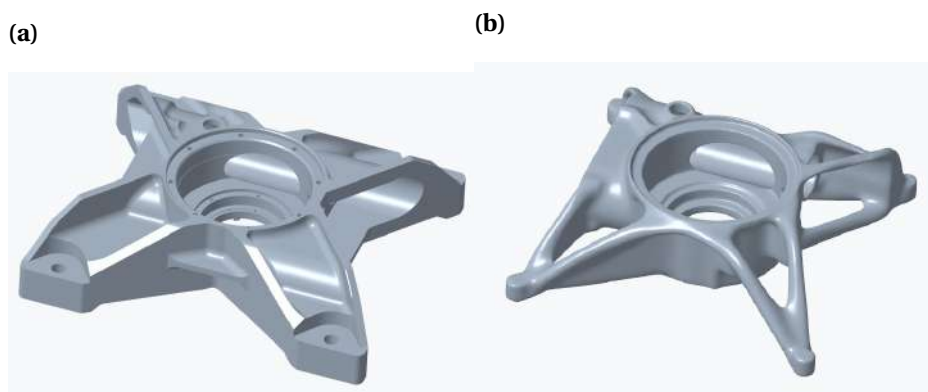
Zgodnie z opracowaną metodą przeprowadzono optymalizację wybranych komponentów manipulatora robota. Optymalizację wykonano z narzuceniem więzów wykonawczych pozwalających na rozformowanie elementu. Narzucone ograniczenie zostało tak skonfigurowane, żeby wynikowa geometria była także możliwa do wykonania poprzez obróbkę CNC. Optymalizację wykonano w oprogramowaniu PTC Creo. Na rysunkach 8.21, 8.22, 8.23 przedstawione są modele komponentów oryginalnych oraz optymalizowanych wraz z ich masami.



Rys. 8.21. Optymalizacji korpusu przegubu 3 manipulatora z narzucenymi więzami wykonawczymi (a) - część oryginalna (masa 305g), (b) - część optymalizowana przygotowana w systemie CAD (masa 315g)



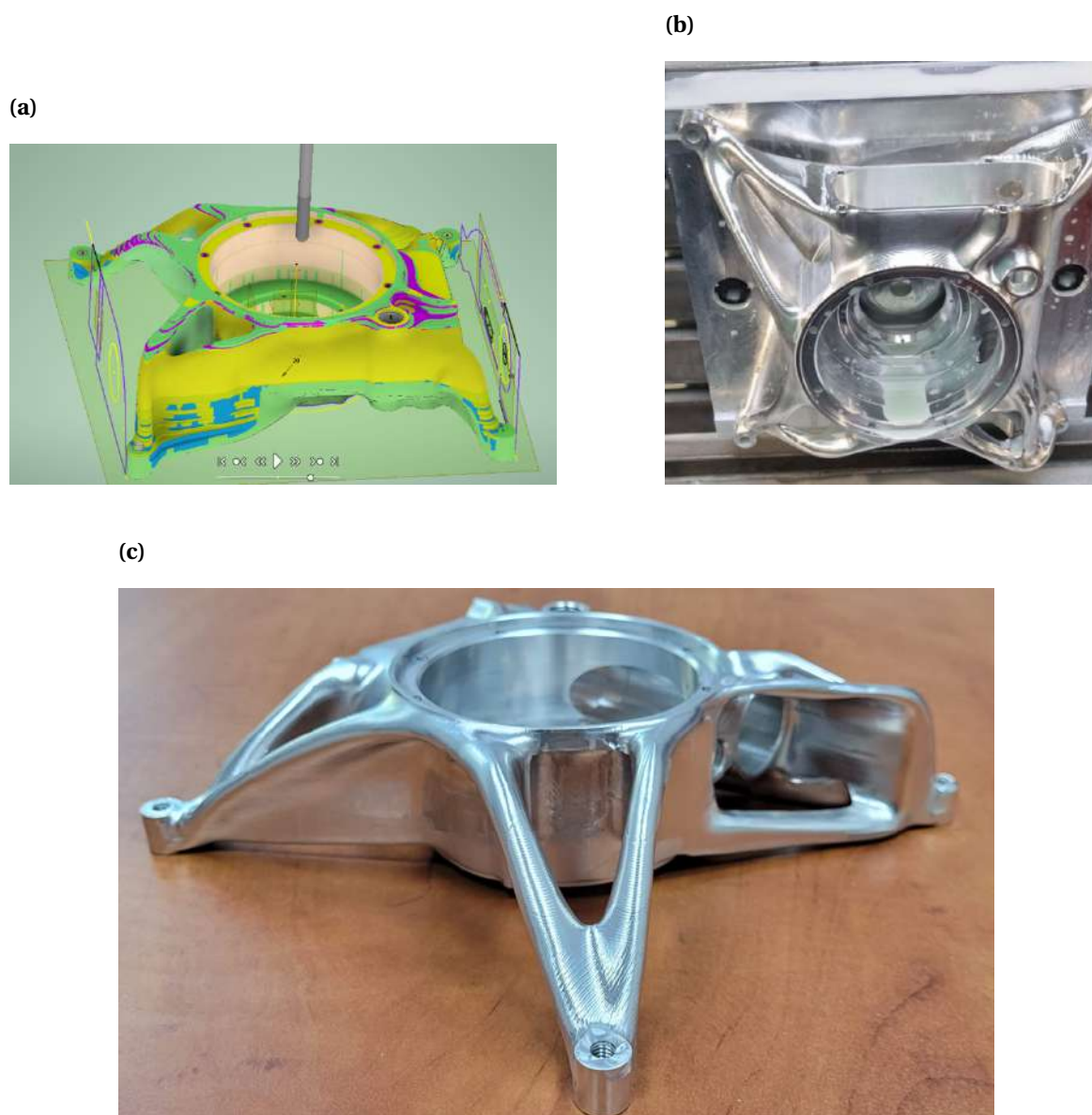
Rys. 8.22. Optymalizacji korpusu przegubu 2 manipulatora z narzuconymi więzami wykonawczymi (a) - część oryginalna (masa 430g), (b) - część optymalizowania (masa 335g)



Rys. 8.23. Optymalizacji korpusu przegubu 1 - podstawy manipulatora z narzuconymi więzami wykonawczymi (a) - część oryginalna (masa 939g), (b) - część zoptymalizowania (masa 575g)

Korpus przegubu pierwszego, którego model jest pokazany na rysunku 8.23b została wykonana technologią CNC na maszynie 3 osiowej (rys. 8.24). Część została wykonana z stopu aluminium EN AW2017A (rys. 8.24c).

Komponent został zintegrowany z testowym manipulatorem robota PIAP Patrol 8.25, który jest wykorzystywany w celach badawczych i marketingowych. Dzięki temu zredukowano masę manipulatora o 360g. Chociaż redukcja masy tej części, ze względu na swoje położenie nie poprawia zdolności podnoszenia manipulatora, uzyskano korzystniejszy współczynnik masy podnoszonej do masy urządzenia. Robot podlegał standardowym, zakładowym testom, podczas których sprawdzane jest osiągnięcie wymaganej dla tego manipulatora możliwość podnoszenia ciężarów.



Rys. 8.24. Wykonanie korpusu przegubu pierwszego - podstawy manipulatora: a - symulacja obróbki CNC, b - część zamontowana na maszynie CNC, c - wykonana część

(a)



(b)



Rys. 8.25. Robot PIAP Patrol z zintegrowanym elementem wykonanym wg opracowanej metody: a - podczas badań terenowych, b - podczas testu udźwigu na maksymalnym wysięgu

8.10. Wnioski z implementacji metody projektowania i optymalizacji manipulatorów

Opracowana metoda została zaimplementowana na przykładzie projektu manipulatora do robota PIAP Patrol. Zostały zdefiniowane wymagane zdolności, które są istotne z punktu widzenia misji EOD. Podczas projektowania wykorzystywane były komponenty z biblioteki rozwiązań, która zawierała rodzinę przegubów z napędami w postaci przekładni ślimakowych oraz elementy łączące. W pierwszym etapie, według założonych funkcji celu i więzów, dobrane były długości ramion i wielkości stosowanych komponentów z biblioteki. W dalszym postępowaniu dla celów porównawczych przyjęto parametry manipulatora zgodne z parametrami jednej z wersji manipulatora PIAP Patrol. Przeprowadzono analizę obciążeń i w oparciu o opracowaną metodę przygotowano przypadki obciążeń do optymalizacji topologicznej części. Przeprowadzona optymalizacja topologiczna elementu pozwoliła na otrzymanie sztywniejszych i bardziej wytrzymałych części. Redukcja masy elementów wynosiła od -10g (-3%) w przypadku przegubu 3, 95g (22%) w przypadku przegubu 2, oraz 38% w przypadku podstawy manipulatora. Zwraca uwagę przyrost masy w przypadku przegubu nr 3, jednak wiąże się on ze znacznym zwiększeniem współczynnika bezpieczeństwa dla tej części. Jednak ponieważ nie są ujawnione metody i założenia, które były podstawą do opracowania oryginalnych części nie należy uzyskanych wyników traktować jako wiarygodny wskaźnik ilościowy.

