

Problematyka doboru obciążeń przy projektowaniu i optymalizacji manipulatorów przenośnych robotów mobilnych do zastosowań specjalnych

Tomasz Krakówka

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP, Al. Jerozolimskie 202, 02-486 Warszawa

Andrzej Typiak

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Instytut Robotów i Konstrukcji Maszyn,
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

Streszczenie: Konstrukcje manipulatorów robotów mobilnych do zastosowań specjalnych muszą podlegać optymalizacji w celu osiągnięcia wymaganych zdolności roboczych przy zachowaniu niskiej masy. W literaturze dotyczącej optymalizacji konstrukcji manipulatorów autorzy najczęściej przyjmują w swoich obliczeniach najbardziej niekorzystny stan obciążenia, bądź uwzględniają kilka wyróżnionych stanów obciążenia wynikających ze statyki lub ruchu dynamicznego obciążonego manipulatora. Do przeprowadzenia optymalizacji konstrukcji manipulatora robota teleoperowanego, który podczas operowania narażony jest na kontakt z przeszkodami w nieustrukturyzowanym środowisku, analiza obciążeń musi być wykonana wieloaspektowo. Wyniki takiej analizy służą do doboru elementów manipulatora np. napędów, a także do określenia obciążeń dla projektowania struktury nośnej konstrukcji oraz jej optymalizacji. Wyznaczone obciążenia mogą zostać wykorzystane do optymalizacji topologicznej komponentów manipulatorów w celu minimalizacji masy przy zachowaniu wytrzymałości dostosowanej do warunków pracy. Przedstawione są wstępne prace nad przygotowaniem metody doboru takich obciążeń.

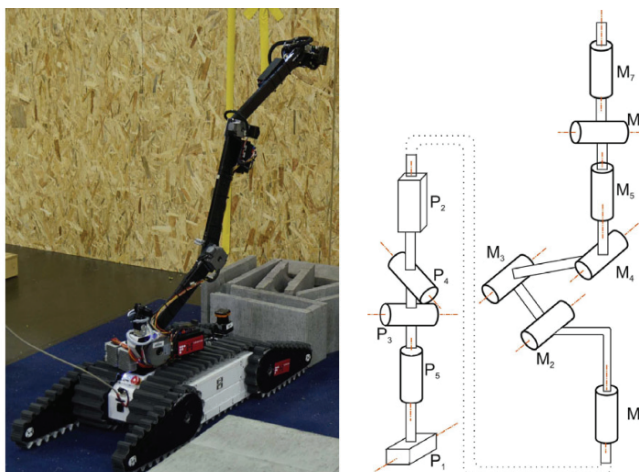
Słowa kluczowe: optymalizacja manipulatorów, złożone przypadki obciążeń, roboty pirotechniczne, manipulatory, robotyka

1. Wprowadzenie

Zadania stawiane robotom mobilnym obejmują dynamiczną manipulację i mobilność, zarówno przy pracy na elastycznych liniach produkcyjnych, wspomaganie człowieka w obszarach usługowych, zastosowaniach medycznych, rehabilitacji, opiece nad osobami starszymi, a także w ratownictwie i zadaniach specjalnych (Rys. 1).

Zadania te wymagają osiągnięcia mobilności oraz zdolności manipulacyjnych, których nie zapewniały dotychczasowe systemy robotyczne. Bieżące badania obejmują rozwój systemów sterowania, nowe podejścia do planowania ścieżki, koncepcje interakcji człowiek-maszyna i nowe czujniki, które zapewniają robotom możliwości sensoryczne często bardziej wyrafinowane

niż te, które mają ludzie. Także w konstrukcji mechanicznej manipulatorów można zauważyć nowe rozwiązania. Ramiona mani-



Rys. 1. Mobilny manipulator do celów ratowniczych, opracowany i zbudowany na Uniwersytecie Nauk Stosowanych w Karyntii (CUAS): a – widok robota, b – łańcuch kinematyczny manipulatora [1]
Fig. 1. Mobile manipulator for rescue purposes, developed and built at the University of Applied Sciences in Carinthia (CUAS): a – robot view, b – manipulator kinematic chain [1]

Autor korespondujący:

Tomasz Krakówka, tomasz.krakowka@piap.lukasiewicz.gov.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 10.01.2022 r., przyjęty do druku 11.03.2022 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0



Rys. 2. Podejmowanie ładunków z przodu i z boku i układanie do skrzyni (Eurathlon 2013)

Fig. 2. Picking-up and stacking of load (Eurathlon 2013)

pulatorów montowane na ruchomych platformach mobilnych wykazują wysoki stosunek udźwigu do masy własnej, co zostało osiągnięte w niektórych najnowszych manipulatorach, takich jak KUKA LWR IIWA, TM Techman, czy Universal Robots [1]. W robotyce do zadań specjalnych także widoczny jest postęp w osiąganiu najwyższego wskaźnika udźwigu do masy własnej.

