

Diplomová práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra řídicí techniky

## Identifikace 6-osého průmyslového robotu

**Bc. Andrej Suslov**

Vedoucí práce: Ing. Martin Ron  
Květen 2017



## Poděkování

bla bla bla

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

V Praze, 24. května 2017

## Abstrakt

text abstraktu cesky

**Klíčová slova:** robot, identifikace, průmysl, energie, spotřeba, databáze

**Vedoucí práce:** Ing. Martin Ron

## Abstract

Text abstraktu anglicky

**Keywords:** robot, identification, industry, energy, consumption, database

**Title translation:** Identification of a 6-axis industrial robot

## Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Robotický systém</b>	<b>3</b>
<b>3 Dynamický model</b>	<b>5</b>
<b>4 Identifikace systému</b>	<b>7</b>
4.1 Z přímého měření součástí robota	7
4.2 Z 3D modelu .....	8
4.3 Z rovnic .....	8
4.4 Excitační trajektorie .....	10
4.5 Postup identifikace .....	10
<b>5 Odvozené parametry</b>	<b>11</b>
5.1 Simulace odvozených parametrů	12
<b>A Reference</b>	<b>15</b>

## Obrázky

2.1 Robot KUKA KR5 Arc. Převzato z [3]. . . . .	3
2.2 Konfigurace os robota. Převzato z [3]. . . . .	4
5.1 Točivé momenty pro osu 6. . . . .	12
5.2 Točivé momenty pro osu 5. . . . .	12
5.3 Točivé momenty pro osu 4. . . . .	13

## Tabulky

4.1 Tabulka nezáměch parametrů . . .	9
5.1 Tabulka odvozených parametrů .	11

# Kapitola 1

## Úvod

Cílem této práce je vytvoření matematického modelu průmyslového robotického manipulátoru za účelem modelování jeho spotřeby elektrické energie při výkonu daných robotických operací. Tato data by poté měla sloužit pro další identifikaci.

Modelování průmyslových robotů již bylo předmětem mnoha prací a projektů a to už od jejich návrhu a prvních použití. Nejčastěji tyto modely slouží pro návrh řízení robota nebo jeho optimalizaci. Tato práce je zaměřena na modelování robota a identifikaci z hlediska jeho spotřeby elektrické energie. Protože dynamické parametry robota často nejsou známy, je nejprve nutné tyto parametry identifikovat.

Identifikací dynamických parametrů se již zabývalo několik prací. V článcích [8][9] je použita identifikace dynamických parametrů metodou nejmenších čtverců. Práce [5][7] se zabývají identifikací touto metodou robota Mitsubishi PA-10. Jiným způsobem se postupuje v článcích [1] a [2], které se zabývají identifikací systému pomocí 3D modelu. V této práci je k identifikaci je použita metoda identifikace pomocí nejmenších čtverců.

Průmyslové robotické manipulátory jsou dnes již nedílnou součástí průmyslové sféry. Na rozdíl od jednoduchých jednoúčelových průmyslových strojů, které jsou úzce specializované jen na jeden typ operace, jsou průmyslové roboty víceúčelové a jsou schopny vykovávat téměř libovolnou operaci. Jsou omezeny jen vlastní geometrií, uspořádáním pracovního prostoru ve které se provozují a mechanickými vlastnostmi aktuátorů a jednotlivých prvků robota. Díky těmto vlastnostem je jeden průmyslový robot schopen vykovávat operace,

ke kterým by jinak bylo potřeba více strojů, a to jen změnou programu.

Dnes se roboty v průmyslu používají pro mnoho typů operací. Patří mezi ně svařování, montáž, manipulace s materiálem, lakování, vrtání a mnoho dalších.