Na przykładzie korpusu przegubu sprawdzono ilość koniecznych przypadków obciążenia, które należy uwzględnić w obliczeniach. Otrzymane wyniki potwierdzają, że wystarczające jest przyjęcie przypadków obciążenia w których uwzględnia się kąt działania momentu promieniowego zmieniający się co 90° .

Należy pamiętać o jej ograniczeniach optymalizacji topologicznej. Proces optymalizacji topologii wymaga określenia różnych parametrów wejściowych, w tym właściwości materiałów, warunków obciążenia i warunków brzegowych. Czynniki te są niezbędne do ukształtowania ostatecznego wyniku projektu. Jednak określenie idealnej kombinacji parametrów wejściowych jest często niejasne i wymaga znacznej wiedzy specjalistycznej i doświadczenia w celu dokładnej definicji. Ponadto nawet niewielkie zmiany tych parametrów wejściowych mogą znacząco wpłynąć na ostateczny projekt, utrudniając uzyskanie pewnego i niezawodnego rozwiązania. Innym czynnikiem ograniczającym zastosowanie metody jest wysoki koszt obliczeniowy metod optymalizacji topologii.

Pomimo tych ograniczeń badania pokazują, że zastosowanie proponowanego podejścia pozytywnie wpływa na zdolność manipulatora do spełnienia rygorystycznych wymagań użytkownika.

9. Podsumowanie i wnioski końcowe

Roboty mobilne przeznaczone do zadań specjalnych, takich jak neutralizacja ładunków wybuchowych (EOD), działania antyterrorystyczne czy operacje ratownicze, stanowią istotny element współczesnych systemów bezpieczeństwa i obrony. Ze względu na specyfikę tych zastosowań, oczekuje się od nich dużej wszechstronności, odporności na ekstremalne warunki oraz niezawodności w pracy w środowiskach nieustrukturyzowanych. Kluczowym podsystemem tych robotów jest manipulator – urządzenie przeznaczone do realizacji zadań manualnych, takich jak podnoszenie, przesuwanie, cięcie, otwieranie drzwi czy obsługa specjalistycznych narzędzi.

Analiza dostępnej literatury wykazała istotne luki w zakresie metod projektowania manipulatorów przeznaczonych dla przenośnych robotów do zadań specjalnych. Istniejące podejścia, opracowane głównie z myślą o manipulatorach przemysłowych, nie uwzględniają specyficznych ograniczeń i wymagań, jakie stawia się urządzeniom pracującym w warunkach operacyjnych typowych dla EOD, działań ratowniczych czy antyterrorystycznych. Zaniedbane aspekty to między innymi złożone warunki eksploatacji, ograniczenia masowe oraz specyfika ręcznego sterowania. Ta luka badawcza stanowiła podstawę do sformułowania celu pracy – opracowania metody doboru parametrów projektowych umożliwiającej tworzenie lekkich, funkcjonalnych manipulatorów do zadań specjalnych.

Realizacja celu wymagała przeprowadzenia identyfikacji rzeczywistych przypadków obciążeń występujących podczas pracy manipulatora. W tym celu wykonano badania z wykorzystaniem manipulatora robota PIAP Patrol, rejestrując obciążenia pojawiające się przy maksymalnym udźwigu oraz w trakcie interakcji końcówki roboczej z otoczeniem – takich jak podpieranie czy przesuwanie obiektów. Na podstawie wyników badań opracowano autorską metodę projektowania, która dobierając parametry manipulatora, uwzględnia wymagania użytkownika oraz dostępne komponenty. Metoda ma charakter iteracyjny i obejmuje trzy etapy: dobór podstawowych parametrów spełniających wymagania użytkownika z uwzględnieniem masy jako ograniczenia projektowego, identyfikację maksymalnych obciążeń konstrukcji, a następnie redukcję masy komponentów poprzez optymalizację topologiczną.

Dla celów weryfikacyjnych przedstawiono przykład implementacji metody dla komponentów manipulatora robota PIAP Patrol. Przeprowadzona optymalizacja umożliwiła zwiększenie współczynnika bezpieczeństwa przegubu łokcia oraz redukcję masy korpusów przegubu ramienia i podstawy odpowiednio o 22% i 38%, co przełożyło się na zmniejszenie całkowitej masy manipulatora o 449 g, czyli 3%, przy optymalizacji zaledwie trzech komponentów.

Podkreślić należy, że skuteczna optymalizacja konstrukcji wymaga podejścia systemowego [41]. Strukturalna optymalizacja komponentów, będąca przedmiotem niniejszej pracy, stanowi tylko jeden z aspektów szerszego procesu projektowania, obejmującego również architekturę systemu, kinematykę, napędy czy dobór materiałów.

Opracowana metoda dostarcza zestaw narzędzi do doboru parametrów i w ogólniejszym ujęciu projektowania manipulatorów przenośnych robotów do zadań specjalnych. Do najważniejszych oryginalnych składowych metody należą:

- Metoda formułowania funkcji celu i ograniczeń optymalizacji na podstawie wymaganych zdolności, umożliwiającą poszukiwanie parametrów manipulatora z uwzględnieniem dostępnych komponentów.
- Metoda szacowania obciążeń konstrukcyjnych w warunkach granicznych.
- Metoda konstruowania przypadków obciążeń uwzględniająca zmienność kierunków sił działających na manipulator.
- Metoda definiowania przestrzeni pasywnej w procesie optymalizacji topologicznej, gwarantująca zachowanie funkcjonalności komponentu.
- Procedura automatycznego przetwarzania wyników optymalizacji topologicznej na model CAD, bez konieczności ręcznej obróbki siatki.

Proponowane podejście ma charakter adaptacyjny – musi być dostosowywane do specyfiki danego projektu, zarówno w kontekście celów optymalizacji (np. minimalizacja masy, maksymalizacja udźwigu), jak i typu analizowanych obciążeń (statyczne, dynamiczne). Kluczowe wskaźniki oceny efektywności projektu, takie jak udźwig przy maksymalnym zasięgu czy blisko podstawy robota, są bezpośrednio zależne od masy manipulatora.

Modele komponentów otrzymane w wyniku optymalizacji topologicznej są włączane do biblioteki rozwiązań i wykorzystywane w kolejnych iteracjach projektowych, umożliwiając oceny wpływu redukcji masy na podstawowe parametry robocze manipulatora. Metodologia jest uniwersalna i może być zastosowana również do innych komponentów łańcucha kinematycznego manipulatora.

Na podstawie przeprowadzonych badań, analiz oraz implementacji zaproponowanej metody doboru parametrów robotów i projektowania manipulatorów przenośnych robotów do zadań specjalnych sformułowano następujące wnioski:

- Opracowana metoda systematyzuje proces projektowania manipulatorów, umożliwiając efektywne dostosowanie konstrukcji do złożonych wymagań operacyjnych.
- Metoda może znacząco poprawić parametry robocze i niezawodność manipulatorów, zwiększając tym samym skuteczność działania mobilnych robotów do zadań specjalnych. Zwiększenie ich efektywności przekłada się bezpośrednio na poprawę bezpieczeństwa operacyjnego.
- Iteracyjny charakter metody wpisuje się w ewolucyjny proces projektowania systemów robotycznych, pozwalając na sukcesywne doskonalenie rozwiązań.
- Uwzględnienie rzeczywistych scenariuszy eksploatacyjnych (np. przeciąganie, podpieranie, uderzenia) zwiększa trafność analiz projektowych.
- Metoda pozwala uzyskać modele komponentów zgodne z przyjętym celem optymalizacji, np. minimalizacji masy lub zwiększenia sztywności.

- Modele wynikowe cechują się bardziej równomiernym rozkładem współczynnika bezpieczeństwa w całej objętości komponentu.
- Komponenty zoptymalizowane metodą topologiczną lepiej odpowiadają funkcji konstrukcyjnej niż modele projektowane klasycznie.
- Masa zoptymalizowanych komponentów może być niższa przy zachowaniu wymagań wytrzymałościowych.
- Lepsze dopasowanie obciążeń umożliwia stosowanie niższych współczynników bezpieczeństwa, co sprzyja dalszej redukcji masy.
- Uwzględnienie obciążeń wynikających z zablokowania ruchu końcówki roboczej pozwala identyfikować najbardziej krytyczne przypadki eksploatacyjne.
- Projektowanie z uwzględnieniem takich przypadków skutkuje komponentami bardziej odpornymi na przeciążenia z nieprzewidywalnych kierunków.
- Konstrukcja dostosowana do rzeczywistych warunków pracy zmniejsza ryzyko uszkodzeń przy kontakcie z otoczeniem.
- Integracja wyników optymalizacji z biblioteką komponentów umożliwia ich ponowne wykorzystanie w przyszłych projektach, skracając czas projektowania.
- Metoda pozwala wykryć potencjalne słabe punkty konstrukcyjne na etapie cyfrowym, ograniczając koszty prototypowania.
- Wyniki optymalizacji topologicznej są silnie zależne od parametrów wejściowych (siatki, warunków brzegowych, przypadków obciążenia, funkcji celu).
- Proces optymalizacji ma charakter iteracyjny i eksperymentalny, często oparty na metodzie prób i błędów.
- Skuteczne stosowanie metody wymaga doświadczenia inżynierskiego i umiejętnego przygotowania przestrzeni projektowej.