Roboty mobilne do zadań specjalnych stosowane 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 czynności takich jak np. detekcja, przenoszenie i neutralizacja ładunków niebezpiecznych, detekcja zagrożeń CBRN, prowadzenie rozpoznania i obserwacji, działania poszukiwawcze i ratownicze, rozminowanie, wsparcie straży pożarnej (Rys. 2, Rys. 3).

Każde z wymienionych zadań wiąże się z specyficznymi wymaganiami dla platformy i jej wyposażenia. Podstawowym wyposażeniem robota, które często jest zespolone z platformą jezdną, jest manipulator. Oprócz podstawowej funkcji manipulatora, którą jest podnoszenie i przenoszenie obiektów, manipulatory są wykorzystywane do takich zadań jak: otwieranie drzwi np. w budynkach i w samochodach, przesuwanie obiektów, które są na drodze robota, rycie i kopanie w ziemi w celu znalezienia pułapek lub przewodów, przecinanie przewodów, prześwietlanie obiektów promieniami RTG, neutralizacja za pomocą wyrzutnika pirotechnicznego lub strzelby, pobieranie próbek i pomiary czujnikami CBRN, a także balansowanie i podpieranie platformy mobilnej podczas pokonywania przeszkód lub przywracanie pozycji pracy po wywróceniu robota.

Podstawowym sposobem osiągnięcia wyższego stosunku udźwigu do masy urządzenia jest przeprowadzenie redukcji masy konstrukcji. Do przeprowadzenia tej operacji konieczna jest identyfikacja obciążeń, jakim podlegać będzie konstrukcja i zdefiniowanie krytycznych stanów obciążeń, które będą wzięte pod uwagę podczas obliczeń. Przy optymalizacji konstrukcji wyróżnia się takie metody jak: optymalizacja wymiaru, optymalizacja kształtu i optymalizacja topologiczna [2]. Podczas redukcji wagi konstrukcji najlepsze rezultaty redukcji masy

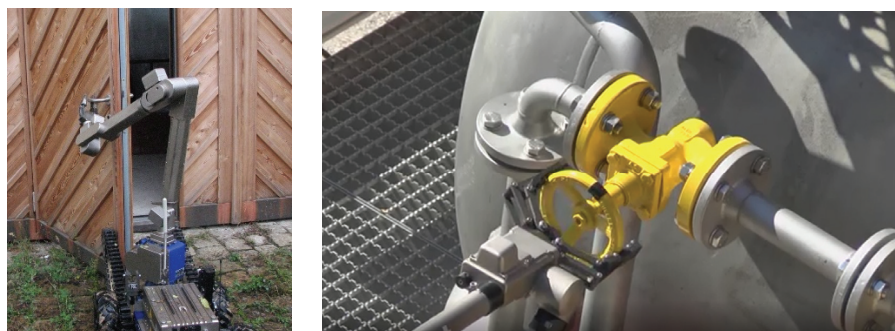
można osiągnąć przez kombinację optymalizacji parametrycznej i topologicznej [3, 4].

Optymalizację parametryczną konstrukcji można rozpatrywać jako dobór optymalnych parametrów opisujących geometrię konstrukcji. Mogą to być np. parametr grubości ścianki wielkość lub liczba otworów. Coraz częściej stosowaną metodą optymalizacji części maszyn jest optymalizacja topologiczna. Podczas działania algorytmu optymalizowane jest rozmieszczenie materiału części dla zadanego obciążenia. Po zdefiniowaniu warunków brzegowych – obszaru działania optymalizacji, obszarów niepodlegających modyfikacji, więzów i obciążeń następuje proces optymalizacji wg przyjętego kryterium. Algorytm w swojej podstawowej wersji [2] minimalizuje podatności elementów siatki przy założonej redukcji objętości. Część jest optymalizowana dla przyjętego stanu obciążenia. W przypadku konstrukcji manipulatorów obciążenia członów manipulatora są zmienne zarówno pod względem wartości, jak i kierunku, co należy uwzględnić w obliczeniach.

