

# Pracownia dyplomowa magisterska

## Sterowanie ramieniem robota w obliczu chwytania przedmiotów

Jakub Postępski, kierunek AiR, 257947

11 czerwca 2019

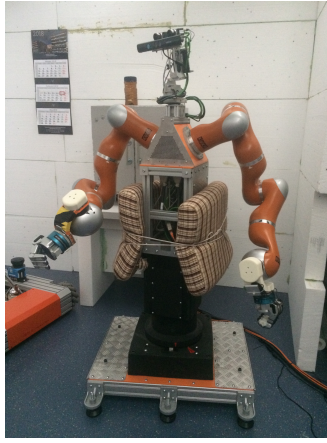
### Spis treści

<b>1</b>	<b>Wprowadzenie</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Prace badawcze</b>	<b>2</b>
2.1	Artykuły . . . . .	2
2.2	Sformalizowanie problemu . . . . .	3
2.3	Dyskretyzacja układu . . . . .	4
2.4	Estymacja nieznanych parametrów . . . . .	4
2.5	Estymacja masy przy wykorzystaniu FTS . . . . .	5
2.6	Estymacja inercji z macierzy układu . . . . .	5
2.7	Kompensacja grawitacji . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Modyfikacja oprogramowania robota</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Podsumowanie</b>	<b>7</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>7</b>

## 1 Wprowadzenie

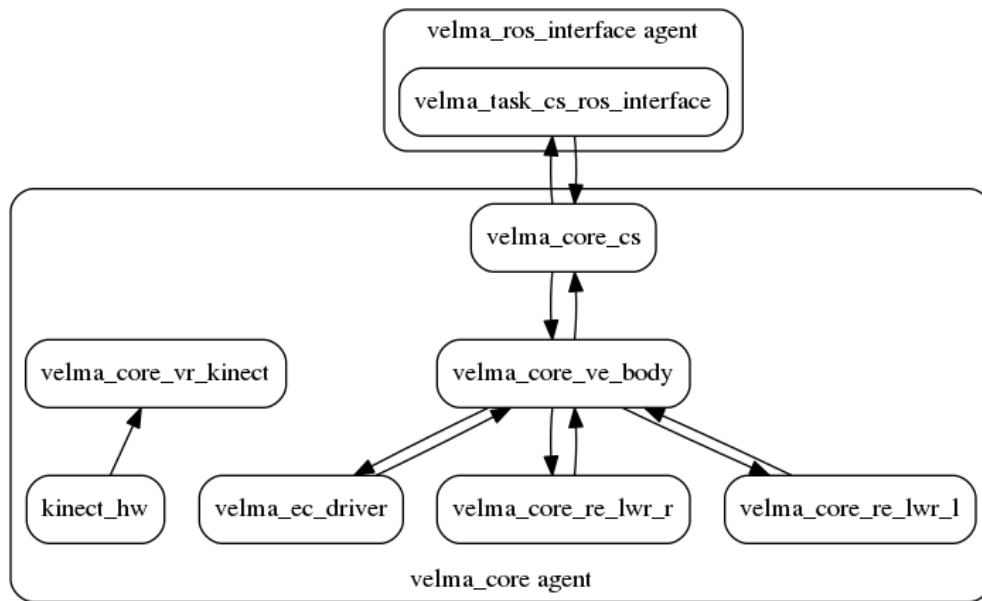
Celem tej pracy magisterskiej jest rozwiązanie problemu kompensacji grawitacji w ramieniu robota sterowanym impedancyjnie. Zakłada się nieznany model chwytanego obiektu, znany model ramienia robota oraz nieważkość ramienia robota. Zakładamy dostępność pomiarów z nadgarstkowego czujnika siły i momentu. W trakcie wspomnianej kompensacji grawitacji robot nie powinien tracić swoich zalet związanych z tym typem sterowania. Dodatkowo ramię robota zakończone jest chwytakiem który pozwala na chwytanie przedmiotów.

Środowiskiem badawczym jest robot Velma [1] (rys. 1). Ma on dwa ramiona LWR [2] sterowane impedancyjnie. Posiadają wbudowaną kompensację grawitacji własnej masy. Na ich końcach znajdują się chwytaki Barretta oraz nadgarstkowe czujniki FTS.



