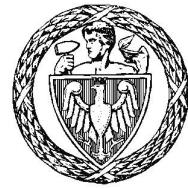


Politechnika Warszawska

WYDZIAŁ ELEKTRONIKI  
I TECHNIK INFORMACYJNYCH



Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej

# Praca dyplomowa magisterska

na kierunku Automatyka i Robotyka

Chwytanie przedmiotów  
w robocie sterowanym impedancyjnie

Jakub Postępski  
Numer albumu 257947

promotor  
dr inż. Tomasz Winiarski

Warszawa 2019





## **Streszczenie**

**Tytuł:** *Chwytanie przedmiotów w robocie sterowanym impedancyjnie*

Zastosowanie siłowych praw sterowania daje możliwość łatwej kooperacji robota z człowiekiem. Jednym z nich jest sterowania impedancyjne. W trakcie manipulacji z chwytyaniem przedmiotów okazuje się, że siła grawitacji przedmiotu nie jest kompensowana przez silniki robota. Celem pracy jest implementacja algorytmu kompensującego wpływ siły grawitacji chwytanego przedmiotu o nieznanych parametrach masy i inercji w robocie sterowanym impedancyjnie.

Wykorzystywany do badań robot Velma zbudowany jest z dwóch ramion LWR-4 osadzonych na ruchomym korpusie. Oprogramowanie robota zostało zaprojektowane przy pomocy teorii agenta upustaciowanego i zaimplementowane przy użyciu struktury ramowej FABRIC. Robot korzysta z impedancyjnego prawa sterowania i samodzielnie kompensuje siłę grawitacji ramion.

**Słowa kluczowe:** *Velma, FABRIC, ROS, LWR*



## Abstract

**Title:** *Grasping objects in impedance control robot*

The use of impedance and force control gives the possibility of easy cooperation between a robot and a human being. During manipulation with gripping objects, it appears that the gravitational force of the object is not compensated by the robot motors. The aim of this thesis is to implement an gravity compensation algorith for impdiance control with unknown tool parameters.

The Velma robot used for research. It consists of two LWR-4 arms mounted on a movable body. The robot software has been designed with embodied agent theory and implemented using the FABRIC framework. The robot uses impedance control and independently compensates gravity of the arms.

**Keywords:** *Velma, FABRIC, ROS, LWR*





„załącznik nr 3 do zarządzenia nr 24/2016 Rektora PW

.....  
miejscowość i data

.....  
imię i nazwisko studenta

.....  
numer albumu

.....  
kierunek studiów

## OŚWIADCZENIE

Świadomy/-a odpowiedzialności karnej za składanie fałszywych zeznań oświadczam, że niniejsza praca dyplomowa została napisana przeze mnie samodzielnie, pod opieką kierującego pracą dyplomową.

Jednocześnie oświadczam, że:

- niniejsza praca dyplomowa nie narusza praw autorskich w rozumieniu ustawy z dnia 4 lutego 1994 roku o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz.U. z 2006 r. Nr 90, poz. 631 z późn. zm.) oraz dóbr osobistych chronionych prawem cywilnym,
- niniejsza praca dyplomowa nie zawiera danych i informacji, które uzyskałem/-am w sposób niedozwolony,
- niniejsza praca dyplomowa nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadawaniem dyplomów lub tytułów zawodowych,
- wszystkie informacje umieszczone w niniejszej pracy, uzyskane ze źródeł pisanych i elektronicznych, zostały udokumentowane w wykazie literatury odpowiednimi odnośnikami,
- znam regulacje prawne Politechniki Warszawskiej w sprawie zarządzania prawami autorskimi i prawami pokrewnymi, prawami własności przemysłowej oraz zasadami komercjalizacji.

Oświadczam, że treść pracy dyplomowej w wersji drukowanej, treść pracy dyplomowej zawartej na nośniku elektronicznym (płycie kompaktowej) oraz treść pracy dyplomowej w module APD systemu USOS są identyczne.

.....  
czytelny podpis studenta”





# Spis treści

<b>1 Wstęp</b>	<b>13</b>
<b>2 Podstawy teoretyczne</b>	<b>15</b>
2.1 Sterowanie impedancyjne . . . . .	15
2.1.1 Przypadek prosty . . . . .	15
2.1.2 Prawo sterowania . . . . .	16
2.1.3 Sterowanie w przestrzeni konfiguracyjnej . . . . .	16
2.2 Sterowanie PID . . . . .	16
2.2.1 Przypadek prosty . . . . .	17
2.2.2 Przypadek wielowymiarowy . . . . .	17
2.3 Estymacja siły uogólnionej w końcówce . . . . .	17
2.4 Jakość sterowania . . . . .	18
2.5 Teoria agenta upustaciowanego . . . . .	19
<b>3 Środowisko badawcze</b>	<b>21</b>
3.1 Budowa ogólna . . . . .	21
3.2 Agenty . . . . .	21
3.3 Pakiety oprogramowania . . . . .	24
3.3.1 ROS . . . . .	24
3.3.2 Orocoss . . . . .	25
3.3.3 FABRIC . . . . .	25
3.4 Symulator robota . . . . .	26
<b>4 Algorytm kompensacji grawitacji</b>	<b>27</b>
4.1 Rozwiążanie oparte na regulatorze PID . . . . .	28
4.2 Rozwiążanie oparte na estymacji modelu robota . . . . .	29
<b>5 Specyfikacja systemu</b>	<b>33</b>
5.1 Wymagania . . . . .	34
5.2 Założenia . . . . .	34

## SPIS TREŚCI

5.3 Przypadki użycia . . . . .	34
<b>6 Działanie systemu</b>	<b>37</b>
6.1 Podnoszenie przedmiotu . . . . .	38
6.2 Ruch ósemkowy . . . . .	41
6.3 Ruch w bok . . . . .	44
6.4 Ruch do góry . . . . .	45
6.5 Ruch do dołu . . . . .	47
6.6 Ruch do przodu . . . . .	49
6.7 Obrót końcówki . . . . .	51
6.8 Wnioski . . . . .	55
<b>7 Podsumowanie</b>	<b>57</b>

# Rozdział 1

## Wstęp

Współczesne roboty z powodzeniem zastępują człowieka przy wielu żmudnych i niewdzięcznych czynnościach. W zakładach produkcyjnych sprawują się znakomicie ale do współpracy robotów z ludźmi podchodzi się niezwykle ostrożnie. Niechęć do tego typu działań podyktowana jest nie tylko wysokimi kosztami ale także obawami związanymi z ochroną otoczenia, w którym robot ma operować.

Zakres zastosowań robotypki można znacznie poszerzyć projektując roboty bezpieczne zarówno dla otaczającego je środowiska jak i samych robotów. Jednym z fundamentów takiego bezpieczeństwa może być algorytm sterowania impedancyjnego, który znacznie ogranicza ryzyko zniszczeń.

Prawo sterowania jest skonstruowane tak by silniki ramienia działały w sposób symulujący układ ze sprężyną i amortyzatorem. Robot sterowany w taki sposób nie dąży do zadanej pozycji za wszelką cenę. W momencie kolizji robot pozostaje elastyczny i ugina się. Opisana zaleta może przerodzić się w wadę. Algorytm korzysta ze zdefiniowanego modelu, który nie uwzględnia wszystkich cech ramienia oraz chwytyanych przez robota przedmiotów. Z punktu widzenia prawa sterowania chwycony przedmiot jest traktowany tak samo jak reszta środowiska. Zamiast skompensować siłę grawitacji tego przedmiotu ramię robota ugina się pod ciężarem. Dalsza manipulacja ramieniem nie ma najczęściej sensu.

Celem pracy jest rozwiązywanie problemu kompensacji siły grawitacji przedmiotu o nieznanej masie i inercji w opisany środowisku. Do badań zostanie wykorzystany robot Velma oraz jego symulator skonstruowane przez Zespół Programowania Robotów i Systemów Rozpoznających. W niniejszej pracy zostanie zaprezentowana praktyczna realizacja sposobu kompensacji grawitacji chwyconego narzędzia wraz z testami.

## ROZDZIAŁ 1. WSTĘP

## Rozdział 2

# Podstawy teoretyczne

Dyskutowane w pracy algorytmy znane są w wielu różnych odmianach. Poniżej zaprezentowano wersje używane w trakcie dalszych badań.

Do dalszych rozważań możemy zdefiniować uchyb jako:

$$\mathbf{e}_x = \mathbf{x}_d - \mathbf{x} \quad (2.1)$$

gdzie:

- $\mathbf{x}_d$  to wektor zadanych pozycji uogólnionych
- $\mathbf{x}$  to wektor pozycji uogólnionych

## 2.1 Sterowanie impedancyjne

Prawo sterowania impedancyjnego [16], [22] w przestrzeni operacyjnej sprawia, że chwytak robota zachowuje się jak przytwierdzony do układu ze sprężyną i amortyzatorem, gdzie drugi koniec tego układu jest pozycją zadaną. Pojawienie się nieprzewidzianych sił zewnętrznych powoduje, że uchyb pozycji nie jest minimalizowany za wszelką cenę. Przy kontakcie z otoczeniem stawy robota są w pewnym stopniu sprężyste i miękkie. W konsekwencji robot ugina się przed otaczającym go środowiskiem a w szczególności w chwili zderzenia z nieprzewidzianą przeszkodą.

### 2.1.1 Przypadek prosty

W najprostszym przypadku możemy więc opisać takie prawo jako układ:

$$F = kx + d\dot{x} + F_{ext} \quad (2.2)$$

gdzie:

- $F$  to siła wynikowa

- $k$  to parametr sztywności
- $d$  to parametr tłumienia
- $F_{ext}$  to nieznana siła zewnętrzna działająca na układ

### 2.1.2 Prawo sterowania

Prawo sterowania można sformułować jako wektor siły uogólnionej:

$$\mathcal{F} = \mathbf{K}_x e_x + \mathbf{D}_x \dot{e}_x \quad (2.3)$$

gdzie:

- $\mathbf{K}_x$  to diagonalna macierz sprężystości
- $\mathbf{D}_x$  to diagonalna macierz tłumienia
- $\mathcal{F}_{ext}$  to wektor nieznanych uogólnionych sił zewnętrznych

### 2.1.3 Sterowanie w przestrzeni konfiguracyjnej

W rzeczywistym ramieniu robotycznym zadajemy momenty na poszczególne stawy robota. Opisane w podrozdziale 2.1.2 prawo sterowania opisuje przestrzeń operacyjną  $\mathcal{F}$ . Wartości wektora momentów  $\boldsymbol{\tau}$  można uzyskać z jakobianem  $\mathbf{J}$ :

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T(\mathbf{q}) \mathcal{F} \quad (2.4)$$

## 2.2 Sterowanie PID

Regulator PID (ang. Proportional Integral Derivative) [14], [21] jest popularnym prawem sterowania automatycznego. Podstawowym celem algorytmu jest minimalizacja uchybu. Uchyb statyczny jest minimalizowany za wszelką cenę nawet jeśli miałoby to spowodować uszkodzenia. Uchyby dynamiczne nie są już tak dobrze kompensowane.

Człon proporcjonalny algorytmu pozwala na wzmacnienie uchybu i w ten sposób odjęcie go od sygnału sterującego. Człon całkujący algorytmu sumuje przeszłe błędy i odejmuje od sterowania ich sumę. Człon różniczkujący wzmacnia sygnał sterujący w gdy wartość błędu zmienia się w celu przyspieszenia regulacji.

### 2.2.1 Przypadek prosty

W jednowymiarowym przypadku prawo sterowania ma postać:

$$F = Pe + I \int_0^t edt + D \frac{de}{dt} \quad (2.5)$$

gdzie:

- $e$  to uchyb
- $P$  to parametr członu proporcjonalnego
- $I$  to parametr członu całkującego
- $D$  to parametr członu różniczkującego

### 2.2.2 Przypadek wielowymiarowy

Rozpatrując wektor siły uogólnionej możemy założyć w uproszczeniu, że prawo sterowania rozpatruje każdą z wartości wektora niezależnie. Prawo sterowania można zapisać w postaci:

$$\mathcal{F} = \mathbf{P}\mathbf{e}_x + \int_0^t \mathbf{I}\mathbf{e}_x dt + \mathbf{D}\dot{\mathbf{e}}_x \quad (2.6)$$

gdzie:

- $\mathbf{P}_x$  to diagonalna macierz proporcjonalności
- $\mathbf{I}_x$  to diagonalna macierz członu całkowania
- $\mathbf{D}_x$  to diagonalna macierz członu różniczkującego

## 2.3 Estymacja siły uogólnionej w końcówce

Dla ramienia robotycznego możemy opisać siły występujące w samym ramieniu zgodnie ze wzorem:

$$\mathcal{F}_m = \mathcal{F}_m(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \ddot{\mathbf{x}}, \mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \boldsymbol{\Lambda}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{x}} + \boldsymbol{\mu}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) + \boldsymbol{\gamma}(\mathbf{q}) + \boldsymbol{\eta}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathcal{F}_{ext} \quad (2.7)$$

gdzie:

- $\mathcal{F}$  to wektor sił wynikowych
- $\boldsymbol{\Lambda}$  to dodatnio określona macierz inercji w przestrzeni zadań
- $\boldsymbol{\mu}$  to macierz sił Coriolisa i sił odśrodkowych

- $\gamma$  to wektor sił grawitacji
- $\eta$  to macierz sił tarcia oraz nieuwzględnionych sił
- $q$  to wektor położen stawów w przestrzeni konfiguracyjnej
- $x$  to wektor położen końcówki w przestrzeni zadań
- $\mathcal{F}_{ext}$  to nieznany wektor sił zewnętrznych działających na układ

Przy wyliczaniu estymowaniu sił działających na końówkę należy pamiętać, że w końówce występują siły wygenerowane przez prawo sterowania oraz rzeczywiste siły występujące w układzie. Wzór estymujący rzeczywistą wartość siły uogólnionej w końówce można zapisać jako:

$$\hat{\mathcal{F}} = \mathcal{F} + \mathcal{F}_m(x, \dot{x}, \ddot{x}, q, \dot{q}) \quad (2.8)$$

gdzie  $\mathcal{F}$  to wektor sił uogólnionych wyliczony prawem sterowania.

## 2.4 Jakość sterowania

Prostym sposobem oceny jakości algorytmu sterowania jest konfrontacja rzeczywistych pozycji ramienia robota z zadanymi. W pracy przyjęto metrykę APE (ang. Absolute Trajectory Error) [18]. Metryka jest popularnym wskaźnikiem testowania algorytmów SLAM (ang. Simultaneous Localization and Mapping) ale może być też użyta do porównania trajektorii zadanej przez interpolator oraz osiągniętej w rzeczywistości (rys. 2.1).

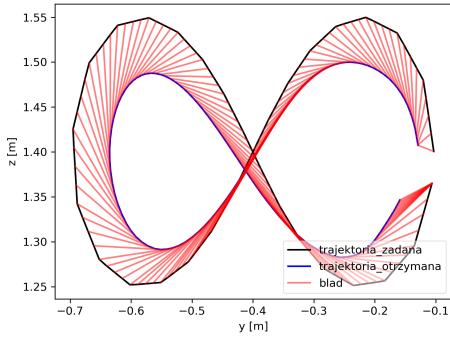
Dwie trajektorie są opisane w postaci list wektorów sił uogólnionych  $P_{1..n}$  oraz  $Q_{1..n}$  gdzie  $n$  to ilość próbek. Dla każdej chwili czasowej  $i$  jest wyliczany błąd postaci:

$$E_i = Q_i^{-1} S P_i \quad (2.9)$$

Macierz  $S$  jest optymalnym w sensie metody najmniejszych kwadratów rzutowaniem wektora  $Q_i$  na wektor  $P_i$  znalezionym za pomocą metody Horna [11].

Błąd całkowity jest wyliczany jako błąd średnio-kwadratowy:

$$RMSE(E_{1..n}) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|E_i\|^2} \quad (2.10)$$



Rysunek 2.1: Rysunek przedstawia rzut APE w dwóch wymiarach. Czarną i niebieską linią oznaczono zadaną i osiąganą trajektorię. Linie czerwone łączą odpowiednie punkty na obydwu trajektoriach i obrazują błąd pomiędzy nimi.

Błąd całkowity jest wyliczany jako błąd średnio-kwadratowy:

$$RMSE(\mathbf{R}_{1..n}) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ||\mathbf{q}_d - \mathbf{q}_i||^2} \quad (2.11)$$

## 2.5 Teoria agenta upostaciowanego

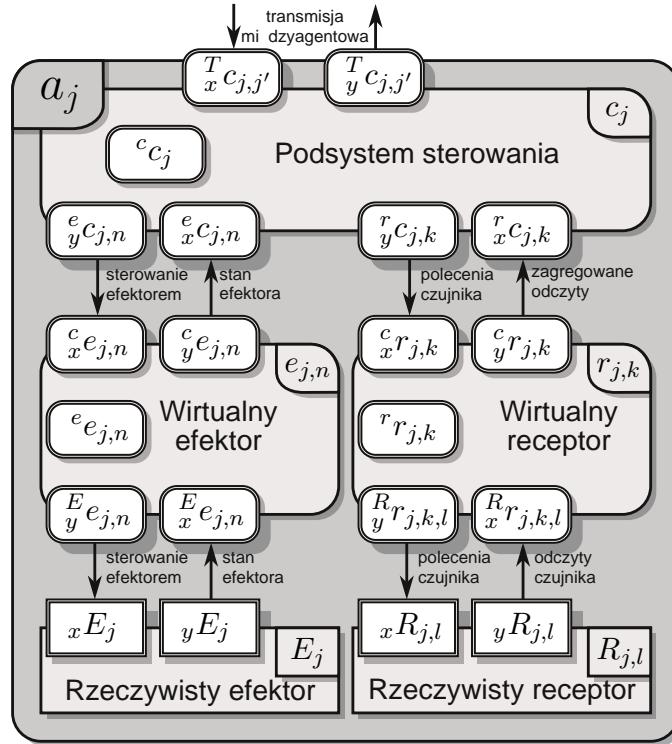
Agentem możemy nazwać jednostkę, która jest: zdolna do komunikowania się ze środowiskiem, zdolna do monitorowania swego otoczenia i podejmowania autonomicznych decyzji. Taka definicja gwarantuje spełnienie wielu cech, których oczekujemy od nowoczesnych systemów robotycznych. Z definicji agenty są w stanie samodzielnie reagować na zmiany zachodzące w środowisku w sposób inteligentny. Rozszerzeniem teorii agentowej jest teoria agenta upostaciowanego [27] [26]. Agent upostaciowany cechuje się tym czym zwykły agent oraz posiada fizyczne ciało. Agenty oraz podsystemy mogą komunikować się poprzez bufory.

