



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Realizace interpolačních funkcí šestiosého průmyslového robotu KUKA

Bakalářská práce

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy
Autor práce: **Martin Košťálek**
Vedoucí práce: Ing. David Lindr, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechatronics, Informatics
and Interdisciplinary Studies ■

Implementation of Interpolation Functions of a Six-axis Industrial Robot KUKA

Bachelor thesis

Study programme: B2612 – Electrical Engineering and Informatics
Study branch: 2612R011 – Electronic Information and Control Systems

Author: **Martin Košťálek**
Supervisor: Ing. David Lindr, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin Košťálek**
Osobní číslo: **M11000161**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronické informační a řídicí systémy**
Název tématu: **Realizace interpolačních funkcí šestiosého průmyslového robotu KUKA**
Zadávací katedra: **Ústav mechatroniky a technické informatiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Proveďte rešerši standardních funkcí průmyslových robotů známých výrobců.
2. Podrobně se seznamte se stávajícím řídicím algoritmem robota, realizovaného v jednotce Simotion/Sinamics.
3. Navrhněte způsob, jak jeho funkční celek rozšířit o interpolační funkce.
4. Proveďte implementaci a důkladné testování vámi vyvinutých funkcí.
5. Vypracujte závěrečnou textovou dokumentaci bakalářské práce, zhodnoťte výsledky vaší práce. Do elektronických příloh uveďte mimo jiné i zdrojové kódy vytvořených programů.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby dokumentace**

Rozsah pracovní zprávy: **cca 30–40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- [1] **Craig J.,J.: Introduction to Robotics Mechanics and Control, Third Edition, Prentice Hall, 2005.**
- [2] **SIMOTION Motion Control Technology Object Path Interpolation, 05/2007, Siemens AG 2007.**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. David Lindr, Ph.D.**

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Martin Diblík, Ph.D.**

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání bakalářské práce: **14. ledna 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2016**

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan



Kolář
doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 14. ledna 2016

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 13. 5. 2016

Podpis: 

Poděkování

Tímto bych chtěl především poděkovat Ing. Davidovi Lindrovi, Ph.D. za jeho odborné vedení při zpracování této bakalářské práce, zejména za jeho ochotu, poskytnutý čas, cenné připomínky a užitečné podněty. Dále bych chtěl poděkovat všem, kteří mi pomáhali a podporovali mě při studiu.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá popisem robotu jako funkčního celku včetně jeho historického vývoje. Dále se zabývá světovými společnostmi, které se zaměřují na vývoj a výrobu průmyslových robotů. Rovněž pojednává o teoretických souvislostech, jako je např. přímá a inverzní úloha kinematiky, singularita, řízení pohybu robotu včetně naplánování požadované trajektorie. Tato práce také popisuje stávající program pro řízení robotu a navazuje na něj v oblasti CP řízení. Vlastní řešení se zabývá vývojem části programu, který zajišťuje výběr optimálního řešení při CP řízení pohybu koncového bodu robotu. Bakalářská práce se zabývá zjištěním chyb ve stávajícím řídicím programu s následným odstraněním a testováním nově vyvinuté funkce. Také nabízí doporučení pro zaměření dalšího vývoje nejen v této oblasti.

Klíčová slova: robot, CP řízení, PTP řízení, plánování trajektorie, singularita, inverzní úloha kinematiky

Abstract

This bachelor thesis deals with the description of the robot as a functional unit, including its historical development. It also deals with international companies which focus the development and production to industrial robots. It also discusses the theoretical contexts, eg. direct and inverse task of kinematics, singularity, robot motion control, including path planning. This thesis also describes the existing program for controlling the robot and continue in this program in CP motion control. Own solutions is specialized in the development of part of the program, which provides a selection of the optimal solution during CP motion control of end point of the robot. This bachelor thesis deals with finding bugs in existing control program with elimination and testing the newly developed function. It also provides recommendations for the focus of further development, not only in this field.

Keywords: robot, CP motion control, PTP motion control, path planning, singularity, inverse task of kinematics

Obsah

Seznam obrázků.....	11
Seznam zkratk a jednotek	12
Úvod.....	13
1 Charakteristika robotů	14
1.1 Generace robotů.....	15
1.1.1 Roboty stávající generace	15
1.1.2 Roboty budoucí generace.....	15
1.2 Klasifikace robotů.....	16
2 Průmyslové roboty známých výrobců	17
2.1 Roboty společnosti ABB	17
2.2 Roboty společnosti KUKA Roboter GmbH	18
2.3 Další společnosti zabývající se průmyslovými roboty	19
3 Transformace souřadnic	20
3.1 Rotace souřadného systému.....	20
3.2 Translace souřadného systému	21
3.3 Rotace a translace souřadného systému.....	21
4 Úloha kinematiky a její souvislosti	23
4.1 Přímá úloha kinematiky	23
4.2 Inverzní úloha kinematiky	24
4.3 Singularita.....	25
5 Způsob řízení pohybu robotu.....	27
5.1 PTP řízení	27
5.2 CP řízení	27
5.3 Plánování trajektorie	28
6 Vlastní řešení	30
6.1 Popis robotu a jeho řídicí jednotky	30
6.2 Popis stávajícího programu.....	31
6.2.1 Program přímé úlohy kinematiky	31
6.2.2 Program inverzní úlohy kinematiky	32
6.2.3 Program PTP řízení pohybu.....	33
6.2.4 Program CP řízení pohybu.....	34
6.3 Popis vlastního řešení	35

6.3.1	Program pro výběr optimálního řešení	36
6.3.2	Předejití „překmitu“ při brzdění v koncovém bodě	38
6.4	Testování programu pro výběr optimálního řešení.....	39
7	Závěr.....	41
	Seznam použité literatury	42
	Příloha A Evoluce robotů v průběhu několika let.....	45
	Příloha B Obsah přiloženého CD.....	46

Seznam obrázků

Obr. 1 Rotace kolem osy x	20
Obr. 2 Rotace kolem osy y	20
Obr. 3 Rotace kolem osy z	21
Obr. 4 Rotace a translace souřadného systému	22
Obr. 5 Smysly pohybů	22
Obr. 6 Konfigurace zprava	25
Obr. 7 Konfigurace zleva, horní a noflip	25
Obr. 8 Dolní konfigurace	25
Obr. 9 Konfigurace flip	25
Obr. 10 Singularita v rameni	26
Obr. 11 Singularita v zápěstí	26
Obr. 12 Lineární trajektorie	28
Obr. 13 Intervaly v polohovém profilu	29
Obr. 14 Tři různá řešení jedné strojní souřadnice	29
Obr. 15 Řídicí systém robotu	31
Obr. 16 Průmyslový robot KUKA VK-10	31
Obr. 17 Uživatelské prostředí pro PTP řízení	33
Obr. 18 Nastavení rychlosti všech os	33
Obr. 19 Uživatelské prostředí pro CP řízení	34
Obr. 20 Kompletní polohový profil	35
Obr. 21 Aktuální hodnoty polohy všech os	36
Obr. 22 Varování s následujícím možným řešením	37
Obr. 23 Aktuální hodnota polohy a rychlosti	38
Obr. 24 Výchozí hodnoty dynamické odezvy v nastavení osy	39
Obr. 25 Použité minimální řešení	40
Obr. 26 Použité optimální řešení	40
Obr. 27 Generace robotů	45

Seznam zkratek a jednotek

°/s	stupeň za sekundu
A	ampér
aj.	a jiný
atd.	a tak dále
CD	compact disc
CP	continuous path
ČSN	česká technická norma
HMI	Human Machine Interface
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
ISO	International Organization for Standardization
kg	kilogram
m	metr
mm	milimetr
např.	například
obr.	obrázek
PC	Personal Computer
PTP	point to point
s.	strana
tzn.	to znamená
tzv.	takzvaně

Úvod

Robotika je speciální vědní disciplína, která je charakteristická svým rychlým rozvojem v jednotlivých průmyslových odvětvích. V současné době existuje celá řada společností, které se vývojem a výrobou robotů, včetně jeho příslušenství, zabývají. Zejména se jedná o zahraniční firmy, které však mají zastoupení i v České republice, a jejich produkty jsou využívány po celém světě. Pro správné fungování robotu je nutné správně a kvalitně naprogramovat jeho řídicí systém. Ten musí zajišťovat bezproblémový běžný chod robotu včetně bezpečnostních funkcí, aby se následně předcházelo poškození samotného robotu či výrobků, se kterými robot manipuluje či je opracovává. Při programování řídicích systémů je nutné dodržovat platnou legislativu a mezinárodní technické normy, které se týkají nejen oblasti robotiky. Průmyslové roboty lze využívat téměř při veškerých činnostech jako je např. sváření, lakování, manipulace s materiálem atd., a to v automobilovém, potravinářském, elektrotechnickém a dalším průmyslu. Jejich potenciál i nadále narůstá.

