

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

Reference

21

1 Úvod	1
2 Robotický systém	3
3 Dynamický model	5
3.1 Elektrický výkon	7
3.2 Solver ReDySim	7
4 Identifikace systému	9
4.1 Z přímého měření součástí robota	9
4.2 Z 3D modelu	10
4.3 Z rovnic	10
4.4 Excitační trajektorie	12
4.5 Postup identifikace	12
5 Odvozené parametry	13
5.1 Simulace odvozených parametrů	14
6 program	17
7 databaze	19

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.	14
5.2 Točivé momenty pro osu 5.	14
5.3 Točivé momenty pro osu 4.	15

Tabulky

4.1 Tabulka nezáměch parametrů . .	11
5.1 Tabulka odvozených parametrů .	13



Kapitola 1

Úvod

Kapitola 2

Robotický systém

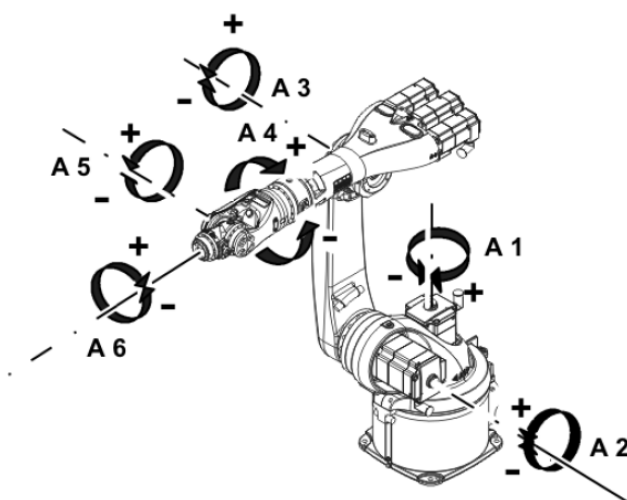
Identifikace byla provedena na průmyslovém robotu KUKA KR5 Arc [4] od společnosti KUKA Roboter GmbH (obr. 2.1). Jedná se o 6-ti osového robota, který má 6 rotačních os poháněných servomotory. Osy robota jsou uspořádány tak, že jsou schopny napodobit stavbu a pohyb lidské paže. Konfigurace os robota je 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 nebo strop ve vnitřních prostorech.



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

Jako pohony os jsou použity třífázové synchronní servopohony s permanentními magnety (PMSM). Pro zvýšení točivého momentu motorů a přesnosti polohování jsou motory opatřeny převodovkou.

Součástí robota je i řídicí systém zajišťující napájení a řízení robota a poskytující uživatelské rozhraní (HMI) pro jeho programování a ovládání. Pohyb robota je programován v jazyce KRL (KUKA Robot Language). Součástí řídicího systému je i užitečný nástroj TRACE, umožňující sledování vnitřních stavů robota jako jsou polohy, rychlosti a zrychlení jednotlivých os, jejich momenty, protékající proudy a mnoho dalších.

Celý systém je napájen z třífázové sítě elektrické energie. Podrobnější informace je možné nalézt v katalogovém listu. [3].

Kapitola 3

Dynamický model

Pro výpočet a predikci spotřeby elektrické energie je potřeba vytvořit matematický dynamický model robota. V případě 6-ti osového manipulátoru se jedná o systém se šesti stupni volnosti. K popisu jeho dynamiky je proto potřeba 6 rovnic druhého řádu. Celkově se tedy jedná o systém dvanáctého řádu.

K odvození těchto rovnic je možné použít jeden ze dvou základních přístupů a to Newton-Eulerovu metodu nebo Euler-Lagrangeovu metodu.

Newton-Eulerova metoda je založena na přístupu k systému jako k soustavě jednotlivých jeho částí a vyžaduje určení pohybových rovnic každé jednotlivé osy. Protože jsou jednotlivé osy vzájemně kinematicky propojeny, jsou i pohybové rovnice jednotlivých os závislé na pohybu ostatních os. Euler-Lagrangeova metoda naopak přistupuje k systému jako k celku a je založena na určení jeho celkové kinetické a potenciální energie.

Oba přístupy nakonec vedou ke stejným rovnicím. Protože jsou jednotlivé polohy a dynamika systému popisovány pomocí úhlů na jednotlivých osách, jsou tyto rovnice silně nelineární. V případě robota KR5 se jedná o soustavu 6 rovnic o celkem 24 neznámých (moment, poloha, rychlost a zrychlení pro každou osu).

Rovnice systému je možné zapsat v následujícím 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 sil působících na jednotlivé osy robota

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

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

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

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

$G(\theta)$ je matice gravitačních sil působících na jednotlivé osy

f_v je vektor koeficientů viskózního tření v jednotlivých osách

f_c je vektor koeficientů Coulombova suchého tření v jednotlivých osách

n je počet os

K výpočtu okamžité spotřeby elektrické energie je nutné řešit inverzní dynamickou úlohu, kdy se z okamžitých poloh, rychlostí a zrychlení na jednotlivých osách robota vypočítají točivé momenty, kterými působí motory. Moment síly motoru je závislý na proudu protékajícím jeho vinutím. Tuto závislost je často možné aproximovat lineární závislostí a psát jako

$$T(t) = KI(t) \quad (3.2)$$

kde

$T(t)[Nm]$ moment síly motoru

$K[Nm/A]$ momentová konstanta

$I(t)[A]$ proud protékající motorem

Momentové konstanty jednotlivých motorů je možné zjistit v jejich dokumentaci. Nástroj TRACE robota KUKA KR5 takto počítá momenty sil jednotlivých motorů.