W teorii agenta upostaciowanego występują pojęcia rzeczywistych efektorów i receptorów. Służą one odpowiednio do oddziaływania na środowisko i do pozyskiwania wiedzy o tym środowisku. W praktyce oznacza to, że rzeczywistym efektorem może być silnik a rzeczywistym receptorem enkoder.

Agent upostaciowany  $a$  (rys. 2.2) może się składać z trzech podsystemów:

- Podsystemu sterowania  $c$  który zajmuje się podejmowaniem decyzji na podstawie danych z innych podsystemów. Agent może mieć tylko jeden podsystem sterowania.
- Wirtualnego efektora  $e$  który pośredniczy w komunikacji pomiędzy podsystemem sterowania i rzeczywistym efektorem.

## ROZDZIAŁ 2. PODSTAWY TEORETYCZNE



Rysunek 2.2: Rysunek przedstawia schemat budowy agenta upustacjowionego [?]. Typ podsystemu oznaczany jest dużą literą. Podsystemy i bufora posiadają prawy dolny indeks. Typ podsystemu jest oznaczany lewym dolnym indeksem. Typ buforu jest oznaczany lewym dolnym indeksem ( $x$  - wejściowy,  $y$  - wyjściowy).

- Wirtualnego receptora  $r$  który pośredniczy w komunikacji pomiędzy podsystemem sterowania i rzeczywistym receptorem.

W podejściu komponentowym wspomnianej teorii podsystemy składają się z komponentów czyli algorytmów. Każdy z podsystemów może mieć wiele komponentów. Podsystem posiada zdefiniowaną maszynę stanów. Stany maszyny mogą się zmieniać przy pomocy funkcji przejścia (predykatów). Stan maszyny definiuje tak zwane zachowanie podsystemu czyli sposób reakcji poprzez uruchomienie konkretnych komponentów.

# Rozdział 3

## Środowisko badawcze

### 3.1 Budowa ogólna

Środowiskiem badawczym jest robot usługowy Velma (rys. 3.1) [2], [24]. Został zaprojektowany i wykonany przez Zespół Programowania Robotów i Systemów Rozpoznających [8]. Do obrotowego korpusu przytwierdzono dwa ramiona robotyczne Kuka LWR-4+ [3] [10]. Mają siedem stopni swobody i udźwig 7 kg. Na ich końcach znajdują się chwytaki Barretta [1] oraz nadgarstkowe czujniki FTS (ang. Force Torque Sensor). Głowa robota umieszczona jest na dedykowanej konstrukcji która za pomocą dwóch silników elektrycznych pozwala na zginanie i obrót głowy [17] [23]. Robot wyposażony jest w czujnik wizyjny Microsoft Kinect oraz dwie kamery połączone w stereoparę. Do głowy zamocowano mikrofon. Podzespoły robota są połączone z komputerem sterującym przy pomocy magistral czasu rzeczywistego.

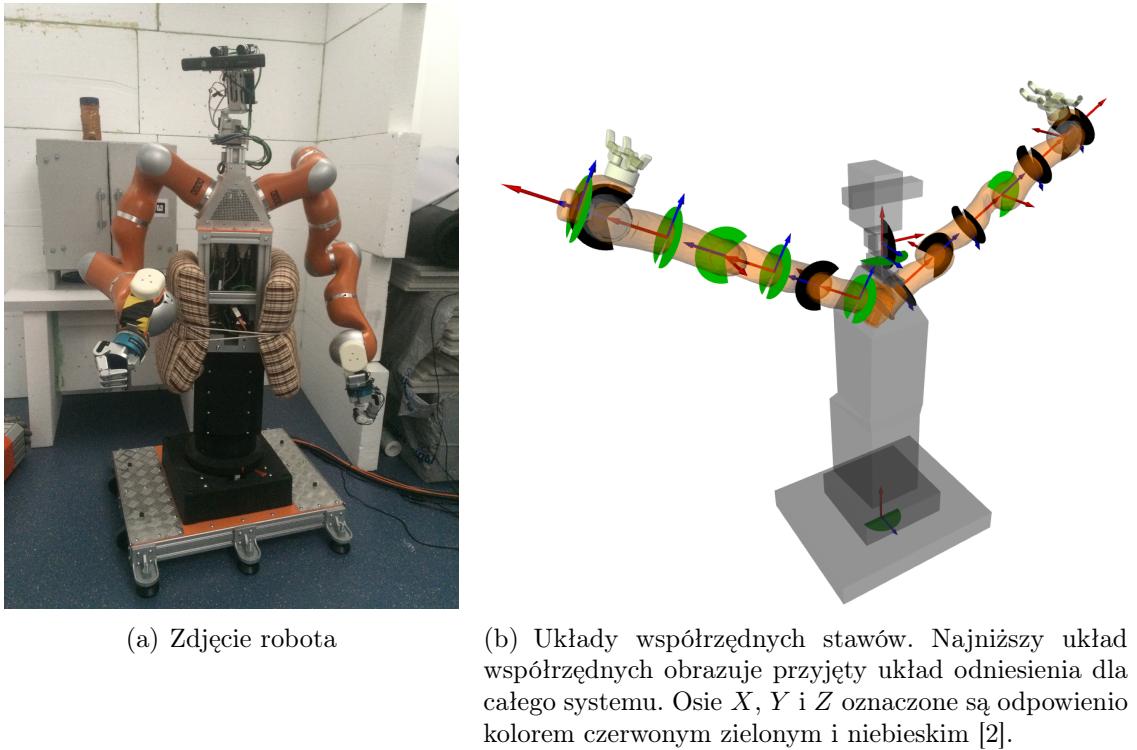
System sterowania o twardych ograniczeniach czasowych pracuje z częstotliwością 500 Hz. Struktura oprogramowania została stworzona w oparciu o teorię agentową. Oprogramowanie robota pisane jest przy wykorzystaniu struktury ramowej FABRIC. Programy nadzoruje system Linux z nakładką Linux-RT. Dostępny jest symulator robota stworzony w przy wykorzystaniu Gazebo i silnika fizyki DART.

### 3.2 Agenty

System sterowania [2] zbudowany jest z dwóch agentów (rys. 3.2). Agent *velma\_core* jest odpowiedzialny za kontrolę zadań związanych z manipulacją w przestrzeni operacyjnej i konfiguracyjnej robota. Drugi z agentów *velma\_task\_cs\_ros\_interface* jest interfejsem pomiędzy programami użytkownika pisanymi w ROS oraz agentem *velma\_core*. Zawiera tylko jeden podsystem o tej samej nazwie.

Podsystem *velma\_core\_cs* agenta *velma\_core* wylicza prawa sterowanie oraz

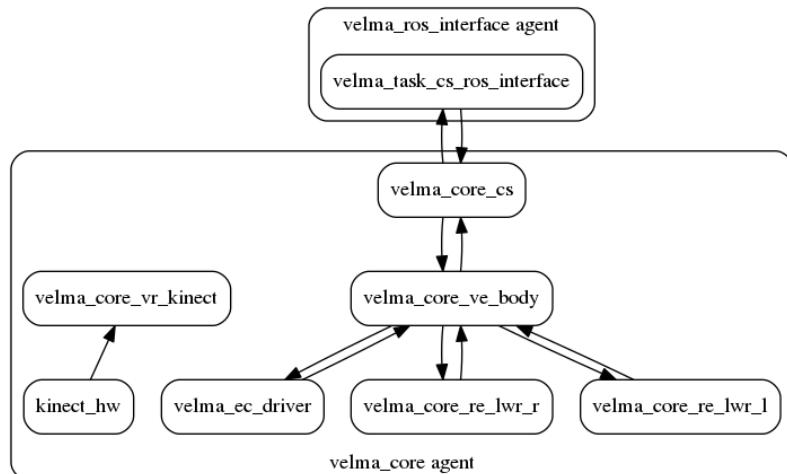
### ROZDZIAŁ 3. ŚRODOWISKO BADAWCZE



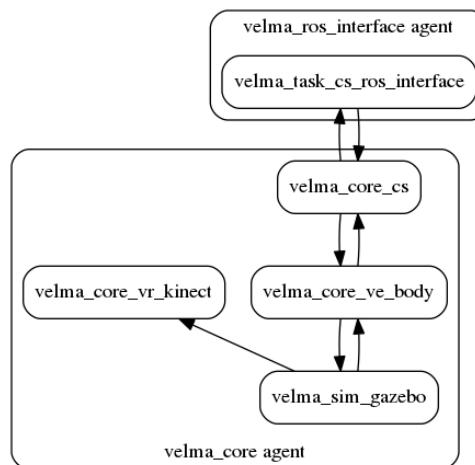
Rysunek 3.1: Robot usługowy Velma

zajmuje się interpolacją trajektorii. Podsystem *velma\_core\_ve\_body* kontroluje bazowe zachowania bezpieczeństwa. Są to ograniczenia prądowe, wykrywanie krańcowych położen stawów oraz wykrywanie kolizji. Podsystem przekazuje też sterowanie do efektorów. Podsystemy w najniższej warstwie abstrakcji mogą być stosowane wymiennie. Do pracy w rzeczywistym świecie uruchamiane są podsystemy *velma\_core\_re\_lwr\_r* i *velma\_core\_re\_lwr\_l* oraz podsystem *velma\_ec\_driver*. Służą odpowiednio do kontroli prawego i lewego ramienia LWR-4 oraz pozostałego sprzętu połączonego magistralą EtherCAT. Do pracy w trybie symulacji podsystemy w najniższej warstwie abstrakcji są wymieniane na podsystem *velma\_sim\_gazebo*, w którym uruchamiany jest symulator świata Gazebo. Podsystem symuluje pracę wszystkich trzech podsystemów odpowiedzialnych za komunikację ze sterownikami sprzętu.

- **Interfejs akcji ROS** - Komponent *CartImpActionRight* znajduje się w podsystemie *velma\_task\_cs\_ros\_interface* i odbiera rozkazy wysłane przez użytkownika przez mechanizm akcji ROS oraz przesyła je do innych podsystemów. Zwraca też status wykonania operacji. Komponent służy do obsługi prawego ramienia i istnieje analogiczny komponent *CartImpActionLeft* służący do obsługi lewego ramienia.
- **Publikacja wektorów pozycji** - Komponent *TfPublisher* wysyła do użytkownika za pomocą ROSa położenie i obrót istotnych dla działania systemu



(a) Tryb pracy ze sprzętem



(b) Tryb symulacji

Rysunek 3.2: Poglądowy i uproszczony schemat agentów robota Velma zawierający także nieopisywane części systemu odpowiedzialne za nadzór Kinecta [2].

## ROZDZIAŁ 3. ŚRODOWISKO BADAWCZE

miejsc robota takich jak chwytaki czy środek ciężkości korpusu.

- **Pozycje stawów** - Odczyt pozycji stawów jest zależny od trybu pracy oprogramowania. Jeśli używamy trybu obsługi rzeczywistego sprzętu to za odczyt pozycji są odpowiedzialne podsystemy *velma\_core\_re\_lwr\_r* i *velma\_core\_re\_lwr\_l* oraz podsystemem *velma\_ec\_driver* które posiadają pojedyncze komponenty służące do komunikacji z fizycznymi sterownikami magistral. W trybie symulatora emulacją tych trzech podsystemów zajmuje się podsystem *velma\_sim\_gazebo*, który jako symulator nie jest podzielony na konkretne podsystemy.
- **Zadawanie momentów** - Zadawanie momentów obrotowych w stawach następuje w analogiczny do odczytywania pozycji sposób.
- **Kinematyka prosta** - Komponent *FK* pobiera dane o pozycjach stawów i wylicza pozycję chwytaka oraz innych części robota.
- **Interpolator trajektorii** - Komponent *INT\_tool\_r* z podsystemu *velma\_core\_cs* odpowiada za interpolacje trajektorii zadanej prawemu ramieniu. Interpolator służy temu by jedno polecenie przesunięcia ramienia zamienić na wiele mniejszych i rozłożonych w czasie. W konsekwencji algorytm sterowania nie jest narażony na duże uchyby a ruch ramienia jest wykonywany płynnie. Do działania komponent potrzebuje aktualnych i zadanych pozycji. Komponent służy do obsługi prawego ramienia. Analogicznie do obsługi lewego ramienia służy komponent *INT\_tool\_l*.
- **Prawo sterowania impedancyjnego** - Komponent *cart\_imp* z podsystemu *velma\_core\_cs* służy do wyliczania momentów zadawanych na stawy zgodnie z algorytmem prawa sterowania impedancyjnego w przestrzeni kartezjańskiej. Pobiera zadaną pozycję z interpolatora trajektorii.

### 3.3 Pakiety oprogramowania

#### 3.3.1 ROS

Struktura ramowa ROS (Robot Operating System) [7] zapewnia biblioteki usprawniające pisanie programów dla robotyki w C++ i Pythonie. Pozwala na komunikację pomiędzy programami na zasadzie tematów oraz na zasadzie usług. Posiada gotowe funkcje wspomagające obliczenia kinematykę i wizualizujące pracę robota. Pakiet daje możliwość akwizycji danych. Podstawowymi narzędziami w pakiecie są:

- **Węzły** - Programy pisane w C++ lub Pythonie spełniające zdefiniowaną w systemie funkcję.

- **Serwisy** - Usługi udostępniane przez węzły pozwalające na komunikację w architekturze zapytanie odpowiedź. Każdy program może udostępniać wiele serwisów. Służą do wywoływania zdalnych procedur.
- **Akcje** - Usługi podobne do serwisów lecz nieblokujące wykonywania węzła będącego serwerem.
- **Tematy** - Usługi udostępniane przez węzły pozwalające na asynchroniczną komunikację. Każdy program może udostępniać i pobierać wiele tematów. Służą do aktualizowania bieżącego stanu całego systemu.
- **Zarządcy** - Odpowiada za komunikację i nadzoruje pracę innych narzędzi pakietu.

### 3.3.2 Orocos

Orocos [6] jest wolnym oprogramowaniem napisanym w C++ służącym do tworzenia aplikacji zgodnych z wymaganiami czasu rzeczywistego. Pozwala na implementację oprogramowania w podejściu komponentowym. Zestaw bibliotek pakietu Orocos składa się między innymi z:

- **RTT (ang. Real-Time Toolkit)** - Biblioteki służące do tworzenia komponentów w aplikacjach czasu rzeczywistego.
- **OCL (ang. Orocos Component Library)** - Biblioteki pomocne w trakcie uruchamiania komponentów.
- **OroGen** oraz **TypeGen** - Narzędzia do automatycznego generowania komponentów i typów danych.
- **Deployer** - Uruchamia komponenty zgodnie z opisem zawartym w pliku XML oraz pozwala na nadzór tych komponentów trakcie pracy.

### 3.3.3 FABRIC

Framework for Agent-Based Robot Control Systems - FABRIC [15] wykorzystuje Orocosa oraz strukturę ramową ROS zapewniając interfejs programistyczny pozwalający na tworzenie komponentów zgodnych z założeniami teorii agentowej. Ma zaimplementowane algorytmy komunikacji pomiędzy poszczególnymi podsystemami poprzez zdefiniowane wiadomości. Posiada narzędzie wizualizujące stan predykatów, zachowań i podsystemów *rqt\_agent* [25]. Pokazuje też przepływ danych między komponentami.



Rysunek 3.3: Robot Velma w trakcie manipulacji. Symulacja w środowisku Gazebo.

### 3.4 Symulator robota

Symulator robota Velma jest wytworzony w oprogramowaniu Gazebo [4] które symuluje obiekty i zachowania między nimi zgodnie z prawami fizyki. Użytkownik ma możliwość zdefiniowania całego środowiska wraz z robotem (rys. 3.3). Posiada gotowe modele wielu receptorów i efektorów oraz pozwala na tworzenia własnych. Daje możliwość emulowania sterowników sprzętu. Interfejs użytkownika udostępnia opcję wywarcie siły bądź momentu na dowolny przedmiot będący w symulacji. Emuluje czas jeśli symulacja nie jest przeprowadzana w czasie rzeczywistym.

Oryginalny kod Gazebo został przystosowany do pakietu oprogramowania DART (ang. Dynamic Animation and Robotics Toolkit) [5] symulującego fizykę zdefiniowanego świata. Pakiet DART został wybrany przez Zespół Programowania Robotów i Systemów Rozpoznających ponieważ po jego zastosowaniu został wyeliminowany problem narastających oscylacji członów robota w trakcie symulacji. W przeciwieństwie do wielu symulatorów fizyki DART daje dostęp do wielu przydatnych informacji takich jak jakobian bądź macierz inercji przedmiotów. Zastosowano w nim algorytm LCP (ang. Linear Complementarity Problem), [19] który sprowadza model fizyczny świata do zestawu równań kwadratowych. DART symuluje działanie wielu sił w tym siły Koriolisa i tarcia dynamicznego. Dzięki temu możliwe jest zaawansowane wykrywanie kolizji.