Řízení pohybu koncového členu robotu v pracovním prostoru po předem stanovených trajektoriích je důležité ke správnému provedení požadovaných aplikací. Jestliže se má koncový bod robotu pohybovat např. po lineární trajektorii, musí být robot řízen tak, aby nedocházelo k nepředvídatelným změnám v jeho konfiguraci a ve výsledku se tak nestala z přímky v prostoru neurčitá křivka. Tímto by mohlo nastat nedokonalé vytvoření výrobku či by mohlo dojít k jeho poničení, ale také by mohl být sám robot poškozen. Tato oblast je jednou z nejvýznamnějších při řízení pohybů robotu.

Hlavním cílem bakalářské práce je vyvinutí funkční části programu řídicí jednotky průmyslového robotu, který má zajišťovat adekvátní řízení pohybu koncového členu robotu po lineární trajektorii. Takto naprogramovaný řídicí systém by mohl být následně použit v praxi či samotný program by mohl být implementován do jiných řídicích jednotek.

1 Charakteristika robotů

Označení **robot** poprvé použil roku 1921 Karel Čapek v premiéře své divadelní hry R.U.R. (Rossum's Universal Robots), tedy Rossumovi univerzální roboti. (Novotný a Horák, 2015) Hlinovský a Mudrová (2014) uvádějí, že robot je stroj, který pracuje téměř samostatně a vykonává zadané úkoly předem stanoveným způsobem. V současné době je robot definován dle normy ČSN ISO 8373 (2013) jako řízený mechanismus, který je možný naprogramovat ve dvou a více osách a je schopný splnit požadované úkoly v závislosti na jeho aktuálním stavu v jeho dosažitelném prostředí především bez lidského zásahu. Další možná definice uvádí, že „*Robotem rozumíme počítačem řízený integrovaný systém, schopný autonomní a cílově orientované interakce s reálným prostředím v souladu s instrukcemi od člověka*“. (Záda, 2012, s. 9)

Robotika popisuje studium a použití robotů. Tento pojem prvně použil Isaac Asimov ve své krátké povídce nesoucí název Runaround vydané roku 1941. V návaznosti na tuto povídku Isaac Asimov definoval tzv. zákony robotiky, které vymezují ochranu lidstva před inteligentními roboty. (Jazar, 2007) Tři základní zákony robotiky jsou: „*robot nesmí ublížit člověku nebo svou nečinností dopustit, aby člověku bylo ublíženo; robot musí uposlechnout příkazů člověka, kromě případů, kdy tyto příkazy jsou v rozporu s prvním zákonem; robot musí chránit sám sebe před zničením, kromě případů, kdy tato ochrana je v rozporu s prvním nebo druhým zákonem*“. (Hlinovský a Mudrová, 2014, s. 8) Zákony by měly být dodržovány každým výzkumníkem v oboru robotiky i přesto, že pochází ze sci-fi literatury. (Hlinovský a Mudrová, 2014)

První průmyslové roboty, které nesly název Unimate, byly zavedeny do praxe na začátku 60. let 20. století Josephem Engelbergerem považovaným za otce robotiky. Jeho společnost Unimation byla první firmou, která začala prodávat roboty. (Jazar, 2007) Vývoj těchto robotů byl podmíněn rozvojem výkonných počítačů, které je dokázaly řídit pomocí složitých algoritmů, a to i v reálném čase. (Záda, 2012) V 80. letech minulého století došlo k rozvoji robotického průmyslu z důvodu velkých investic v automobilovém průmyslu. (Jazar, 2007) Od této doby využití robotů v praxi exponenciálně vzrůstá. V roce 1980 bylo v praxi využíváno pouze cca 20 000 robotů, v roce 2000 se využití výrazně zvýšilo na více jak 500 000. Od roku 2013 se využívá více jak 1,3 milionů robotů po celém světě. (Novotný a Horák, 2015) Například teprve roku 1995 byl do zdravotnictví zaveden první chirurgický robot, který se začal využívat

zejména k miniinvazivním výkonům, a roku 1997 byl na planetu Mars umístěn první robot nazvaný Sojourner. (Hlinovský a Mudrová, 2014)

1.1 Generace robotů

Roboty lze rozdělit do několika generací, a to od mechanických automatů po spolupracující roboty s člověkem podle roku jejich uvedení do praxe. (Novotný a Horák, 2015) Rozdělení těchto robotů je znázorněno v Příloze A.

1.1.1 Roboty stávající generace

Průmyslové roboty spadající do první generace a **roboty pro účelové aplikace** z druhé generace musí splňovat důležité bezpečnostní podmínky. Těmi se rozumí vymezení pracovního prostoru robotu a ostatních pracovníků dané instituce, ve které je robot umístěn. Další podmínkou je vymezení prostoru pro obsluhu robotu, která nesmí být ohrožena vykonávanou činností daného robotu. (Novotný a Horák, 2015)

Dalšími generacemi jsou **multiaplikační roboty** a **spolupracující roboty s člověkem**. U těchto dvou generací je kladen důraz na značnou úroveň řízení, především na jejich přizpůsobení se okolí s užitím nejen nástrojů robotického vidění, ale též s dokonalou senzorikou a dalšími nezbytnými systémy. (Novotný a Horák, 2015)

1.1.2 Roboty budoucí generace

Vývoj stávajících robotů je zaměřen na zlepšení pohybů celé robotické soustavy, na samotné rychlosti a tudíž na celkové preciznosti pohybu. Dále je zaměřen na zvětšení pracovní oblasti robotu, nosnosti ramene, snížení jeho hmotnosti atd. Nedílnou součástí vývoje je stále vylepšování automatického řízení s vlastním přizpůsobením se novým podmínkám z okolního prostředí, dále vylepšování komunikace mezi obsluhou a samotným robotem a tím souvisejícím vývojem moderních čidel. (Záda, 2012) Využití robotů s nízkou hmotností je v současné době požadováno včetně spojení s velkou produktivitou robotu a smysly člověka. (Kabeš, 2016) Z tohoto vyplývá, že vývoj

je stále více zaměřován na spolupráci s člověkem a robot tedy tvoří nedílnou součást při práci. Zejména dochází k odstranění bariéry mezi robotem a člověkem, kdy je nezbytné minimalizovat riziko vzniku úrazu způsobené robotem. (Novotný a Horák, 2015) Toto také potvrzuje Kabeš (2016) a dodává, že inteligentní roboty v dnešní době plní ucelené úkoly za zaměstnance a navíc je plní s požadovanou přesností bez velkých odchylek. Taktéž se samy přizpůsobí okolnímu prostředí a není obtížné je naprogramovat. Využití robotů budoucí generace bude i nadále rozvíjeno v technické sféře, ale také ve zdravotnictví a dalších oblastech. (Novotný a Horák, 2015)

1.2 Klasifikace robotů

Roboty lze rozdělit podle využití a jejich struktury na mobilní, humanoidní a speciální roboty a na robotická ramena. S **mobilními roboty** se lze setkat nejen v průmyslových odvětvích, ale taktéž ve výzkumných ústavech či v běžném životě. **Humanoidní roboty** jsou v dnešní době často viděny v multimédiích, avšak i přes oblibu veřejnosti praktické využití často nemají. (Záda, 2012) Roku 2000 firma Honda představila svého robota Asima a firma Sony robota Aiba v podobě zvířete. (Hlinovský a Mudrová, 2014). **Speciální roboty** jsou často využívány v nebezpečných podmínkách či tam, kde člověk nemůže bez zvláštních opatření pobývat. Jedná se především o vesmírný prostor, podmořská dna atd. (Záda, 2012)

Robotické rameno je v současné době nejběžnější struktura průmyslových robotů, se kterou se lze setkat. Robot s touto strukturou je často využíván v prostorách, které jsou nevyhovující pro zdraví osob. Nejčastěji se s nimi lze setkat v průmyslu strojírenském, elektrotechnickém, stavebnickém, hornickém a hutním a dalším. Procentuální využití robotických ramen pro různé činnosti v průmyslových odvětvích bylo v roce 2011 následující: nejvíce zastoupenou činností byla manipulace s materiálem (23 %), dále bodové svařování (18 %), obloukové svařování (16 %), nástřik a dokončování (15 %), mechanická montáž (7 %), elektronická montáž (5 %), přeprava (5 %) a ostatní činnosti (11 %). (Záda, 2012) Robotická ramena lze rozdělit do několika dílčích skupin dle rozdílných kritérií, a to podle „*počtu stupňů volnosti, kinematické struktury, použitých pohonů, geometrie pracovního prostoru, pohybových charakteristik, způsobu řízení, způsobu programování, aj.*“ (Skařupa, 2007, s. 16) Záda (2012) k tomuto doplňuje dělení podle specifikace a dělení podle způsobu řízení.