Rysunek 1: Robot usługowy Velma

System sterowania o twardych ograniczeniach czasowych pracuje z częstotliwością 500 Hz. Struktura oprogramowania (rys. 2) została stworzona w oparciu o teorię agentową. Agent **velma\_core\_cs** jest odpowiedzialny za kontrolę zadań związanych z manipulacją w przestrzeni operacyjnej i konfiguracyjnej robota poprzez kontrolę efektorów i receptorów robota. Agent **velma\_ros\_interface** służy do kontroli i interpretacji zadań zleconych przez użytkownika poprzez zarządzanie agentem **velma\_core\_cs**. Oprogramowanie agenta **velma\_core\_cs** jest wykonane przy wykorzystaniu struktury ramowej Orocos, natomiast agenta **velma\_ros\_interface** przy użyciu struktury ramowej ROS. Dostępny jest też symulator robota pisany w przy wykorzystaniu Gazebo. Do obserwowania pracy poszczególnych komponentów systemu służy narzędzie `rqt_agent`.



Rysunek 2: Agentowa struktura oprogramowania [1]

## 2 Prace badawcze

### 2.1 Artykuły

Artykuł [3] pozwala na zrozumienie podstaw sterowania impendancyjnego dla ramion robotów. Artykuły [4] i [5] przedstawiają przykładowe rozwiązania problemu kompensacji grawitacji.

Na wykładach z Teorii sterowania można uzyskać wiedzę na temat podstawowych struktur sterowania. Poruszane są problemy systemów z czasem dyskretnym. Omawiane są problemy konstrukcji optymalnych estymatorów regulatorów i obserwatorów. Jeden z wykładów poświęcony został regulacji adaptacyjnej. Omawiane są zagadnienia niwelowania szumów znajdujących się w układzie. Na przedmiocie Algorytmy i metody optymalizacji poruszana jest tematyka optymalizacji funkcji liniowych i nieliniowych z ograniczeniami. Omawiany jest problem prowadzenia optymalizacji funkcji nieliniowej i niewypukłej do prostszych postaci. Prezentowane są szybkie algorytmy optymalizacji funkcji kwadratowych. W ramach wykładów z Modelowania i sterowania robotów omawiane są zagadnienia opisu kinematyki i dynamiki robotów. Na przedmiocie Inteligentne systemy robotyczne omawiane są zagadnienia teorii agentowej i zastosowania tej teorii w robotyce.

Uczęszczanie na wykłady oraz czytanie artykułów pozwoliło na wyrobienie ogólnego poglądu na przedstawiony problem. Szczególnie istotne była zdobyta wiedza na temat optymalnych regulatorów i obserwatorów. Ważne okazały się też metody optymalizacji ponieważ mogą pozwolić na sprawną implementację wymienionych narzędzi.

## 2.2 Sformalizowanie problemu

Należy skompensować siłę grawitacji w układzie stawu obrotowego sterowanego impedancyjnie. Rozwiązaniem jest określenie masy a następnie dodanie odpowiednich sił do układu w celu kompensacji siły grawitacji.

Obiektem jest układ wahadła sterowanego prawem sterowania impedancyjnego (rys. 3). Na końcu nieważkiego ramienia  $r$  zawieszona jest punktowa masa  $m$  której grawitację należy skompensować. Algorytm sterowania symuluje sprężynę oraz amortyzator w osi obrotu wahadła i można do niego dodać moment  $u$ . Przyjmujemy że dla użytkownika dostępne są pomiary położenia  $q$ , prędkości  $\dot{q}$ , przyspieszenia  $\ddot{q}$ . Dodatkowo przyjmujemy, że w osi obrotu znajduje się czujnik FTS odczytujący siłę  $F$  i moment siły  $\tau$ .