## Rozdział 4

# Algorytm kompensacji grawitacji

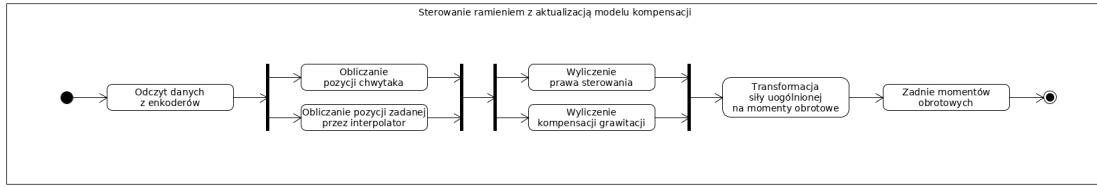
Ramiona robota muszą uginać się w trakcie kolizji z otoczeniem. To założenie jest podstawową motywacją do zastosowania prawa sterowania impedancyjnego opisanego w sekcji 2.1.2. Każdy staw robota posiada jeden silnik oraz enkoder i czujnik momentu obrotowego. Z odczytów pozycji i momentu może korzystać prawo sterowania, czyli algorytm wyliczający momenty obrotowe zadawane silnikom. Wyliczanie pozycji końcówki następuje poprzez jakobian. W sterowaniu impedancyjnym momenty zadawane są w taki sposób, że ramię robota zachowuje się jak zawieszone na niewidocznych sprężynach. Algorytm sterowania w przestrzeni kartezjańskiej działa tak, że jeden z jej końców jest przytwierdzony w punkcie zadanym przez użytkownika a drugi koniec do chwytaka.

Punkty zadane są wyznaczane przez interpolator trajektorii na podstawie rozkazów użytkownika. Interpolator ma za zadanie rozłożyć ruch zadany przez użytkownika w czasie. Skokowa zmiana pozycji zadanej do pozycji wskazanej przez użytkownika spowodowała by oscylacje w stawach i zadanie dużych momentów obrotowych stawom.

Do prawa sterowania impedancyjnego dodany jest algorytm kompensacji grawitacji członów robota. Na podstawie znanego modelu wyliczany jest moment obrotowy, dla każdego stawu, odpowiadający sile grawitacji członów. Momenty o przeciwnym znaku i tej samej wartości są dodawane do momentów sterujących ramieniem co kompensuje siłę grawitacji poszczególnych członów (rys. 4.1). Model może być też rozszerzony i wyliczać momenty dla innych sił np. Koriolisa bądź tarcia.

Zadany odgórnie model stosowany przy wyliczaniu kompensacji grawitacji ma pewne wady. Jeśli model nie jest dokładny siła grawitacji nie zostanie skompensowana właściwie. W trakcie pracy robot zmienia swoje własności np. przez zwiększenie tarcia związanego ze wzrostem temperatury. Dodatkową niedokładność wprowadza zmiana konfiguracji stawów ujętego w modelu jako jeden człon chwytaka. Ważniejsze dla rozważań jest to, że jeśli robot chwyci narzędzie czyli obiekt, którym ma manipulować, to jego parametry nie zostaną uwzględnione w tym modelu.

## ROZDZIAŁ 4. ALGORYTM KOMPENSACJI GRAWITACJI



Rysunek 4.1: Diagram aktywności pokazujący przebieg sterowania ramieniem robota.

Spowoduje to, że ramiona robota będą opadać.

Najprostszym rozwiązaniem jest poznanie masy narzędzia poprzez odczyt siły grawitacji z czujnika siły zamieszczonego w chwytku a następnie dodanie wartości tej siły o przeciwnym znaku do prawa sterowania. Takie rozwiązanie nie jest dość dokładne. Na pomiar siły mają wpływ inne siły niż siła grawitacji i znacznie zaburzają wynik. Istnieje potrzeba znalezienia bardziej wysublimowanego rozwiązania.

Poniżej zaprezentowano dwa możliwe rozwiązania opisanego problemu. Pierwsze z nich oparte na dodaniu do istniejącego prawa sterowania członu całkującego jest proste w implementacji lecz prawdopodobnie mniej dokładne. Nie pozwala też na poznanie żadnych parametrów narzędzia które jest chwyтанie. Druga z, zakładająca obliczenie parametrów modelu narzędzia, jest skomplikowana w implementacji i wymaga większych zasobów obliczeniowych. Stanowi to realny problem w systemie czasu rzeczywistego.

### 4.1 Rozwiązanie oparte na regulatorze PID

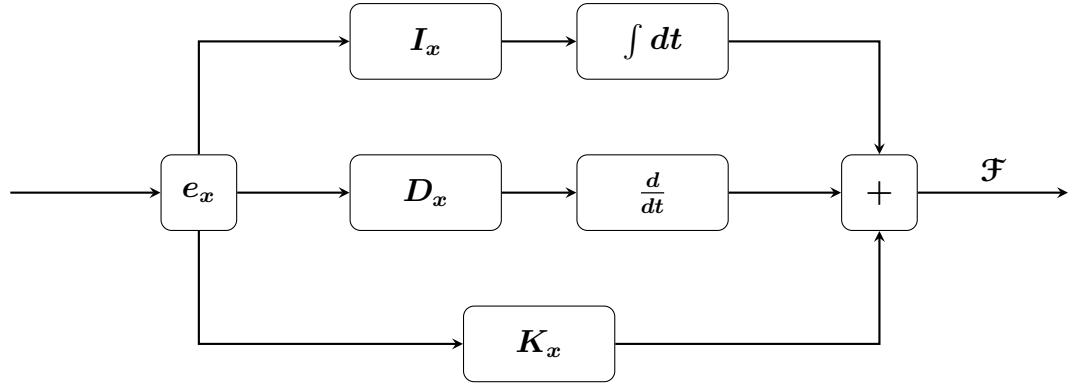
Opadanie ramion można interpretować jako błąd pomiędzy pozycją zadaną przez interpolator i pozycją zadaną czyli uchyb. Problem uchybu rozwiązuje regulator PID opisany w sekcji 2.2. Jego zastosowanie rodzi ryzyko, że ramiona robota usztywnią się i będą powodować uszkodzenia w trakcie kolizji. Stąd wniosek aby połączyć prawo sterowania impedancyjnego i regulator PID w nowe prawo sterowania [9, 20]. Po połączeniu obydwu praw sterowania i zastosowaniu ograniczenia całkowania ramiona nie powinny być nadmiernie sztywne.

Niektóre człony są takie same w zaprezentowanych prawach sterowania. W impedancyjnym prawie sterowania nie ma członu całkującego i został on skopiowany z algorytmu PID. W rezultacie nowe prawo sterowania jest postaci (rys. 4.2):

$$\mathcal{F} = \mathbf{K}_x e_x + \mathbf{D}_x \dot{e}_x + \int_0^t \mathbf{I}_x e_x dt \quad (4.1)$$

gdzie:

- $\mathcal{F}$  to wektor sił wynikowych



Rysunek 4.2: Schemat nowego prawa sterowania. W pierwszej fazie wyliczany jest algorytm z członem całkującym a następnie transformowany do przestrzeni stawów przez jacobian.

- $\mathbf{K}_x$  to diagonalna macierz sprężystości
- $\mathbf{D}_x$  to diagonalna macierz sztywności
- $\mathbf{I}_x$  to diagonalna macierz członu całkującego
- $\mathbf{e}_x$  to wektor uchybu

Parametry członu całkującego powinny mieć na tyle małe wartości, żeby nie zdominowały początkowego prawa sterowania impedancyjnego a jedynie poprawiały jego działanie. Ważne jest też zastosowanie ograniczenia całkowania. Po wyliczeniu prawa sterowania należy zastosować przekształcenie obliczające momenty obrotowe, które mają być zadane na silniki robota analogicznie do procedury pokazanej w sekcji 2.1.3.

## 4.2 Rozwiązań oparte na estymacji modelu robota

Problem można też rozwiązać przez estymację nowego modelu wykorzystywanego do kompensacji grawitacji postaci takiej jak w sekcji 2.3 ale rozszerzonego o zastosowane prawo sterowania [12,13] (rys. 4.3). Równanie siły uogólnionej dla chwili  $i$  jest wtedy postaci:

$$\mathcal{F}_{mi} = \mathbf{K}_x \mathbf{e}_x + \mathbf{D}_x \dot{\mathbf{e}}_x + \boldsymbol{\Lambda}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{x}} + \boldsymbol{\mu}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) + \boldsymbol{\gamma}(\mathbf{q}) + \boldsymbol{\eta}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (4.2)$$

gdzie:

- $\boldsymbol{\Lambda}$  to dodatnio określona macierz inercji w przestrzeni zadań
- $\boldsymbol{\mu}$  to macierz sił Coriolisa i sił odśrodkowych
- $\boldsymbol{\gamma}$  to wektor sił grawitacji

- $\boldsymbol{\eta}$  to macierz sił tarcia oraz nieuwzględnionych sił
- $\mathbf{q}$  to wektor położen stawów w przestrzeni konfiguracyjnej
- $\mathbf{x}$  to wektor położen końcówki w przestrzeni zadań
- $\mathbf{K}_x$  to diagonalna macierz sprężystości
- $\mathbf{D}_x$  to diagonalna macierz sztywności
- $\mathbf{e}_x$  to wektor uchybu

Czujnik FTS dla każdej chwili  $i$  pozwala na odczytanie rzeczywistego wektora siły uogólnionej w końcówce  $\mathcal{F}_i$ . Dzięki temu możemy uzyskać różnicę pomiędzy dwoma tymi wartościami:

$$\mathcal{F}_{ei} = \mathcal{F}_i - \mathcal{F}_{mi} \quad (4.3)$$

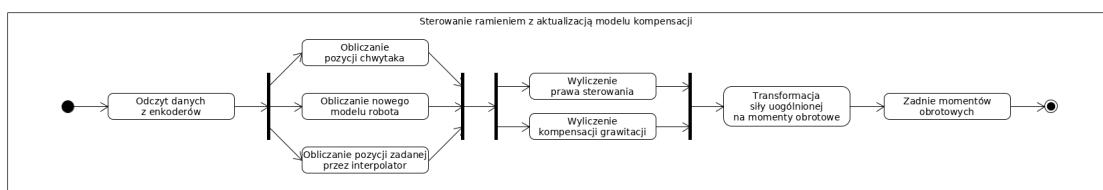
a następnie zastosować optymalizację, której parametrami są macierze stosowane do wyliczania modelu. Problem optymalizacji powinien być oparty o minimalizację różnicy dla  $n$  próbek:

$$\min_{\Lambda(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{x}}, \mu(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}), \gamma(\mathbf{q}), \boldsymbol{\eta}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})} \sum_{i=1}^n \|\mathcal{F}_{ei}\| \quad (4.4)$$

W trakcie praktycznych obliczeń można stosować pewne uproszczenia modelu. Przy założeniu braku ruchu pomiędzy narzędziem a chwytkiem możemy potraktować narzędzie jako część chwytaka. W takiej sytuacji dodanie narzędzia do chwytaka powoduje zmianę parametrów środka ciężkości masy oraz ostatniego członu i wprowadza zmiany tylko z tym związane. Można też przyjąć pewne uproszczenia wynikające z faktu, że chwytyany przedmiot ma stosunkowo małą masę w porównaniu z masą całego ramienia robotycznego. Estymowany model powinien być aktualizowany na bieżąco w trakcie pracy robota i stosowany w celu kompensacji grawitacji zamiast pierwotnego modelu.

Optymalizacja nieliniowa jest rozwiązywana na tyle wolno, że model nie może być aktualizowany tak często jak cały system sterowania robota. Rozwiązanie jest też dużo bardziej skomplikowane w implementacji niż opisane w sekcji 4.1.

## ROZDZIAŁ 4. ALGORYTM KOMPENSACJI GRAWITACJI



Rysunek 4.3: Diagram aktywności pokazujący przebieg sterowania ramieniem robota z aktualizacją modelu.

#### ROZDZIAŁ 4. ALGORYTM KOMPENSACJI GRAWITACJI

## Rozdział 5

### Specyfikacja systemu

Sterowanie impedancyjne w przestrzeni operacyjnej zastosowane w robocie Velma kompensuje jedynie masę członów własnych. Gdy manipulator chwyci narzędziu powstaje znaczny uchyb, który nie jest kompensowany. W przypadku chwycenia przedmiotu o dużej masie, ramię robota jest wręcz unieruchomione. Potrzebne jest gotowe narzędzie rozwiązujące opisany problem w sprawny i szybki sposób. Trzeba zmodyfikować podsystem *velma\_core\_cs* w celu implementacji algorytmu pozwalającego na skompensowanie masy chwytanego narzędzia.

Implementacja rozwiązania z sekcji 4.2 rodzi sporo problemów. W praktyce trudne jest zbudowanie odpowiedniego zadania optymalizacji, które zagwarantuje na tyle dobry model, że grawitacja będzie odpowiednio kompensowana. Dodatkowo optymalizacja obliczana jest na tyle wolno, że nie ma możliwości umieszczenia estymatora tego modelu jako jeden z komponentów podsystemu sterowania *velma\_core\_cs*. Komponent musiałby zostać umieszczony w nowym agencie, który pracuje z mniejszą niż cały system częstotliwością i komunikuje się z systemem robota za pośrednictwem interfejsu ROSa. W początkowej fazie, gdy przedmiot zostanie chwycony najczęściej ramiona robota zostają nieruchome, bo grawitacja chwyconego narzędzia nie jest kompensowana. Wtedy estymacja modelu jest wyjątkowo niedokładna. W początkowej fazie należałoby stosować uproszczony model tylko po to żeby robot podniósł przedmiot. Dopiero po kilku ruchach, gdy zadanie optymalizacji zostanie poprawnie rozwiązane, można wprowadzić właściwy model z użyciem narzędzi logiki rozmytej.

Wspomniane wady były podstawą decyzji o implementacji rozwiązania z sekcji 4.1. Główną wadą jest niemożność wyekstrahowania danych dotyczących narzędzia które chwyta robot. Kolejną wadą może być lekkie usztywnienie stawów. Nie powinno mieć dużego znaczenia z dwóch powodów. W sterowaniu impedancyjnym w przestrzeni operacyjnej wirtualna sprężyna jest zawieszona pomiędzy chwytakiem a punktem zadanym, a nie w konkretnych stawach robota. Do tego zakładamy niskie współczynniki członu całkującego.

## 5.1 Wymagania

Konkretnie wymagania są podyktowane środowiskiem badawczym oraz potrzebami Zespołu Programowania Robotów i Systemów Rozpoznających.

- System dostarcza gotowe komponenty potrzebne do pracy ramienia, w szczególności: generatora trajektorii, interpolatora oraz wyznaczania kinematyki prostej
- System pozyskuje dane o otoczeniu na podstawie odczytów z czujników położenia stawów.
- System samodzielnie kompensuje siłę grawitacji związaną z masą wszystkich członów robota.
- Parametry chwytanego obiektu związane z masą i inercją nie są znane i mogą być zmienne w czasie.

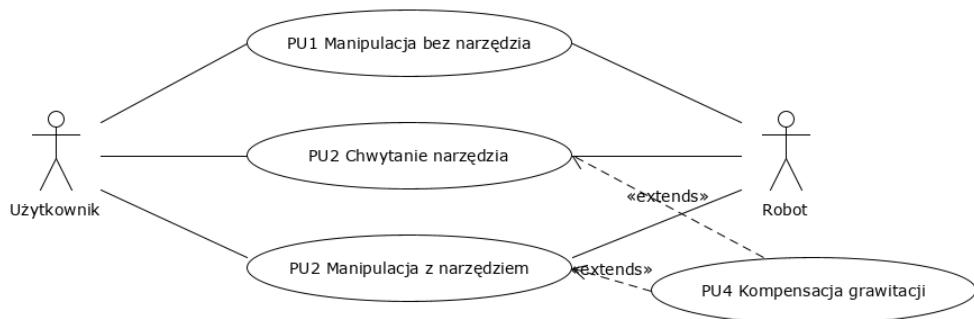
## 5.2 Założenia

Algorytm kompensacji grawitacji musi wyliczać dodatkowy moment w stawach robota. Do momentów obrotowych wyliczanych na postawie prawa sterowania impedancyjnego w przestrzeni operacyjnej robota należy dodać te związane z kompensacją masy narzędzia.

- Wyliczone przez prawo sterowania momenty zadawane w stawach zostaną zmodyfikowane przez algorytm kompensacji grawitacji
- Algorytm kompensacji ma minimalizować uchyb statyczny wynikający z chwycenia przedmiotu o nieznanej masie i inercji.
- Trajektoria końcówki ramienia powinna być zbliżona do trajektorii analogicznego ruchu bez uchwyconego przedmiotu.
- Algorytm kompensacji nie może zaburzać cech sterowania impedancyjnego pozwalających na uginanie się robota w momencie kolizji

## 5.3 Przypadki użycia

Przypadki użycia (rys. 5.1) odzwierciedlają pracę systemu po modyfikacji. Algorytm kompensujący ma działać przez cały czas pracy robota gdy pracuje z narzędziem. Przypadki użycia są zbieżne z przypadkami użycia robota kiedy pracuje w trybie sterowania impedancyjnego.



Rysunek 5.1: Diagram przypadków użycia robota z uwzględnieniem algorytmu kompensacji grawitacji

Aktorami korzystającymi z systemu są:

- **Robot** - robot wykonujący zadanie chwycenia obiektu
- **Użytkownik** - system zewnętrzny wydający polecenia

Można wyszczególnić następujące przypadki użycia:

- **PU1 Manipulacja bez narzędzia** - Konfiguracja ramienia robota może się zmieniać lecz robot nie trzyma żadnego narzędzia. Algorytm compensacji grawitacji nie powinien zmieniać prawa sterowania.
- **PU2 Chwytyanie narzędzia** - Robot zaciska chwytek na narzędziu o nieznanym parametrach a następnie je podnosi.
- **PU3 Manipulacja z narzędziem** - Konfiguracja ramienia może się zmieniać a algorytm compensacji grawitacji powinien przeciwdziałać sile grawitacji chwyconego narzędzia.
- **PU4 Kompensacja grawitacji** - Robot kompensuje siłę grawitacji chwyconego narzędzia

## ROZDZIAŁ 5. SPECYFIKACJA SYSTEMU

# Rozdział 6

## Działanie systemu

W symulacji uruchomiono testowy program nakazujący robotowi manipulowanie chwytkiem w trybie sterowania impedancyjnego w przestrzeni operacyjnej. Modyfikacja prawa sterowania impedancyjnego została wykonana w komponencie *cart\_imp*.

