

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA
WYDZIAŁ ELEKTRONIKI

KIERUNEK: Automatyka i Robotyka (AIR)
SPECJALNOŚĆ: Robotyka (ARR)

**PRACA DYPLOMOWA
MAGISTERSKA**

Podatny manipulator planarny - budowa i
sterowanie

Vulnerable planar manipulator - design and
control

AUTOR:
Michał Kot

PROWADZĄCY PRACĘ:
dr inż. Janusz Jakubiak, I-6

OCENA PRACY:

Spis treści

1	Wstęp	3
2	Cele projektu	5
2.1	Aspekt inżynierski	5
2.2	Aspekt badawczy	5
2.3	Kinematyka	6
3	Pierwotwór	7
3.1	Różnice w stosunku do pierwotworu	7
4	Struktura manipulatora	9
4.1	Konfiguracje niedozwolone	9
4.2	Kinematyka manipulatora	9
4.2.1	Prosta kinematyka manipulatora	9
4.2.2	Odwrotna kinematyka manipulatora	9
5	Wyznaczenie wymiarów manipulatora	11
5.1	Obliczenie przestrzeni roboczej manipulatora	11
5.1.1	Przestrzeń robocza na bazie prostej kinematyki	11
5.1.2	Przestrzeń robocza na bazie odwrotnej kinematyki	11
5.1.3	Obwiednia przestrzeni roboczej	12
5.1.4	Wyznaczanie powierzchni przestrzeni roboczej	12
5.2	Wyznaczenie wymiarów manipulatora na podstawie przestrzeni roboczej . .	12
5.2.1	Wyznaczenie wymiarów próbnej wersji manipulatora	12
5.2.2	Wyznaczenie wymiarów ostatecznej wersji manipulatora	13
6	Podsumowanie projektu	17
A	Zawartość płyty CD	19
	Bibliografia	19

Rozdział 1

Wstęp

Oby gdzieś był

Rozdział 2

Cele projektu

Celem projektu zrealizowanego w ramach niniejszej pracy magisterskiej jest zaprojektowanie i skonstruowanie planarnego, równoległego i redundantnego manipulatora, który będzie w stanie analizować siły działające na niego z zewnątrz. Umożliwi to zręczne poruszanie się robota w środowisku, ponieważ każda napotkana przeszkoda spowoduje zatrzymanie go bądź też zmusi do osiągnięcia zadanego położenia w innej konfiguracji przegubów. Dodatkową cechą, która zostanie zaimplementowana w manipulatorze jest możliwość uczenia się ruchów zadanych manualnie przez operatora – konkretna ścieżka może zostać zapisana na podstawie odczytów sił działających na napędy.

2.1 Aspekt inżynierski

Aspekt inżynierski projektu zakłada zaprojektowanie mechaniki i układu sterowania manipulatora. Jest on ściśle powiązany z aspektem badawczym (2.2), ponieważ dobór parametrów układu mechanicznego musiał zostać poprzedzony szeregiem analiz i symulacji. Trójwymiarowy model obiektu został wykonany z wykorzystaniem środowiska Autodesk Inventor [?], które to umożliwia szybkie i wygodnie modelowanie złożonych konstrukcji mechanicznych. Co więcej, posiada on plugin SimMechanics Link [?], umożliwiający eksport modelu do toolboxa Simulink środowiska Matlab [?], które jest jednym z najpopularniejszych i najbardziej rozbudowanych aplikacji symulacyjnych. W trakcie prac z wykorzystaniem Inventora skonstruowane zostały cztery podobne modele manipulatora, które ewoluowały w kierunku wersji docelowej.

Projektowanie i implementacja algorytmów sterowania bla bla

2.2 Aspekt badawczy

Opracowanie kryteriów doboru parametrów kinematycznych manipulatora stanowiło jeden z kluczowych elementów aspektu badawczego projektu. Proporcje długości ramion robota mają istotny wpływ na jakość i wielofunkcyjność jego pracy, w związku z czym definiuje się cały szereg kryteriów [?], które różnią się pomiędzy sobą zarówno podejściem, jak i stopniem skomplikowania:

- ekscentryczność manipulatora, mierząca odległość położenia przegubów od ich pozycji środkowych,
- manipulowalność manipulatora, która jest miarą wrażliwości efektora na lokalne wariacje konfiguracji,

- współczynnik uwarunkowania, będący miarą stopnia anizotropowości konfiguracji,
- dystorsja kinematyczna, jako miara niesztymności kinematyki,
- objętość przestrzeni roboczej,
- gęstość objętości kinematyki.