Zebrane wnioski jednoznacznie wskazują na wysoką użyteczność opracowanej metody w kontekście projektowania manipulatorów do zadań specjalnych. Jej zastosowanie nie tylko pozwala na lepsze dopasowanie konstrukcji do specyficznych warunków eksploatacyjnych, ale także znacząco zwiększa efektywność i niezawodność rozwiązań. Systematyczne podejście, uwzględniające zarówno ograniczenia masowe, jak i rzeczywiste scenariusze obciążeń, stanowi solidną podstawę do dalszego rozwoju narzędzi projektowych oraz standaryzacji metod w dziedzinie robotyki mobilnej.

Metodologia ta jest szczególnie przydatna dla producentów robotów posiadających katalog gotowych modułów i komponentów – umożliwia ich efektywne wykorzystanie przy jednoczesnym dostosowaniu do konkretnych potrzeb aplikacyjnych. Dzięki zastosowaniu optymalizacji topologicznej możliwa jest redukcja jednego z najistotniejszych parametrów – masy manipulatora. W efekcie, opracowana metoda nie tylko porządkuje proces projektowania manipulatorów, ale także tworzy fundament dla dalszych prac rozwojowych i budowy spójnych standardów oceny efektywności konstrukcji manipulatorów w robotyce mobilnej.

W pracy można wydzielić następujące elementy będące oryginalnym dorobkiem autora:

- Przeprowadzenie analizy wymaganych zdolności robotów do zadań specjalnych, i zadań manipulatorów;
- Przeprowadzenie badań identyfikujących obciążenia występujące podczas wykonywania zadań manipulatorem;
- Opracowanie metody formułowania funkcji celu i ograniczeń optymalizacji na podstawie wymaganych zdolności, która pozwala na poszukiwanie podstawowych parametrów manipulatora. Metoda uwzględnia wymagane zdolności oraz dostępne do wykorzystania komponenty;
- Opracowanie metody szacowania obciążeń w konstrukcji, które pozwalają uwzględnić najgorsze możliwe do uzyskania warianty obciążenia podczas blokady końcówki roboczej manipulatora;
- Opracowanie metody konstruowania przypadków obciążeń, która uwzględnia zmienność kierunków obciążenia podczas pracy manipulatora;
- Opracowanie metody przygotowania przestrzeni pasywnej procesu optymalizacji topologicznej, która pozwala na uzyskanie wymaganej funkcjonalności części;
- Opracowanie procedury przetwarzania geometrii wynikowej optymalizacji topologicznej, która pozwala na uzyskanie modelu CAD bez manualnej obróbki siatki.

Powyższe punkty stanowią zbiór oryginalnych osiągnięć autora, które razem tworzą kompleksową i spójną metodologię projektowania manipulatorów przenośnych robotów do zadań specjalnych. Opracowane metody obejmują zarówno etap analizy funkcjonalnej i identyfikacji obciążeń, jak i nowatorskie podejścia do formułowania funkcji celu, definiowania przypadków obciążeń oraz integracji wyników optymalizacji topologicznej z procesem projektowym. Całość stanowi istotny wkład w rozwój narzędzi wspomagających projektowanie robotów mobilnych, uwzględniających ich specyficzne wymagania eksploatacyjne i konstrukcyjne.

Bibliografia

- [1] *Centaur* | *Teledyne FLIR*, Accessed: 2025-01-12. adr.: <https://www.flir.com/products/centaur>.
- [2] *PackBot 525 Man-transportable, Multi-Mission Robot* | *Teledyne FLIR*, Accessed: 2025-01-12. adr.: <https://www.flir.com/products/packbot-525>.
- [3] *SUGV 310* | *Teledyne FLIR*, Accessed: 2025-01-12. adr.: <https://www.flir.com/products/sugv-310>.
- [4] *SPUR next generation backpackable robot*, Accessed: 2025-01-12. adr.: <https://www.qinetiq.com/en/capabilities/robotics-and-autonomous-systems/robotic-products/spur-next-generation-backpackable-robot>.
- [5] *Bomb Disposal Robot - QinetiQ*, Accessed: 2025-01-12. adr.: <https://www.qinetiq.com/en/capabilities/robotics-and-autonomous-systems/robotic-products/talon-medium-sized-tactical-robot>.
- [6] *telexmax Unmanned Ground Vehicle (UGV)* | *telexmax EVO PLUS* | *telexmax EVO PRO & HYBRID*, Accessed: 2025-01-12. adr.: <https://www.avinc.com/ugv/telexmax-evo>.
- [7] *MTGR - Micro Tactical Ground Robot for EOD and Military Operations*, Accessed: 2025-01-12. adr.: <https://robo-team.com/products/mtgr/>.
- [8] *TIGR - Transportable Interoperable Ground Robot* | *Roboteam*, Accessed: 2025-01-12. adr.: <https://robo-team.com/products/tigr/>.
- [9] *Cameleon E / UGV / Unmanned Ground Vehicle* | *Eca Group*, Accessed: 2025-01-12. adr.: <https://www.ecagroup.com/en/solutions/cameleon-e-ugv-unmanned-ground-vehicle>.
- [10] *Mini-CALIBER® - ICOR Technology - Tactical & Security Robotics Products*, Accessed: 2025-01-12. adr.: <https://icortechnology.com/robots/mini-caliber/>.
- [11] *CALIBER T5 - ICOR Technology - Tactical & Security Robotics Products*, Accessed: 2025-01-12. adr.: <https://icortechnology.com/robots/caliber-t5/>.
- [12] *The Avenger LT Unmanned Ground Vehicle* | *ICP NewTech*, Accessed: 2025-01-12. adr.: <https://icpnewtech.com/products/avenger-lt-unmanned-ground-vehicle>.
- [13] *T4 Robotic System* | *L3Harris Fast. Forward*. Accessed: 2025-01-12. adr.: <https://www.l3harris.com/all-capabilities/t4-robotic-system>.
- [14] *PackBot 510* | *Teledyne FLIR*, Accessed: 2025-01-12. adr.: <https://www.flir.com/products/packbot>.
- [15] *Home - HDT Robotics*, Accessed: 2025-02-01. adr.: <https://www.hdtrobotics.com/>.
- [16] J. EZRA, V. D. T. W, L. W. TRAVIS i C. B. MITCHELL, *Modular rotational electric actuator*, *Patent EP2532927B1*, 2014.
- [17] N. Aage, E. Andreassen, B. S. Lazarov i O. Sigmund, "Giga-voxel computational morphogenesis for structural design", *Nature* 2017 550:7674, t. 550, s. 84–86, 7674

- paż. 2017, ISSN: 1476-4687. DOI: 10 . 1038 /nature23911. adr.: <https://www.nature.com/articles/nature23911>.
- [18] D. J. Munk, D. J. Auld, G. P. Steven i G. A. Vio, "On the benefits of applying topology optimization to structural design of aircraft components", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, t. 60, 3 2019, ISSN: 16151488. DOI: 10 . 1007/s00158-019-02250-6.
- [19] V. Dhinakaran, A. R. Kumar, R. Ramgopal, S. Kannan, B. Stalin i T. Jagadeesha, "Topology Optimization of Steering Knuckle", *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, t. 23, s. 197–206, 2021, ISSN: 21954364. DOI: 10 . 1007/978-981-15-4739-3_17.
- [20] M. Mrzygłód i M. Michalik, "Optymalizacja topologiczna z ograniczeniem naprężeniowym konstrukcji pojazdu", *Pomiary Automatyka Kontrola*, t. R. 54, nr 7, s. 429–432, 2008, ISSN: 0032-4110.
- [21] F. Wang i G. Yang, "Topological Design of a Mortar Base Plate under Impact Loads", *Shock and Vibration*, t. 2021, 2021, ISSN: 10709622. DOI: 10 . 1155/2021/8845019.
- [22] *Unmanned Ground Vehicle (UGV) Interoperability Profile (IOP)*, 2011.
- [23] M. A. Hinton, M. J. Zeher, M. V. Kozlowski i M. S. Johannes, "Advanced explosive ordnance disposal robotic system (AEODRS): A common architecture revolution", *Johns Hopkins APL Technical Digest (Applied Physics Laboratory)*, t. 30, s. 256–266, 3 2011, ISSN: 02705214.
- [24] D. Lisle, "Making safe: The dirty history of a bomb disposal robot", *Security Dialogue*, 2020, ISSN: 14603640. DOI: 10 . 1177/0967010619887849.
- [25] F. Li, S. Hou, C. Bu i B. Qu, "Rescue Robots for the Urban Earthquake Environment", *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, t. 17, nr. 6, e181, czer. 2023, ISSN: 1935-7893. DOI: 10 . 1017/DMP.2022.98. adr.: <https://www.cambridge.org/core/journals/disaster-medicine-and-public-health-preparedness/article/abs/rescue-robots-for-the-urban-earthquake-environment/AE4E401B0D089C78EDB0DB635768D93A>.
- [26] G. J. M. Kruijff, F. Pirri, M. Gianni i in., "Rescue robots at earthquake-hit Mirandola, Italy: A field report", *2012 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics, SSRR 2012*, 2012. DOI: 10 . 1109/SSRR.2012.6523866.
- [27] M. Chiou, G. T. Epsimos, G. Nikolaou i in., "Robot-Assisted Nuclear Disaster Response: Report and Insights from a Field Exercise", *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, t. 2022-October, s. 4545–4552, lip. 2022, ISSN: 21530866. DOI: 10 . 1109/IR0S47612.2022.9981881. arXiv: 2207 . 00648. adr.: <https://arxiv.org/abs/2207.00648v1>.
- [28] *Fukushima Robot Operator Writes Tell-All Blog - IEEE Spectrum*, Accessed: 2025-02-01. adr.: <https://spectrum.ieee.org/fukushima-robot-operator-diaries>.
- [29] C. Tan, S. Liew, M. Alkahari i in., "Fire fighting mobile robot : state of the art and recent development", *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, t. 7, nr. 10, s. 220–230, 2013, ISSN: 1991-8178. adr.: <https://research.tue.nl/en/>