W trakcie wszystkich eksperymentów wszystkie parametry algorytmu sterowania były takie same. Macierze sprężystości i sztywności miały niskie wartości. Wszystkie eksperymenty wykazywały, że przy odpowiednio długim czasie eksperymentu uchyb końcówki dąży do zera. Do obliczeń przyjęto krótsze obserwacje przebiegów, w celu pokazania zachowania systemu w realnych warunkach. Eksperymenty opisane są w bazowym układzie odniesienia (rys. 3.1(b)). Ocena jakości sterowania następuje poprzez porównanie przebiegów trajektorii realizowanych w opisanych wcześniej wersjach.

W pracy zamieszczono wyniki eksperymentów o tych samych trajektoriach zadanego w czterech wersjach:

- bez algorytmu kompensacji, bez narzędzia
- z algorymem kompensacji, bez narzędzia
- z algorymem kompensacji, z chwyconą puszka o kształcie walca, masie 1 kg i jednolitym rozkładzie mas
- z algorymem kompensacji, z chwyconą wiertarką o nierównomiernym kształcie i masie 1,5 kg

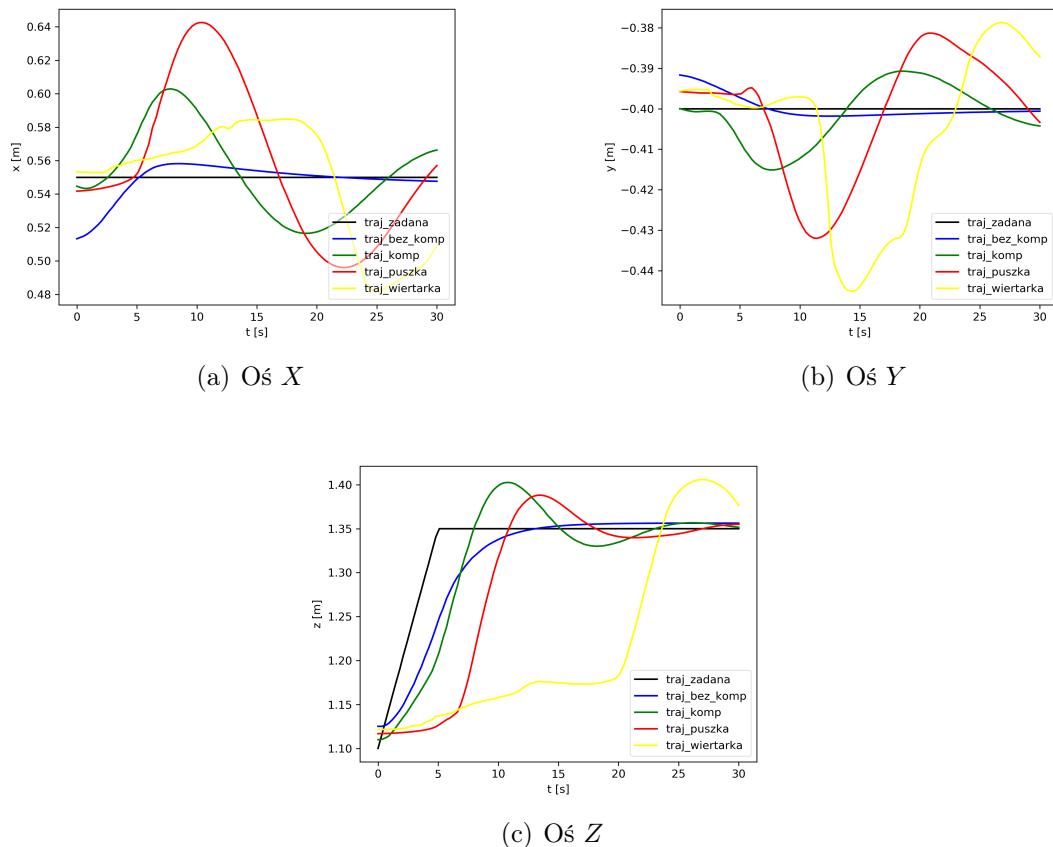
W pracy nie zamieszczono wyników działania algorytmu sterowania bez kompensacji i z chwyconymi przedmiotami. Takie trajektorie nie były w żadnym stopniu wykonywane.

Określenie jakości algorytmu możliwe jest dzięki modyfikacji komponentu *TfPublisher*. Po modyfikacji udostępnia on dane o pozycji zadanej z interpolatora trajektorii oraz o pozycji osiągniętej.

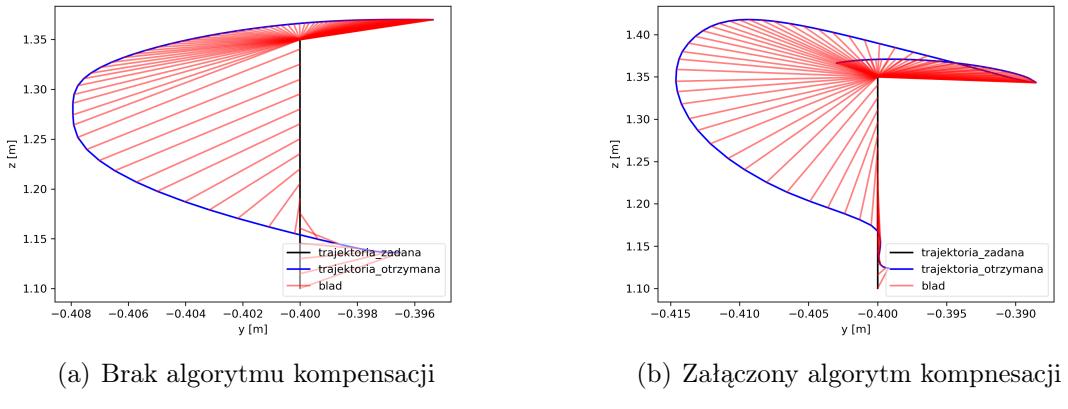
## 6.1 Podnoszenie przedmiotu

Eksperyment ma przetestować zachowanie algorytmu kompensacji przy podnoszeniu przedmiotu o nieznanych parametrach ruchach (rys. 6.1, 6.3). Ruch widoczny jest głównie w osi  $Z$ .

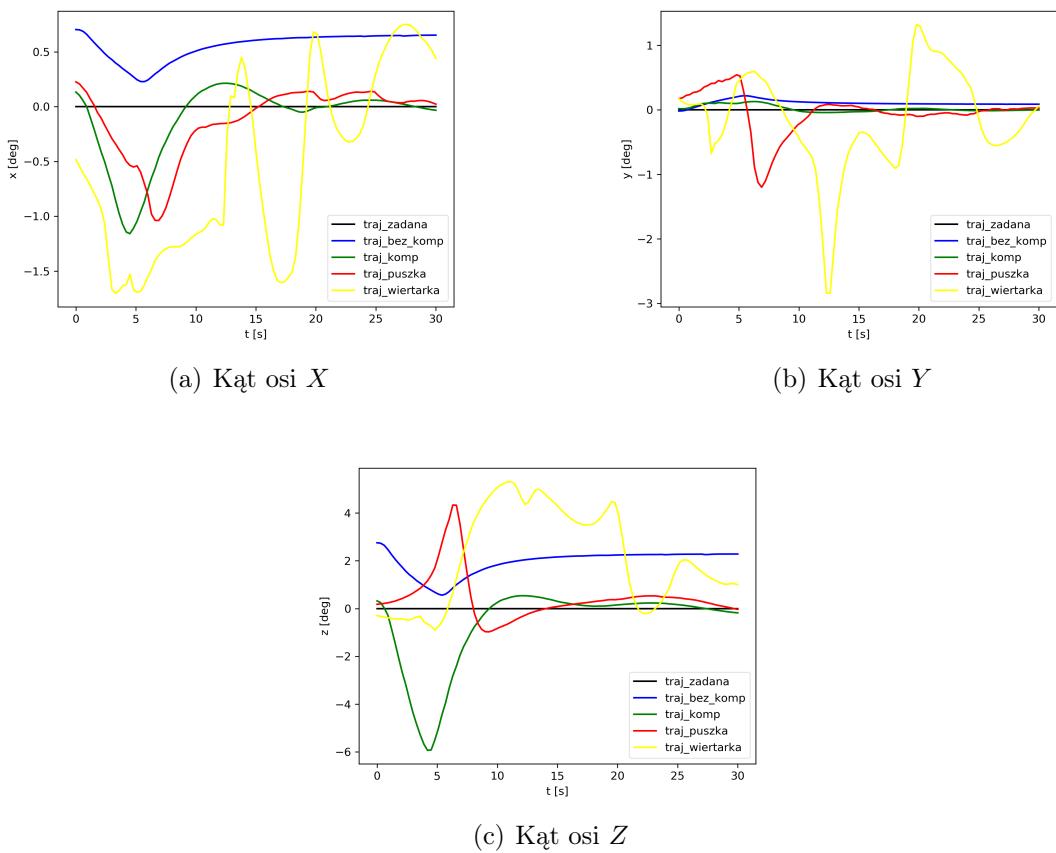
Trajektoria ruchu w rzucie na wprost ruchu została zaprezentowana na rys. 6.2 i 6.4. Trajektoria widoczna z boku (w osiach  $X$  oraz  $Z$ ) została zaprezentowana na rys. 6.5,i 6.6.



Rysunek 6.1: Podnoszenie przedmiotu. Porównanie trajektorii pozycji w zależności od czasu.

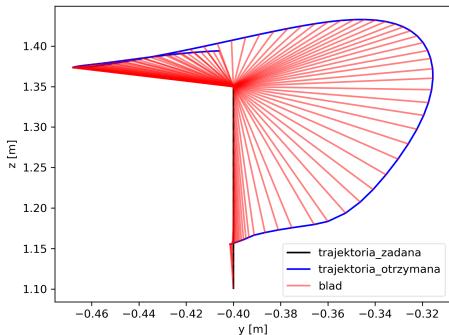


Rysunek 6.2: Podnoszenie przedmiotu. Porównanie trajektorii chwytaka w osiach  $Y$  i  $Z$

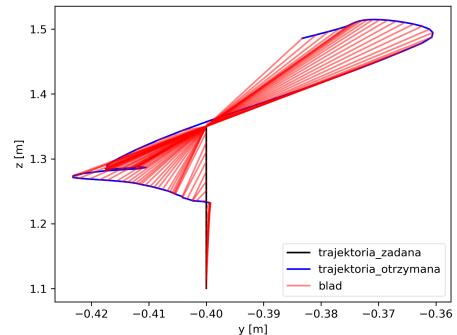


Rysunek 6.3: Podnoszenie przedmiotu. Porównanie trajektorii kątów w notacji Eulera w zależności od czasu.

## ROZDZIAŁ 6. DZIAŁANIE SYSTEMU

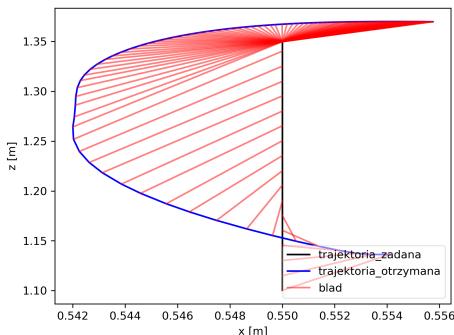


(a) Trajektoria z chwycona puszka

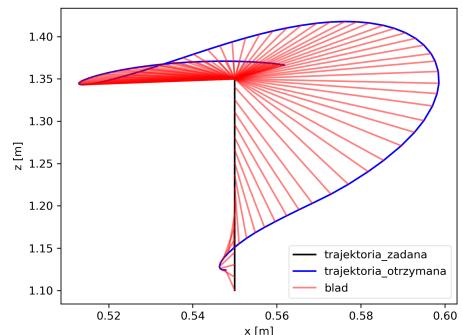


(b) Trajektoria z chwycona wiertarka

Rysunek 6.4: Podnoszenie przedmiotu. Porównanie trajektorii chwytaka w osiach  $Y$  i  $Z$

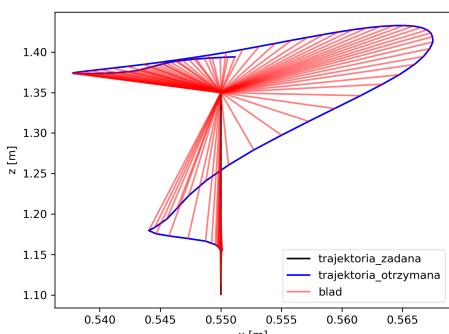


(a) Brak algorytmu kompensacji

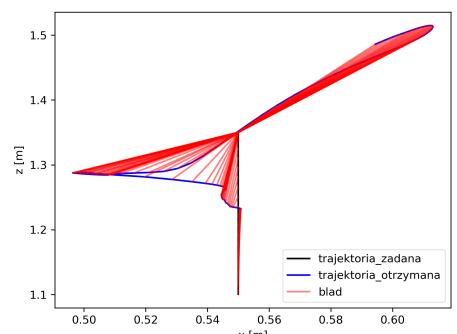


(b) Załączony algorytm kompensacji

Rysunek 6.5: Podnoszenie przedmiotu. Porównanie trajektorii chwytaka w osiach  $X$  i  $Z$



(a) Trajektoria z chwycona puszka



(b) Trajektoria z chwycona wiertarka

Rysunek 6.6: Podnoszenie przedmiotu. Porównanie trajektorii chwytaka w osiach  $X$  i  $Z$

## 6.2 Ruch ósemkowy

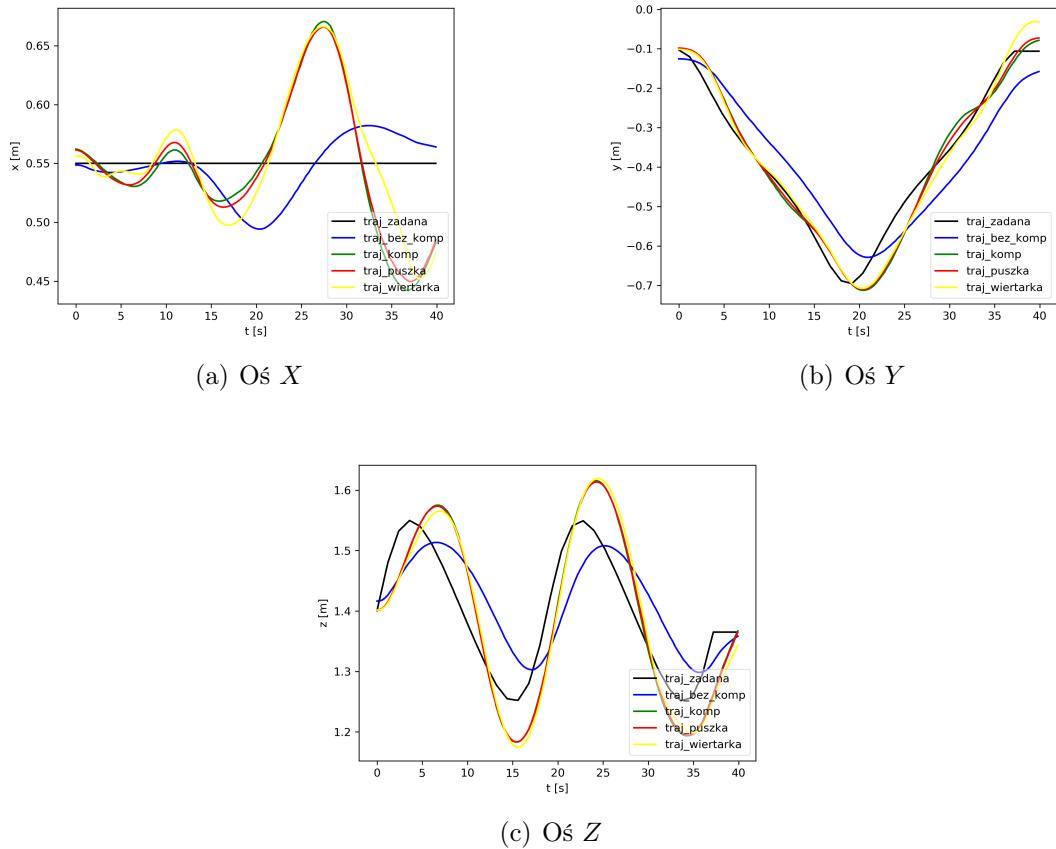
Eksperyment ma przetestować zachowanie algorytmu kompensacji przy skomplikowanych ruchach (rys. 6.7, 6.9). Ruch ósemkowy zadany jest w osi  $Y$  oraz  $Z$ . Trajektoria jest zadana zgodnie ze wzorem lemniskaty Bernoullego opisanej wzorem:

$$(y^2 + z^2)^2 = 2a^2(y^2 - z^2) \quad (6.1)$$

gdzie:

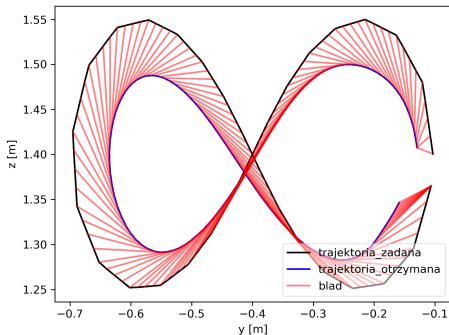
- $y$  oraz  $z$  to współrzędne trajektorii
- $a$  to parametr równania

Trajektoria ruchu w rzucie ATE ruchu została zaprezentowana na rys. 6.8 i 6.10. Trajektoria widoczna z boku (w osiach  $X$  oraz  $Z$ ) została zaprezentowana na rys. 6.11, 6.12.

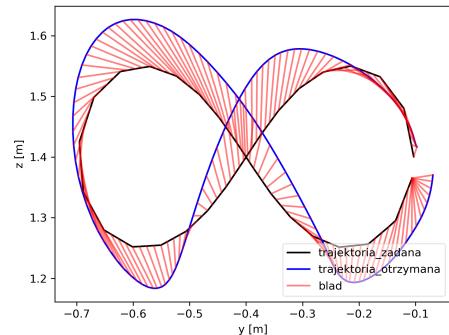


Rysunek 6.7: Ruch ósemkowy. Porównanie trajektorii pozycji w zależności od czasu.