W teorii robotyki stosuje się także kombinacje kilku różnych kryteriów. W przypadku niniejszego projektu zastosowane zostało kryterium mówiące o objętości przestrzeni roboczej, co w przypadku manipulatorów planarnych sprowadza się do powierzchni przestrzeni roboczej. Obliczenie przestrzeni z dużą dokładnością dla wielu różnych konfiguracji robota jest niemożliwe bez wykorzystania komputera. W związku z tym konieczne okazało się napisanie programu z wykorzystaniem języka C++, który wyszukuje optymalną konfigurację parametrów manipulatora. Szerzej zostało to opisane w rozdziale 5.

Istotną częścią aspektu badawczego projektu były także badania porównawcze algorytmów sterowania oraz ocena ich własności. bla bla

2.3 Kinematyka

Efektorem (chwytaikiem) nazywa się zakończenie konstrukcji manipulatora, które często posiada możliwość wymiany bądź modyfikacji. Dzięki temu jeden robot może sekwencyjnie wykonywać kilka różniących się od siebie operacji. Przekształcenie geometryczne, które pozwala wyznaczyć położenie efektora w przestrzeni roboczej na podstawie położenia przegubów manipulatora określa się mianem kinematyki. Ze względu na planarność konstruowanego manipulatora wyznaczenie kinematyki sprowadza się do obliczenia położenia X i Y , gdyż ruch robota odbywa się na płaszczyźnie i współrzędna Z jest stała.

Rozdział 3

Pierwówzór

Pomysł na stworzenie planarnego manipulatora zrodził się po przeczytaniu artykułu naukowego "Hybrid position/force control of a flexible parallel manipulator" [?]. Autorzy tego artykułu podjęli się stworzenia równoległego manipulatora, którego cechą charakterystyczną jest elastyczna końcówka umożliwiająca pomiary sił/momentów działających na efektor. Jak widzimy na rysunku ??, do pomiaru siły został wykorzystany czujnik sił/momentów o sześciu stopniach swobody, dzięki czemu możliwe jest wykrycie każdego rodzaju deformacji elastycznej końcówki. Zaletą takiego rozwiązania jest zdolność do analizy sił i momentów, którymi otoczenie oddziałuje na efektor. W rezultacie, poprzez zastosowanie hybrydowego sterowania, polegającego na jednoczesnym kontrolowaniu położenia efektora i sił na niego oddziałujących, jesteśmy w stanie zapewnić dokładniejszą i bezpieczniejszą interakcję manipulatora z otoczeniem. Wynika to z braku dużych sił powstających przy wykorzystaniu jedynie kontroli położenia.

3.1 Różnice w stosunku do pierwowzoru

Stworzony w ramach niniejszej pracy magisterskiej manipulator różni się jednakże w wielu aspektach od swojego pierwowzoru. Konstrukcja tamtego manipulatora nie zakładała redundancji, która jest jednym z fundamentów tego projektu. Redundancja, która umożliwia osiągnięcie jednego położenia efektora przy pomocy wielu różnych konfiguracji manipulatora, została zapewniona poprzez wprowadzenie jednego dodatkowego przegubu pasywnego. Co więcej, w stosunku do pierwowzoru elastyczne ramie połączone z czujnikiem sił i momentów zostało zastąpione przez inny mechanizm, opisany dokładniej w rozdziale ??. Dzięki zmianom w konstrukcji manipulator stworzony w ramach tego projektu posiada większą gamę potencjalnych zastosowań, np. możliwość uczenia się.

Rozdział 4

Struktura manipulatora

4.1 Konfiguracje niedozwolone

4.2 Kinematyka manipulatora

4.2.1 Prosta kinematyka manipulatora

4.2.2 Odwrotna kinematyka manipulatora

Rozdział 5

Wyznaczenie wymiarów manipulatora

Po zdefiniowaniu modelu robota w postaci równań kinematyki można przejść do projektowania jego fizycznej konstrukcji. Pierwszym etapem tego procesu jest określenie żądanych gabarytów robota. Istnieje kilka podejść do tego zadania 2.2, jednakże w przypadku tej pracy została wykorzystana analiza stosunku wielkości przestrzeni roboczej do rozmiarów poszczególnych elementów manipulatora.