- publications/fire-fighting-mobile-robot-state-of-the-art-and-recent-developmen.
- [30] *Robotics in Firefighting - SFPE*, Accessed: 2025-02-01. adr.: <https://www.sfpe.org/publications/fpemagazine/fpeextra/etarchives3/fpeetissue100>.
- [31] *THERMITE | Howe & Howe Technologies*, Accessed: 2025-02-01. adr.: <https://www.howeandhowe.com/civil/thermite>.
- [32] *Firefighting robots and firefighting solutions - Shark Robotics*, Accessed: 2025-02-01. adr.: <https://www.shark-robotics.com/applications/firefighting-robots>.
- [33] C. W. Gardner, R. Wentworth, P. J. Treado, P. Batavia i G. Gilbert, "Remote chemical biological and explosive agent detection using a robot-based Raman detector", *Unmanned Systems Technology X*, t. 6962, s. 286–295, kw. 2008, ISSN: 0277786X. DOI: 10.1117/12.781692. adr.: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/6962/69620T/Remote-chemical-biological-and-explosive-agent-detection-using-a-robot/10.1117/12.781692.full%20https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/6962/69620T/Remote-chemical-biological-and-explosive-agent-detection-using-a-robot/10.1117/12.781692.short>.
- [34] *MAARS weaponized robot*, Accessed: 2025-02-01. adr.: <https://www.qinetiq.com/en-us/markets/defence/land/maars-weaponized-robot>.
- [35] *Army Testing Robot Dogs Armed with Artificial Intelligence-Enabled Rifles in Middle East | Military.com*, Accessed: 2025-02-01. adr.: <https://www.military.com/daily-news/2024/10/01/army-has-sent-armed-robot-dog-middle-east-testing.html>.
- [36] *Call to Industry: Procurement for participation in the first EU Defence Innovation Operational Experimentation Campaign on Autonomous Systems for Cross-domain Logistics*, Accessed: 2025-02-01. adr.: <https://eda.europa.eu/news-and-events/news/2024/07/16/call-to-industry-procurement-for-participation-in-the-first-eu-defence-innovation-operational-experimentation-campaign-on-autonomous-systems-for-cross-domain-logistics>.
- [37] *Studium wykonalności projektu Programu Strategicznego na rzecz bezpieczeństwa i obronności państwa pt.: „Rodzina bezzałogowych platform lądowych (BPL) do zastosowań w systemach bezpieczeństwa i obronności państwa”*, 2012.
- [38] D. Constantin, A. Țigău, D. Toma i D. Dogaru, "Human Capabilities Projection: Haptic Device for EOD Robot Control", *Journal of Military Technology*, t. 2, s. 11–16, czer. 2019. DOI: 10.32754/JMT.2019.1.02.
- [39] P. M. Wensing, A. Wang, S. Seok, D. Otten, J. Lang i S. Kim, "Proprioceptive actuator design in the MIT cheetah: Impact mitigation and high-bandwidth physical interaction for dynamic legged robots", *IEEE Transactions on Robotics*, t. 33, s. 509–522, 3 czer. 2017, ISSN: 15523098. DOI: 10.1109/TR0.2016.2640183.

- [40] *projektowanie*, *Encyklopedia PWN (online)*, <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/projektowanie;3962534.html>, Accessed: 2024-01-15. adr.: <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/projektowanie;3962534.html>.
- [41] M. Ostwald, *Podstawy optymalizacji konstrukcji w projektowaniu systemowym*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2016, ISBN: 978-83-7775-414-6.
- [42] *Systems Engineering Handbook v. 3.2.2*. International Council on Systems Engineering, 2011. adr.: <https://www.incose.org/publications/se-handbook-v5>.
- [43] V. Crespi, A. Galstyan i K. Lerman, "Top-down vs bottom-up methodologies in multi-agent system design", *Autonomous Robots*, t. 24, s. 303–313, 3 kw. 2008, ISSN: 09295593. DOI: 10.1007/S10514-007-9080-5/METRICS. adr.: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10514-007-9080-5>.
- [44] J. W. Z. Osiński, *Teoria konstrukcji maszyn*. PWN, 1982, ISBN: 8601790132937.
- [45] C. Cempel, *Teoria i inżynieria systemów zasady i zastosowania myślenia systemowego*. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji - PIB, 2006.
- [46] R. G. (G. Budynas, J. K. Nisbett, K. Tangchaichit, K. Tangchaichit i J. E. Shigley, "Shigley's mechanical engineering design", s. 1095,
- [47] M. Nowak i P. P. Wydawnictwo, *Projektowanie konstrukcji o wysokiej sztywności z zastosowaniem optymalizacji strukturalnej*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2017, ISBN: 978-83-7775-460-3. adr.: <https://books.google.pl/books?id=FS6ptAEACAAJ>.
- [48] *optymalizacja*, *Encyklopedia PWN (online)*, <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/optymalizacja;3951487.html>, Accessed: 2024-01-15. adr.: <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/optymalizacja;3951487.html>.
- [49] F. A. Potra i S. J. Wright, "Interior-point methods", *Journal of Computational and Applied Mathematics*, t. 124, s. 281–302, 1-2 grud. 2000, ISSN: 0377-0427. DOI: 10.1016/S0377-0427(00)00433-7.
- [50] K. Deb, S. Agrawal, A. Pratap i T. Meyarivan, "A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II", *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, t. 1917, s. 849–858, 2000, ISSN: 16113349. DOI: 10.1007/3-540-45356-3_83/COVER. adr.: https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-45356-3_83.
- [51] T. Lewiński, T. Sokół i C. Graczykowski, *Michell Structures*. Springer International Publishing, 2019, ISBN: 978-3-030-06988-9.
- [52] A. Michell, "The limit of economy of material in frame structures", *Philos Mag*, t. 8, s. 589–597, 6 list. 1904, ISSN: 1941-5982. DOI: 10.1080/14786440409463229.
- [53] O. Sigmund, N. Aage i E. Andreassen, "On the (non-)optimality of Michell structures", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, t. 54, s. 361–373, 2 sierp. 2016, ISSN: 16151488. DOI: 10.1007/S00158-016-1420-7/TABLES/4. adr.: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00158-016-1420-7>.

- [54] M. P. Bendsøe i O. Sigmund, *Typology Optimization, Theory, methods, and applications*, 2nd. 2004, s. 381, ISBN: 978-3-642-07698-5. adr.: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-05086-6#toc>.
- [55] O. Sigmund i K. Maute, "Topology optimization approaches: A comparative review", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, t. 48, s. 1031–1055, 6 grud. 2013, ISSN: 1615147X. DOI: 10.1007/S00158-013-0978-6/FIGURES/2. adr.: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00158-013-0978-6>.
- [56] T. Tang, L. Wang, M. Zhu i in., "Topology Optimization: A Review for Structural Designs Under Statics Problems", *Materials* 2024, Vol. 17, Page 5970, t. 17, s. 5970, 23 grud. 2024, ISSN: 1996-1944. DOI: 10.3390/MA17235970. adr.: <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/23/5970/htm%20https://www.mdpi.com/1996-1944/17/23/5970>.
- [57] M. P. Bendsøe i N. Kikuchi, "Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, t. 71, s. 197–224, 2 1988, ISSN: 00457825. DOI: 10.1016/0045-7825(88)90086-2.
- [58] M. P. Bendsøe, "Optimal shape design as a material distribution problem", *Structural Optimization*, t. 1, s. 193–202, 4 grud. 1989, ISSN: 09344373. DOI: 10.1007/bf01650949.
- [59] R. Wildman i A. Gaynor, "Topology optimization for robotics applications", w 2019. DOI: 10.1016/b978-0-08-102260-3.00011-1.
- [60] M. Zhou i G. I. Rozvany, "The COC algorithm, Part II: Topological, geometrical and generalized shape optimization", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, t. 89, s. 309–336, 1-3 sierp. 1991, ISSN: 0045-7825. DOI: 10.1016/0045-7825(91)90046-9.
- [61] O. Sigmund, "A 99 line topology optimization code written in matlab", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, t. 21, s. 120–127, 2 kw. 2001, ISSN: 1615147X. DOI: 10.1007/S001580050176/METRICS. adr.: <https://link.springer.com/article/10.1007/s001580050176>.
- [62] K. Svanberg, "The method of moving asymptotes—a new method for structural optimization", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, t. 24, nr. 2, s. 359–373, 1987, ISSN: 10970207. DOI: 10.1002/nme.1620240207.
- [63] S. Osher i J. A. Sethian, "Fronts propagating with curvature-dependent speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations", *Journal of Computational Physics*, t. 79, s. 12–49, 1 list. 1988, ISSN: 0021-9991. DOI: 10.1016/0021-9991(88)90002-2.
- [64] G. Allaire, F. Jouve i A. M. Toader, "Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method", *Journal of Computational Physics*, t. 194, s. 363–393, 1 lut. 2004, ISSN: 0021-9991. DOI: 10.1016/J.JCP.2003.09.032.
- [65] J. D. Deaton i R. V. Grandhi, "A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, t. 49,