## ROZDZIAŁ 6. DZIAŁANIE SYSTEMU

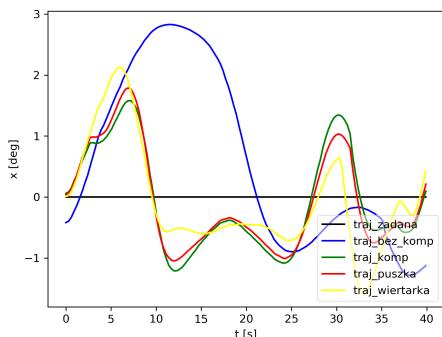


(a) Brak algorytmu kompensacji

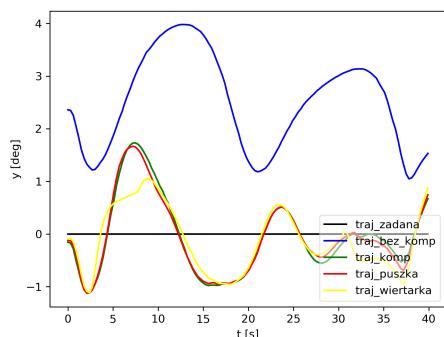


(b) Załączony algorytm kompensacji

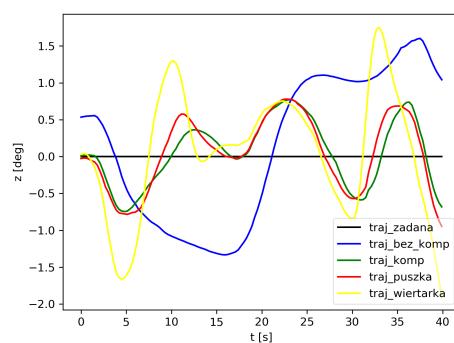
Rysunek 6.8: Porównanie trajektorii chwytaka w osiach  $Y$  i  $Z$



(a) Kąt osi  $X$

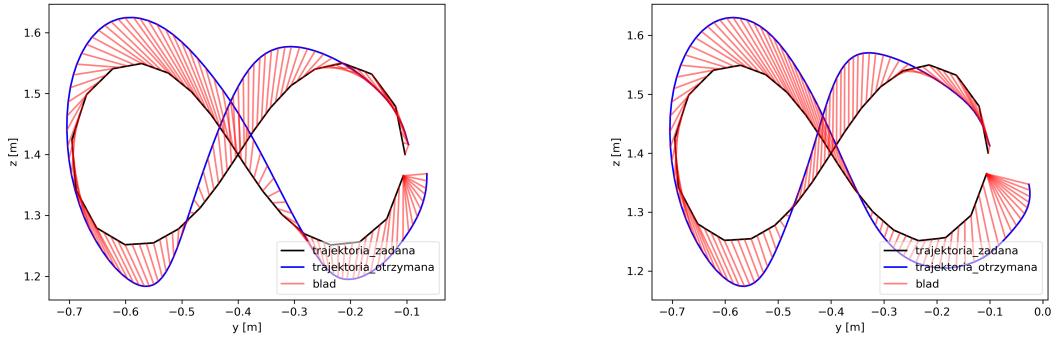


(b) Kąt osi  $Y$



(c) Kąt osi  $Z$

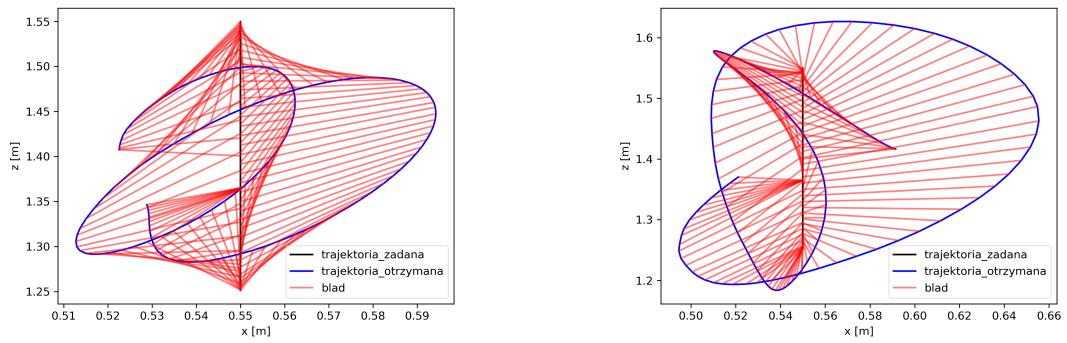
Rysunek 6.9: Ruch ósemkowy. Porównanie trajektorii kątów w notacji Eulera w zależności od czasu.



(a) Trajektoria z chwycona puszka

(b) Trajektoria z chwycona wiertarka

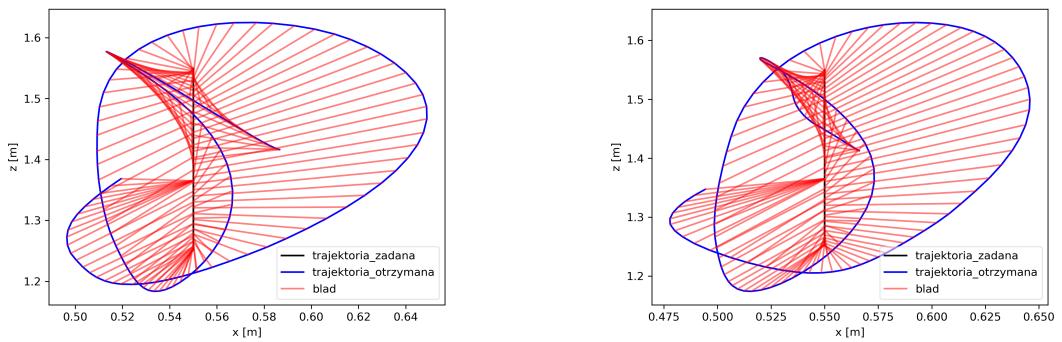
Rysunek 6.10: Ruch ósemkowy. Porównanie trajektorii chwytaka w osiach  $Y$  i  $Z$



(a) Brak algorytmu kompensacji

(b) Załączony algorytm kompensacji

Rysunek 6.11: Ruch ósemkowy. Porównanie trajektorii chwytaka w osiach  $X$  i  $Z$



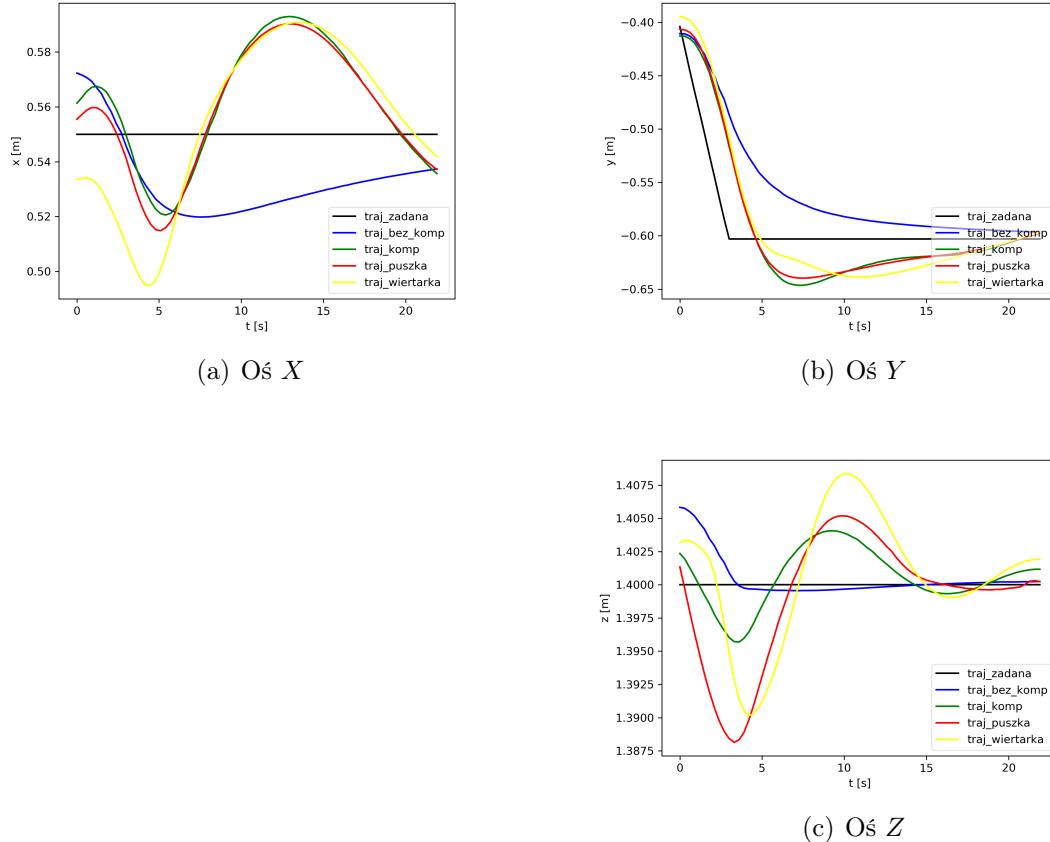
(a) Trajektoria z chwycona puszka

(b) Trajektoria z chwycona wiertarka

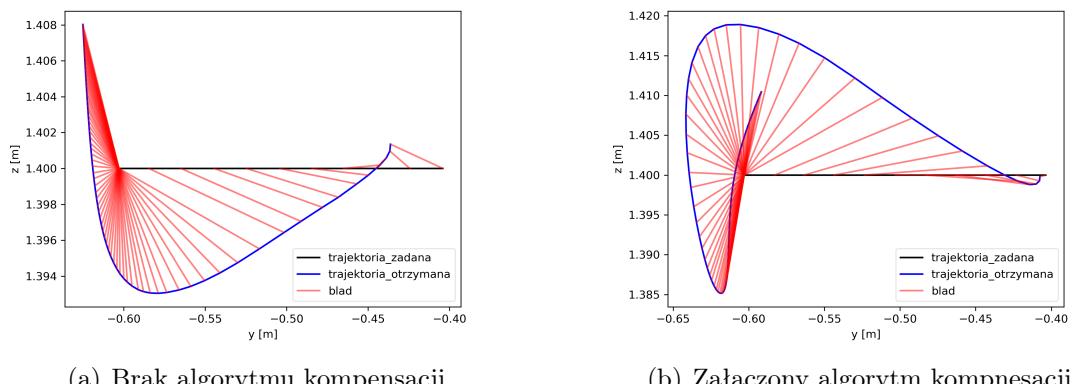
Rysunek 6.12: Ruch ósemkowy. Porównanie trajektorii chwytaka w osiach  $X$  i  $Z$

### 6.3 Ruch w bok

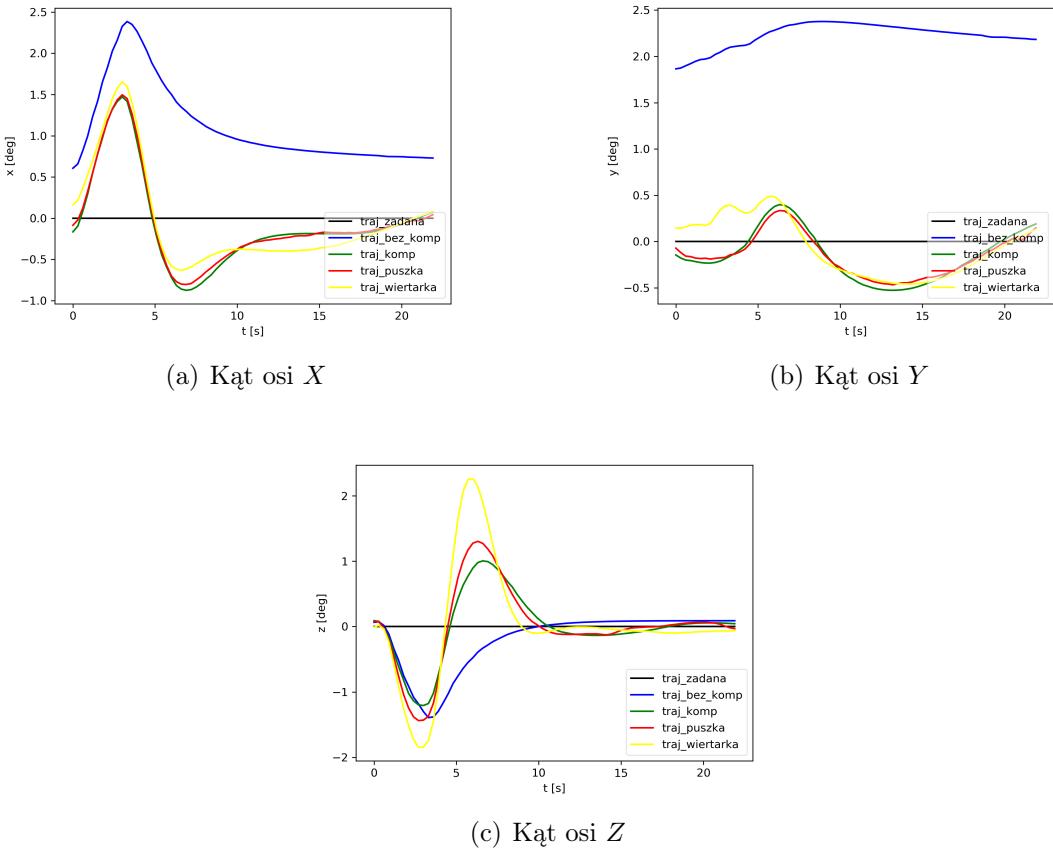
Eksperyment ma przetestować zachowanie algorytmu kompensacji przy ruchu końówka w bok. Trajektoria ruchu w rzucie ATE została zaprezentowana na rys. 6.14 i 6.16.



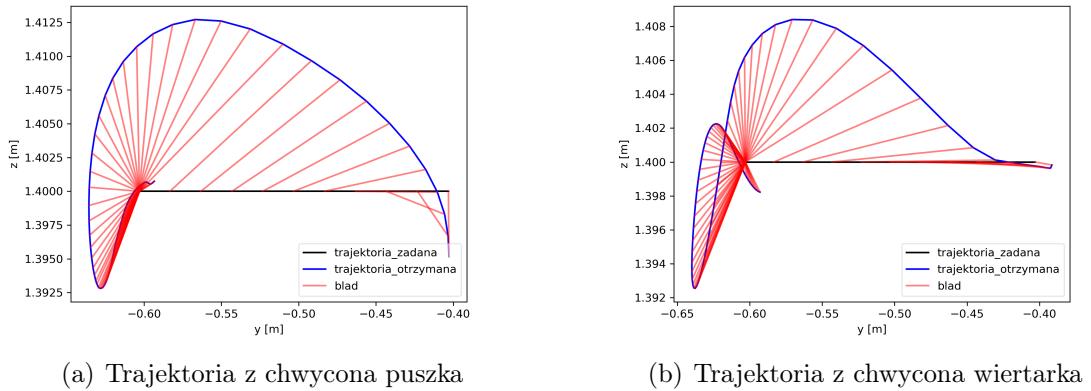
Rysunek 6.13: Ruch w bok. Porównanie trajektorii pozycji w zależności od czasu.



Rysunek 6.14: Ruch w bok. Porównanie trajektorii chwytyka w osiach  $Y$  i  $Z$



Rysunek 6.15: Ruch w bok. Porównanie trajektorii kątów w notacji Eulera w zależności od czasu.



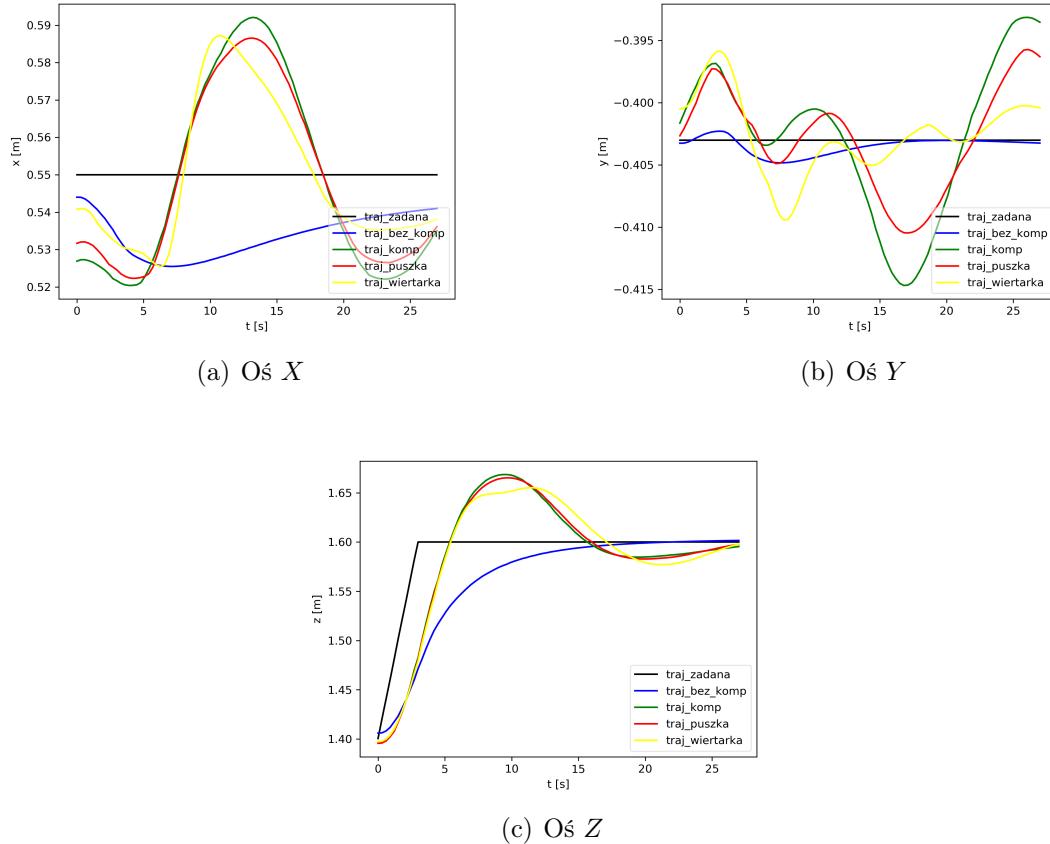
Rysunek 6.16: Ruch w bok. Porównanie trajektorii chwytnika w osiach Y i Z

## 6.4 Ruch do góry

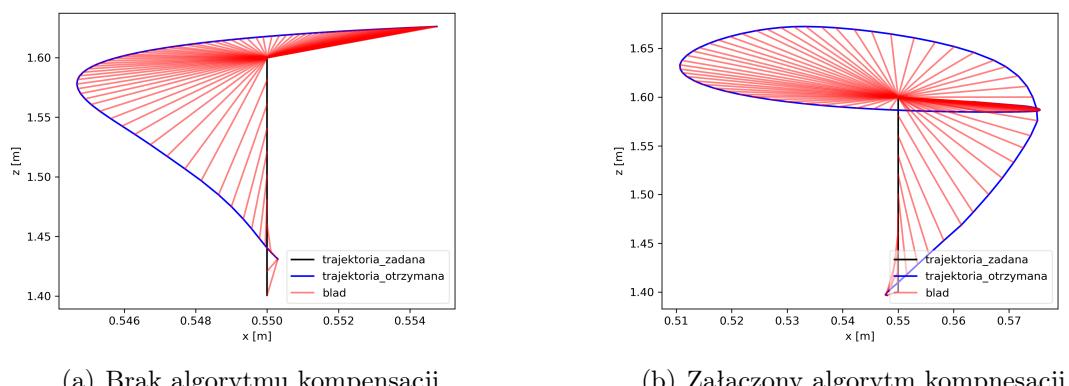
Eksperyment ma przetestować zachowanie algorytmu kompensacji przy ruchu końcówki do góry (rys. 6.17, 6.19). Ruch jest interesujący przez działanie siły grawitacji.