2. Dobór obciążeń na podstawie przykładów z literatury

W literaturze można znaleźć przykłady doboru obciążeń do przeprowadzenia optymalizacji, najczęściej na przykładach manipulatorów przemysłowych. W [5] autorzy wykonują optymalizację topologiczną ramienia manipulatora przemysłowego z uwzględnieniem zmienności kierunku obciążeń podczas obrotu ramienia. Autorzy założyli, że ramię jest obciążone na końcu siłą pionową. Wykonana optymalizacja uwzględniła obciążenia podczas obrotu ramienia od kąta 0° do 170° , co 10° .

W [6] optymalizacji topologicznej podlegały komponenty manipulatora. W obliczeniach uwzględniono obciążenia wynikające ze zmiennej konfiguracji ramion, z rozdzielczością 10° , oraz obciążeń wynikających z maksymalnych przyspieszeń i opóźnień napędów manipulatora. W [7] wykonana jest optymalizacja topologiczna komponentów egzoszkieletu kończyny górnej przy użyciu dwóch metod. Autorzy wykonali optymalizację



Rys. 3. Otwieranie drzwi i zakręcanie zaworu (Eurathlon 2013)

Fig. 3. Opening the door and closing the valve (Eurathlon 2013)

zając dla pojedynczej konfiguracji, dla której naprężenia konstrukcji są największe. Przyjęto, że ramiona są wyprostowane poziomo oraz jako obciążenia przyjęto maksymalne przyspieszenia osiągalne przez przeguby ramienia. W pracy [8] autorzy przedstawili proces projektowania manipulatora o strukturze równoległej, przeznaczonego do paletyzacji. Do przyjęcia obciążeń dla optymalizacji topologicznej wykonali analizę obciążeń w poszczególnych przegubach manipulatora dla pełnego zakresu ruchu członów przy dla założonego przenoszonego ciężaru. Autorzy przyjęli do optymalizacji jeden, wybrany stan obciążenia. W pracy [9] autorzy przedstawili metodę optymalizacji lekkiego manipulatora antropomorficznego. Do identyfikacji obciążeń ramienia zostały przeanalizowane typowe konfiguracje i warunki obciążenia. Do optymalizacji komponentów zostały wykorzystane różne obciążenia. Każdy przypadek obciążenia był podzielony na obciążenie zginające, ścinające i rozciągające. W pracy [4] autorzy przedstawili sposób optymalizacji manipulatora przeznaczonego do malowania natryskowego, przy wykorzystaniu optymalizacji topologicznej oraz parametrycznej. W obliczeniach zostały wykorzystane przypadki obciążeń które generowały największe ugięcie efektora dla 30 losowo wygenerowanych konfiguracji manipulatora. Ugięcia były obliczane metodą MES korzystając z modelu przed optymalizacją. Problematyka sposobu uwzględnienia wielu przypadków obciążenia jest opisywana m.in. w pracach [2, 10–12].

Przykłady doboru obciążeń do optymalizacji struktury nośnej manipulatora, które można znaleźć w literaturze nie odzwierciedlają rzeczywistych obciążeń, które występują w przypadku manipulatorów robotów mobilnych a w szczególności robotów mobilnych do zadań specjalnych.

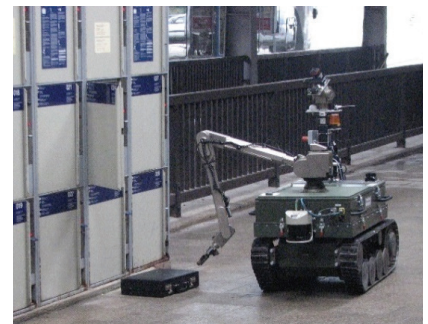
3. Podział obciążeń ze względu na zadania

Do przeprowadzenia efektywnej optymalizacji topologicznej ważne jest odpowiednie zdefiniowanie obciążeń. W praktyce podczas zdalnego sterowania teleoperowanymi robotami mobilnymi występują nie tylko obciążenia związane z przenoszeniem ładunków czy używaniem końcówki roboczej [1], ale też inne obciążenia, które należy uwzględnić w założeniach. Manipulator robota mobilnego do zadań specjalnych w czasie eksploatacji podlega złożonym obciążeniom. Poniżej wymienione będą zadania, podczas których konstrukcja podlega największym obciążeniom.