## Kapitola 2

### Robotický systém

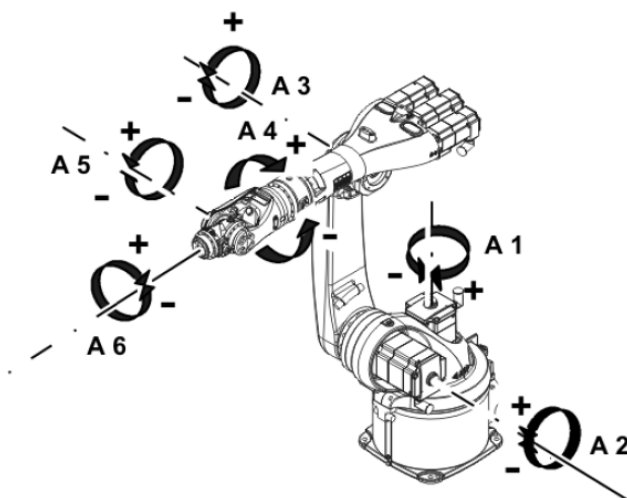
Měření průběhů dynamických parametrů se provádí na průmyslovém robotu KUKA KR5 Arc [4] od společnosti KUKA Roboter GmbH (obr. 2.1). Jedná se o 6-ti osového robota, který má 6 rotačních os poháněných servomotory. Osy robota jsou uspořádány tak, že jsou schopny napodobit stavbu a pohyb lidské paže. Konfigurace os robota je zobrazena na obrázku 2.2.



**Obrázek 2.1:** Robot KUKA KR5 Arc. Převzato z [3].

Tento robot s hmotností 127 kg a základní nosností 5 kg patří mezi lehčí průmyslové roboty. Byl vyvinut primárně pro aplikace vyžadující vysokou přesnost polohování, jako je obloukové svařování a přesná manipulace s lehkými

pevnými předměty. Je určen pro montáž na zem ve vnitřních prostorech.



**Obrázek 2.2:** Konfigurace os robota. Převzato z [3].

Jako pohony os jsou použity synchronní servopohony s permanentními magnety (PMSM). Pro zvýšení točivého momentu motorů a přesnosti polohování jsou motory opatřeny převodovkou. Podrobnější informace je možné nalézt v katalogovém listu [3].

## Kapitola 3

### Dynamický model

Pro výpočet spotřeby je nutné řešit inverzní dynamickou úlohu, kdy z průběhů poloh, rychlostí a zrychlení na jednotlivých osách robota se vypočítají točivé momenty, kterými působí motory. Moment síly motoru je závislý na proudu protékajícím jeho vinutím. Tuto závislost je často možné aproximovat lineární závislostí. Poté je již snadné z momentů na motorech určit jejich proudy a tím i elektrický výkon.

Aby bylo možné řešit inverzní dynamickou úlohu, je potřeba mít dynamický model robotického systému. Jedná se o soustavu nelineárních diferenciálních rovnic druhého řádu. Počet rovnic odpovídá počtu aktuátorů. Rovnice je možné zapsat v maticovém tvaru jako

$$T = M(\dot{\theta}, \theta)\ddot{\theta} + C(\dot{\theta}, \theta)\dot{\theta} + G(\theta) + f_v\dot{\theta} + f_c\text{sign}(\dot{\theta}) \quad (3.1)$$

kde

$T = [T_1 \cdots T_n]^T$  je vektor momentů

$\ddot{\theta} = [\ddot{\theta}_1 \cdots \ddot{\theta}_n]^T$  je vektor úhlových zrychlení

$\dot{\theta} = [\dot{\theta}_1 \cdots \dot{\theta}_n]^T$  je vektor úhlových rychlostí

$M(\dot{\theta}, \theta)$  je matice setrvačnosti tvořena tenzory setrvačnosti jednotlivých os

$C(\dot{\theta}, \theta)$  je matice Coriolisových a odstředivých sil

$G(\theta)$  je matice gravitačních sil

$f_v$  je vektor koeficientů viskózního tření

$f_c$  je vektor koeficientů Coulombova tření

$n$  je počet os

V tomto případě se jedná o soustavu 6 rovnic o celkem 24 neznámých (moment, poloha, rychlost a zrychlení pro každou osu). Pro usnadnění odvození soustavy rovnic pro robota o 6 stupních volnosti byl použit skript pro matematický nástroj MATLAB využívající solver ReDySim Symbolic[6]. Tento nástroj byl vyvinutý na univerzitě v Dillí a je bezplatně k dispozici ke stažení a použití v MATLABu. Je schopen generovat rovnice pro libovolný počet os. Vstupními parametry jsou DH-parametry robota a fyzické parametry s numerickými nebo symbolickými hodnotami.

