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

Prohlášení

bla bla bla

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

V Praze, 24. května 2017

Abstrakt

Abstract

text abstraktu cesky

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

Vedoucí práce: Ing. Martin Ron

Text abstraktu anglicky

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

Title translation: Identification of a 6-axis industrial robot

Obsah

1 Úvod	1
2 Robotický systém	3
3 Dynamický model	5
4 Identifikace systému	7
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
5 Odvozené parametry	11
5.1 Simulace odvozených parametrů	12
A Reference	15

Obrázky Tabulky

2.1 Robot KUKA KR5 Arc. Převzato z [3]	4.1 Tabulka nezámých parametrů 9
2.2 Konfigurace os robota. Převzato z [3] 4	5.1 Tabulka odvozených parametrů. 11
5.1 Točivé momenty pro osu 6 12	
5.2 Točivé momenty pro osu 5 12	
5.3 Točivé momenty pro osu 4 13	

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,

1. Úvod

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.

Robotický systém

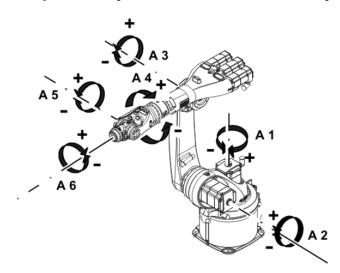
Měření průběhů dynamických parametrů se provádí na průmyslovém robotu KUKA KR5 Arc [4] od společnosti KUKA Roboter GmbH (obr. 2.1). Jedná se o 6-ti osového robota, který má 6 rotačních os poháněných servomotory. Osy robota jsou uspořádány tak, že jsou schopny napodobit stavbu a pohyb lidské paže. Konfigurace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



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].

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

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

kde

 $T = \begin{bmatrix} T_1 \cdots T_n \end{bmatrix}^T$ je vektor momentů

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

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

 $M\big(\dot{\theta},\theta\big)\,$ 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.

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 řídícím 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

4. Identifikace systému

komponent.

Další nevýhodou je nemožnost zobecnění tohoto způsobu na více typů robotů. Každý typ robota by se musel rozebrat a změřit, i kdyby se jednalo o robota podobné konstrukce. Proto se tato práce tímto postupem dále nezabývá.

4.2 Z 3D modelu

Výrobce poskytuje k robotu KUKA KR5 3D model. Ten je možné analyzovat v nástrojích CAD jako je například AutoCAD nebo Siemens NX, které jsou schopny počítat momenty setrvačnosti a hmotnosti libovolně složitých objektů. Výhodou tohoto postupu je jeho rychlost a jednoduchost. Navíc je takto možné získat hledané parametry bez nutnosti přístupu k opravdovému fyzickému robotu. Je také možné tento postup zobecnit na libovolný typ robota.

3D model ale popisuje pouze povrchovou geometrii jednotlivých komponent robota a neobsahuje informace o jejich vnitřní konstrukci ani hustotě použitých materiálů. Je sice možné považovat jednotlivá ramena robota za homogenní a hmotnost odhadnout z celkové hmotnosti robota udávané v datasheetu, tento postup ale dává jen velmi hrubý odhad dynamických parametrů. Navíc z 3D modelu není možné získat informace o koeficientech tření os. Tento postup je zde použit pouze pro účely porovnání určených hodnot.

4.3 Z rovnic

Přestože jsou dynamické rovnice robota 3.1 nelineární vůči zobecněným souřadnicím, jsou lineární vůči jednotlivým složkám dynamických parametrů. Proto je možné je přepsat do tvaru

$$T = H(\ddot{\theta}, \dot{\theta}, \theta)P \tag{4.1}$$

kde

 $T=\begin{bmatrix}T_1\cdots T_n\end{bmatrix}^T$ je vektor momentů $P=\begin{bmatrix}P_1\cdots P_n\end{bmatrix}^T$ je vektor neznámých dyn. parametrů jednotlivých os

4.3. Z rovnic

a
$$P_i = \begin{bmatrix} I_{ixx} & I_{ixy} & I_{iyy} & I_{iyz} & I_{izz} & I_{izx} & m_i r_{ix} & m_i r_{iy} & m_i r_{iz} & m_i f_{vi} & f_{ci} \end{bmatrix}^T$$

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}
	I_{6xx}								

Tabulka 4.1: Tabulka nezámých 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

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

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.