3.1. Przenoszenie obiektów

Podczas normalnej pracy manipulatorów robotów do zadań specjalnych można założyć, że obciążenia są quasi-statyczne i wynikają z podnoszenia i przesuwania obiektów chwytakiem lub narzędziem roboczym (Rys. 4). Często dla robotów do zadań specjalnych określa się maksymalną masę, którą robot może unieść na manipulatorze wyprostowanym poziomo oraz maksymalną masę, którą robot może unieść blisko platformy

Rys. 4. Podejmowanie niebezpiecznego ładunku i wyjmowanie walizki z szafki na dworcu (Eurathlon 2013)
Fig. 4. Picking up a dangerous load and taking a suitcase out of a locker at a station (Eurathlon 2013)



mobilnej. Są to parametry, które są podstawą doboru i optymalizacji układów napędowych oraz struktury nośnej manipulatora. Jednakże często obiekty, które operator chciałby podjąć mogą przekraczać możliwości udźwigu manipulatora lub stateczność robota. Znaczne obciążenia mogą także wynikać z wykorzystywania dodatkowych akcesoriów robota.

3.2. Przesuwanie obiektów manipulatorem

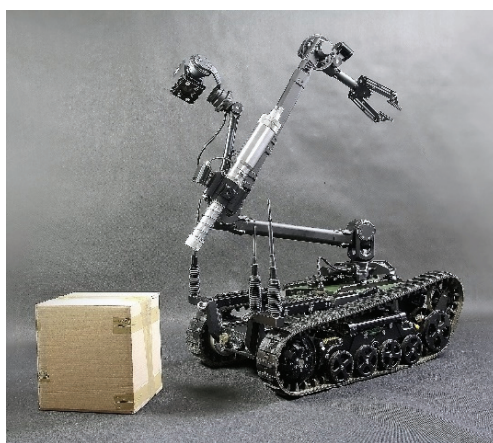
Zdarzają się sytuacje, kiedy konieczne jest przesunięcie ciężkiego obiektu stojącego np. na ziemi. W takiej sytuacji obiekt jest popychany lub ciągnięty np. końcówką roboczą manipulatora. Obiekt może być przesuwany poprzez odpowiedni ruch przegubów manipulatora, ale też przez ruch platformy mobilnej. Obciążenia, które występują w takiej sytuacji mogą być znaczące i ich kierunek jest inny niż w przypadku 3.1. Przykładami ruchów i obciążeń, które należy wziąć pod uwagę są np. przesuwanie obiektów po gruncie chwytakiem przez obrót pierwszej – pionowej osi lub obrót platformy w miejscu, ciągnięcie chwytakiem obiektu przez wykorzystanie układu napędowego platformy robota, co ma miejsce np. podczas przeciągania samochodu, napór końcówką roboczą, np. podczas przebijania opony lub wybijania szyby samochodowej.

3.3. Kopanie i rycie w ziemi

Roboty są wykorzystywane m.in. do detekcji i wydobywania obiektów zakopanych w gruncie (Rys. 5). W takim przypadku wykorzystywany jest zarówno ruch manipulatora, jak i platformy mobilnej. Obciążenia mogą być podobnie zdefiniowane i porównywane z obciążeniami z punktu 3.2.



Rys. 5. Wyciąganie zakopanego przedmiotu (Eurathlon 2013)
Fig. 5. Extracting a buried Item (Eurathlon 2013)



Rys. 6. Robot PIAP – Patrol wyposażony w strzelbę oraz działko pirotechniczne
 Fig. 6. PIAP Robot – Patrol equipped with a shotgun and a disrupter

3.4. Obciążenia wynikające z wykorzystania końcówek roboczych

Na manipulatorach mogą być mocowane i używane akcesoria do neutralizacji ładunków wybuchowych takie jak wyrzutniki pirotechniczne lub strzelby gładkolufowe (Rys. 6). Podczas wystrzałów generowane są znaczne siły w krótkim czasie [13, 14]. Konstrukcja musi być odporna na tego typu obciążenia.

Podczas wykonywania niektórych działań, jako końcówki robocze, wykorzystane są także nożyce elektrohydrauliczne. Narzędzie służy m.in. do cięcia lub rozpierania elementów karoserii pojazdów. W zależności od użytego modelu generowane są siły tnące rzędu np. 700 kN [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 ruch napotyka na mniejszy opór. Manipulator musi dostosować się do wymuszonej końcówką roboczą pozycji. Częściowo efekt jest redukowany poprzez wykorzystanie uchwytów z elementami podatnymi.

3.5. Podnoszenie i podpieranie platformy mobilnej

Często wymagane jest, żeby robot mógł sam się podnieść po przewrocie. Przy użyciu manipulatora operator może przywrócić platformę mobilną do pozycji pracy.