## Kapitola 4

### Identifikace systému

U robotického manipulátoru zpravidla nejsou zcela známy informace o dynamických parametrech robota, jako jsou momenty setrvačnosti, hmotnosti nebo koeficienty tření jednotlivých os. Tyto informace nejsou v běžných situacích poskytovány ani samotnými výrobci robotů. Je to hlavně proto, že pro zákazníka nejsou tyto údaje důležité, protože se robotické manipulátory dodávají jako hotové uzavřené systémy připravené k použití. Jejich řízení je již implementováno v řídicím systému robota.

Z toho důvodu je nutné tyto parametry nějakým způsobem odvodit. Toho je možné docílit několika hlavními způsoby.

#### 4.1 Z přímého měření součástí robota

Dynamické parametry je možné určit rozebráním robota na menší součásti a přímým měřením jejich dynamických vlastností. Tento způsob se jeví jako nejpřirozenější.

Určení parametrů takovýmto způsobem je ale možné pouze u jednoduchých laboratorních modelů robota tvořených malým počtem součástí. U větších a složitějších robotů je tento způsob náročný časově i způsobem provedení. Jednotlivé linky sestávají z více komponent, jako jsou převodovky motorů, napájecí a komunikační vedení motorů atd. Ty dále sestávají z dalších



$$a \quad P_i = [I_{ixx} \ I_{ixy} \ I_{iyy} \ I_{iyz} \ I_{izz} \ I_{izx} \ m_i r_{ix} \ m_i r_{iy} \ m_i r_{iz} \ m_i f_{vi} \ f_{ci}]^T$$

kde

$I_{ijk}$  je složka setrvačnosti pro link  $i$  vůči souřadnicím  $j$  a  $k$

$r_{ij}$  je složka vektoru těžiště linku  $i$  vyjádřená v souřadnici  $x$

$m_i$  je hmotnost linku  $i$

$f_{vi}$  je koeficient viskózního tření linku  $i$

$f_{ci}$  je koeficient Coulombova tření linku  $i$

Počet neznámých je možné zredukovat, protože některé parametry dynamiku robota neovlivní. Je to způsobeno tím, že se některé linky mohou otáčet jen kolem některé z os. Příkladem může být osa 1 (spojená se zemí), která se v prostoru může otáčet jen kolem jedné osy. Zároveň je možné si model zjednodušit uvažováním pouze prvků na hlavní diagonále tenzorů setrvačnost a zanedbáním prvků mimo ni.

V následující tabulce (tabulka 4.1) je přehled hledaných neznámých dynamických parametrů.

Osa	Neznámé parametry								
1							$I_{1z}$	$f_{v1}$	$f_{c1}$
2	$I_{2xx}$	$I_{2yy}$	$I_{2zz}$	$d_{2x}$	$d_{2y}$	$d_{2z}$	$m_2$	$f_{v2}$	$f_{c2}$
3	$I_{3xx}$	$I_{3yy}$	$I_{3zz}$	$d_{3x}$	$d_{3y}$	$d_{3z}$	$m_3$	$f_{v3}$	$f_{c3}$
4	$I_{4xx}$	$I_{4yy}$	$I_{4zz}$	$d_{4x}$	$d_{4y}$	$d_{4z}$	$m_4$	$f_{v4}$	$f_{c4}$
5	$I_{5xx}$	$I_{5yy}$	$I_{5zz}$	$d_{5x}$	$d_{5y}$	$d_{5z}$	$m_5$	$f_{v5}$	$f_{c5}$
6	$I_{6xx}$	$I_{6yy}$	$I_{6zz}$	$d_{6x}$	$d_{6y}$	$d_{6z}$	$m_6$	$f_{v6}$	$f_{c6}$

**Tabulka 4.1:** Tabulka neznámých parametrů

Naměřením průběhů momentů, poloh, rychlostí a zrychlení na jednotlivých osách a jejich dosazením do lineární rovnice 4.1 lze pak tuto rovnici řešit ve tvaru

$$P = H(\ddot{\theta}, \dot{\theta}, \theta)^{-1} T \quad (4.2)$$

Důležité je na trajektorii mít tolik bodů, aby z rovnice 4.1 vznikla rovnice přeuročená. Takovou rovnici je poté možné řešit například použitím metody nejmenších čtverců. Ta minimalizuje střední odchylku mezi skutečnými a odhadnutými parametry.