## ROZDZIAŁ 6. DZIAŁANIE SYSTEMU

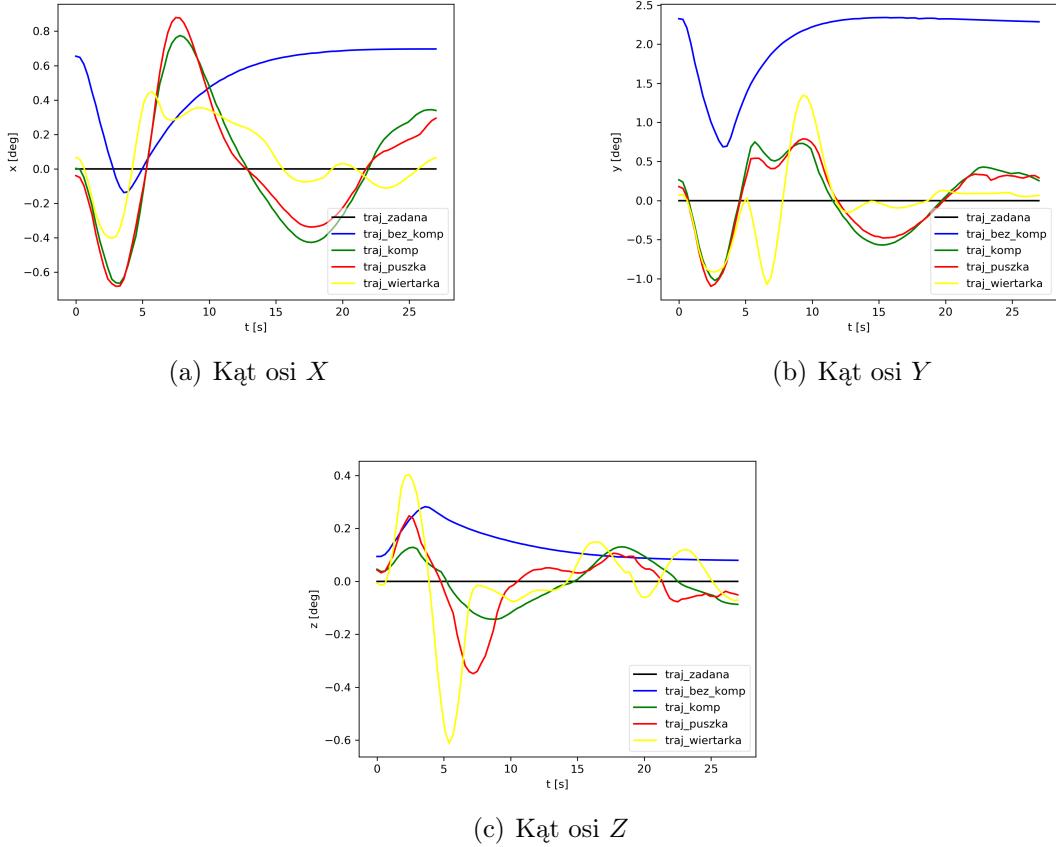
tacji właśnie w tej osi. Ruch różni się od ruchu podnoszenia przedmiotu, ponieważ grawitacja przedmiotu jest już wstępnie skompensowana. Trajektoria ruchu w rzucie ATE została zaprezentowana na rys. 6.18, 6.20.



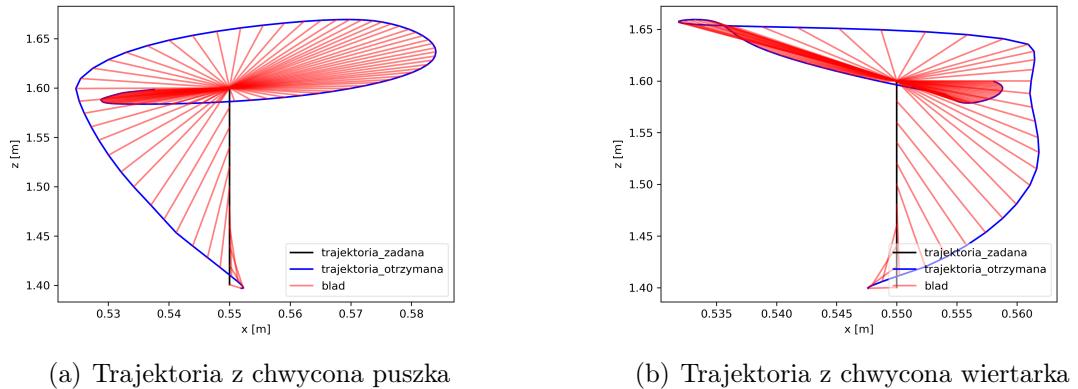
Rysunek 6.17: Ruch do góry. Porównanie trajektorii pozycji w zależności od czasu.



Rysunek 6.18: Ruch do góry. Porównanie trajektorii chwytaka w osiach X i Z



Rysunek 6.19: Ruch do góry. Porównanie trajektorii kątów w notacji Eulera w zależności od czasu.



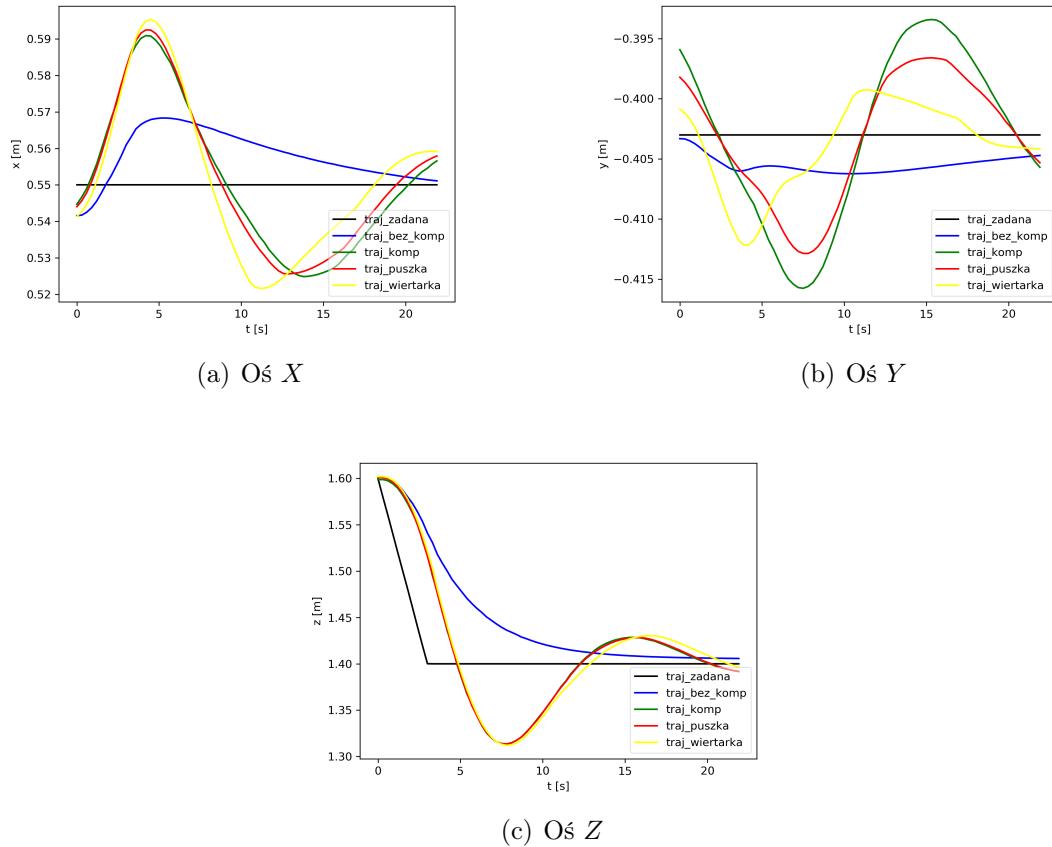
Rysunek 6.20: Ruch do góry. Porównanie trajektorii chwytnika w osiach  $X$  i  $Z$

## 6.5 Ruch do dołu

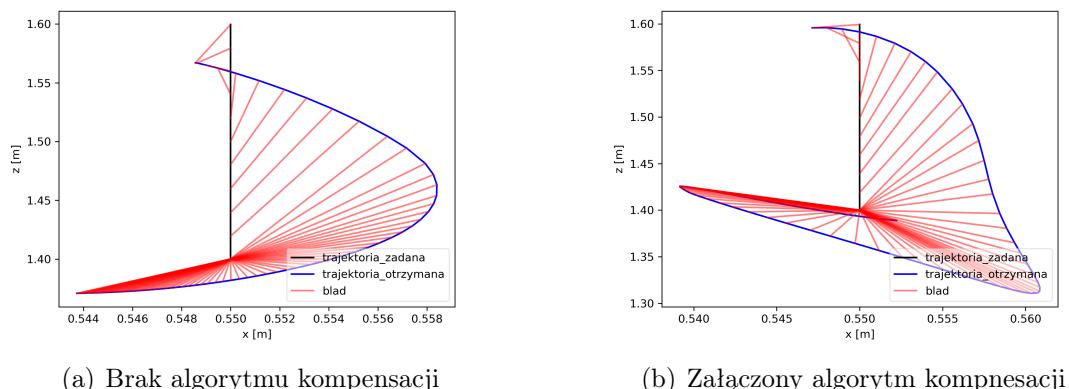
Eksperyment ma przetestować zachowanie algorytmu kompensacji przy ruchu końcówki do dołu (rys. 6.21, 6.23). Trajektoria ruchu pokrywa się z osią w której

## ROZDZIAŁ 6. DZIAŁANIE SYSTEMU

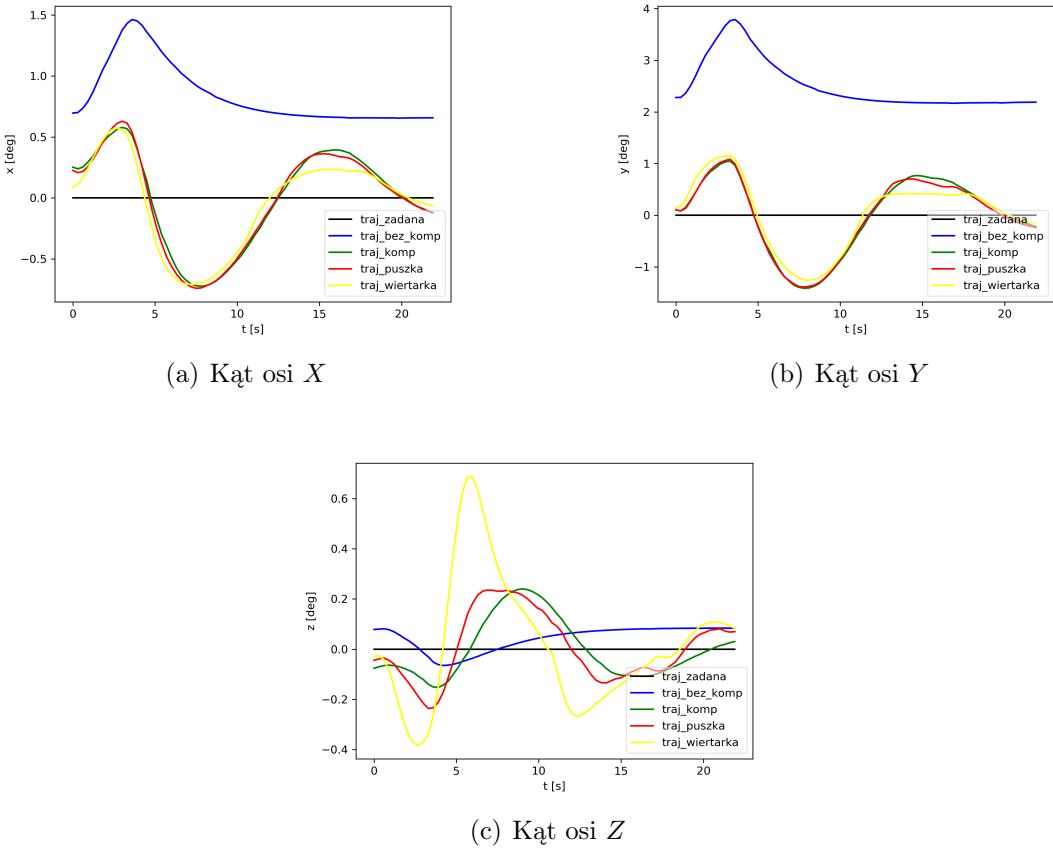
działa siła grawitacji Trajektoria ruchu w rzucie ATE została zaprezentowana na rys. 6.22, 6.24.



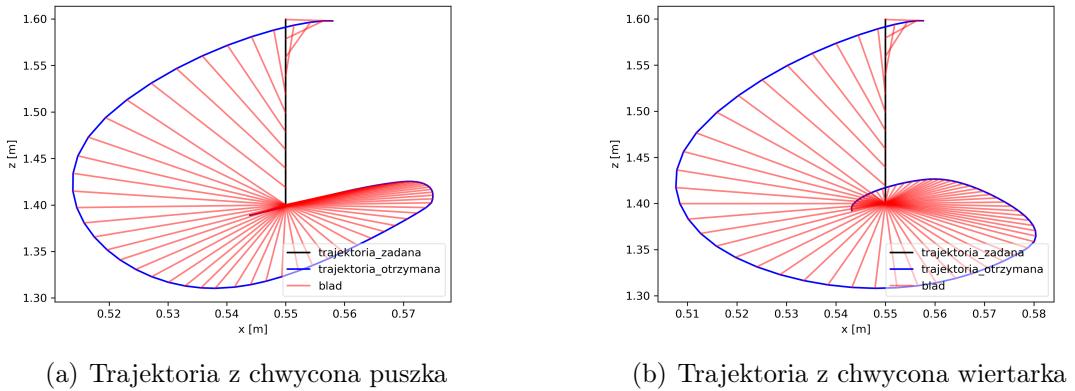
Rysunek 6.21: Ruch do dołu. Porównanie trajektorii pozycji w zależności od czasu.



Rysunek 6.22: Ruch do dołu. Porównanie trajektorii chwytaka w osiach X i Z



Rysunek 6.23: Ruch do dołu. Porównanie trajektorii katów w notacji Eulera w zależności od czasu.