Manipulator może także być wykorzystany do podparcia platformy w trakcie pokonywania przeszkód terenowych (Rys. 7). Roboty Łukasiewicz – PIAP wyposażone są w dodatkowe koło umieszczone w osi nadgarstka. Należy także uwzględnić, że przewróconego robota najszybciej i najłatwiej jest podnieść podchodząc do niego i przywracając do pozycji roboczej chwytając za elementy konstrukcji np. ramie manipulatora.

3.6. Obciążenia dynamiczne

Platformy mobilne robotów podczas pracy poruszają się po przeszkodach terenowych, krawężnikach, schodach itp. Biorąc pod uwagę, że platformy mogą się poruszać z prędkościami 10 km/h lub więcej, wymuszony ruch manipulatora może powodować 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 także dochodzić do drgań manipulatora wynikających z występów na bieżniku opon lub segmentów gąsienicy platformy mobilnej.

3.7. Kolizje manipulatora

Praca robota w nieznanym i dynamicznym środowisku powoduje, że podczas teleoperacji robota dochodzi do wywrotek

Rys. 7. Podpieranie się ramieniem (Eurathlon 2013) i podnoszenie robota manipulatorem (Łukasiewicz– PIAP)

Fig. 7. Leaning on the arm (Eurathlon 2013) and lifting the robot with a manipulator



i kolizji z przeszkodami. Kolizja może być z obiektem statycznym lub przemieszczającym się, co może potęgować jej skutki. Jest to zwykle powodowane ograniczoną świadomością sytuacji operatora.

4. Wpływ zadań i obciążeń na konstrukcję manipulatora

Manipulatory robotów mobilnych znacznie różnią się pod względem wymagań i parametrów od robotów przemysłowych. Parametry takie jak dokładność i powtarzalność, które są powiązane z sztywnością konstrukcji mają małe znaczenie i nie są dla tych konstrukcji określane [16]. Jest to związane z sposobem sterowania manipulatorów, które są teleoperowane i sprzężenie zwrotne jest realizowane przez operatora na podstawie obrazu z kamer robota.

W przypadku robotów przemysłowych podstawowym kryterium optymalizacyjnym dla elementów konstrukcji jest minimalizacja odkształceń końcówki roboczej podczas pracy. Sztywność takiej konstrukcji i współczynniki bezpieczeństwa elementów są duże. W przypadku robotów mobilnych do zadań specjalnych, zwłaszcza przenośnych jednym z ważniejszych czynników jest stosunek udźwigu do masy. W takim przypadku współczynniki bezpieczeństwa są niższe i obciążenie, które nie zostało na etapie projektowania uwzględnione może uszkodzić konstrukcję.

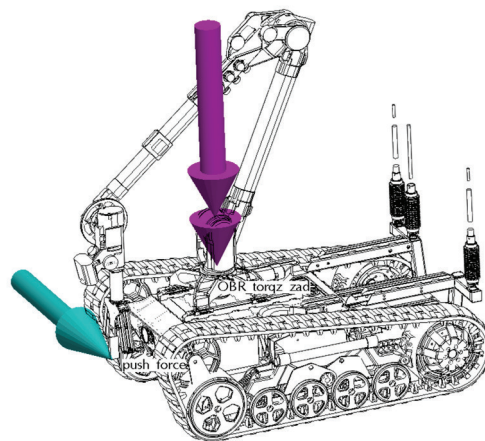
W celu zapewnienia odporności manipulatora na przeciążenia często w przegubach manipulatorów stosowane są sprzęgła przeciążeniowe, zabezpieczające napędy przed przekroczeniem dopuszczalnego obciążenia. Niestosowanie sprzęgieł przeciążeniowych jest możliwe, jeśli wytrzymałość manipulatora jest odpowiednia w stosunku do masy platformy mobilnej. Oczywiście stosowanie sprzęgieł nie zabezpiecza konstrukcji w przypadku składowych momentów, które nie działają w osiach przegubów. W takich przypadkach najczęściej obciążenia są ograniczane stabilnością platformy mobilnej lub przyczepnością platformy do podłoża.

Należy określić, jakie kombinacje wymienionych obciążeń są możliwe do zrealizowania i na tej podstawie wytypować kluczowe stany obciążeń. Należy także wziąć pod uwagę, że przygotowanie konstrukcji do niektórych hipotetycznie możliwych obciążeń może być nieuzasadnione i kosztowne. Takie obciążenie może wystąpić podczas kolizji wyprostowanego w bok manipulatora z przeszkodą, podczas kiedy platforma jedzie z pełną prędkością. Zabezpieczenia konstrukcji na taką ewentualność może być kosztowne i skomplikowane. W takich przypadkach zagrożenie może być wyeliminowane odpowiednim szkoleniem i np. programową redukcją prędkości robota w konfiguracji z rozłożonym ramieniem itp. Analiza ryzyka pozwoliłaby na opracowanie konstrukcji, która nie była by przewymiarowana.