## Kapitola 5

### Odvozené parametry

Identifikované parametry jsou uvedeny v tabulce 5.1. Křížkem jsou označeny hodnoty, které se nepodařilo plně identifikovat. Hodnoty jsou uvedeny v základních jednotkách SI. Z tabulky je možné vypořizovat, že šestý link se podařilo identifikovat plně. Problém nastal už u linku č.5, jehož hmotnost vyšla nulová, protože neměla při těchto průbězích na dynamiku vliv. Kvůli tomu již hmotnosti následujících linků nemohou být správně identifikovány, protože jejich rovnice jsou na tomto parametru závislé.

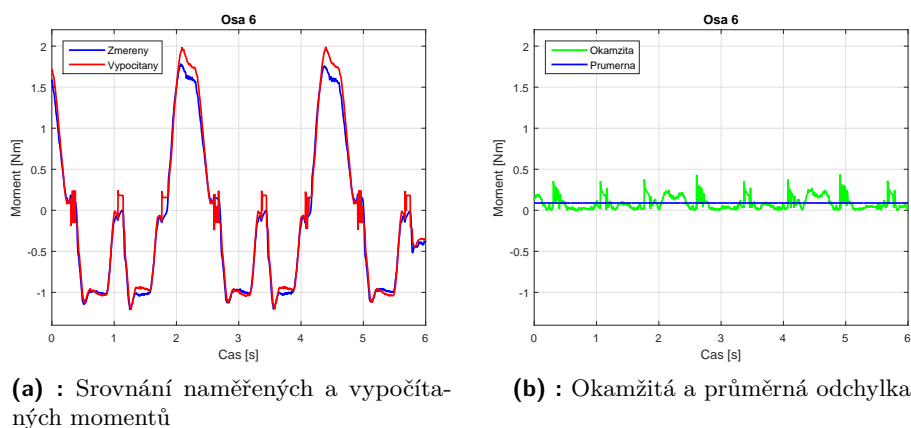
Osa	$I_{xx}$	$I_{yy}$	$I_{zz}$	$d_x$	$d_y$	$d_z$	$m$	$f_v$	$f_c$
1			x	x	x	x	x	x	x
2	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4	0	0	0.013	0.0053	-0.001	x	0	0.1516	0.2757
5	0	0.013	0.0135	-0.0017	0.007	0.001	0	0.0739	0.1576
6	0.0065	0.007	0.0049	-0.0047	-0.0012	-0.0039	0.0055	0.0835	0.1926

**Tabulka 5.1:** Tabulka odvozených parametrů

## 5.1 Simulace odvozených parametrů

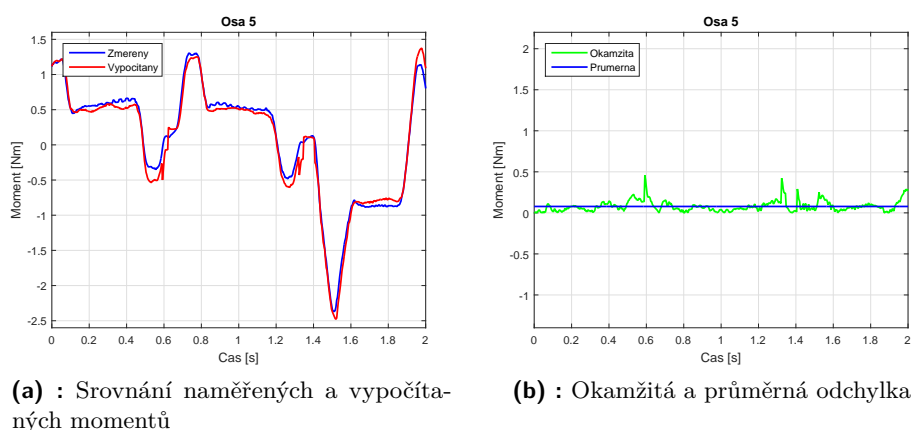
Na následujících obrázcích jsou odsimulované točivé momenty s odvozenými parametry pro osy 4 až 6. Pro další osy simulace provedeny nebyly, protože se pro ně nepodařilo správně odvodit všechny jejich dynamické parametry.