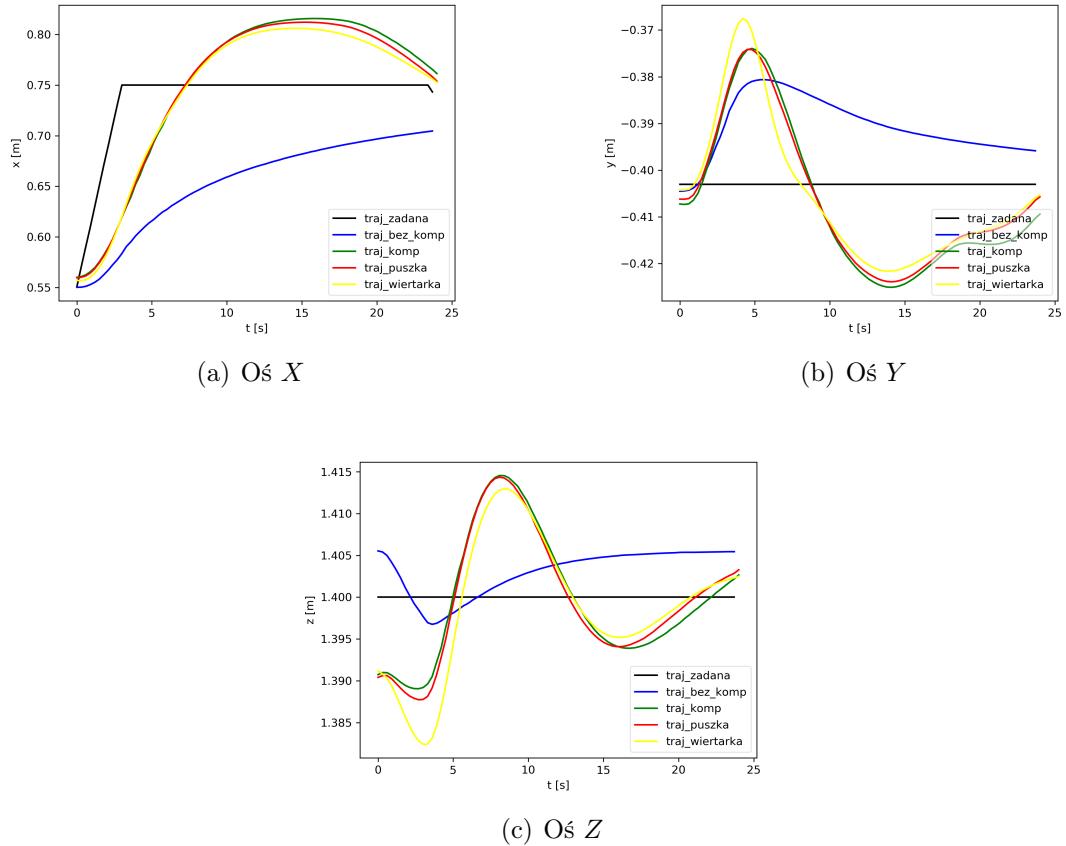
Rysunek 6.24: Porównanie trajektorii chwytnika w osiach  $X$  i  $Z$

## 6.6 Ruch do przodu

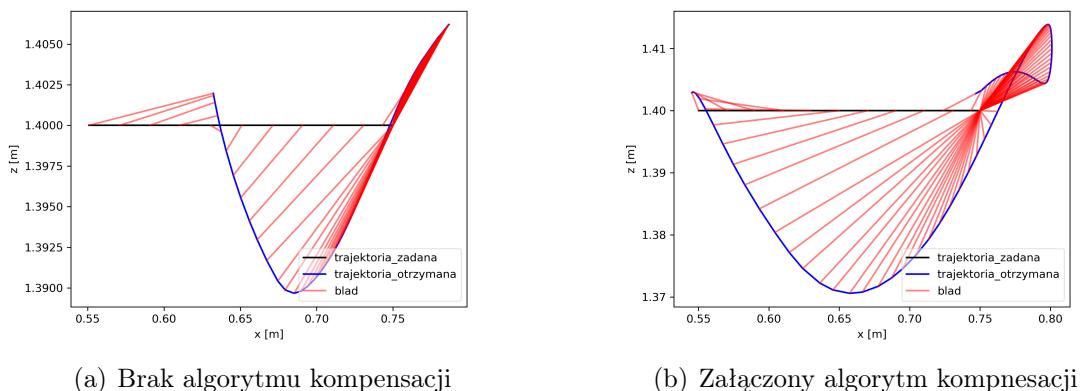
Eksperyment ma przetestować zachowanie algorytmu kompensacji przy ruchu końcówki w kierunku od robota (rys. 6.25, 6.27). Trajektoria ruchu w rzucie ATE

## ROZDZIAŁ 6. DZIAŁANIE SYSTEMU

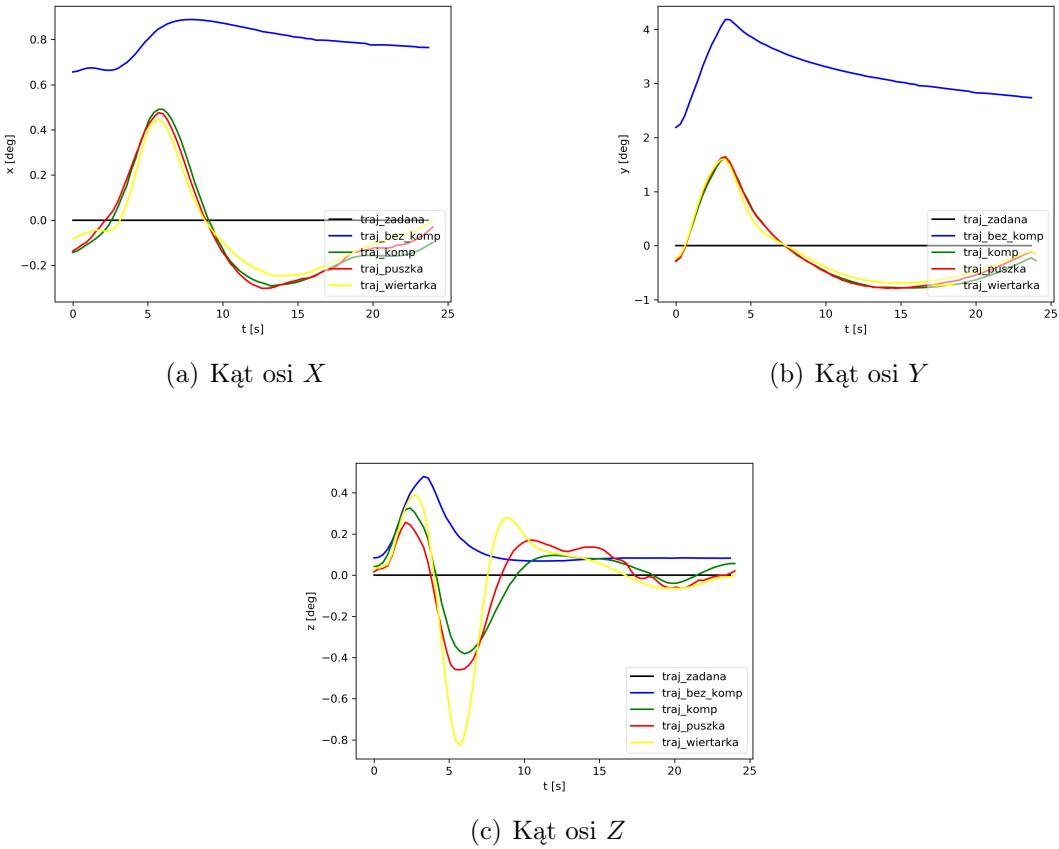
została zaprezentowana na rys. 6.26, 6.28.



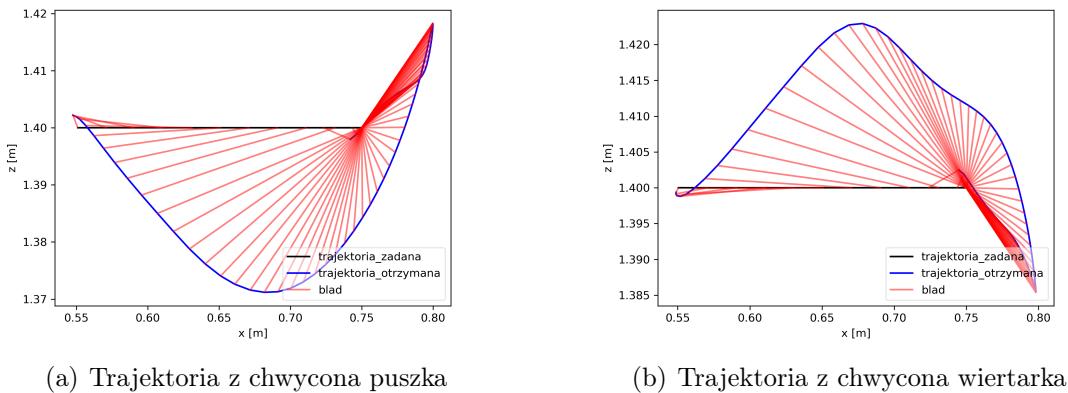
Rysunek 6.25: Ruch do przodu. Porównanie trajektorii pozycji w zależności od czasu.



Rysunek 6.26: Ruch do przodu. Porównanie trajektorii chwytaka w osiach  $X$  i  $Z$



Rysunek 6.27: Ruch do przodu. Porównanie trajektorii katów w notacji Eulera w zależności od czasu.



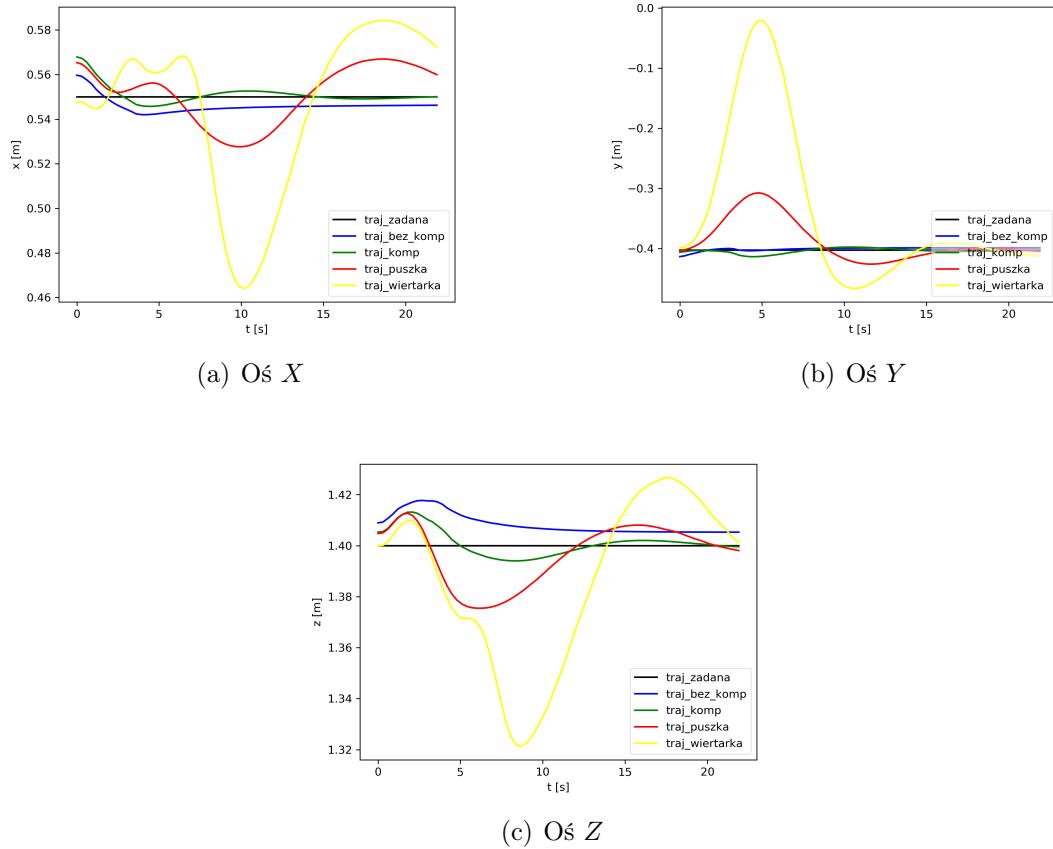
Rysunek 6.28: Ruch do przodu. Porównanie trajektorii chwytnika w osiach  $X$  i  $Z$

## 6.7 Obrót końcówki

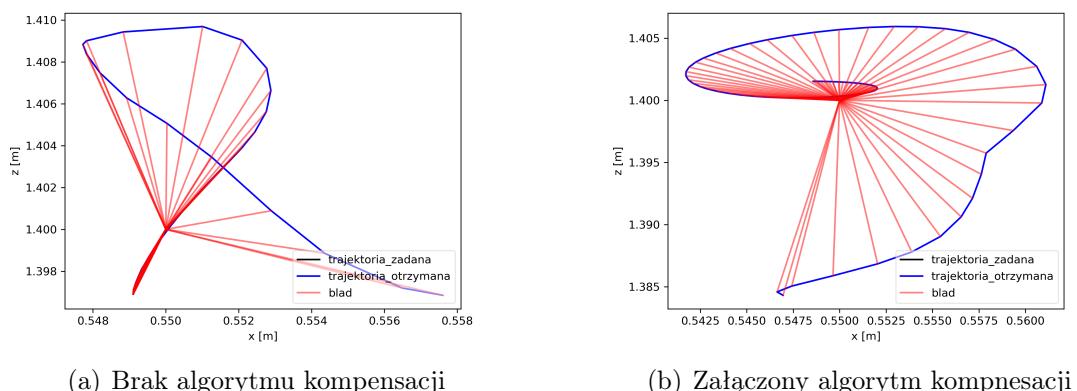
Eksperyment ma przetestować zachowanie algorytmu kompensacji przy obrocie końcówki. Obserwacje polegają na zmianie położen kątowych końcówki bez zmiany

## ROZDZIAŁ 6. DZIAŁANIE SYSTEMU

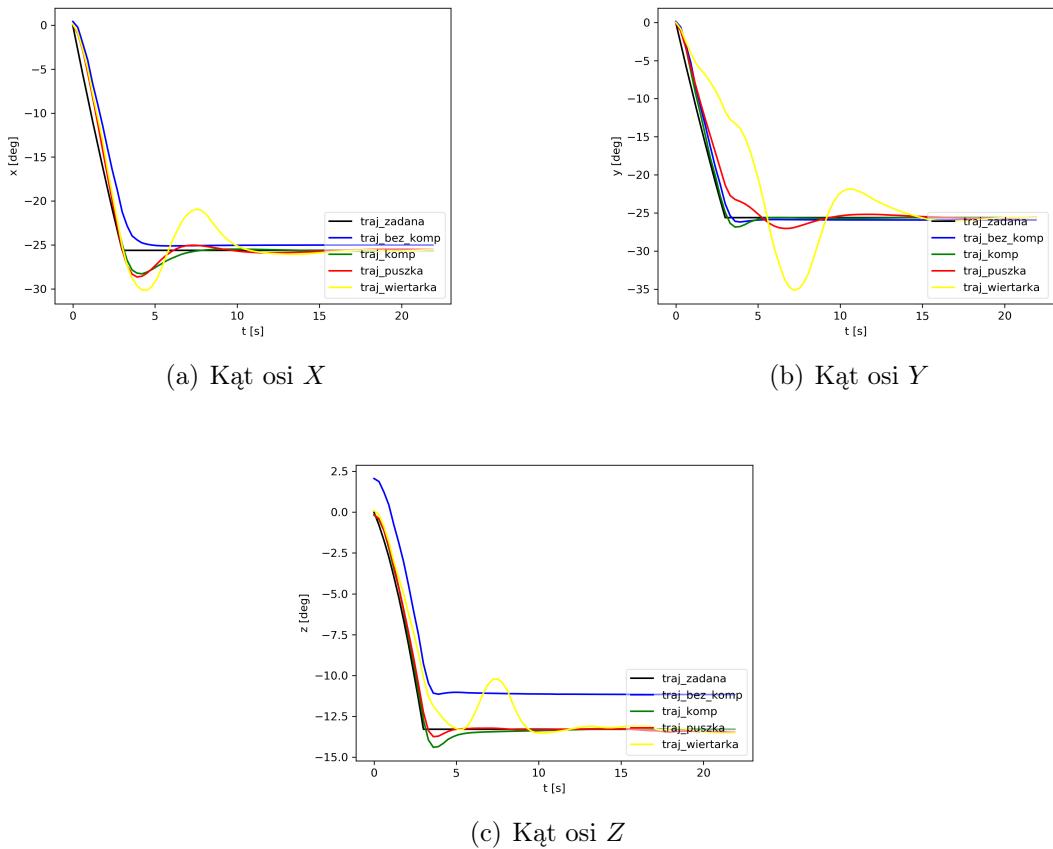
pozycji. Końcówka ma obrócić się o zadany kat we wszystkich osiach (rys.6.29, 6.31) Trajektoria ruchu (w osiach  $X$  oraz  $Y$ ) została zaprezentowana na rys. 6.30 i 6.32. Trajektoria widoczna z boku (w osiach  $X$  oraz  $Z$ ) została zaprezentowana na rys. 6.33, 6.35.



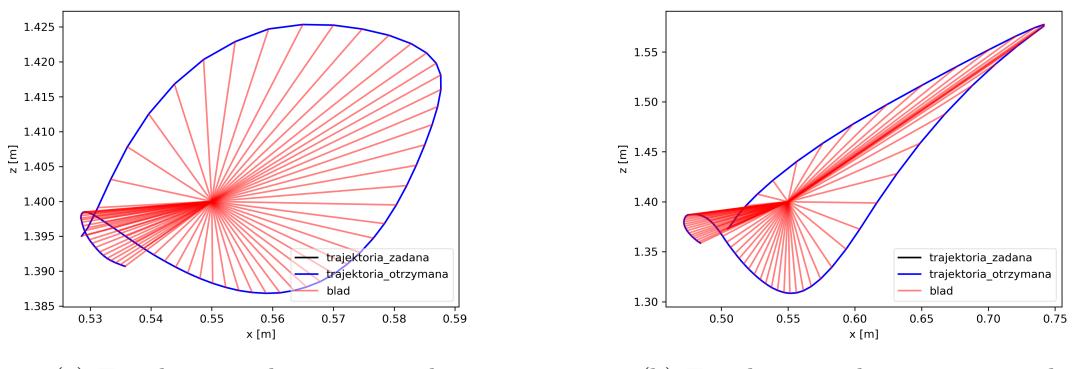
Rysunek 6.29: Porównanie trajektorii pozycji w zależności od czasu.



Rysunek 6.30: Porównanie trajektorii chwytaka w osiach  $X$  i  $Z$

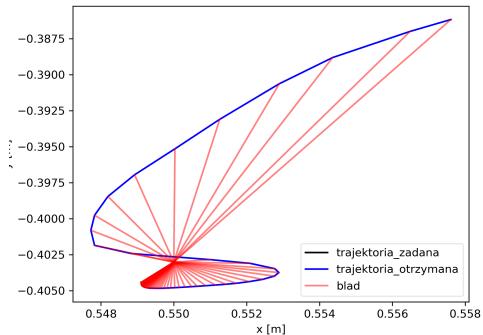


Rysunek 6.31: Porównanie trajektorii kątów w notacji Eulera w zależności od czasu.