2 Průmyslové roboty známých výrobců

Roboty jsou v dnešní době již standardně používané automatizované stroje, se kterými se lze ve všech rozličných odvětvích setkat, a to od zneškodňování trhavin po domácnosti. Nejvíce rozšířenou skupinou jsou však průmyslové roboty, které jsou vyráběny mnoha světovými firmami. Všechny firmy přistupují k řešení robotů různým způsobem včetně jejich následné propagace, prodeji i servisu. (Roboti, 2012)

2.1 Roboty společnosti ABB

Společnost ABB se již 120 let zabývá oblastí energetiky a automatizace. Nedílnou součástí společnosti je významný výzkum a vývoj v této oblasti ve výzkumných centrech na celém světě. Společnost působí od roku 1992 i v České republice a téměř 80 % produktů je vyváženo do světa. (ABB, 2016a)

Nejen průmyslovými roboty se společnost zabývá v divizy Automatizace výroby a pohony. Všechny produkty z této divize zajišťují dobré podmínky pro automatizované aplikace. (ABB, 2016b) Společnost dodala po celém světě již 250 tisíc průmyslových robotů a z toho vyplývá, že se stala předním dodavatelem robotů včetně ucelených automatizovaných systémů a služeb s tím spojených. (ABB, 2016c)

Společnost je výrobcem mnoha robotů s různou strukturou, avšak předně se zaměřuje na výrobu robotů s angulární strukturou. Ty jsou využívány nejen v průmyslu strojírenském a potravinářském (ABB, 2014), ale i v dalších aplikacích jako např. při paletizaci, manipulaci s materiálem, výrobě plastů a dalších. (ABB, 2016d) Výroba začíná u malých robotů (IRB 120) s nosností 3 kg (ABB, 2014) a končí nově u robotů s nosností až 1 000 kg. Tento největší robot vyvinutý firmou ABB dostal označení IRB 8700 a podle společnosti se jedná o robota, který je o 25 % rychlejší než konkurenční roboty stejné kategorie. Jeho další předností je automatické přizpůsobení rychlosti v závislosti na zatížení koncového bodu a rozměrům přenášených komponentů. Robot navíc oproti konkurenci, která u takovýchto modelů používá duální motory a převodovky v každé ose, obsahuje pouze jeden motor a převodovku na osu. Došlo i k nahrazení tlumičů s plynem spolehlivou protiváhou a mechanickými pružinami a proto z těchto všech důvodů dosahuje krátké doby cyklu s vyšší přesností. (ABB, 2016d) Opakovatelná přesnost takto velkého robota s dosahem až 4,2 m je pouze

0,08 mm. (ABB, 2016e) Hlavními aplikacemi, pro které jsou roboty určeny, jsou např. obloukové a bodové svařování, dávkování, měření, broušení a leštění, montáž a další. Speciální skupinou jsou pak lakovací roboty. (ABB, 2014)

Nedílnou součástí je i výroba řídicích systémů robotů včetně operátorských panelů a dalšího příslušenství, mezi které patří pojezdy, pozicionéry, nástroje pro svařování a mnoho dalších. Společnost také vyvíjí software, který umožňuje naprogramovat roboty bez zastavení výroby. Užitečnou vlastností tohoto softwaru je po vytvoření virtuálního prostoru, který kopíruje reálný prostor okolo programovaného robotu, simulace naprogramovaného procesu. Díky tomu lze bezpečně ihned poté spustit proces v reálném prostředí. (ABB, 2014)

Novinkou v oblasti průmyslových robotů budoucí generace je první spolupracující robot na světě – robot YuMi® – IRB 14000. Tohoto robota po dlouholetém výzkumu a vývoji oficiálně uvedla společnost ABB v dubnu roku 2015. Tento robot s duálními pažemi, úchopovým systémem, kamerovým systémem pro dosažení cílů, vyspělým řízením a bezpečnostním systémem dokáže bezprostředně pracovat s člověkem, aniž by došlo ke zranění způsobeným samotným robotem. (ABB, 2016f) V případě nepředpokládané situace dokáže tento robot zastavit své pohyby v řádu milisekund, kdy opětovné uvedení do provozu je podle výrobce velmi snadné. Každá paže se skládá ze 7 os, a proto lze v pracovním prostoru dosáhnout větší obratnosti a přesnosti s maximální odchylkou 0,02 mm. (ABB, 2015)

2.2 Roboty společnosti KUKA Roboter GmbH

Společnost KUKA Roboter GmbH je další společností, která se zabývá výrobou průmyslových robotů. Narozdíl od předchozí společnosti se zabývá pouze robotikou. Podle společnosti je automatizace za pomoci robotů důležitou oblastí pro dosažení vyšší produktivity a hospodárnosti, včetně kvality výrobku se snížením nákladů na potřebný materiál. Z důvodu zdokonalování samotných robotů a řídicích systémů lze roboty společnosti KUKA Roboter GmbH použít nejen v automobilovém průmyslu a ve velkosériové výrobě, ale také v oblastech pro zpracování kovů, umělých hmot, výrobu potravin, zdravotnické techniky a dalších. Firma si klade za cíl co nejvíce zapojit průmyslové roboty jako inteligentní stroje do pracovního procesu, kde budou spolupracovat s ostatními zaměstnanci bez ohledu na možná rizika vzniku poranění

způsobených robotem. (KUKA Robotics, 2016a)

Využití průmyslových robotů v různých průmyslových odvětvích této společnosti je velmi obdobné jako je uvedené v předchozí kapitole (viz Kapitola 2.1). Aplikace robotů této firmy odpovídají požadovanému průmyslu, ve kterém má být robot umístěn, avšak firma také vytvoří celý robotický systém podle zákaznických představ. Běžně vyráběné varianty jsou např. konzolové roboty, paletovací roboty, ale i roboty odolné proti teplotě a nečistotám, vysoce přesné roboty a další. (KUKA Robotics, 2016b)

Společnost vyrábí roboty s nosností od 3 kg (KR 3 AGILUS) až do 1 300 kg. (KUKA Robotics, 2016c) Robot nazvaný KR 1000 1300 titan PA je podle společnosti v současné době nejsilnější robot na trhu a jeho maximální dosah činí 3,2 m. (KUKA Robotics, 2016d) Společnost také vyrábí řídicí systémy pro své roboty, dále operátorské panely, lineární jednotky a další. (KUKA Robotics, 2016b) Bartošík (2010) dodává, že tato společnost je předním představitelem vývoje bezpečnostních systémů robotů. Koncepte SafeRobot se zabývá pracovišti, ve kterých pracovník vstupuje do pracovního prostoru robotu. Zjednodušuje tedy např. manuální vkládání a vyjímání materiálu pracovníkem v tomto prostoru. Tato koncepce je začleněna například do řídicí jednotky KR C4, kdy dochází k propojení bezpečnostního a řídicího systému. Toto propojení umožňuje bezpečné snížení pohybu a rychlosti včetně úplného zastavení robotu při vstupu do zóny robotu. (Bartošík, 2010) Nedílnou součástí je i vývoj softwaru, ve kterém lze naprogramovat roboty offline či online sledovat stav robotu a další. (KUKA Robotics, 2016e)

Společnost KUKA Roboter GmbH také vyvíjí nové koncepce průmyslových robotů spolupracujících přímo s člověkem a již v roce 2014 na veletrhu Automatica v Mnichově představil robota LBR iiwa (Bartošík, 2014), který se dnes vyrábí s maximální nosností 7 a 14 kg. (KUKA Robotics, 2016f) Robot lze využít bez ochranné bariéry např. v robotizované chirurgii, při montáži automatické převodovky či při skládání displejů a dalších. (Bartošík, 2014)

2.3 Další společnosti zabývající se průmyslovými roboty

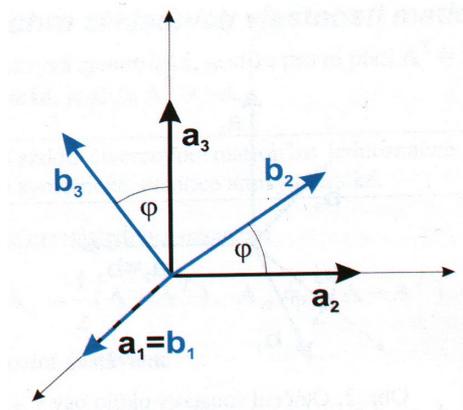
Mezi další společnosti, které se zabývají vývojem a výrobou průmyslových robotů, lze uvést Stäubli Robotics, FANUC America Corporation, Mitsubishi Electric, Motoman, Kawasaki Robotics, Comau a další.