- s. 1–38, 1 sty. 2014, ISSN: 1615147X. DOI: 10.1007/S00158-013-0956-Z. adr.: <https://dl.acm.org/doi/10.1007/s00158-013-0956-z>.
- [66] S. C. Subedi, C. S. Verma i K. Suresh, “A review of methods for the geometric post-processing of topology optimized models”, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, t. 20, 6 2020, ISSN: 15309827. DOI: 10.1115/1.4047429.
- [67] J. C. Cuillière, V. François i A. Nana, “Automatic construction of structural CAD models from 3D topology optimization”, *CAD Solutions LLC*, t. 15, s. 107–121, 1 sty. 2017, ISSN: 16864360. DOI: 10.1080/16864360.2017.1353726. adr.: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/16864360.2017.1353726>.
- [68] J. Polak i M. Nowak, “From Structural Optimization Results to Parametric CAD Modeling—Automated, Skeletonization-Based Truss Recognition”, *Applied Sciences 2023, Vol. 13, Page 5670*, t. 13, s. 5670, 9 maj 2023, ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/APP13095670. adr.: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/9/5670/htm%20https://www.mdpi.com/2076-3417/13/9/5670>.
- [69] M. Marinov, M. Amagliani, T. Barback i in., “Generative Design Conversion to Editable and Watertight Boundary Representation”, *CAD Computer Aided Design*, t. 115, s. 194–205, paź. 2019, ISSN: 00104485. DOI: 10.1016/J.CAD.2019.05.016.
- [70] S. Larsen i C. G. Jensen, “Converting topology optimization results into parametric CAD models”, *Computer-Aided Design and Applications*, t. 6, s. 407–418, 3 2009, ISSN: 16864360. DOI: 10.3722/CADAPS.2009.407-418.
- [71] J. Denavit i R. S. Hartenberg, “A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices”, *Journal of Applied Mechanics*, t. 22, nr. 2, s. 215–221, czer. 1955, ISSN: 0021-8936. DOI: 10.1115/1.4011045. adr.: <https://dx.doi.org/10.1115/1.4011045>.
- [72] R. Vijaykumar, K. J. Waldron i M. J. Tsai, “Geometric Optimization of Serial Chain Manipulator Structures for Working Volume and Dexterity”, *The International Journal of Robotics Research*, t. 5, nr. 2, s. 91–103, czer. 1986, ISSN: 02783649. DOI: <https://doi.org/10.1177/027836498600500210>. adr.: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/027836498600500210>.
- [73] S. H. Zargarbashi, W. Khan i J. Angeles, “The Jacobian condition number as a dexterity index in 6R machining robots”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, t. 28, nr. 6, s. 694–699, 2012, ISSN: 07365845. DOI: 10.1016/j.rcim.2012.04.004. adr.: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2012.04.004>.
- [74] J. P. Merlet, “Jacobian, Manipulability, Condition Number, and Accuracy of Parallel Robots”, *Journal of Mechanical Design*, t. 128, nr. 1, s. 199–206, sty. 2006, ISSN: 1050-0472. DOI: 10.1115/1.2121740. adr.: <https://dx.doi.org/10.1115/1.2121740>.
- [75] C. Gosselin i J. Angeles, “A Global Performance Index for the Kinematic Optimization of Robotic Manipulators”, *Journal of Mechanical Design*, t. 113, nr. 3,

- s. 220–226, wrz. 1991, ISSN: 1050-0472. DOI: 10.1115/1.2912772. adr.: <https://dx.doi.org/10.1115/1.2912772>.
- [76] T. Yoshikawa, “Manipulability of Robotic Mechanisms”, *The International Journal of Robotics Research*, t. 4, nr. 2, s. 3–9, czer. 1985, ISSN: 02783649. DOI: 10.1177/027836498500400201.
- [77] S. Patel i T. Sobh, “Task based synthesis of serial manipulators”, *Journal of Advanced Research*, t. 6, nr. 3, s. 479–492, maj 2015, ISSN: 2090-1232. DOI: 10.1016/J.JARE.2014.12.006.
- [78] S. Kucuk i Z. Bingul, “Comparative study of performance indices for fundamental robot manipulators”, *Robotics and Autonomous Systems*, t. 54, nr. 7, s. 567–573, 2006, ISSN: 09218890. DOI: 10.1016/j.robot.2006.04.002.
- [79] S. Singh i E. Singla, “Realization of task-based designs involving DH parameters: a modular approach”, *Intelligent Service Robotics*, t. 9, nr. 3, s. 289–296, lip. 2016, ISSN: 18612784. DOI: 10.1007/S11370-015-0186-X.
- [80] E. Galan-Urbe i L. Morales-Velazquez, “Kinematic Optimization of 6DOF Serial Robot Arms by Bio-Inspired Algorithms”, *IEEE Access*, t. 10, 2022, ISSN: 21693536. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3214850.
- [81] S. Hwang, H. Kim, Y. Choi, K. Shin i C. Han, “Design optimization method for 7 DOF robot manipulator using performance indices”, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, t. 18, s. 293–299, 3 mar. 2017, ISSN: 20054602. DOI: 10.1007/s12541-017-0037-0.
- [82] H. Lim, S. Hwang, K. Shin i C. Han, “The application of the Grey-based Taguchi method to optimize the global performances of the robot manipulator”, 2010. DOI: 10.1109/IR0S.2010.5652917.
- [83] M. Mashali, M. Addeif i M. Embarak, “SCARA ROBOT LINKS LENGTH OPTIMIZATION BY USING MATLAB AND VERIFICATION WITH SIMMECHANICS AND SOLIDWORKS”, *International Journal of Advances in Signal and Image Sciences*, t. 6, s. 8, 2 grud. 2020. DOI: 10.29284/ijasis.6.2.2020.8-19.
- [84] Z. J. Du, Y. Q. Xiao i W. Dong, “Method for optimizing manipulator’s geometrical parameters and selecting reducers”, *Journal of Central South University*, t. 20, s. 1235–1244, 5 maj 2013, ISSN: 21622388. DOI: 10.1007/s11771-013-1607-7.
- [85] M. Hu, H. Wang i X. Pan, “Multi-objective global optimum design of collaborative robots”, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, t. 62, s. 1547–1561, 3 maj 2020, ISSN: 16151488. DOI: 10.1007/S00158-020-02563-X/TABLES/7. adr.: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00158-020-02563-x>.
- [86] H. Yin, S. Huang, M. He i J. Li, “A unified design for lightweight robotic arms based on unified description of structure and drive trains”, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, t. 14, s. 1–14, 4 lip. 2017, ISSN: 17298814. DOI: 10.1177/1729881417716383.
- [87] C. Lanni, S. F. Saramago i M. Ceccarelli, “Optimal design of 3R manipulators by using classical techniques and simulated annealin”, *Journal of the Brazilian Society*

- of Mechanical Sciences*, t. 24, s. 293–301, 4 2002, ISSN: 0100-7386. DOI: 10.1590/S0100-73862002000400007. adr.: <https://www.scielo.br/j/jbsms/a/GkLGS3sp9H8Btjwqbb6txKL/?lang=en>.
- [88] Q. Xu, Q. Zhan i X. Tian, “Link Lengths Optimization Based on Multiple Performance Indexes of Anthropomorphic Manipulators”, *IEEE Access*, t. 9, s. 20 089–20 099, 2021, ISSN: 21693536. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3054834.
- [89] P. Yao, K. Zhou, Y. Lin i Y. Tang, “Light-weight topological optimization for upper arm of an industrialwelding robot”, *Metals*, t. 9, 9 2019, ISSN: 20754701. DOI: 10.3390/met9091020.
- [90] S. A. Kouritem, M. I. Abouheaf, N. Nahas i M. Hassan, “A multi-objective optimization design of industrial robot arms”, *Alexandria Engineering Journal*, t. 61, s. 12 847–12 867, 12 2022, ISSN: 11100168. DOI: 10.1016/j.aej.2022.06.052. adr.: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.06.052>.
- [91] X. Wang, D. Zhang, C. Zhao, P. Zhang, Y. Zhang i Y. Cai, “Optimal design of lightweight serial robots by integrating topology optimization and parametric system optimization”, *Mechanism and Machine Theory*, t. 132, s. 48–65, October 2019, ISSN: 0094114X. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2018.10.015. adr.: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.10.015>.
- [92] E. Tyflopoulos i M. Steinert, “Topology and Parametric Optimization-Based Design Processes for Lightweight Structures”, *Applied Sciences 2020, Vol. 10, Page 4496*, t. 10, s. 4496, 13 czer. 2020, ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/APP10134496. adr.: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/13/4496/htm%20https://www.mdpi.com/2076-3417/10/13/4496>.
- [93] S. Chamran i D. Xuan Bien, “Investigation of Driving Torques at the Joints of Industrial Robot Arms based on the Topology Optimization Technique”, *Journal of Applied and Computational Mechanics*, t. 9, nr. 3, s. 820–833, lip. 2023, ISSN: 2383-4536. DOI: 10.22055/JACM.2023.42381.3920. adr.: https://jacm-1scu-1ac-1ir-1000007qr0083.han.wat.edu.pl/article_18028.html.
- [94] M. Kumaran i V. Senthilkumar, “Generative Design and Topology Optimization of Analysis and Repair Work of Industrial Robot Arm Manufactured Using Additive Manufacturing Technology”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, t. 1012, nr. 1, 2021, ISSN: 1757-8981. DOI: 10.1088/1757-899x/1012/1/012036.
- [95] A. Albers i J. Ottnad, “System based topology optimization as development tools for lightweight components in humanoid robots”, *2008 8th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Humanoids 2008*, s. 674–680, 2008. DOI: 10.1109/ICHR.2008.4756024.
- [96] Z. Paska, J. Rojicek, P. Ferfecki, M. Fusek, D. Heczko i V. Kryš, “Methodology of arm design for mobile robot manipulator using topological optimization”, *MM Science Journal*, t. 2020, nr. June, s. 3918–3925, czer. 2020, ISSN: 18050476. DOI: 10.17973/MMSJ.2020_06_2020008.