5. Przykład obciążenia

Przykładem zadania, które należy uwzględnić przy optymalizacji konstrukcji jest przesuwanie stojącej na gruncie przeszkody chwytakiem. W takim przypadku chwytak napiera np. z boku na obiekt przez obrót manipulatora w pierwszej – pionowej osi. W celu ilustracji została przeprowadzona symulacja, podczas której manipulator robota działa maksymalnym momentem osiągalnym dla danej osi, a chwytak zapiera się o niewidoczną przeszkodę. Wykorzystany tu został moduł do symulacji dynamiki układów wielocłonowych w oprogramowaniu Creo [17, 18].

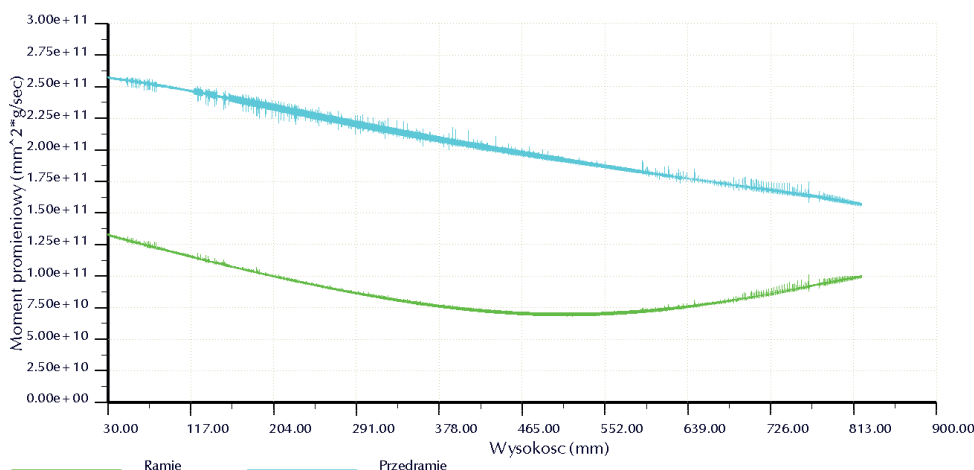
Na Rys. 8 pokazany jest robot, którego jedna oś wywiera stały moment M 70 Nm. Obrót manipulatora jest ograniczony przez zdefiniowany kontakt końcówki chwytaka z niewidoczną płaszczyzną. Chwytak działając na ramieniu 300 mm od osi obrotu wywiera na płaszczyznę siłę F . Podczas symulacji, chwytak jest podnoszony pionowo od poziomu gruntu. Zachowywana jest pionowa orientacja chwytaka.



Rys. 8. Moment wymuszający obrót manipulatora i siła reakcji przeszkody

Fig. 8. The moment that forces the manipulator to rotate and the force of reaction to an obstacle

Na wykresie (Rys. 9) pokazane są momenty działające promiennie dla przegubów ramienia i przedramienia podczas ruchu chwytaka do góry. Można zauważyć, że moment promieniowy przedramienia w najniekorzystniejszym momencie osiąga około 260 Nm, co jest wartością porównywalną z zakładaną możliwością obciążania momentem przegubu w kierunku osiowym. Symulacja została przerwana, gdy robot zaczął się przewracać.



Rys. 9. Wykres momentu promieniowego w ramieniu i przedramieniu robota podczas napierania chwytakiem na ścianę

Fig. 9. Diagram of the radial moment in the arm and forearm of the robot while pressing the gripper against the wall

Można zauważyć, że przy tak zdefiniowanym obciążeniu, moment skręcający górne ramię byłby większy dla chwytaka obróconego o 90° względem przedramienia, przy napieraniu w punkcie bliższym osi obrotu podstawy manipulatora, np. na element podstawy manipulatora. Pokazuje to, jak ważne dla bezpieczeństwa konstrukcji jest wsparcie operatora robota np. za pomocą wizualizacji konfiguracji manipulatora lub systemu zapobiegającemu kolizji końcówki roboczej z elementami robota.