5.1 Obliczenie przestrzeni roboczej manipulatora

W celu obliczenia przestrzeni roboczej manipulatora stworzony został oddzielny program w języku C++, który realizował to zadanie. Składał się on przede wszystkim z klasy symulującej obiekt manipulatora, w której zaimplementowane zostały metody liczenia zarówno prostej jak i odwrotnej kinematyki dla konkretnej instancji robota. Na ich podstawie wyznaczana jest przestrzeń robocza. Wyniki obliczeń z wykorzystaniem jednej i drugiej metody zapisywane są do tej samej postaci, co pozwala na ich porównanie.

Postać ta zakłada stworzenie odpowiednio dużej siatki w przestrzeni (większej niż przestrzeń robocza manipulatora) o określonych i równych rozmiarach pojedynczych komórek wypełnionych zerami. Następnie wypełniamy wartościami jeden wszystkie te komórki, które są dla poprzez efektor osiągalne dla badanego manipulatora.

5.1.1 Przestrzeń robocza na bazie prostej kinematyki

Prosta kinematyka manipulatora zaimplementowana analogicznie do obliczeń z rozdziału ??, tutaj jest już liczona dla konkretnych wartości parametrów manipulatora. W celu wyznaczenia przestrzeni roboczej rozpatrzone zostały wszystkie możliwe konfiguracje kątów przegubów manipulatora, z dokładnością do zadanego kroku i z wyłączeniem konfiguracji niedozwolonych (opisanych szerzej w rozdziale 4.1). Rezultatem wyznaczenia prostej kinematyki jest położenie XY, dla którego odpowiadająca komórka siatki przestrzeni (ta, w której efektor w zadanej konfiguracji się znajduje) zostaje wypełniona jedynką.

5.1.2 Przestrzeń robocza na bazie odwrotnej kinematyki

W przypadku odwrotnej kinematyki stosujemy odwrotne podejście do problemu wyznaczenia przestrzeni roboczej. Tym razem zadanie sprowadza się do przejrzania wszystkich komórek siatki przestrzeni i oznaczeniu jedynką tych, dla których możliwe jest wyznaczenie konfiguracji manipulatora, w której efektor znajduje się w aktualnej komórce.

W związku z tym funkcja wyznaczająca odwrotną kinematyką dla zadanego położenia zwraca wartość *true/false* w zależności od tego czy operacja się powiodła.

5.1.3 Obwiednia przestrzeni roboczej

Kolejnym etapem liczenia powierzchni jest wyznaczenie obwiedni przestrzeni roboczej na podstawie siatki wypełnionej z wykorzystaniem metod kinematyki. W tym celu został zaimplementowany algorytm, który dla zadanej siatki tworzy jej kopię zawierającą jedynie obrys przestrzeni. Co warto dodać, dla efektywności obliczeń nie przeszukuje on całej siatki, a jedynie inteligentnie porusza się po krawędziach przestrzeni roboczej (zakładamy, że jest ona wypukła).

Dodatkowo w algorytmie została zaimplementowana możliwość zapisania wygenerowanego obrysu do pliku. Odbywa się to poprzez przeliczenie odpowiednich komórek siatki na wartości X i Y co umożliwia późniejsze narysowanie przestrzeni. Przykład takiej obwiedni, wygenerowany z pomocą programu gnuplot został przedstawiony na rysunku ??.

5.1.4 Wyznaczanie powierzchni przestrzeni roboczej

Na podstawie obwiedni przestrzeni roboczej jesteśmy w stanie obliczyć jej powierzchnię. Ze względu na ograniczenia numeryczne przyjęte wcześniej będzie to jedynie jej aproksymacja. Dla każdej kolumny obliczamy liczbę komórek siatki pomiędzy wystąpieniem pierwszej i drugiej jedynki (górna i dolna krawędź obrysu), a następnie sumujemy wszystkie te wartości otrzymując powierzchnię przestrzeni roboczej. Dokładność otrzymanej w ten sposób powierzchni zależy w dużym stopniu od zdefiniowanej ziarnistości siatki.