-
- [97] G. L. Srinivas i A. Javed, "Topology optimization of industrial manipulator-link considering dynamic loading", *Materials Today: Proceedings*, t. 18, s. 3717–3725, 2019, ISSN: 22147853. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.306. adr.: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.306>.
 - [98] G. L. Srinivas i A. Javed, "Topology optimization of rigid-links for industrial manipulator considering dynamic loading conditions", *Mechanism and Machine Theory*, t. 153, s. 103 979, list. 2020, ISSN: 0094114X. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.103979.
 - [99] G. L. Srinivas i A. Javed, "Topology optimization of KUKA KR16 industrial robot using equivalent static load method", *2021 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference, IEMTRONICS 2021 - Proceedings*, kw. 2021. DOI: 10.1109/IEMTRONICS52119.2021.9422633.
 - [100] L. Sha, A. Lin, Q. Xi i S. Kuang, "A topology optimization method for robot light-weight design under multi-working conditions and its application on upper-limb powered exoskeleton", 2020. DOI: 10.1109/AIEA51086.2020.00011.
 - [101] D. Zhang, Y. Xu, Z. Hou, J. Yao i Y. Zhao, "Optimal design and kinematics analysis of 5-DOF hybrid serial-parallel manipulator", *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, t. 32, 24 2016, ISSN: 10026819. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.24.009.
 - [102] H. Wu, M. Yin, Z. Zhao i Z. Xu, "Topology optimization method and lightweight design of anthropomorphic manipulator", t. 1453, 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1453/1/012068.
 - [103] B. Liu, L. Sha, K. Huang, W. Zhang i H. Yang, "A topology optimization method for collaborative robot lightweight design based on orthogonal experiment and its applications", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, t. 19, 1 sty. 2022, ISSN: 17298814. DOI: 10.1177/17298814211056143/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_17298814211056143-FIG12.JPEG. adr.: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/17298814211056143>.
 - [104] C. C. Kessens, J. B. Rice, D. C. Smith, S. J. Biggs i R. Garcia, "Utilizing compliance to manipulate doors with unmodeled constraints", *IEEE/RSJ 2010 International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2010 - Conference Proceedings*, s. 483–489, 2010. DOI: 10.1109/IROS.2010.5650927.
 - [105] E. Schoenfeld, L. Parrington i S. von Muehlen, "Door breaching robotic manipulator", <https://doi.org/10.1117/12.778135>, t. 6962, s. 276–285, kw. 2008, ISSN: 0277786X. DOI: 10.1117/12.778135. adr.: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/6962/69620S/Door-breaching-robotic-manipulator/10.1117/12.778135.full>.
 - [106] M. Ceh i T. Josey, "Recoil Measurement of Improvised Explosive Device. Disruptors Lightweight AB Precision Ltd. – Pigstick and Hotrod", 2016, Scientific Report DRDC-RDDC-2016-R223. adr.: https://cradpdf.drdc-rddc.gc.ca/PDFS/unc262/p805077_A1b.pdf.

- [107] B. A. PARATE, S. CHANDEL i H. SHEKHAR, “Estimation of Recoil Energy of Water-Jet Disruptor”, *Problems of Mechatronics Armament Aviation Safety Engineering*, t. 11, s. 31–42, 2 czer. 2020, ISSN: 2081-5891. DOI: 10.5604/01.3001.0014.1991.
- [108] M. Tosa i K. Berns, “Stability Prediction of an UGV with Manipulator on Uneven Terrain”, *Mechanisms and Machine Science*, t. 67, s. 256–263, czer. 2018, ISSN: 22110992. DOI: 10.1007/978-3-030-00232-9_26. adr.: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-00232-9_26.
- [109] A. S. Jacoff, H.-M. Huang, E. R. Messina, A. M. Virts i A. J. Downs, *Comprehensive Standard Test Suites for the Performance Evaluation of Mobile Robots*, 2011. adr.: <https://www.nist.gov/publications/comprehensive-standard-test-suites-performance-evaluation-mobile-robots>.
- [110] A. Jacoff, R. Sheh, A.-M. Virts i in., *Using Competitions to Advance the Development of Standard Test Methods for Response Robots*, 2012. adr.: <https://www.nist.gov/publications/using-competitions-advance-development-standard-test-methods-response-robots>.
- [111] J. Adam, *Guide for Evaluating, Purchasing, and Training with Response Robots Using DHS-NIST-ASTM International Standard Test Methods*, 2016. adr.: <https://www.nist.gov/document/dhsnistastmrobottestmethods-2pdf>.
- [112] K. S. A. J. Ann Virts, *Counter-Improvised Explosive Device Training Using Standard Test Methods for Response Robots*. adr.: <https://www.nist.gov/document/c-ied-training-using-standard-test-methods-response-robots-v2015pdf>.
- [113] M. Sereinig, W. Werth i L. M. Faller, “A review of the challenges in mobile manipulation: systems design and RoboCup challenges: Recent developments with a special focus on the RoboCup”, *Elektrotechnik und Informationstechnik*, t. 137, s. 297–308, 6 paź. 2020, ISSN: 0932383X. DOI: 10.1007/S00502-020-00823-8/FIGURES/14. adr.: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00502-020-00823-8>.
- [114] *DARPA Subterranean (SubT) Challenge*, Accessed: 2025-02-01. adr.: <https://www.darpa.mil/research/programs/darpa-subterranean-challenge>.
- [115] *ELROB - The European Land-Robot Trial | ELROB.org*, Accessed: 2025-02-01. adr.: <https://elrob.org/>.
- [116] A. F. Winfield, M. P. Franco, B. Brueggemann i in., “euRathlon 2015: A Multi-domain Multi-robot Grand Challenge for Search and Rescue Robots”, *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, t. 9716, s. 351–363, 2016, ISSN: 1611-3349. DOI: 10.1007/978-3-319-40379-3_36. adr.: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-40379-3_36.
- [117] K. W. Buffinton, “Kane’s Method in Robotics”, w CRC Press, 2005, Num Pages: 31, ISBN: 978-1-315-22035-2.
- [118] F. S. Wong i D. C. Wynn, “M-ARM: An automated systematic approach for generating new variant design options from an existing product family”, *Research in*