6. Podsumowanie

Podczas przygotowywania założeń do projektowania i optymalizacji manipulatorów robotów mobilnych istotna jest analiza obciążeń występujących nie tylko podczas nominalnej zakładanej pracy urządzenia. Należy przewidzieć różne, niestandardowe kombinacje obciążeń, np. operator robota może także podejmować ciężkie ładunki, przekraczając możliwości statyczne platformy mobilnej, dzięki możliwości podparcia przegubów robota na gruncie do skrócenia ramienia działania siły od podnoszonego ciężaru. Konieczne jest rozważenie wszelkich możliwych stanów obciążenia podczas pracy. Jak pokazał zaprezentowany przykład, takie obciążenia nie mogą być pominięte.

Dobór obciążeń do projektowania i optymalizacji można potraktować jako poszukiwanie maksymalnych wartości sił w każdym z przegubów w całej przestrzeni możliwych konfiguracji i obciążeń. Jest to proces wielokryterialnej optymalizacji, w którym poszukiwane są zmienne w postaci parametrów opisujących konfigurację i obciążenia zewnętrzne, dla których siły w kluczowych miejscach konstrukcji, jak np. w przegubach manipulatorów są największe.

W cytowanej literaturze autorzy wykonują optymalizację topologiczną elementów konstrukcji manipulatorów przykładając obciążenia prostopadle do osi obrotu przegubu, pod zmiennymi kątami z rozdzielczością 10°. Należy rozważyć sposób uwzględnienia w optymalizacji bardziej złożonej zmienności obciążeń pod względem kierunków i wartości.

W pracy zostały przedstawione najważniejsze zadania i czynniki, które należy wziąć pod uwagę podczas definiowania obciążeń pod kątem przeprowadzenia optymalizacji konstrukcji manipulatorów robotów do zadań specjalnych. Określone zostały charakterystyczne cechy konstrukcji manipulatorów, wynikające z wymienionych zadań. Na przykładzie obciążenia, które występuje dla typowego zadania, wskazano na istotność dokładnej analizy obciążeń przy definiowaniu zadania optymalizacji. Zasygnalizowana została możliwość zdefiniowania procesu poszukiwania najniekorzystniejszych stanów obciążenia przegubów jako zadania optymalizacyjnego.

Na podstawie przeprowadzonej wstępnej analizy obciążeń manipulatora przewiduje się określenie algorytmu doboru obciążeń do przeprowadzenia optymalizacji topologicznej komponentów manipulatora robota mobilnego do zadań specjalnych.

Opracowana metoda pozwoli na przeprowadzenie optymalizacji topologicznej konstrukcji, która będzie uwzględniała stany obciążeń spotykane podczas eksploatacji robota. Zagadnienie jest szczególnie istotne dla badaczy i konstruktorów opracowujących manipulatory robotów mobilnych a także metoda może zostać zaadaptowana do optymalizacji innych konstrukcji, w których występuje wiele złożonych stanów obciążenia.