5.2 Wyznaczenie wymiarów manipulatora na podstawie przestrzeni roboczej

Posiadając możliwość obliczenia rozmiaru przestrzeni roboczej pojedynczej instancji manipulatora jesteśmy w stanie porównać je i wybrać tą, która zapewni nam najlepsze warunki pracy. W tym celu definiujemy konkretną wartość jako sumę ramion (sama wartość nie jest istotna, gdyż interesuje nas wzajemny stosunek długości ramion). Następnie zmieniamy długość każdego z ogniw z odpowiednim krokiem i obliczamy rozmiar przestrzeni roboczej, zarówno prostą jak i odwrotną kinematyką. Oczywiście interesują nas tylko te konfiguracje, w których suma długości ramion nie przekracza zadanej sumy. Spośród wszystkich wygenerowanych kombinacji wybieramy tą, która maksymalizuje rozmiar przestrzeni roboczej. Dla zdefiniowanych ogniw należy wyznaczyć także optymalne rozstawienie początków każdego z ramion (silników). Operację tą wykonujemy dla konkretnych długości ogniw, które z kolei musimy liczyć dla konkretnego rozstawienia – zadania te są komplementarne.

5.2.1 Wyznaczenie wymiarów próbnej wersji manipulatora

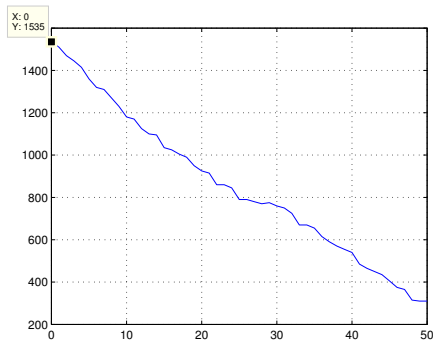
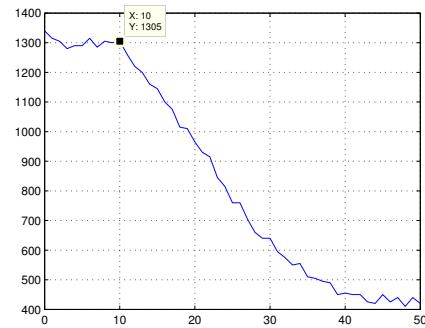
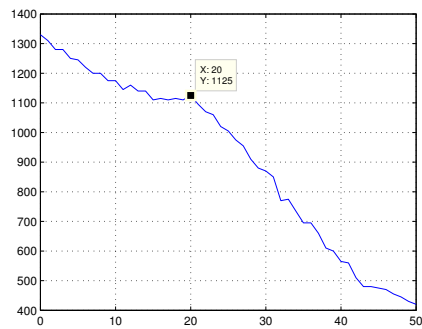
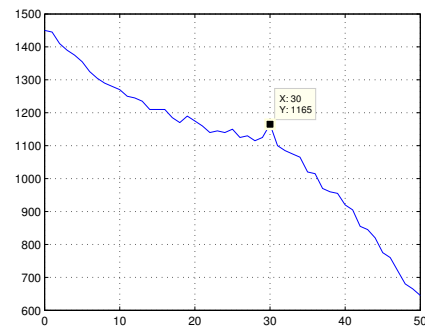
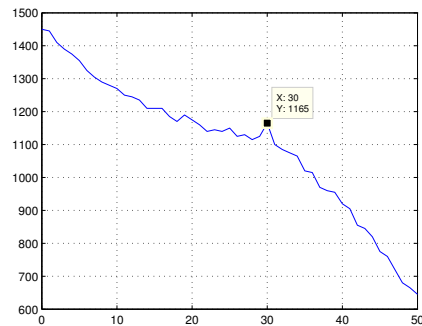
Przed przystąpieniem do wyznaczania konfiguracji docelowego manipulatora proces optymalizacji został przeprowadzony dla wersji próbnej, opisanej w rozdziale ??. W tym przypadku dokładność wyniku nie była najistotniejsza, w związku z czym wszystkie długości iterowano z krokiem 10, przy czym ich suma powinna wynosić 100. Po zaimplementowaniu prostej i odwrotnej kinematyki na początku wyznaczono optymalne konfiguracje

dla kilku przykładowych wartości L , będących połową odległości pomiędzy początkami ramion manipulatora:

- kinematyka prosta:
 - $L=0$: $l_1=40, l_2=20, l_3=40, l_4=0$,
 - $L=10$: $l_1=30, l_2=30, l_3=40, l_4=0$,
 - $L=20$: $l_1=20, l_2=40, l_3=40, l_4=0$,
 - $L=30$: $l_1=20, l_2=30, l_3=50, l_4=0$,
 - $L=40$: $l_1=20, l_2=30, l_3=50, l_4=0$,
- kinematyka odwrotna:
 - $L=0$: $l_1=30, l_2=40, l_3=30, l_4=0$,
 - $L=10$: $l_1=30, l_2=40, l_3=30, l_4=0$,
 - $L=20$: $l_1=30, l_2=30, l_3=40, l_4=0$,
 - $L=30$: $l_1=30, l_2=20, l_3=50, l_4=0$,
 - $L=40$: $l_1=20, l_2=30, l_3=50, l_4=0$,

Warto wspomnieć, że parametry l_1 - l_4 były iterowane na przedziale od 0 do 50. Jak widzimy, dla tej wersji manipulatora ostatnie z ramion najmniej wpływa na wielkość przestrzeni roboczej, w związku z czym algorytm starał się je eliminować (dzięki temu inne ramiona mogły by być dłuższe). Przy oddalaniu początków ramion od siebie wzrasta znaczenie trzeciego ramienia, podczas gdy maleje pierwszego. Różnice pomiędzy prostą i odwrotną kinematyką wynikają głównie z różnych metodologii liczenia, jednakże warto rozważyć i jedną i drugą opcję w celu zebrania większej ilości obserwacji. Posiadając kilka wybranych konfiguracji manipulatora możemy teraz dokładniej już (z krokiem 1) znaleźć najlepszą dla nich odległość L . Wyniki zostały zaprezentowane na wykresach, rysunek 5.2.1 prosta kinematyka i rysunek 5.2.1. Jak można się było spodziewać, w obu przypadkach największa przestrzeń robocza jest osiągana dla małych wartości L . Jednakże jest to sprzeczne z wymaganiem dotyczącym rozłożenia sił działających na efektor na poszczególne napędy – zależy nam, aby ramiona były w pewnej odległości od siebie. W związku z tym konieczne jest wypracowanie konsensusu. Wszystkie konfiguracje długości zwracają stosunkowo dość duże przestrzenie robocze dla parametru L znajdującego się w przedziale (10,20). Jeżeli to byłaby ostateczna wersja manipulatora, jako kompromis wartość z tego przedziału zostałaby wybrana.

5.2.2 Wyznaczenie wymiarów ostatecznej wersji manipulatora

(a) $L=0$: $l_1=40$, $l_2=20$, $l_3=40$, $l_4=0$ (b) $L=10$: $l_1=30$, $l_2=30$, $l_3=40$, $l_4=0$ (c) $L=20$: $l_1=20$, $l_2=40$, $l_3=40$, $l_4=0$ (d) $L=30$: $l_1=20$, $l_2=30$, $l_3=50$, $l_4=0$ (e) $L=40$: $l_1=20$, $l_2=30$, $l_3=50$, $l_4=0$

Rysunek 5.1 Powierzchnia przestrzeni roboczej w zależności od odległości początków pierwszych ramion manipulatora przy wykorzystaniu prostej kinematyki

(a)(b)
 $L=10$:
 $l_1=30, 30$,
 $l_2=40, 40$,
 $l_3=30, 30$,
 $l_4=0$

(c)(d)
 $L=20$:
 $l_1=30, 30$,
 $l_2=20, 20$,
 $l_3=50, 50$,
 $l_4=0$

(e)
 $L=40$:
 $l_1=20$,
 $l_2=30$,
 $l_3=50$,
 $l_4=0$

Rysunek 5.2 Powierzchnia przestrzeni roboczej w zależności od odległości początków pierwszych ramion manipulatora przy wykorzystaniu odwrotnej

Rozdział 6

Podsumowanie projektu

Dodatek A

Zawartość płyty CD

Do pracy dołączono płytę CD zawierającą:

1. Aplikacja – katalog zawierający kod źródłowy aplikacji,
2. Doc – katalog zawierający dokumentację kodu źródłowego przy wykorzystaniu środowiska Doxygen
3. KDL – katalog zawierający kod źródłowy biblioteki KDL [?]
4. Projekt_Inzynierski.pdf – wersja elektroniczna niniejszego dokumentu