- Engineering Design*, t. 35, s. 389–408, 4 paź. 2024, ISSN: 14356066. DOI: 10.1007/S00163-024-00439-5/FIGURES/13. adr.: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00163-024-00439-5>.
- [119] A. Bartnicki, J. M. Łopatka, T. Muszyński i J. Wrona, “Concept of IED/EOD Operations (CONOPs) for engineer mission support robot team”, *Journal of KONES*, t. 22, s. 269–273, 3 2015, ISSN: 1231-4005. DOI: 10.5604/12314005.1181703.
 - [120] V. Moulianitis, N. Aspragathos, A. Synodinos i C. Valsamos, “Task-based optimal design of serial metamorphic manipulators.”, 2014.
 - [121] J. M. Hollerbach, “OPTIMUM KINEMATIC DESIGN FOR A SEVEN DEGREE OF FREEDOM MANIPULATOR.”, s. 215–222, 1985.
 - [122] Z. Jiang, Y. Ma, X. Cao i in., “FC-EODR: Immersive Humanoid Dual-Arm Dexterous Explosive Ordnance Disposal Robot”, *Biomimetics*, t. 8, nr. 1, s. 67, mar. 2023, ISSN: 23137673. DOI: 10.3390/BIOMIMETICS8010067/S1. adr.: <https://www.mdpi.com/2313-7673/8/1/67/htm%20https://www.mdpi.com/2313-7673/8/1/67>.
 - [123] Z. Sun, H. Yang, Y. Ma i in., “BIT-DMR: A Humanoid Dual-Arm Mobile Robot for Complex Rescue Operations”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, t. 7, nr. 2, s. 802–809, kw. 2022, ISSN: 23773766. DOI: 10.1109/LRA.2021.3131379.
 - [124] A. S. Inc., *The Chaos Robotic Platform*. <https://asirobots.com/platforms/chaos/>, Accessed: 2024-05-26.
 - [125] D. V. Gealy, S. McKinley, B. Yi i in., “Quasi-Direct Drive for Low-Cost Compliant Robotic Manipulation”, kw. 2019. adr.: <http://arxiv.org/abs/1904.03815>.
 - [126] V. Goldfarb, E. Trubachev, T. Pushkareva i T. Savelyeva, “Comparative investigation of worm and spiroid gears with cylindrical worms”, *Mechanisms and Machine Science*, t. 73, s. 925–935, 2019, ISSN: 22110992. DOI: 10.1007/978-3-030-20131-9_92/COVER. adr.: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-20131-9_92.
 - [127] L. Petrović, M. Matejić i M. Blagojević, “Comparative Analysis of Power Transmission Gearboxes with High Gear Ratios”, *Machine Design*, t. 10, s. 57–62, 2 czer. 2018. DOI: 10.24867/MD.10.2018.2.57-62. adr.: <https://journals.indexcopernicus.com/publication/2127502/Luka-Petrovic-Comparative-Analysis-of>.
 - [128] J. W. Sensinger i J. H. Lipsey, “Cycloid vs. harmonic drives for use in high ratio, single stage robotic transmissions”, *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, s. 4130–4135, 2012, ISSN: 10504729. DOI: 10.1109/ICRA.2012.6224739.
 - [129] P. L. García, S. Crispel, E. Saerens, T. Verstraten i D. Lefeber, “Compact Gearboxes for Modern Robotics: A Review”, *Frontiers in Robotics and AI*, t. 7, s. 562 214, sierp. 2020, ISSN: 22969144. DOI: 10.3389/FR0BT.2020.00103/BIBTEX.
 - [130] P. L. Garcia, S. Crispel, T. Verstraten, E. Saerens, B. Vanderborcht i D. Lefeber, *Wolfrom planetary gear trains for lightweight, human-centered robotics*, wrz. 2019. adr.:

- <https://researchportal.vub.be/en/publications/wolfrom-planetary-gear-trains-for-lightweight-human-centered-robo>.
- [131] T. Krakówka, A. Typiak i M. Cader, "Selection of Manipulator Configuration for a Portable Robot for Special Tasks", *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems*, t. 2022, s. 21–30, 1 2022, ISSN: 1897-8649. DOI: 10.14313/JAMRIS/1-2022/3. adr.: <https://www.jamris.org/index.php/JAMRIS/article/view/718>.
 - [132] T. Krakówka i A. Typiak, "Selection of Loads in the Design and Optimization of Manipulators of Portable Mobile Robots for Special Applications", *Pomiary Automatyka Robotyka*, t. 26, 1 2022, ISSN: 14279126. DOI: 10.14313/par_243/61.
 - [133] M. Langelaar, "Topology optimization for multi-axis machining", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, t. 351, 2019, ISSN: 00457825. DOI: 10.1016/j.cma.2019.03.037.
 - [134] J. Liu i Y. S. Ma, "3D level-set topology optimization: a machining feature-based approach", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, t. 52, s. 563–582, 3 wrz. 2015, ISSN: 16151488. DOI: 10.1007/S00158-015-1263-7.
 - [135] N. Morris, A. Butscher i F. Iorio, "A subtractive manufacturing constraint for level set topology optimization", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, t. 61, s. 1573–1588, 4 2020, ISSN: 16151488. DOI: 10.1007/s00158-019-02436-y.
 - [136] K. Hu, S. Jin i C. C. Wang, "Support slimming for single material based additive manufacturing", *Computer-Aided Design*, t. 65, s. 1–10, sierp. 2015, ISSN: 0010-4485. DOI: 10.1016/J.CAD.2015.03.001.
 - [137] K. K. Yang, J. H. Zhu, C. Wang, D. S. Jia, L. L. Song i W. H. Zhang, "Experimental validation of 3D printed material behaviors and their influence on the structural topology design", *Computational Mechanics*, t. 61, s. 581–598, 5 maj 2018, ISSN: 01787675. DOI: 10.1007/S00466-018-1537-1.
 - [138] Y. Luo, O. Sigmund, Q. Li i S. Liu, "Additive manufacturing oriented topology optimization of structures with self-supported enclosed voids", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, t. 372, s. 113 385, grud. 2020, ISSN: 0045-7825. DOI: 10.1016/J.CMA.2020.113385.
 - [139] M. P. Bendsøe, A. R. Díaz, R. Lipton i J. E. Taylor, "Optimal design of material properties and material distribution for multiple loading conditions", *Int J Numer Meth Engng*, t. 38, s. 1149, 7 1995, ISSN: 10970207. DOI: 10.1002/nme.1620380705.
 - [140] *How are the loads distributed for bearing force? – nTop Support*, Accessed: 2025-02-01. adr.: <https://support.ntop.com/hc/en-us/articles/4409902451091-How-are-the-loads-distributed-for-bearing-force>.
 - [141] L. Kuśmierz i G. Ponieważ, "Podstawy konstrukcji maszyn: projektowanie napędów mechanicznych", s. 87, 2011. adr.: <https://pub.pollub.pl/publication/7903/>.
 - [142] *Next-gen topology optimization software | nTop | nTop*, <https://www.ntop.com/software/capabilities/topology-optimization/>, Accessed: 2024-01-15.

Spis rysunków

2.1	Wartości wskaźnika W_1 dla wybranych robotów.	15
2.2	Robot Packbot 510 [14]	16
2.3	Wartości wskaźnika W_2 dla wybranych robotów.	17
2.4	Robot L3Harris T4 wyposażony w podpory zwiększające stateczność robota podczas operowania manipulatorem [13]	18
3.1	Rodzaje manipulatorów: a- robot przemysłowy Kuka KR16 , b - robot współpracujący Universal Robots UR5e, c - manipulator robota pirotechnicznego z rodziny platform przenośnych Łukasiewicz PIAP	22
3.2	Model V - model cyklu życia produktu, na podstawie [42]	24
3.3	Fazy projektu (opracowanie na podstawie [46])	26
3.4	Schemat logiczny algorytmu optymalizacji NSGA II	34
3.5	Rodzaje optymalizacji strukturalnej [54]: a-optymalizacja wymiarów, b-optymalizacja kształtu, c-optymalizacja topologiczna	36
3.6	Przykład zastosowania optymalizacji topologicznej do podpory robota przenośnego [59]	37
3.7	Algorytm optymalizacji topologicznej metodą SIMP, (opracowanie w oparciu o [61])	38
3.8	Poszczególne kroki przekształcenia wynikowej geometrii w model CAD [69]	42
3.9	Manipulator o 6 stopniach swobody o parametrach dostosowanych do realizacji zadań w serwerowni. [79]	45
3.10	Parametry komponentów ramion optymalizowanego manipulatora [86].	46
3.11	Ramie manipulatora: a - konstrukcja oryginalna, b-konstrukcja po optymalizacji [89].	47
3.12	Optymalizacja komponentów manipulatora: a- model do analizy MBS, b- struktura ramienia po optymalizacji topologicznej ([95])	49
3.13	Przykład zastosowania optymalizacji topologicznej do ramienia manipulatora: a - oryginalny komponent ramienia manipulatora (211g), b - nowy komponent ramienia, po optymalizacji topologicznej (139g) ([96])	50
3.14	Optymalizacja ramienia manipulatora: a-przestrzeń robocza optymalizacji topologicznej, b-wyniki optymalizacji topologicznej [97]	51
3.15	Wyniki optymalizacji topologicznej komponentu manipulatora przeprowadzone dla trzech przypadków obciążeń: a- obciążeń rozciągających, b- obciążeń zginających, c- obciążeń ścinających [102].	52
3.16	Model manipulatora współpracującego o 7 stopniach swobody z zaznaczonym optymalizowanym komponentem podstawy [103].	52
3.17	Optymalizowane komponenty manipulatora [103].	53
3.18	Modele komponentów manipulatora współpracującego po optymalizacji topologicznej [103].	53