Układ z inercją  $I$  możemy opisać przy pomocy równania:

$$\tau = I\ddot{q} = mr^2\ddot{q} = kq + d\dot{q} + mgr \cos(q) + Iu \quad (1)$$

Model obiektu można opisać układem równań różniczkowych:

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \ddot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{k}{I} & \frac{d}{\tau_u} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{I} \end{bmatrix} (mgr \cos(q) + \tau_u) \quad (2)$$

gdzie:

- $q$  - kąt obrotu  $[rad]$
- $k$  - sztywność
- $b$  - tłumienie
- $m$  - masa przedmiotu  $[kg]$
- $g$  - przyspieszenie ziemskie  $[\frac{m}{s^2}]$
- $\tau_u$  - moment dodawany w celu kompensacji grawitacji przedmiotu  $[Nm]$

Układ możemy więc zapisać w standardowej postaci

$$\dot{q} = \mathbf{A}q + \mathbf{B}u(t) \quad (3)$$

gdzie:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{k}{I} & \frac{d}{I} \end{bmatrix} \quad (4)$$

oraz:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Siła działająca na układ jest sumą siły grawitacji i siły odśrodkowej układu. Siłę grawitacji możemy opisać wzorem:

$$F_g = mg \quad (6)$$

a siłę odśrodkową odpowiednio w osi  $X$  oraz  $Y$  wzorami:

$$F_{ox} = \cos(q)m\dot{q}^2r \quad (7)$$

$$F_{oy} = \sin(q)m\dot{q}^2r \quad (8)$$

Dlatego odczyty czujnika w dwóch osiach możemy opisać wzorami:

$$F_x = F_{ox} = \cos(q)m\dot{q}^2r \quad (9)$$

$$F_y = F_g + F_{oy} = mg + \sin(q)m\dot{q}^2r \quad (10)$$

## 2.3 Dyskretyzacja układu

Po zdyskretyzowaniu metodami ZOH z okresem próbkowania  $T$  otrzymujemy układ:

$$q(t+1) = \mathbf{A_d}q(t) + \mathbf{B_d}u(t) \quad (11)$$

Dyskretyzację odczytów FTS oraz innych równań można przeprowadzić korzystając z dyskretyzacji metodą Eulera ( $\dot{q} \approx \frac{q(t)-q(t-1)}{T}$ ).

$$F_{dx}(t) = \cos(q)m\left(\frac{q(t)-q(t-1)}{T}\right)^2r \quad (12)$$

$$F_{dy}(t) = mg + \sin(q)m\left(\frac{q(t)-q(t-1)}{T}\right)^2r \quad (13)$$

oraz z równania 1

$$\tau(t) = kq(t) + d\frac{q(t)-q(t-1)}{T} + Iu + \cos(q)mg \quad (14)$$

Podobnie można dyskretyzować inne równania i w dalszej części raportu zastosowanie metody nie będzie pokazywane wprost. We wszystkich symulacjach przedstawionych dalej użyto dyskretnych wersji przedstawionych równań.

## 2.4 Estymacja nieznanych parametrów

W celu skompensowania grawitacji zawieszonoj masy należy poznać parametry opisujące tę masę. Uznano że do opisu wystarczą typowe i powszechnie używane zmienne. W opisywanym układzie nie są znane takie wielkości jak inercja, masa oraz środek ciężkości.

Przy założeniu, że masa jest punktowa wiemy że inercję tej masy opisuje zależność

$$I = mr^2 \quad (15)$$

W trakcie opisu metod estymacji parametrów starano się w miarę możliwości nie korzystać z tej zależności. Dzięki takiemu podejściu w przyszłości będzie można wykorzystać znalezione metody w celu estymacji mas niepunktowych o nierównomiernym rozkładzie.

Posiadając estymację promienia  $r$  i wykorzystując pozycję  $q$  jesteśmy w stanie określić pozycję zawieszonoj w układzie masy i jej środek ciężkości.

## 2.5 Estymacja masy przy wykorzystaniu FTS

Korzystając z równania 10 można opisać siły działające na czujnik w osi  $Y$  w chwili  $i$  jako:

$$F_{yi} = m(g + \dot{q}_i^2 r \sin(q_i)) \quad (16)$$

Zakładając błędy odczytu  $e$  dostajemy próbkę postaci:

$$\hat{F}_{yi} + e_i = F_{yi} \quad (17)$$

Posiadając  $n$  próbek możemy więc sformułować zadanie optymalizacji nieliniowej z parametrami  $m$  oraz  $r$  takie że:

$$\min_{m,r} \sum_{i=1}^n \|e_i\| = \sum_{i=1}^n \|\hat{F}_{yi} - F_{yi}\| \quad (18)$$