3 Transformace souřadnic

Pro popis základních pohybů robotů je potřeba určit translace souřadného systému a rotace kolem jednotlivých souřadných os. Vhodný popis je možný pomocí matic, kdy se tedy konkrétně jedná o transformační matice. Výsledný pohyb je složen z kombinací rotací a translací. (Novotný a Horák, 2015)

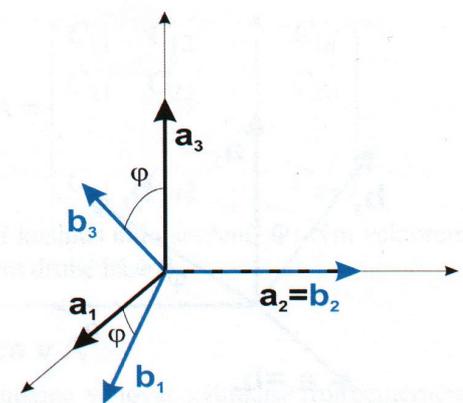
3.1 Rotace souřadného systému

Matice rotace popisuje natočení souřadného systému podle dané osy o určitý úhel. Tyto matice jsou uvedeny níže, včetně grafického znázornění natočení, a to v pořadí rotace kolem osy x , rotace kolem osy y a rotace kolem osy z , vše o úhel φ . (Skařupa, 2007)



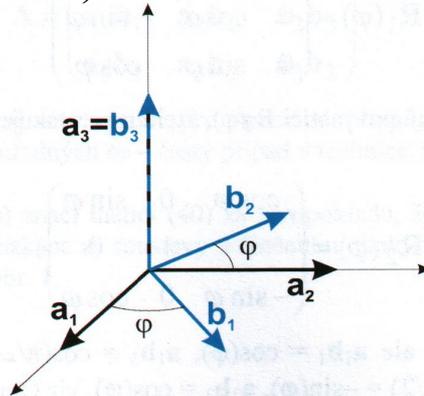
Obr. 1 Rotace kolem osy x (Záda, 2012)

$$\mathbf{R}_x(\varphi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \quad (\text{Rovnice 1})$$



Obr. 2 Rotace kolem osy y (Záda, 2012)

$$\mathbf{R}_y(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix} \quad (\text{Rovnice 2})$$



Obr. 3 Rotace kolem osy z (Záda, 2012)

$$\mathbf{R}_z(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{Rovnice 3})$$

Jestliže dojde k natočení kolem dvou nebo i tří os zároveň, výsledná matice rotace se bude rovnat součinu matic rotací jednotlivých os. V tomto případě musí odpovídat pořadí násobení matic rotací jednotlivým pohybům. Matice rotace tedy nelze mezi sebou zaměnit. (Skařupa, 2007)

3.2 Translace souřadného systému

Pohyby robotu nelze popsat jen pomocí rotací souřadného systému a z tohoto důvodu je nutné popis rozšířit o translaci souřadného systému neboli posunutí. Nejjednodušší popis translace je pomocí vektoru posunutí, kdy tento vektor určuje vzdálenost mezi posunutými souřadnými systémy. (Skařupa, 2007) Níže je uvedena rovnice vyjadřující posunutí souřadného systému A do systému B pomocí vektoru P.

$$\mathbf{A}(x, y, z) = \mathbf{B}(x, y, z) + \mathbf{P}(x, y, z) \quad (\text{Rovnice 4})$$

3.3 Rotace a translace souřadného systému

Pro ucelený popis pohybu robotu je nutné zkombinovat rotace a translace, kdy výsledkem je transformační matice o rozměru 4x4, kterou lze dále vhodně využít.

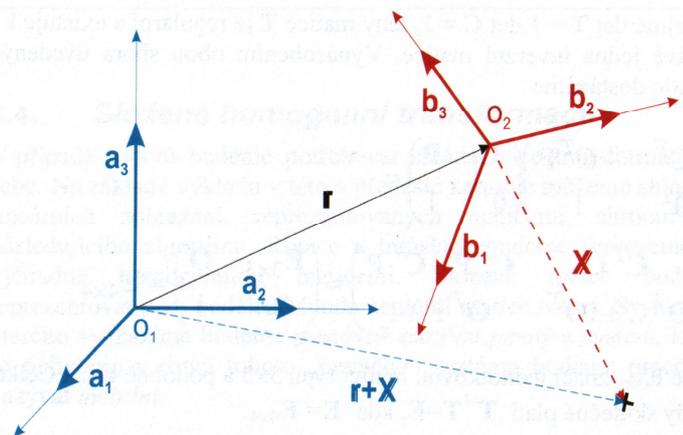
Výsledná transformační matice při přechodu z jednoho souřadného systému do druhého se tedy získá aplikací rotace a následným přičtením vektoru posunutí.

$$\begin{pmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{pmatrix} = \mathbf{R}_x(\alpha) \cdot \begin{pmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \end{pmatrix} \quad (\text{Rovnice 5})$$

Výsledná transformační matice je tedy následující.

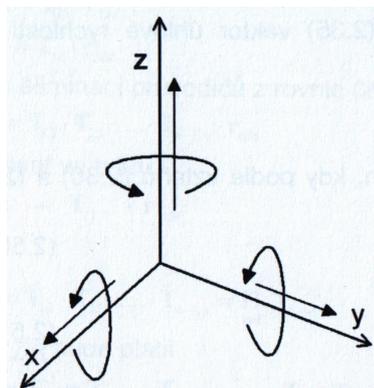
$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{P} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{Rovnice 6})$$

Z rovnice vyplývá, že je možné souřadný systém rotovat podle kterékoliv osy či podle více os zároveň a vzájemně je mezi sebou posouvat o určitou velikost. Násobením jednotlivých transformačních matic mezi sebou vznikne výsledná transformační matice, která popisuje celého robota. (Skařupa, 2007) Rotace souřadného systému, včetně posunutí, je znázorněna níže, kdy v tomto případě dochází k rotaci kolem všech os a k posunutí o vektor R. (Záda, 2012)



Obr. 4 Rotace a translace souřadného systému (Záda, 2012)

Při sestavování matic je taktéž důležité určit správný smysl rotace či translace, kdy translace je kladná v případě posuvu v kladném směru osy a rotace je kladná, pokud je otáčení v souladu s pravidlem pravé ruky. (Novotný a Horák, 2015)



Obr. 5 Smysly pohybů (Novotný a Horák, 2015)

4 Úloha kinematiky a její souvislosti

Kinematika průmyslových robotů se zabývá popisem polohy, případně rychlosti a zrychlení. Pro popis těchto veličin se užívají dva typy souřadnic. Prvním typem jsou **kartézské souřadnice** (x, y, z) , které popisují bod v pracovním prostoru nezávisle na poloze jednotlivých členů robotu, a **strojní souřadnice** (vnitřní, kloubové, zobecněné atd.), které udávají přesnou polohu daného členu. Strojní souřadnice se obvykle označují podle počtu jednotlivých os q_1, q_2, \dots, q_n . Převod mezi těmito souřadnými systémy řeší přímá a inverzní úloha kinematiky. (Novotný a Horák, 2015)

4.1 Přímá úloha kinematiky

Přímá úloha kinematiky se užívá pro přesné určení polohy a orientace koncového bodu robotu pomocí jednoduchých matematických vztahů z předem známých strojních souřadnic. (Skařupa, 2007) Z toho vyplývá, že existuje pouze **jedno řešení** určující bod v pracovním prostoru. K výsledné transformační matici popisující převod mezi kartézskými a strojovými souřadnicemi lze dojít několika způsoby. Nejjednodušším způsobem je použití **matic pro transformaci souřadnic** (viz Kapitola 3), kdy jejich vzájemným násobením při přechodu z jednoho souřadného systému do druhého vzniká výsledná transformační matice. Tento způsob je velmi jednoduchý, avšak je poměrně zdoluhavý a může při něm vzniknout mnoho početních chyb. (Novotný a Horák, 2015)