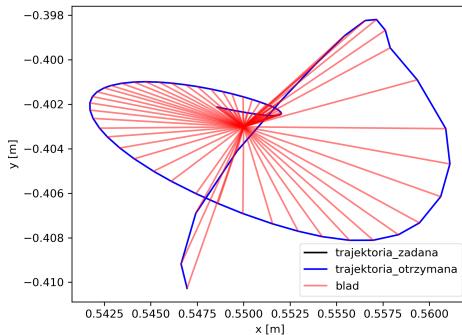


Rysunek 6.32: Porównanie trajektorii chwytaka w osiach  $X$  i  $Z$

## ROZDZIAŁ 6. DZIAŁANIE SYSTEMU

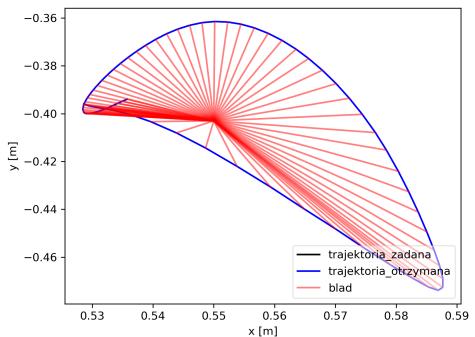


(a) Brak algorytmu kompensacji

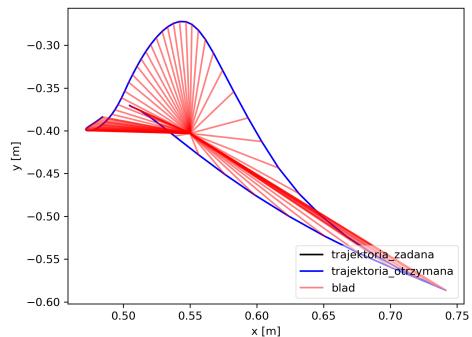


(b) Załączony algorytm kompnesacji

Rysunek 6.33: Porównanie trajektorii chwytaka w osiach  $X$  i  $Y$

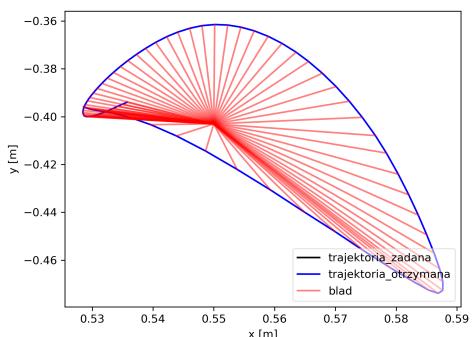


(a) Trajektoria z chwyconą puszką

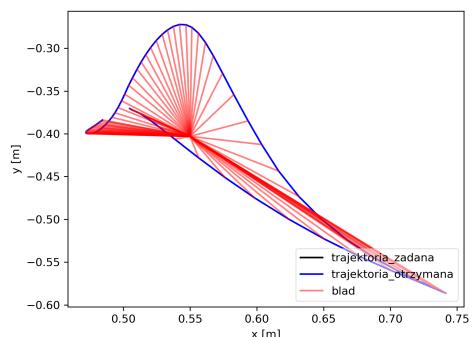


(b) Trajektoria z chwyconą wiertarką

Rysunek 6.34: Porównanie trajektorii chwytaka w osiach  $X$  i  $Y$



(a) Trajektoria z chwyconą puszką



(b) Trajektoria z chwyconą wiertarką

Rysunek 6.35: Porównanie trajektorii chwytaka w osiach  $X$  i  $Y$

## 6.8 Wnioski

Metryka APE jest dobrym narzędziem do oceny jakości trajektorii końcówki. Ruchy tego samego typu mają zbliżony do siebie współczynnik RMSE (tab. 6.1). Zaimplementowane prawo sterowania pozwoliło na skuteczną kompensację siły grawitacji chwyconego przedmiotu. Modyfikacja pozwala na kompensację nie tylko sił grawitacji ale także na ograniczanie innych niedoskonałości modelu stosowanego w prawie sterowania. Osiągane błędy średnio-kwadratowe trajektorii wykonywanych trajektorii są rzędu pojedynczych centymetrów i maksymalnie około dwa razy większe niż w przypadku braku algorytmu kompensacji (tab. 6.1).

W trakcie wszystkich eksperymentów widać, że prawo sterowania osiąga mniejsze błędy dla prostszego obiektu jakim jest puszka z jednorodnym rozkładem mas. Algorytm kompensacji wprowadza oscylacje zarówno położenia jak i rotacji. Zjawisko jest najbardziej widoczne gdy prędkość w końcówce jest wytracana. Przez właściwości zaimplementowanego prawa sterowania podnoszenie przedmiotów trwa długo.

Empiryczne eksperymenty w trakcie pracy symulatora wykazały, że wprowadzone modyfikacje nie miały dużego wpływu na uginanie się robota w trakcie kolizji z przedmiotami chyba że kolizja trwa bardzo długo. Wytylumaczeniem tego pozytywnego zjawiska może być fakt powolnej kompensacji po chwyceniu przedmiotu. Robot potrzebuje ok 15 s aby dodać do końcówki chwytaka siłę o wartości odpowiadającej sile ciężkości jednego kilograma.

Opis ruchu – Błąd [m]	Bez alg. komp.	Bez narzędzia	Z puszka	Z wiertarką
Podnoszenie	0.032490	0.053853	0.090244	0.104056
Ruch ósemkowy	0.102113	0.092006	0.089532	0.095919
Ruch w bok	0.030680	0.040400	0.041024	0.047411
Ruch do góry	0.035023	0.051653	0.050177	0.048357
Ruch do dołu	0.038727	0.055311	0.055371	0.057347
Ruch do przodu	0.035068	0.060216	0.058322	0.056084
Obrót końcówki	0.005984	0.007722	0.038998	0.140615

Tablica 6.1: Porównanie błędu średnio-kwadratowego RMSE w metryce APE dla poszczególnych ruchów.

## ROZDZIAŁ 6. DZIAŁANIE SYSTEMU

# Rozdział 7

## Podsumowanie

Zaprezentowana modyfikacja prawa sterowania impedancyjnego w przestrzeni operacyjnej pozwoliła na szybkie i proste rozwiązywanie problemu kompensacji grawitacji chwytanego narzędzia. W trakcie manipulacji nawet skomplikowane ruchy z chwyconymi przedmiotami o znacznej masie nie stanowią problemu dla robota. Najbardziej wymagające dla nowego prawa sterowania jest podnoszenie przedmiotów, czyli manipulacja przy zmieniających się parametrach narzędzia. Potrzeba adaptacji do narzędzia o nowych parametrach trwa kilka sekund.

W przyszłości można usprawnić algorytm poprzez dodanie ograniczenia członu całkującego zapożyczonego z prawa sterowania PID. Dzięki takiej modyfikacji nie będzie miało miejsce praktycznie żadne pogorszenie uginania się robota w trakcie kolizji. Jako alternatywę można stosować algorytm który działa tylko w pionowej osi układu. Prawdopodobne jest jednak to, że spowoduje to znaczne pogorszenie jakości osiąganych trajektorii. Dalsze badania mogłyby skupić się na przyjęciu uproszczonego modelu robota wraz z narzędziem oraz estymacji jego parametrów z wykorzystaniem czujnika FTS i wyliczonych pozycji końcówki.

Zaprezentowana metodyka pracy stanowi dobre podstawy do testowania zupełnienie nowych i bardziej wysublimowanych algorytmów. Badania w obszarze metodyki powinny skupić się na stworzeniu bardziej precyzyjnych narzędzi do oceny jakości kolizji robota z otoczeniem.

## ROZDZIAŁ 7. PODSUMOWANIE

# Bibliografia

- [1] Barrett Hand. <https://robots.ros.org/barrett-hand/>. [Dostęp: 21 stycznia 2019 r.].
- [2] Documentation of control system of WUT Velma Robot. [https://rcprg-ros-pkg.github.io/velma\\_docs/](https://rcprg-ros-pkg.github.io/velma_docs/). [Dostęp: 21 stycznia 2019 r.].
- [3] Kuka lwr4+ datasheet. [https://www.kukakore.com/wp-content/uploads/2012/07/KUKA\\_LBR4plus\\_ENLISCH.pdf](https://www.kukakore.com/wp-content/uploads/2012/07/KUKA_LBR4plus_ENLISCH.pdf).
- [4] Oficjalna strona gazebo. <http://www.gazebosim.org/>.
- [5] Oficjalna strona projektu dart. <https://dartsim.github.io/>.
- [6] Oficjalna strona systemu orocos. <http://orocos.org/>.
- [7] Oficjalna strona systemu ROS. <http://www.ros.org/>.
- [8] Oficjalna strona Zakładu Programowania Robotów i Systemów Rozpoznających. <https://www.robotyka.ia.pw.edu.pl/>.
- [9] Loredana Zollo Alessandro De Luca, Bruno Siciliano. PD control with on-line gravity compensation for robots with elastic joints: Theory and experiments. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000510980500186X?via%3Dihub>. [Dostęp: 21 stycznia 2019 r.].
- [10] Rainer Bischoff1, Johannes Kurth, Günter Schreiber, Ralf Koeppe, Alin Albu-Schäffer, Alexander Beyer, Oliver Eiberger, Sami Haddadin, Andreas Stemmer, Gerhard Grunwald, Gerhard Hirzinger. The KUKA-DLR Lightweight Robot arm – a new reference platform for robotics research and manufacturing. IEEE.
- [11] Berthold Horn, Hugh Hilden, Shahriar Negahdaripour. Closed-Form Solution of Absolute Orientation Using Orthonormal Matrices.
- [12] SJ Huang, G Lallement. Direct estimation of rigid body properties from harmonic forced responses. *PROCEEDINGS-SPIE THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING*, strony 175–180. SPIE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL, 1997.

## BIBLIOGRAFIA

- [13] K. Parsa, J. Angeles, A. K. Misra. Pose-and-twist estimation of a rigid body using accelerometers. *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.01CH37164)*, wolumen 3, strony 2873–2878 vol.3, May 2001.
- [14] Tavakoli Saeed, Griffin Ian, Peter J. Fleming. Tuning of decentralised pi (pid) controllers for tito processes. *Control Engineering Practice*, strony 1069–1080. IEEE, 2006.
- [15] Dawid Seredyński, Tomasz Winiarski, Cezary Zieliński. FABRIC: Framework for Agent-Based Robot Control Systems. K. Kozłowski, redaktor, *12th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo)*, strony 215–222. IEEE, 2019.
- [16] P. Song, Y. Yu, X. Zhang. Impedance control of robots: An overview. *2017 2nd International Conference on Cybernetics, Robotics and Control (CRC)*, strony 51–55, July 2017.
- [17] Maciej Stefańczyk, Michał Walęcki, Konrad Banachowicz, Tomasz Winiarski. Robot usługowy Velma – projekt i konstrukcja głowy. *XIII Krajowa Konferencja Robotyki – Postępy robotyki*, wolumen 2, strony 451–460, 2014.
- [18] J. Sturm, N. Engelhard, F. Endres, W. Burgard, D. Cremers. A benchmark for the evaluation of rgb-d slam systems. *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, strony 573–580, Oct 2012.
- [19] Jie Tan, Kristin Siu, Karen Liu. Contact Handling for Articulated Rigid Bodies Using LCP.
- [20] N Uyama, T Narumi. Hybrid impedance/position control of a free-flying space robot for detumbling a noncooperative satellite. *IFAC-PapersOnLine*, 49(17):230–235, 2016.
- [21] Nie ZY. Wang QG. PID Control for MIMO Processes. Visioli A. Vilanova R., redaktor, *PID Control in the Third Millennium. Advances in Industrial Control.*, strony 177–204. IEEE, 2012.
- [22] Wikipedia. Impedance control — Wikipedia, the free encyclopedia. <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Impedance%20control&oldid=904943924>, 2019. [Online; accessed 05-September-2019].
- [23] Tomasz Winiarski, Konrad Banachowicz. Sterowanie redundantnym systemem dwuramiennym z aktywnym korpusem. *XIII Krajowa Konferencja Robotyki – Postępy robotyki*, wolumen 2, strony 433–442, 2014.

- [24] Tomasz Winiarski, Konrad Banachowicz, Dawid Seredyński. Two mode impedance control of Velma service robot redundant arm. Roman Szewczyk, Cezary Zieliński, Małgorzata Kaliczyńska, redaktorzy, *Progress in Automation, Robotics and Measuring Techniques. Vol. 2 Robotics.*, wolumen 351 serii *Advances in Intelligent Systems and Computing (AISC)*, strony 319–328. Springer, 2015.
- [25] Tomasz Winiarski, Dawid Seredyński. Wizualizacja sterowników robotów bazujących na teorii agenta upostaciowanego. *XV Krajowa Konferencja Robotyki – Postępy robotyki*, wolumen 1, strony 417–426, 2018.
- [26] Cezary Zieliński. Architektury systemów robotycznych tworzone z agentów upostaciowionych. 196:379–394, 2018. Robotic System Architectures Based on Embodied Agents (in Polish) - Zielinski.
- [27] Cezary Zieliński. Zastosowanie agentów upostaciowionych do projektowania systemów robotycznych. J. Kacprzyk P. Kulczycki, J. Korbicz, redaktor, *Automatyka, robotyka i przetwarzanie informacji*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2019. Zielinski.

## BIBLIOGRAFIA

# Spis rysunków

2.1	Rysunek przedstawia rzut APE w dwóch wymiarach. Czarną i niebieską linią oznaczono zadaną i osiąganą trajektorię. Linie czerwone łączą odpowiednie punkty na obydwu trajektoriach i obrazują błąd pomiędzy nimi. . . . .	19
2.2	Rysunek przedstawia schemat budowy agenta upustaciowionego [?]. Typ podsystemu oznaczany jest dużą literą. Podsystemy i bufory posiadają prawy dolny indeks. Typ podsystemu jest oznaczany lewym dolnym indeksem. Typ buforu jest oznaczany lewym dolnym indeksem ( $x$ - wejściowy, $y$ - wyjściowy). . . . .	20
3.1	Robot usługowy Velma . . . . .	22
3.2	Poglądowy i uproszczony schemat agentów robota Velma zawierający także nieopisywane części systemu odpowiedzialne za nadzór Kinecta [2]. . . . .	23
3.3	Robot Velma w trakcie manipulacji. Symulacja w środowisku Gazebo. . . . .	26
4.1	Diagram aktywności pokazujący przebieg sterowania ramieniem robota. . . . .	28
4.2	Schemat nowego prawa sterowania. W pierwszej fazie wyliczany jest algorytm z członem całkującym a następnie transformowany do przestrzeni stawów przez jakobian. . . . .	29
4.3	Diagram aktywności pokazujący przebieg sterowania ramieniem robota z aktualizacją modelu. . . . .	31
5.1	Diagram przypadków użycia robota z uwzględnieniem algorytmu kompensacji grawitacji . . . . .	35
6.1	Podnoszenie przedmiotu. Porównanie trajektorii pozycji w zależności od czasu. . . . .	38
6.2	Podnoszenie przedmiotu. Porównanie trajektorii chwytyaka w osiach $Y$ i $Z$ . . . . .	39
6.3	Podnoszenie przedmiotu. Porównanie trajektorii kątów w notacji Eulera w zależności od czasu. . . . .	39

## SPIS RYSUNKÓW

6.4	Podnoszenie przedmiotu. Porównanie trajektorii chwytaka w osiach $Y$ i $Z$ . . . . .	40
6.5	Podnoszenie przedmiotu. Porównanie trajektorii chwytaka w osiach $X$ i $Z$ . . . . .	40
6.6	Podnoszenie przedmiotu. Porównanie trajektorii chwytaka w osiach $X$ i $Z$ . . . . .	40
6.7	Ruch ósemkowy. Porównanie trajektorii pozycji w zależności od czasu.	41
6.8	Porównanie trajektorii chwytaka w osiach $Y$ i $Z$ . . . . .	42
6.9	Ruch ósemkowy. Porównanie trajektorii kątów w notacji Eulera w za- leżności od czasu. . . . .	42
6.10	Ruch ósemkowy. Porównanie trajektorii chwytaka w osiach $Y$ i $Z$ . .	43
6.11	Ruch ósemkowy. Porównanie trajektorii chwytaka w osiach $X$ i $Z$ . .	43
6.12	Ruch ósemkowy. Porównanie trajektorii chwytaka w osiach $X$ i $Z$ . .	43
6.13	Ruch w bok. Porównanie trajektorii pozycji w zależności od czasu. .	44
6.14	Ruch w bok. Porównanie trajektorii chwytaka w osiach $Y$ i $Z$ . . . .	44
6.15	Ruch w bok. Porównanie trajektorii kątów w notacji Eulera w za- leżności od czasu. . . . .	45
6.16	Ruch w bok. Porównanie trajektorii chwytaka w osiach $Y$ i $Z$ . . . .	45
6.17	Ruch do góry. Porównanie trajektorii pozycji w zależności od czasu. .	46
6.18	Ruch do góry. Porównanie trajektorii chwytaka w osiach $X$ i $Z$ . . .	46
6.19	Ruch do góry. Porównanie trajektorii kątów w notacji Eulera w za- leżności od czasu. . . . .	47
6.20	Ruch do góry. Porównanie trajektorii chwytaka w osiach $X$ i $Z$ . . . .	47
6.21	Ruch do dołu. Porównanie trajektorii pozycji w zależności od czasu. .	48
6.22	Ruch do dołu. Porównanie trajektorii chwytaka w osiach $X$ i $Z$ . . .	48
6.23	Ruch do dołu. Porównanie trajektorii kątów w notacji Eulera w za- leżności od czasu. . . . .	49
6.24	Porównanie trajektorii chwytaka w osiach $X$ i $Z$ . . . . .	49
6.25	Ruch do przodu. Porównanie trajektorii pozycji w zależności od czasu.	50
6.26	Ruch do przodu. Porównanie trajektorii chwytaka w osiach $X$ i $Z$ . .	50
6.27	Ruch do przodu. Porównanie trajektorii kątów w notacji Eulera w za- leżności od czasu. . . . .	51
6.28	Ruch do przodu. Porównanie trajektorii chwytaka w osiach $X$ i $Z$ . .	51
6.29	Porównanie trajektorii pozycji w zależności od czasu. . . . .	52
6.30	Porównanie trajektorii chwytaka w osiach $X$ i $Z$ . . . . .	52
6.31	Porównanie trajektorii kątów w notacji Eulera w zależności od czasu.	53
6.32	Porównanie trajektorii chwytaka w osiach $X$ i $Z$ . . . . .	53
6.33	Porównanie trajektorii chwytaka w osiach $X$ i $Y$ . . . . .	54
6.34	Porównanie trajektorii chwytaka w osiach $X$ i $Y$ . . . . .	54

## SPIS RYSUNKÓW

6.35 Porównanie trajektorii chwytaka w osiach  $X$  i  $Y$  . . . . . 54

## SPIS RYSUNKÓW

## Spis tablic