4.4 Excitační trajektorie

Aby bylo možné robota takto identifikovat, je potřeba s robotem provést takové pohyby, aby byly vybuzeny všechny dynamické složky robota, tzn. aby se projevily všechny neznámé parametry. Ve vědeckých článcích a v jiných publikacích např. [9][5][7] se na jednotlivých osách doporučují průběhy, které je možné popsat konečnou Fourierovou řadou. Jejich výhodou je, že díky vlastnostem harmonické funkce jsou poté jak polohy, tak i rychlosti a zrychlení rovněž kombinací harmonických průběhů a tím se minimalizuje vliv šumu měření.

Protože se robot používá převážně pro polohování, jeho řídící systém zpravidla neumožňuje na osách provádět čistě harmonické průběhy. Řídící systém robota KUKA KR5 umožňuje pouze nastavit požadované koncové polohy os a rychlosti/zrychlení, s jakými jich má robot dosáhnout. Z toho důvodu je nutné robotu poskytnout sérii bodů popisujících harmonický průběh. Výsledná trajektorie robota poté bude pouze aproximací harmonického průběhu.

Bohužel takové průběhy momentálně nejsou k dispozici a kvůli odstavení robota je v tuto chvíli nelze naměřit. Identifikace tedy byla zatím provedena na dříve naměřených průbězích, kdy robot postupně 10x zahýbal osou 1, poté se zastavil, zahýbal osou 2 a tak pokračoval až k poslední ose.

4.5 Postup identifikace

Při identifikaci parametrů se postupovalo od poslední, šesté osy (konečného linku) k první. Nejprve se pevně zafixovaly ostatní osy a z průběhů na šesté ose se metodou nejmenších čtverců pomocí rovnice 4.2 určily její dynamické parametry. Poté se tento postup zopakoval pro předchozí osu až k ose první.

Takto se podařilo odvodit některé dynamické parametry. Protože se ale jednalo o šest nezávislých měření pro šest pohybů s ostatními osami pevně zafixovanými, nepokryla se kompletní škála pohybů a neprojevila se při těchto průbězích veškerá dynamika. Proto se nepodařilo odvodit všechny neznámé parametry.

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 vypozorovat, 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.

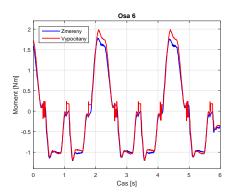
Osa	I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}	d_x	d_y	d_z	m	f_v	f_c
1			X	X	X	X	X	X	X
2	x	X	X	X	X	X	X	X	X
3	X	X	X	X	X	X	X	X	X
4	0	0	0.013	0.0053	-0.001	X	0	0.1516	0.2757
5	0	0.013	0.0135	-0.0017	0.007	0.001	0	0.0739	0.1576
6	0.0065	0.007	0.0049	-0.0047	-0.0012	-0.0039	0.0055	0.0835	0.1926

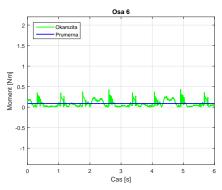
Tabulka 5.1: Tabulka odvozených parametrů

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.

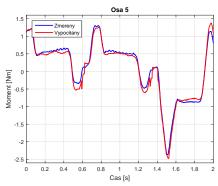


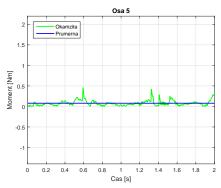


- (a) : Srovnání naměřených a vypočítaných momentů
- (b) : Okamžitá a průměrná odchylka

Obrázek 5.1: Točivé momenty pro osu 6.

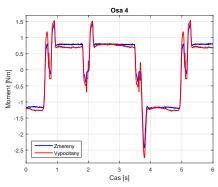
Stejné průběhy pro osu 5 jsou na obrázku 5.2 a pro osu 4 na obr. 5.3.

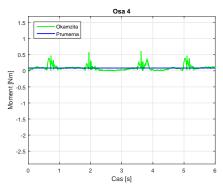




- (a) : Srovnání naměřených a vypočítaných momentů
- (b): Okamžitá a průměrná odchylka

Obrázek 5.2: Točivé momenty pro osu 5.





(a) : Srovnání naměřených a vypočítaných momentů

 $\mbox{(b)}$: Okamžitá a průměrná odchylka

Obrázek 5.3: Točivé momenty pro osu 4.

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

program

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

Reference

 $\label{thm:modified} \mbox{Modified Fourier Series. } \mbox{\it International Journal of Advanced Robotic Systems, 2012.}$