Dalším velmi vhodným způsobem je tzv. **Denavit-Hartenbergova metoda**. Tato metoda je pojmenována po svých autorech Jacquesem Denavitem a Richardem Hartenbergem, kteří ji vytvořili roku 1955. Při přechodu z jednoho systému do druhého se užívá pouze translací a rotací kolem osy x a z . Získané parametry se vždy dosadí do jednotné tzv. Hartenbergovy matice a po sestavení všech těchto matic se mezi sebou matice vynásobí a tím se získá výsledná transformační matice. Hartenbergovu matici lze velmi jednoduše odvodit a to tak, že se vynásobí právě matice rotace v ose z , matice translace v ose z , matice translace v ose x a matice rotace v ose x (viz Rovnice 7). Násobení musí být vždy v tomto pořadí. Tato metoda je určena především pro začátečníky a lze ji poměrně snadno převést do formy algoritmu. (Záda, 2012)

$$\mathbf{T}_i = \mathbf{R}_z(\vartheta_i) \cdot \mathbf{P}_z(d_i) \cdot \mathbf{P}_x(a_i) \cdot \mathbf{R}_x(\alpha_i) \quad (\text{Rovnice 7})$$

Denavit-Hartenbergovu metodu dále upravil Richard Paul, který ji přizpůsobil

pro dynamické řešení. Mluví se tedy o Paulově metodě. (Novotný a Horák, 2015)

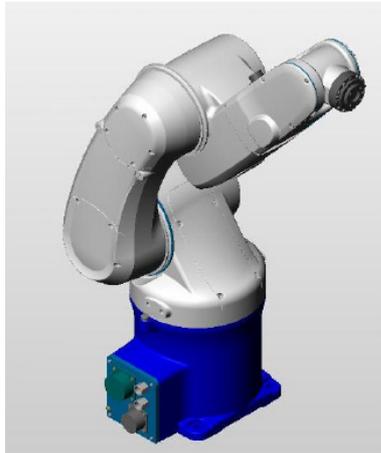
4.2 Inverzní úloha kinematiky

Opakem přímé úlohy kinematiky je inverzní úloha, kdy jsou známy pouze kartézské souřadnice bodu v pracovním prostoru a je potřeba určit strojní souřadnice. (Skařupa, 2007) Tato úloha je o mnoho složitější, jelikož neexistuje žádný snadný systematický postup k vyřešení. Obecně nelze určit, zda lze řešení inverzní úlohy kinematiky určit **analyticky** a poté je tedy nutné řešení nalézt pomocí **numerických metod**. (Záda, 2012) Jedná se o velmi komplikovaný problém, kterým se zabývá mnoho světových společností vyvíjejících průmyslové roboty, jelikož nalezení řešení numerickými metodami probíhá ideálně v reálném čase, což velmi zatěžuje řídicí systém. (Skařupa, 2007) „*V případě robotů se 6 stupni volnosti, je situace poměrně příznivá. Má-li robot sférické zápěstí, to znamená, že čtvrtá, pátá a šestá osa se protínají v jednom bodě, má robot vždy analytické řešení.*“ (Záda, 2012, s. 81) Používané roboty v současné době obvykle tento jeden z nezbytných požadavků splňují, přičemž záleží na počtu stupňů volnosti, kdy při nižším počtu je nalezení definitivního řešení snazší. (Záda, 2012) Jak již bylo zmíněno, řešení lze nalézt analyticky pomocí vektorové metody nebo pomocí numerických metod, které lze dále rozdělit na metodu numerického řešení soustavy transcendentních rovnic, aproximační a optimalizační metodu. (Skařupa, 2007)

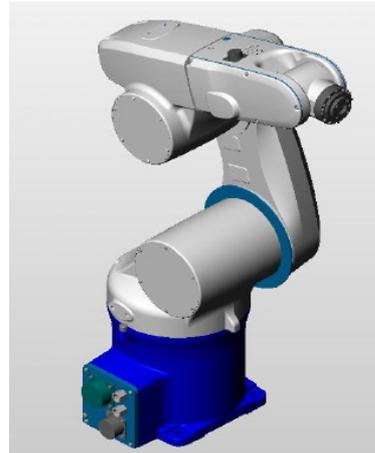
Při řešení těchto metod je nejprve nutné určit, zda vůbec existuje nějaké řešení. Řešení existuje, pokud je koncový bod robotu uvnitř pracovního prostoru. Tímto prostorem se rozumí prostor, kterého lze bez jakýchkoliv omezení dosáhnout. Taktéž je vhodné definovat dva pracovní prostory, mezi které patří běžný, ve kterém lze každého bodu dosáhnout různou orientací robotu, a dosažitelný, ve kterém robot bodu dosáhne alespoň jednou orientací. (Craig, 2005) Záda (2012) k tomuto doplňuje, že řešení neexistuje, pokud je bod mimo pracovní prostor a nebo prostoru sice náleží, ale nelze ho z důvodu limitů jednotlivých strojních souřadnic dosáhnout. V případě, že je bod umístěn v běžném pracovním prostoru a existuje řešení inverzní úlohy kinematiky, lze s největší pravděpodobností tohoto bodu dosáhnout **několika konfiguracemi**. Tato situace se nazývá **nejednoznačnost**, případně víceznačnost, řešení inverzní úlohy kinematiky. Vznik tohoto řešení je podmíněn větším počtem stupňů

volnosti robotu. (Záda, 2012)

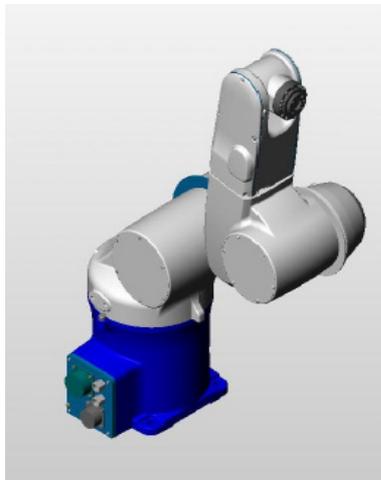
Výsledkem nejednoznačného řešení inverzní úlohy kinematiky mohou být různé konfigurace robotu (viz Obr. 6–9), a to konfigurace zprava a zleva, konfigurace horní a dolní a tzv. konfigurace flip a noflip. U všech konfigurací je vždy dosažen totožný bod v pracovním prostoru určený kartézskými souřadnicemi. (Adept Technology, 2007)



Obr. 6 Konfigurace zprava
(Adept Technology, 2007)



Obr. 7 Konfigurace zleva,
horní a noflip (Adept
Technology, 2007)



Obr. 8 Dolní konfigurace
(Adept Technology, 2007)

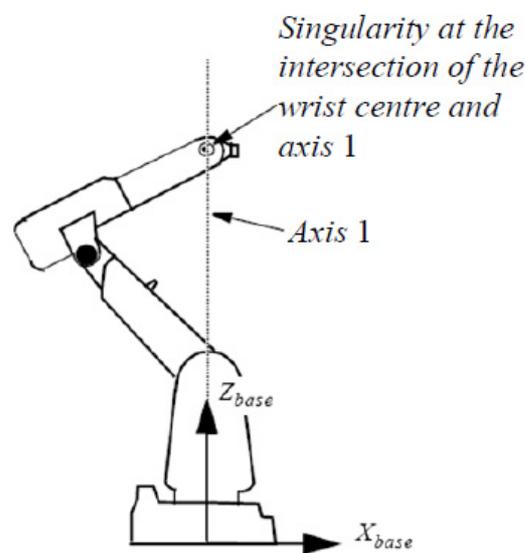


Obr. 9 Konfigurace flip
(Adept Technology, 2007)

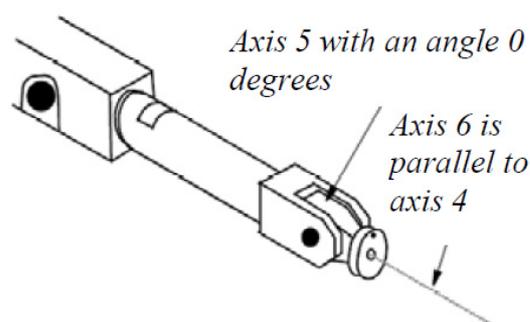
4.3 Singularita

Nejednoznačnost řešení inverzní úlohy kinematiky (viz Kapitola 4.2) je spojena s pojmem singularita. **Singulární body** jsou právě ty body v pracovním prostoru robotu, kterých lze dosáhnout různými konfiguracemi strojních souřadnic. Tyto body představují problém při řešení inverzní úlohy kinematiky, kdy teoreticky existuje

nekonečně mnoho konfigurací robotu. U robotu se šesti stupni volnosti se lze setkat se dvěma základními typy singularity, a to s tzv. **singularitou v rameni** a **singularitou v zápěstí**. Singularita v rameni vzniká v případě, že průsečík 4., 5. a 6. osy leží přímo nad 1. osou a singularita v zápěstí vzniká v případě, že 4. a 6. osa je v jedné linii, tzn., že úhel 5. osy je vždy roven nule. (Lehtla, 2008) Vznik singularity je závislý na počtu stupňů volnosti robotu, přičemž při nižším počtu stupňů volnosti se snižuje pravděpodobnost vzniku singularity. (Záda, 2012) Craig (2005) k tomuto dodává, že u robotů se sedmi stupni volnosti singularita v zápěstí nevzniká při situaci, kdy čtyři stupně volnosti jsou právě v zápěstí robotu.