przy ograniczeniach  $F_{yi} = m(g + \dot{q}_i^2 r \sin(q_i)), i = 1, \dots, n.$

Analogicznie można rozwiązać problem estymacji inercji  $I$  wykorzystując równanie 1 i sformułować zadanie optymalizacji:

$$\min_I \sum_{i=1}^n \|e_i\| = \sum_{i=1}^n \|\hat{\tau}_i - \tau_i\| \quad (19)$$

przy ograniczeniach  $\tau_i = I\ddot{q}_i^2, i = 1, \dots, n.$

## 2.6 Estymacja inercji z macierzy układu

Ponieważ macierz  $\mathbf{B}$  ma tylko jeden wyraz różny od zera  $\mathbf{B_d}$  jest uzyskiwana w prosty sposób i można przyjąć że:

$$\mathbf{B_d} \approx \mathbf{B}T \quad (20)$$

Przekształcając równanie 11 i stosując pseudoinwersję macierzy otrzymujemy równanie macierzowe:

$$\mathbf{A_d} = (X(t+1) - \mathbf{B_d}u(t))(X(t))^{pinv} \quad (21)$$

przy założeniu  $n$  ostatnich próbek zmiennych stanów układu

$$X(t) = \begin{bmatrix} x(t) & x(t-1) & \dots & x(t-n) \end{bmatrix} \quad (22)$$

Po obliczeniu estymacji  $\mathbf{A_d}$  metodą ZOH wyliczamy estymację macierzy  $\mathbf{A}$  otrzymując macierz

$$\hat{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad (23)$$

Po przyrównaniu jej do macierzy  $\mathbf{A}$  możemy wyliczyć inercję z równań:

$$\hat{I}_1 = \frac{-k}{a_{21}} \quad (24)$$

$$\hat{I}_2 = \frac{-b}{a_{22}} \quad (25)$$

i ostatecznie przyjąć estymację:

$$\hat{I} = \frac{\hat{I}_1 + \hat{I}_2}{2} \quad (26)$$

Metoda nie pozwala na uzyskanie wszystkich parametrów lecz w przypadku braku czujnika FTS lub uzyskania z niego zaszumionych odczytów można uzyskać tą metodą zadowalające wyniki.

## 2.7 Kompensacja grawitacji

Kompensacja polega na dodaniu do układu momentu siły który przeciwdziała sile grawitacji masy. Z równania 2.2 wynika postać sterowania  $u$  kompensującego siłę grawitacji. Ponieważ zależy nam na tym aby pozbyć się członu związanego z macierzą  $\mathbf{B}$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \left( \frac{mgr \cos(q)}{I} + u \right) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

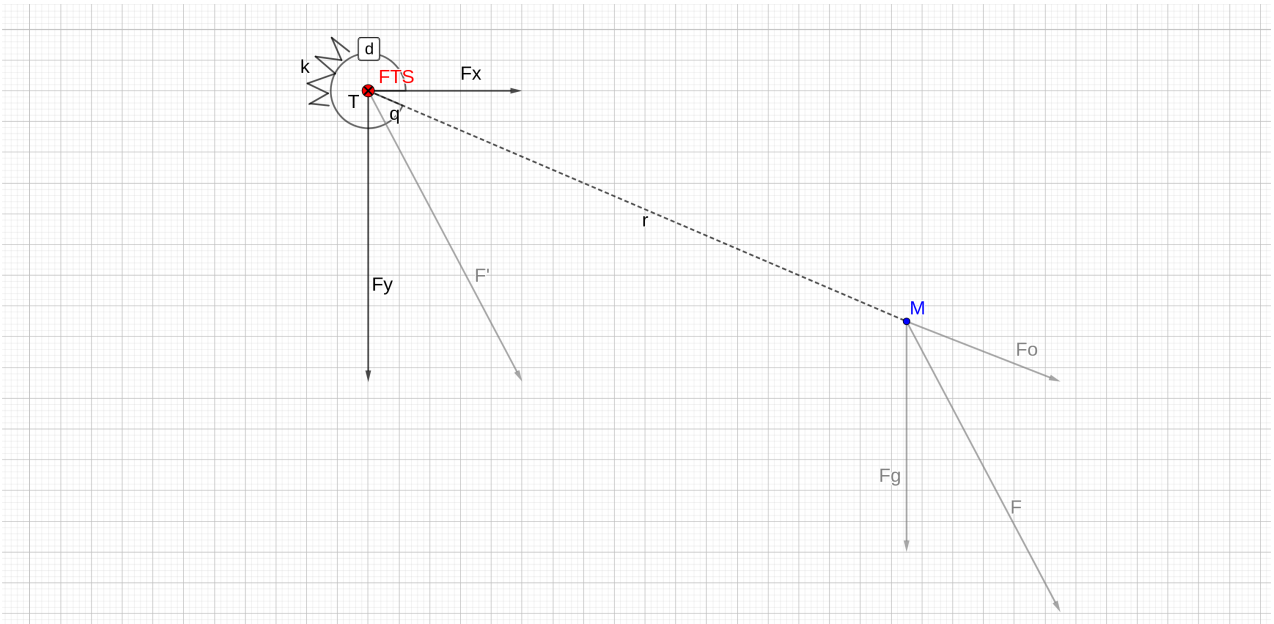
możemy przyjąć sterowanie:

$$u_s(t) = -\frac{mgr \cos(q(t))}{I} \quad (28)$$

Masę  $m$ , promień  $r$  oraz inercję  $I$  uzyskujemy z estymacji przedstawionych w sekcji 2.5.

Algorytm kompensacji nie powinien wprowadzać gwałtownych zmian w prezentowanym układzie więc sterowanie kompensujące wpływ grawitacji jest załączany stopniowo. W celu uzyskania takiego efektu sterowanie jest mnożone przez odpowiednią funkcję trapezową. Dla czasu  $t_p$  początku załączania algorytmu i  $t_k$  końca załączania mamy:

$$u(t) = \min\left(\frac{\max(t - t_p, 0)}{t_k - t_p}, 1\right)u_s(t) \quad (29)$$



Rysunek 3: Schemat badanego układu. Kolorem niebieskim zaznaczono masę  $m$  zawieszoną na ramieniu  $r$ . Kolorem czerwonym zaznaczono punkt mocowania ramienia i umiejscowienia czujnika FTS. Kolorem czarnym pokazano siły odczytywane z czujnika sił, moment siły  $\tau$ , pozycję  $q$  sprężyny  $k$  oraz amortyzator  $d$ . Kolorem szarym zaznaczono rzeczywiste siły układu.

## 3 Modyfikacja oprogramowania robota

Implementacja praw sterowania znajduje się w podsystemie sterowania agenta **velma\_core\_cs** [1]. Zdecydowano się zmianę trybu pracy **cart\_imp** odpowiedzialnego za sterowanie impedancyjne w przestrzeni konfiguracyjnej. Odpowiedzialny za to jest komponent **cart\_imp**. Dodano do niego nowe wejście na które można podać dodatkowy moment siły uwzględniany w każdym kroku sterowania. W celu uzyskania odczytów z czujników FTS zmodyfikowano podsystem

wirtualnego receptora, tak aby przekazywał odczyty do podsystemu sterowania. Do podsystemu sterowania dodano nowy komponent **gravity\_compensation** który odbiera odczyty z czujników FTS i na swoje wyjście przekazuje moment sił który należy uwzględnić w prawie sterowania. Komponent będzie dalej modyfikowany.

## 4 Podsumowanie

W ramach dotychczasowych prac przedstawiono przeprowadzone badania nad zagadnieniem. Dodatkowo przygotowano symulator środowiska badawczego do implementacji i testowania przedstawionych algorytmów. Do wykonania pozostała praktyczna implementacja rozwiązania oraz testy.

## Bibliografia

- [1] 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.].
- [2] Antoine Laurens, Mahdi Khoramshahi, and Aude Billard. Adaptive human-robot interaction: From human intention to motion adaptation using parameterized dynamical systems, 01 2018.
- [3] Andreas Kugi Gerd Hirzinger Christian Ott, Alin Albu-Schaffer. On the Passivity Based Impedance Control of Flexible Joint Robots. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4451347>. [Dostęp: 21 stycznia 2019 r.].
- [4] N. Ulrich and V. Kumar. Passive mechanical gravity compensation for robot manipulators. In *Proceedings. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1536–1541 vol.2, April 1991.
- [5] 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.].