Na obrázku 5.1a je porovnání mezi skutečným naměřeným momentem a vypočítaným z odvozených parametrů pro osu 6. Na druhém obrázku 5.1b je poté zobrazena okamžitá a průměrná odchylka mezi naměřeným a vypočítaným momentem.

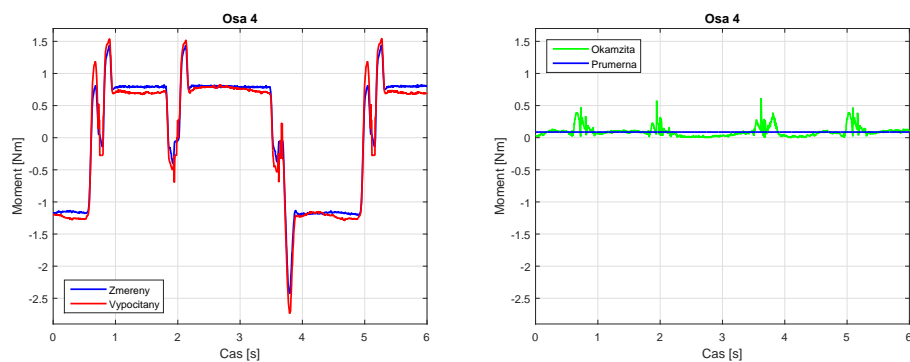


**Obrázek 5.1:** Točivé momenty pro osu 6.

Stejné průběhy pro osu 5 jsou na obrázku 5.2 a pro osu 4 na obr. 5.3.



**Obrázek 5.2:** Točivé momenty pro osu 5.



(a) : Srovnání naměřených a vypočítaných momentů

(b) : Okamžitá a průměrná odchylka

**Obrázek 5.3:** Točivé momenty pro osu 4.

Z výše uvedených průběhů je patrné, že vypočítané a naměřené průběhy si poměrně odpovídají. Ve všech případech se průměrná odchylka pohybuje kolem jedné desetiny Nm a maximální okamžitá odchylka nepřesahuje šest desetin Nm.





## Kapitola 6

### program





## **Kapitola 7**

### **database**







## Reference

- [1] Abdullah Aamir Hayat, Vishal Abhishek, Subir. K. Saha. - Dynamic Identification of Manipulator: Comparison between CAD and Actual Parameters. 2015.
- [2] Akeel Othman, Květoslav Belda, Pavel Burget. - Physical modelling of energy consumption of industrial articulated robots. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2015.
- [3] KUKA Roboter GmbH. - KUKA KR5 ARC - Specifications. 2016. URL [http://www.kuka-robotics.com/res/sps/48ec812b-1b29-4789-8ac2-598aff70abc0\\_Spez\\_KR\\_5\\_arc\\_en.pdf](http://www.kuka-robotics.com/res/sps/48ec812b-1b29-4789-8ac2-598aff70abc0_Spez_KR_5_arc_en.pdf).
- [4] KUKA Roboter GmbH. - KUKA KR5 ARC. 2016. URL [http://www.kuka-robotics.com/czech\\_republic/cs/products/industrial\\_robots/low/kr5\\_arc/start.htm](http://www.kuka-robotics.com/czech_republic/cs/products/industrial_robots/low/kr5_arc/start.htm).
- [5] Ngoc Dung Vuong, Marcelo H. Ang Jr. - Dynamic Model Identification for Industrial Robots. 2009.
- [6] Recursive Dynamics Simulator (ReDySim). 1992. URL <http://www.redysim.co.nr/>.
- [7] R. van der Aalst. - Dynamic identification of a Mitsubishi PA-10 robotic manipulator. 2008.
- [8] Seyed Mahdi Hashemi. - Parameter identification of a robot arm using separable least squares technique. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2009.
- [9] Wenxiang Wu, Shiqiang Zhu, Xuanyin Wang and Huashan Liu. - Closed-loop Dynamic Parameter Identification of Robot Manipulators Using

Modified Fourier Series. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2012.