Obr. 10 Singularita v rameni (Lehtla, 2008)



Obr. 11 Singularita v zápěstí (Lehtla, 2008)

5 Způsob řízení pohybu robotu

Řízení pohybu koncového bodu robotu po určité trajektorii z jednoho místa do druhého je možné dvěma způsoby. Pohyb je možný řídit způsobem **point to point** (PTP) a **continuous path** (CP). (Záda, 2012) Pro naplánování trajektorie koncového bodu robotu v pracovním prostoru se využívá inverzní úloha kinematiky (viz Kapitola 4.2), kdy výsledkem této úlohy jsou přesné parametry strojních souřadnic. (Lehtla, 2008) Požadované polohy dosáhne koncový bod robotu pouze za předpokladu, že tato poloha je vně pracovního prostoru robotu a hodnoty úhlů jsou menší než limity jednotlivých strojních souřadnic. (Záda, 2012) Možné způsoby řízení jsou popsány v následujících kapitolách.

5.1 PTP řízení

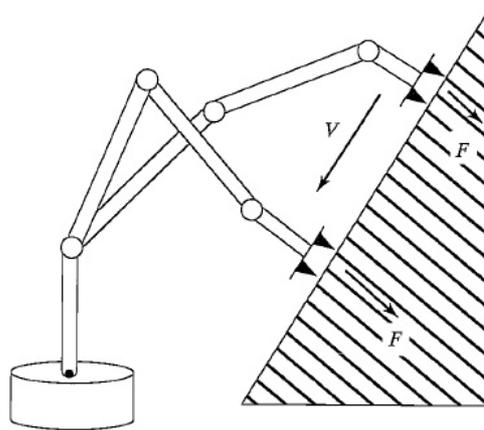
Při PTP řízení se koncový bod robotu do požadované polohy v pracovním prostoru dostává nejrychleji po takové trajektorii, kterou nelze předem odhadnout. Ve většině případů se nejedná o nejkratší cestu. (Záda, 2012) Rychlost všech os při pohybu mezi počátečním a koncovým bodem je konstantní a zrychlení je automaticky přizpůsobeno maximálnímu výkonu robotu. Tento způsob řízení se používá v aplikacích, kde není důležitá přesnost trajektorie. (Lehtla, 2008) Mezi typické aplikace využívající toto řízení patří manipulace s materiálem, bodové svařování, elektronická montáž atd. (Záda, 2012)

5.2 CP řízení

Při CP řízení se koncový bod robotu do požadované polohy v pracovním prostoru dostává po předem zvolené trajektorii takovou konstantní rychlostí, která je nutná pro dodržení požadované doby přesunu koncového bodu robotu do koncové polohy. S tímto typem řízení se lze setkat např. při řezání laserem, obloukovém svařování, stříkání, lepení atd. (Záda, 2012)

Jednou z možných trajektorií, po které se koncový bod robotu může pohybovat, je **trajektorie lineární** (viz Obr. 12). V tomto případě je koncový bod veden po úsečce, která je vymezena počátečním a koncovým bodem. Pohyb po této trajektorii lze snadno

předvídat. Jestliže se koncový bod pohybuje v kartézských souřadnicích lineárně, pak pohyb některých ze šesti os robotu musí být nelineární. Rychlost jednotlivých os tedy není konstantní z důvodu zrychlování a zpomalování pohybu. V případě větší nelinearity je zrychlení a zpomalení vyšší, avšak pro docílení linearitu pohybu koncového bodu je tato situace nutná. Všechny osy robotu jsou řízeny tak, aby se pohyb v kartézských souřadnicích nestal nelineární. (Lehtla, 2008)



Obr. 12 Lineární trajektorie (Craig, 2005)

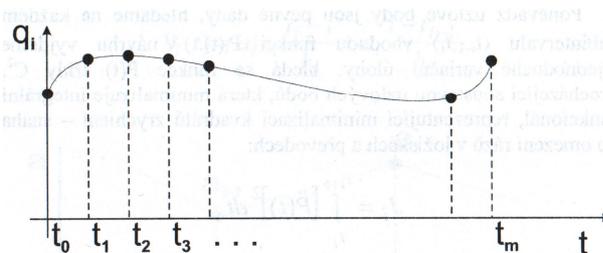
Další možnou trajektorií je **trajektorie kruhová**, kdy je stanoven počáteční, koncový a tzv. pomocný bod. Tento bod slouží k určení kružnice, po jejíž části se koncový bod robotu pohybuje. Všechny tři body by měly být v prostoru rozmístěny tak, aby výsledná trajektorie byla co nejpresnější. Rychlost koncového bodu robotu v kartézských souřadnicích musí být během pohybu konstantní. Jelikož je tato trajektorie nelineární, pohyby některých os robotu musí být více zrychlovány a zpomalovány, rychlost osy není tedy konstantní, avšak pouze do takové míry, aby se z části kružnice v pracovním prostoru nestala ve výsledku křivka. (Lehtla, 2008)

5.3 Plánování trajektorie

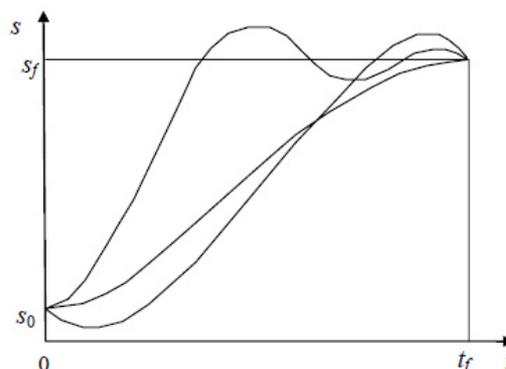
Křivka v pracovním prostoru robotu je vymezena dvěma, případně třemi, body, které charakterizují požadovanou trajektorii. Pro docílení správného pohybu je potřeba zvolit přesné body náležící křivce popisující trajektorii. Křivku v prostoru je tedy nutné rozdělit na dílčí intervaly. Body těchto intervalů musí být od sebe stejně vzdáleny a jsou nezbytné pro určení přesných strojních souřadnic právě pomocí inverzní úlohy kinematiky, která se provádí v každém bodě. Čím menší bude interval, tím přesnější

bude výsledná trajektorie. Parametry strojních souřadnic jsou následně ukládány do polohových profilů jednotlivých os a po určení všech bodů trajektorie v prostoru jsou tyto parametry interpolovány (viz Obr. 13). Tímto se získá přesná trajektorie jednotlivých os robotu. Polohové profily jsou poté spouštěny zároveň a tím se koncový bod robotu pohybuje po požadované trajektorii v pracovním prostoru. (Záda, 2012)

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.2, výsledkem inverzní úlohy kinematiky může být více než jedno řešení v daném bodě určeným kartézskými souřadnicemi. Proto je nutné uvažovat situaci, kdy se koncový bod robotu pohybuje po trajektorii v různých konfiguracích. (Adept Technology, 2007) V případě šestiosého robotu může při výpočtu inverzní úlohy vzniknout až 16 řešení. Tzn., že robot se může pohybovat po dané trajektorii až 16 různými konfiguracemi strojních souřadnic (viz Obr. 14). Kritéria pro výběr řešení se liší, avšak vhodný je výběr takové konfigurace, která bude z pohledu pohybu jednotlivých os nejminimálnější. (Craig, 2005) Nutné je také uvažovat situaci, kdy se robot při lineární či kruhové trajektorii blíží bodům singularity (viz Kapitola 4.3). V případě výběru takového řešení se v blízkosti singularity překonfigurovávají některé osy velmi vysokou rychlostí. Aby k těmto stavům nedocházelo, rychlost všech os je snižována, což vede i ke snížení rychlosti pohybu koncového bodu v blízkosti singulárního bodu. Rychlost pohybu v pracovním prostoru není tedy konstantní, což může být v některých aplikacích (obloukové svařování, stříkání atd.) nevyhovující. (Lehtla, 2008)



Obr. 13 Intervaly v polohovém profilu (Záda, 2012)



Obr. 14 Tři různá řešení jedné strojní souřadnice (Lehtla, 2008)

6 Vlastní řešení

V rámci vlastního řešení probíhalo implementování nových funkcí do řídicí jednotky průmyslového robotu se šestiosou angulární strukturou. Tento robot je umístěn v laboratoři Ústavu mechatroniky a technické informatiky Fakulty mechatroniky, informatiky a mezioborových studií Technické univerzity v Liberci. Pro řešení bylo nejprve nutné detailně prostudovat materiály zabývající se popisem a řízením robotů. Dále byla nutná instalace programovacího prostředí, ve kterém probíhal vývoj nových funkcí, i s následným zaškolením. Nezbytný byl i přístup do laboratoře se samotným robotem, aby bylo možné vyvinuté funkce odzkoušet.