Bibliografia

- Sereinig M., Werth W., Faller L.-M., *A review of the challenges in mobile manipulation: systems design and RoboCup challenges*, "Elektrotechnik und Informationstechnik", Vol. 137, No. 6, 2020, 297–308, DOI: 10.1007/s00502-020-00823-8.
- Bendsøe M., Sigmund O., *Topology optimization. Theory, methods, and applications*. 2004, DOI: 10.1007/978-3-662-05086-6.
- Tyflopoulos E., Steinert M., *Topology and Parametric Optimization-Based Design Processes for Lightweight Structures*, "Applied Sciences", Vol. 10, No. 13, 2020, DOI: 10.3390/app10134496.
- Wang X., Zhang D., Zhao C., Zhang P., Zhang Y., Cai Y., *Optimal design of lightweight serial robots by integrating topology optimization and parametric system optimization*, "Mechanism and Machine Theory", Vol. 132, 2019, 48–65, DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2018.10.015.
- Lakshmi Srinivas G., Javed A., *Topology Optimization of Industrial Manipulator-Link Considering Dynamic Loading*, "Materials Today", Proceedings, Vol. 18, Part 7, 3717–3725, DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.306.
- Lakshmi Srinivas G., Javed A., *Topology optimization of rigid-links for industrial manipulator considering dynamic loading conditions*, "Mechanism and Machine Theory", Vol. 153, 2020, DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.103979.
- Sha L., Lin A., Zhao X., Kuang S., *A topology optimization method of robot lightweight design based on the finite element model of assembly and its applications*, "Science Progress", 2020, DOI: 10.1177/0036850420936482.
- Zhang H., Huang Y., Mo Z., Zhang X., *Mechanism Design and Analysis for a Lightweight Manipulator Based on Topology Optimization Methods*, "Mechanism and Machine Science", Singapore, 2017, 467–477, DOI: 10.1007/978-981-10-2875-5_39.
- Wu H., Yin M., Zhao Z., Xu Z., *Topology optimization method and lightweight design of anthropomorphic manipulator*, "Journal of Physics: Conference Series", Vol. 1453, No. 1, 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1453/1/012068.
- Briot S., Goldsztejn A., *Topology Optimization of Industrial Robots: Application to a Five-bar Mechanism*, "Mechanism and Machine Theory", Vol. 120, 2018, 30–56, DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2017.09.011.
- Kim B.J., Yun D.K., Lee S.H., Jang G.-W., *Topology optimization of industrial robots for system-level stiffness maximization by using part-level metamodels*, "Structural and Multidisciplinary Optimization", Vol. 54, 2016, 1061–1071, DOI: 10.1007/s00158-016-1446-x.
- Novotny A.A., Lopes C., Santos R., *Topological Derivative-based Topology Optimization of Structures Subject to Multiple Load-cases*, "Latin American Journal of Solids and Structures", Vol. 12, No. 5, 2014, DOI: 10.1590/1679-78251252.
- Canfield-Hershkovitz B., Foster T., Meijer W., Rifle and Shotgun Recoil Test System, 2013.
- Parate B.A., Chandel S., Shekhar H., *Estimation of Recoil Energy of Water-Jet Disruptor*, "Problemy Mechatroniki: uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa", Vol. 11, Nr 2, 2020, 31–42, DOI: 10.5604/01.3001.0014.1991.
- Ogura Rescue Tools – truly portable rescue tools, <https://ogurarescuetools.com>.
- Trevelyan J.P., Kang S.-C., Hamel W.R., *Robotics in Hazardous Applications*, "Springer Handbook of Robotics", 2008, 1101–1126, DOI: 10.1007/978-3-540-30301-5_49.
- Creo CAD Software: *Enable the Latest in Design* | PTC, www.ptc.com/en/products/creo.
- Buffinton K.W., *Kane's Method in Robotics*, "Robotics and Automation Handbook", CRC Press, 2005.

Selection of Loads in the Design and Optimization of Manipulators of Portable Mobile Robots for Special Applications

Abstract: The construction of mobile robot manipulators for special applications must be optimized to achieve the required working capacity while maintaining a low mass. In the literature on the optimization of manipulator structures, the authors most often take into account the most unfavorable load case in their calculations or take into account several distinguished load cases resulting from the static or dynamic of the loaded manipulator. To optimize the design of a teleoperated robot manipulator, which during operation is exposed to contact with obstacles in an unstructured environment, the load analysis must be carried out in many aspects. The results of such analysis are used to select manipulator elements, e.g. drives, and to determine the loads for the design of the load-bearing structure and its optimization. The determined loads can be used to perform topological optimization of components of manipulators to minimize the mass while maintaining strength adapted to the operating conditions. Preliminary work on the preparation of a method for selecting such loads is presented.

Keywords: optimization of manipulators, multiple load cases, eod robots, manipulators, robotics

dr hab. inż. Andrzej Typiak

andrzej.typiak@wat.edu.pl
ORCID: 0000-0003-1992-015X

Profesor na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Wojskowej Akademii Technicznej. Wykładowca na kierunkach studiów: Energetyka, Maszyny inżynieryjno-budowlane i drogowe, Maszyny inżynieryjne, oraz Inżynieria systemów bezzałogowych. Autor wielu publikacji z obszaru zdalnego i autonomicznego sterowania maszynami inżynieryjnymi i pojazdami. Kierował czterema projektami badawczymi z tego obszaru. Prowadzi badania w obszarze sterowania maszyn inżynieryjnych i pojazdów w układzie teleoperacji, rozpoznania otoczenia na podstawie obrazów wizyjnych, lokalizowania obiektów i budowy mapy na podstawie pomiarów skanerami laserowymi oraz interfejsów do współpracy operator-maszyna.



mgr inż. Tomasz Krakówka

tomasz.krakowka@piap.lukasiewicz.gov.pl
ORCID: 0000-0002-0004-835X

Absolwent Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej, Zatrudniony w Sieć Badawcza Łukasiewicz – Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP, gdzie zajmuje się pracami badawczo rozwojowymi w zakresie bezałogowych platform mobilnych i manipulatorów przeznaczonych dla służb odpowiedzialnych za bezpieczeństwo i obronność. Od 2020 r. uczestnik programu doktoratów wdrożeniowych w Szkole Doktorskiej Wojskowej Akademii Technicznej.