3.19 Wynikowe modele komponentów manipulatora dostosowane do metody produkcji [103].	53
4.1 Podział zagadnień przedstawionych w rozprawie	57
5.1 Robot PIAP Gryf podczas wystrzela z działka bezodrzutowego	60
5.2 Podparcie robota na kole zamontowanym na przegubie chwytaka	61
5.3 Wybrane konfiguracje manipulatora podczas realizacji zadań: a - inspekcja podwozia samochodowego, b - podnoszenie obiektu na maksymalnym zasięgu horyzontalnym, c - transport robota, d - podnoszenie ładunku o maksymalnej masie, e - inspekcja przepustu drogowego, f - podejmowanie obiektu umieszczonego na wysokości odpowiadającej maksymalnemu zasięgowi pionowemu manipulatora	64
6.1 Przebieg współrzędnych konfiguracyjnych podczas realizacji zadania 1.	69
6.2 Przebieg momentów osiowych w przegubach manipulatora podczas realizacji zadania 1.	70
6.3 Przebieg współrzędnych konfiguracyjnych podczas realizacji zadania 2.	70
6.4 Przebieg momentów osiowych w przegubach podczas realizacji zadania 2.	71
6.5 Robot PIAP Patrol realizujący ruch przesuwania obiektu po podłodze	71
6.6 Siły wymuszenia i reakcji, naniesione w model Robota PIAP Patrol.	72
6.7 Przebieg momentów promieniowych w przegubach ramienia i przedramienia, podczas realizacji zadania.	72
7.1 Schemat logiczny algorytmu optymalizacji struktur mechanicznych manipulatorów lekkich robotów do zadań specjalnych	75
7.2 Robot o 5 stopniach swobody manipulatora	77
7.3 Robot podczas podnoszenia przedmiotu na bliskim zasięgu	79
7.4 Robot podczas podnoszenia przedmiotu na maksymalnym zasięgu	80
7.5 Konfiguracja manipulatora podczas sprawdzania podwozia samochodu.	82
7.6 Konfiguracja manipulatora podczas podejmowania obiektu znajdującego się na zadanej wysokości.	82
7.7 Konfiguracja manipulatora podczas podejmowania obiektu znajdującego się za przeszkodą.	83
7.8 Przykładowe elementy biblioteki komponentów - rodzina przegubów manipulatora o różnej nośności i masie	83
7.9 Struktury kinematyczne manipulatorów robotów do zadań specjalnych (a) - 2DOF RR, (b) - 3DOF RRR, (c) - 4DOF RRRR, (d) - 5DOF RRRRR, (e) - 6DOF RRRPRR, (f) - 7DOF RRPRRRR, (g) - 7DOF RRRRRRR	85
7.10 Struktura kinematyczne manipulatora dwuramiennego	86
7.11 Siły podnoszenia osiągane przez manipulator przy maksymalnym zasięgu w zależności od długości ramienia i przedramienia, dla dwóch różnych konfiguracji manipulatora	91

7.12	Maksymalne siły podnoszenia osiągane przez manipulator w zależności od długości ramienia i przedramienia, dla dwóch konfiguracji manipulatora . . .	92
7.13	Wyznaczanie obciążenia przegubu 3 momentem promieniowym w kierunku α	93
7.14	Wyznaczanie obciążenia przegubu 3 momentem promieniowym w kierunku α	94
7.15	Elementy procesu przygotowania optymalizacji topologicznej	99
7.16	Przestrzeń projektu oraz przestrzeń pasywna przygotowana do optymalizacji korpusu	103
7.17	TO bez więzów wykonawczych. Masa wynikowa 401g. Czas obliczeń 42g 7min	103
7.18	TO z narzuconym minimalnym promieniem krzywizny 3mm. Masa wynikowa 372g. Czas obliczeń 42g 11min	103
7.19	TO z więzem rozformowania. Masa wynikowa 381g. Czas obliczeń 81g 2min .	104
7.20	TO z więzem rozformowania i minimalnym promieniem krzywizny 3mm. Masa wynikowa 480g. Czas obliczeń 27g 28min	104
7.21	Schemat procesu przygotowania modelu uzyskanego po optymalizacji topologicznej do dalszej obróbki	105
7.22	Model testowy	107
7.23	Siatka i warunki brzegowe modelu testowego	107
7.24	Rozkład sił w obciążeniu łożyskowym, modelowane w oprogramowaniu Ntopology [140]	107
7.25	Uwzględniane przypadki obciążenia dla modelu testowego: a - 4 przypadki obciążenia, co 90 stopni, b - 4 przypadki obciążenia, co 90 stopni, obrócone o 45 stopni, c - Osiem przypadków obciążenia, co 45 stopni	108
7.26	Wyniki pierwszego etapu optymalizacji dla trzech konfiguracji obciążeń. . . .	108
7.27	Wyniki drugiego etapu optymalizacji dla trzech konfiguracji obciążeń.	109
7.28	Wyniki optymalizacji po wygładzaniu powierzchni, dla trzech konfiguracji obciążeń.	109
8.1	Oznaczenia parametrów manipulatora 5 DOF zainstalowanego na robocie PIAP Patrol	110
8.2	Zależność pomiędzy przenoszonym momentem a masą modułu napędowego	112
8.3	Wartości trzech funkcji przystosowania dla ostatniej generacji parametrów manipulatora, pokazane odpowiednio na osiach X i Y wykresu, oraz wartość trzecia, zakodowana kolorem: a - $f_1 - f_2 - f_3$, b - $f_2 - f_3 - f_1$, c - $f_1 - f_3 - f_2$	115
8.4	Wartości trzech funkcji przystosowania dla ostatniej generacji parametrów manipulatora, pokazane, odpowiednio na osiach X i Y oraz zakodowane kolorem maksymalne momenty w przegubach manipulatora: a - $f_1 - f_2 - M_{max3}$, b $f_2 - f_3 - M_{max3}$	116
8.5	Wartości funkcji przystosowania dla ostatniej generacji parametrów manipulatora. Wykres $f_1 - f_2 - M_{max2}$	117

8.6	Maksymalne momenty promieniowe w przegubie 3 w zależności od kąta pomiaru α oraz odpowiadające im konfiguracje współrzędnych wewnętrznych: a - kierunek obrotu pierwszej osi dodatni, b - kierunek obrotu pierwszej osi ujemny.	120
8.7	Maksymalne momenty promieniowe w przegubie 3 w zależności od kąta pomiaru α	121
8.8	Konfiguracje manipulatora, dla których momenty promieniowe działające w wybranych kierunkach, w przegubie 3, są największe.	121
8.9	Siły występujące w przekładni przegubu manipulatora	124
8.10	Siły działające na wybrane powierzchnie przegubu 3, w zależności od kąta poszukiwania maksymalnego momentu promieniowego.	125
8.11	Naprężenia zredukowane modelu oryginalnej części korpusu	126
8.12	Przestrzeń projektowa (przezroczysta) i przestrzeń pasywna (szara) korpusu przegubu manipulatora	127
8.13	Warunki brzegowe przy optymalizacji korpusu przegubu (czerwone oznaczenia - utwierdzenie modelu, żółte oznaczenia - siły przyłożone do elementów modelu	127
8.14	Wynik optymalizacji topologicznej korpusu przegubu manipulatora	128
8.15	Obróbka siatki wynikowej optymalizacji topologicznej. (a) - siatka TO, (b) - wygładzony model implicit, (c) - model implicit zsumowany z modelem przestrzeni pasywnej, (d) - siatka wygenerowana z modelu (c)	129
8.16	Naprężenia zredukowane modelu wynikowego optymalizacji topologicznej . .	130
8.17	Wyniki optymalizacji dla różnej liczby przypadków obciążeń: a - 4, b - 8, c - 16	130
8.18	Modele implicit dla różnej liczby przypadków obciążeń: a - 4, b - 8, c - 16 . . .	131
8.19	Modele implicit zsumowane z modelami przestrzeni pasywnych dla różnej liczby przypadków obciążeń: a - 4, b - 8, c - 16	131
8.20	Naprężenia w korpusie pod wpływem obciążenia $\alpha = 45^\circ$ dla różnej liczby przypadków obciążeń: a - 4, b - 8, c - 16	132
8.21	Optymalizacji korpusu przegubu 3 manipulatora z narzuconymi więzami wykonawczymi (a) - część oryginalna (masa 305g), (b) - część optymalizowania przygotowana w systemie CAD (masa 315g)	132
8.22	Optymalizacji korpusu przegubu 2 manipulatora z narzuconymi więzami wykonawczymi (a) - część oryginalna (masa 430g), (b) - część optymalizowania (masa 335g)	133
8.23	Optymalizacji korpusu przegubu 1 - podstawy manipulatora z narzuconymi więzami wykonawczymi (a) - część oryginalna (masa 939g), (b) - część zoptymalizowania (masa 575g)	133

8.24 Wykonanie korpusu przegubu pierwszego - podstawy manipulatora: a - symulacja obróbki CNC, b - część zamontowana na maszynie CNC, c - wykonana część	134
8.25 Robot PIAP Patrol z zintegrowanym elementem wykonanym wg opracowanej metody: a - podczas badań terenowych, b - podczas testu udźwigu na maksymalnym wysięgu	135

Spis tabel

2.1 Parametry wybranych robotów o masie do 103kg, wyposażonych w manipulatory	14
6.1 Podstawowe parametry manipulatora	68
7.1 Tabela kompatybilności więzów produkcyjnych w oprogramowaniu nTopology: A - Symetria, B - Obszar pasywny, C - Odpowiedź, D - Wyciągnięcie, E - Minimalny wymiar cechy, F - Nawis, G - Powtórzenie wzoru, H - Wyciągnięcie powierzchni, I - Przemapowanie, J - Maksymalny wymiar cechy, K - Rozformowanie, L - Obróbka cnc	102
8.1 Tabela parametrów przekładni dostępnych w bibliotece.	112
8.2 Wybrane rozwiązania z frontu Pareto	118
8.3 Siły wywierane na korpus przez łożyska ślimacznicy przegubu - 16 przypadków obciążenia	125