6.1 Popis robotu a jeho řídicí jednotky

Robot s typovým označením VK-10 byl vyroben roku 1996 společností KUKA Roboter GmbH. Jedná se o standardní robotické rameno s nosností 10 kg, které v současné době není opatřeno žádným efektozem. Slouží tedy pouze k praktickému testování vyvíjených funkcí. Jeho původní řídicí systém byl nahrazen novým systémem, který je sestaven z modulů společnosti Siemens, s.r.o. Jádrem systému tvoří řídicí jednotka Simotion D435, pomocí které lze při náročných aplikacích ovládat až 32 os. Pro naprogramování řídicí jednotky slouží programovací prostředí Simotion Scout. Dalším modulem řídicího systému je nízkonapěťový frekvenční měnič Sinamics S120, který je v provedení Active Line Module (diodový můstek v napájecím směru, IGBT tranzistoru ve zpětném směru řízený pulsně šířkovou modulací). Poslední součástí tohoto systému tvoří čtyři motorové moduly, kdy první modul je dvoumotorový se jmenovitým proudem 2x9 A a napájí servomotory 1. a 3. osy robotu. Druhý modul je také dvoumotorový se stejným jmenovitým proudem a napájí servomotory 4. a 5. osy. Třetí modul je jednomotorový se jmenovitým proudem 5 A a napájí servomotor 6. osy. Poslední modul je také jednomotorový se jmenovitým proudem 30 A a napájí servomotor 2. osy. Tento servomotor je ze všech nejvýkonnější především z toho důvodu, že musí pohybovat s celým robotickým ramenem, tedy s největší zátěží. Pro ovládání robotu je k řídicí jednotce připojen HMI operátorský panel, také od společnosti Siemens, s.r.o., a jedná se o typ Simatic HMI OP177B, který je programován pomocí Simatic WinCC flexible.



Obr. 16 Průmyslový robot KUKA VK-10 (autor)



Obr. 15 Řídicí systém robotu (autor)

6.2 Popis stávajícího programu

Celý program pro řízení robotu je napsán ve formě strukturovaného textu v prostředí Simotion Scout. Stávající program, který byl vyvinut v předchozích letech několika lidmi, nebyl dostatečně okomentován, což značně komplikovalo pochopení souvislostí mezi jednotlivými částmi programu. Proto bylo nutné důkladně pochopit, co dané proměnné, funkce, funkční bloky a jednotlivé zdrojové kódy zajišťují. Dále také bylo nutné seznámit se s uživatelským prostředím operátorského panelu včetně samotného ovládání robotu. V následujících kapitolách je uveden popis nejdůležitějších stávajících programů včetně chyb či chybných nastavení parametrů a jejich následných oprav. Tyto chyby a chybná nastavení byly zjištěny před a při zpracování vlastního řešení.

6.2.1 Program přímé úlohy kinematiky

Tento program byl naprogramován po určení výsledné transformační matice popisující robota, která byla získána pomocí Denavit-Hartenbergovy metody. Program tedy vrací transformační matici popisující robota, kdy vstupními parametry jsou aktuální hodnoty strojních souřadnic a konstrukční parametry robotu. Transformační

matice obsahuje submatici rotace popisující orientaci koncového bodu robotu a vektor posunutí, který určuje kartézské souřadnice koncového bodu v pracovním prostoru (viz Kapitola 3.3).

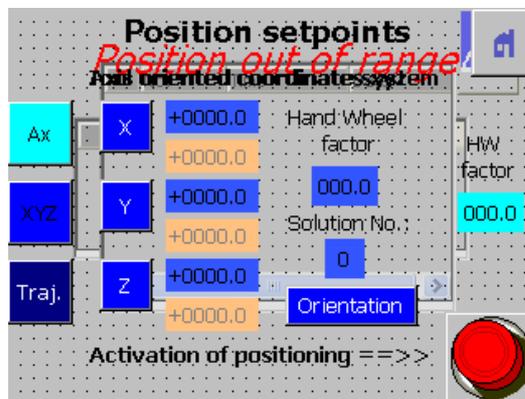
6.2.2 Program inverzní úlohy kinematiky

Oproti programu přímé úlohy kinematiky je tento program daleko složitější (viz Kapitola 4.2). Po samotném odvození inverzní úlohy kinematiky byla úloha přepsána do formy zdrojového kódu. Vstupním parametrem je transformační matice zahrnující submatici rotace a kartézské souřadnice koncového bodu robotu. Výstupním parametrem jsou hodnoty strojních souřadnic ve všech existujících řešení, kterých může být u robotu se šesti stupni volnosti maximálně 16. Z generovaných řešení se vybírá takové řešení, které je nejbližší aktuálním hodnotám strojových souřadnic a je tedy z pohledu pohybu jednotlivých os nejminimálnější.

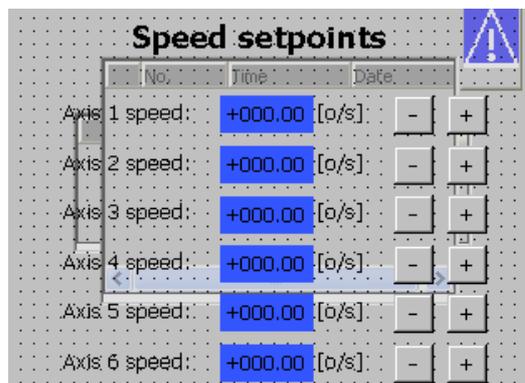
Při testování stávajícího programu robotu bylo zjištěno, že v některých situacích nefunguje správně. Proto bylo nejprve nutné tento problém vyřešit, jelikož dále vyvíjené funkce by nebylo možné přesně otestovat a ve výsledku by nemusely fungovat správně. Problém spočíval v tom, že při změně orientace koncového bodu robotu o úhel $+45^\circ$ ve všech kartézských souřadnicích nedosáhl koncový bod po poslední rotaci v ose z této požadované orientace i přes to, že program pro nastavování orientace generoval matici rotace správně. Následující změny v orientaci vycházející z této chybné konfigurace již nebyly prováděny správně. Proto bylo nutné zaměřit se právě na program inverzní úlohy kinematiky, který generuje strojní souřadnice. Jak již bylo zmíněno, tento program je poměrně složitý, a tudíž nalezení chyb bylo obtížné. Zdrojový kód byl detailně porovnáván s odvozením inverzní úlohy kinematiky robotu a příčina tohoto vznikajícího problému byla následně zjištěna. V prvním případě byla chyba v matematické operaci, kdy bylo použito na jednom řádku programu sčítání a podle odvození inverzní úlohy kinematiky zde mělo být odčítání. V druhém případě byla v dílčím výpočtu použita chybná proměnná. Jednalo se o relativně formální chyby, kterými však docházelo ke generování některých chybných řešení, kdy právě jedno z těchto řešení bylo nejminimálnější, a bylo proto automaticky používáno. Po odstranění těchto chyb již bylo dosaženo požadované orientace koncového bodu robotu včetně následných jiných orientací.

6.2.3 Program PTP řízení pohybu

Program pro řízení PTP pohybu (viz Kapitola 5.1) je realizován takovým způsobem, že při zadání kartézských souřadnic tohoto bodu v uživatelském prostředí operátorského panelu (viz Obr. 17) vstupují souřadnice přímo do transformační matice, kdy se následně provede inverzní úloha kinematiky a výsledkem jsou různá možná řešení, ze kterých se vybere nejminimálnější vůči aktuálním hodnotám strojních souřadnic. Tyto hodnoty poté vstupují ve formě tzv. setpointů do funkčního bloku umožňujícího nastavení pozic všech os příkazem `_pos`. Tento příkaz zajišťuje přesun osy do požadované pozice konstantní rychlostí. Tuto rychlost je možné nastavit v uživatelském prostředí (viz Obr. 18). Přesun je realizován za splnění dvou podmínek. Jednou z podmínek je povolení všech os tzv. enable tlačítkem umístěným na operátorském panelu, které musí být po celou dobu pohybu robotu stisknuto, a druhou podmínkou je stisk tlačítka, které zahájí samotný pohyb. V případě, že při probíhajícím pohybu robotu nastane mimořádná situace, např. do pracovního prostoru vstoupí jiná osoba, toto tlačítko slouží jako ochranná funkce, kdy při jeho uvolnění dojde k okamžitému zastavení všech os. V případě, že koncový bod robotu dosáhne požadovaných souřadnic, nemusí být toto tlačítko dále stisknuté.