■ 3.1 Elektrický výkon

Poté je již snadné z momentů na motorech určit jejich proudy a tím i elektrický výkon.

■ 3.2 Solver ReDySim

Pro usnadnění odvození soustavy rovnic pro robota o 6 stupních volnosti a pro případné rozšíření použití i na jiné typy robotů byl použit skript pro matematický nástroj MATLAB využívající solver ReDySim Symbolic[6]. Tento nástroj byl vyvinut 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 přeurčená. 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.

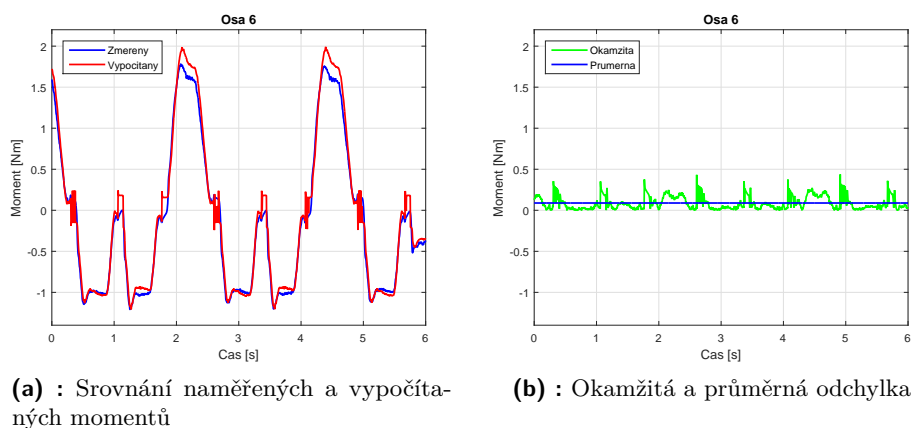
Osa	I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}	d_x	d_y	d_z	m	f_v	f_c
1			x	x	x	x	x	x	x
2	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4	0	0	0.013	0.0053	-0.001	x	0	0.1516	0.2757
5	0	0.013	0.0135	-0.0017	0.007	0.001	0	0.0739	0.1576
6	0.0065	0.007	0.0049	-0.0047	-0.0012	-0.0039	0.0055	0.0835	0.1926

Tabulka 5.1: Tabulka odvozených parametrů

5.1 Simulace odvozených parametrů

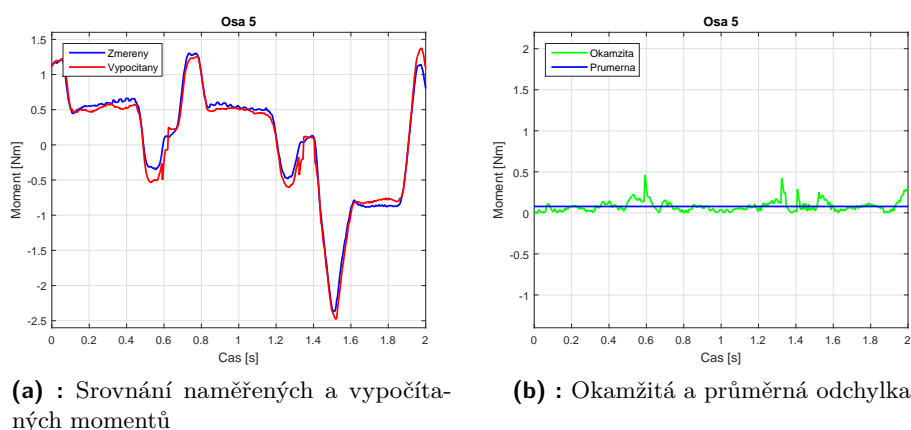
Na následujících obrázcích jsou odsimulované točivé momenty s odvozenými parametry pro osy 4 až 6. Pro další osy simulace provedeny nebyly, protože se pro ně nepodařilo správně odvodit všechny jejich dynamické parametry.

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.

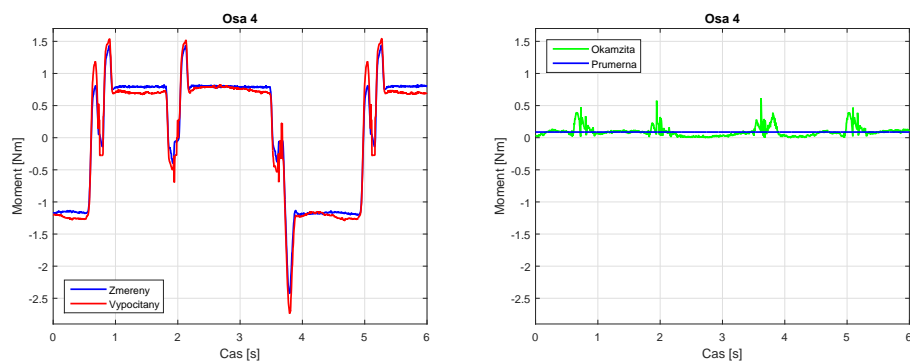


Obrázek 5.1: Točivé momenty pro osu 6.

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.
- [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.
- [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.