Obr. 17 Uživatelské prostředí pro PTP řízení (autor)

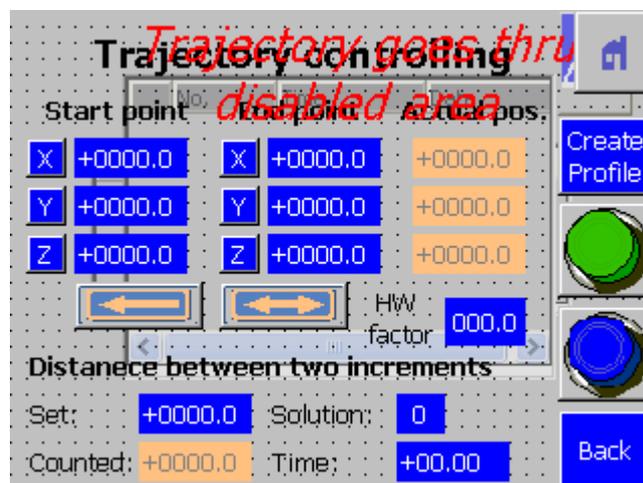


Obr. 18 Nastavení rychlostí všech os (autor)

6.2.4 Program CP řízení pohybu

Program pro řízení CP pohybu je v současné době naprogramován pro lineární trajektorii a funguje následujícím způsobem (viz Kapitola 5.2 a 5.3). V uživatelském prostředí operátorského panelu se zadávají kartézské souřadnice počátečního a koncového bodu trajektorie. Taktéž se zadává doba, která je potřebná pro absolvování trajektorie, a velikost přírůstku mezi dílčími body trajektorie, která je nutná pro správné a přesné naplánování trajektorie (viz Obr. 19). K tomuto řízení jsou vhodně využity tzv. elektronické vačky, které představují polohové profily jednotlivých os. V případě, že se na operátorském panelu stiskne tlačítko pro vytvoření profilu a počáteční a koncový bod se neshoduje, je počáteční bod přímo zpracován funkcí, která ve výsledku přidává hodnoty strojních souřadnic do polohových profilů spolu s časovými úseky. Nejprve je tedy nutné provést inverzní úlohu kinematiky k získání všech řešení, kdy je následně vybráno právě minimální řešení. Hodnoty použitého řešení jsou následně přidány pomocí příkazu `_addPointToCam` do polohových profilů.

Dále se vypočte směrový vektor trajektorie spolu s jeho délkou a určí se počet bodů v trajektorii podle zadaného přírůstku. Velikost tohoto přírůstku je poté přizpůsobena délce směrového vektoru. Následně se přírůstek přičte k předcházejícímu bodu trajektorie a tento nový bod v trajektorii je zpracován stejným způsobem, jak je uvedeno výše. V případě dosažení koncového bodu trajektorie jsou tedy polohové profily všech os kompletní a může být následně provedena interpolace bodů trajektorie v každém profilu pomocí příkazu `_interpolateCam` (viz Obr. 20) s následným spuštěním těchto profilů. Další část tohoto programu je již vlastním řešením této bakalářské práce, proto i způsob spouštění profilů a další souvislosti jsou popsány v následující kapitole.



Obr. 19 Uživatelské prostředí pro CP řízení (autor)



Obr. 20 Kompletní polohový profil (autor)

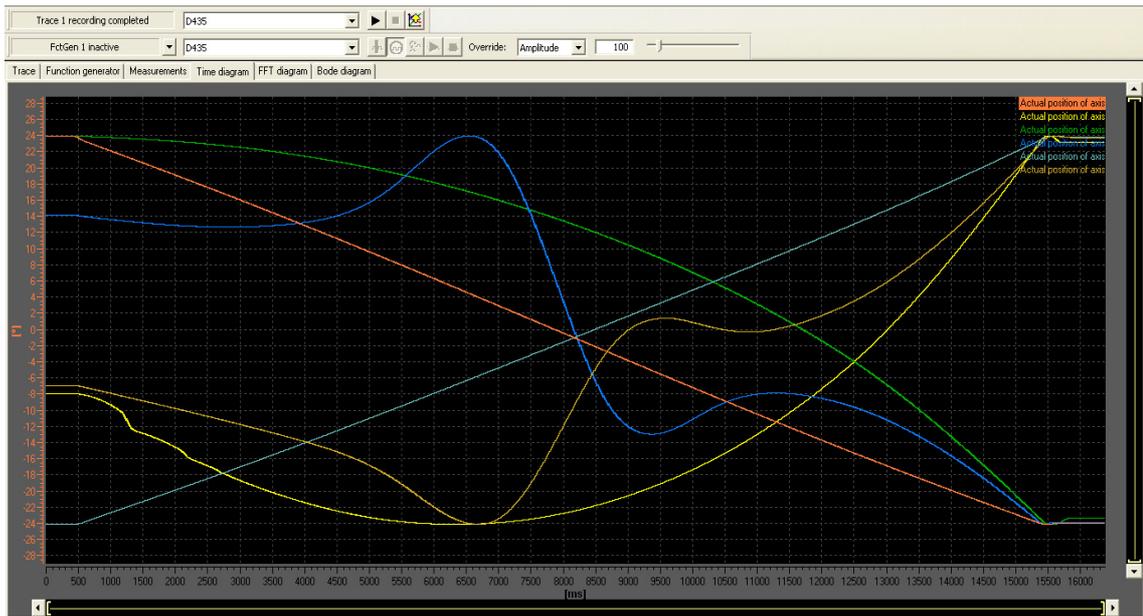
6.3 Popis vlastního řešení

K vlastnímu řešení bylo přistoupeno z důvodu toho, že při spouštění vygenerovaných profilů pro CP řízení pohybů robotu docházelo v případě trajektorie, kdy se koncový bod robotu blížil singularitě, ke změnám konfigurace robotu v maximální rychlosti, a to nejen ve 4. a 6. ose, ale v některých případech i ve 2. a 3. ose. Tyto situace jsou velmi nebezpečné, zvláště při změnách ve 2. a 3. ose, jelikož při nich může dojít k velmi vážným zraněním či ke zničení okolních předmětů atd. Robot není v současné době umístěn v ochranné kleci s bezpečnostními prvky, jako tomu je v běžné praxi, a zastavení robotu je závislé pouze na obsluze, která však nemůže předem přesně určit, v jakých případech bude docházet k rychlým změnám v konfiguraci a při probíhajícím průběhu nedokáže tak rychle zareagovat, aby v případě změny konfigurace pohyb zastavila.

Druhým důvodem vlastního řešení bylo špatné brzdění v koncovém bodě trajektorie při zvolení krátké doby potřebné pro přesun z počáteční polohy do koncové polohy, kdy koncový bod byl ve zvolené době minut. V tomto bodě tedy docházelo k „trhnutí“ s robotem.

Z obrázku 21 jsou oba důvody patrné. Tento obrázek znázorňuje naměřené aktuální hodnoty polohy všech šesti os při lineární trajektorii koncového bodu robotu. Jelikož byl nastaven typ interpolace polohových profilů pomocí Bézierovy kubiky,

změny v konfiguraci robotu během trajektorie nejsou v tomto případě tak rychlé, jako u lineární interpolace, která je v současné době při generování profilů používána.



Obr. 21 Aktuální hodnoty polohy všech os (autor)

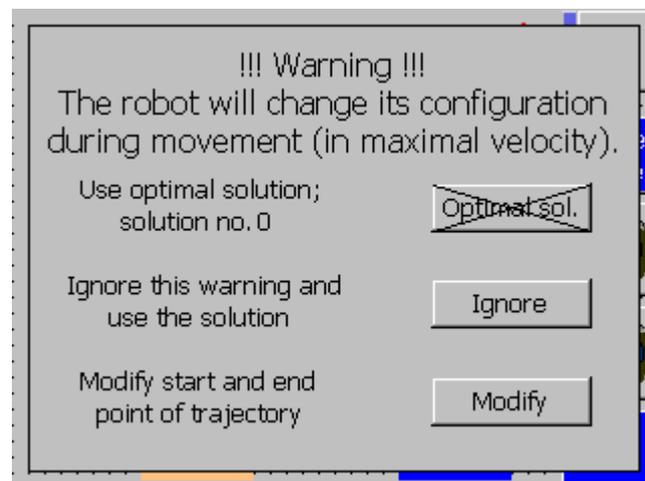
6.3.1 Program pro výběr optimálního řešení

Samotné řešení vychází ze stávajícího programu pro CP řízení. Jak již bylo zmíněno v kapitole 6.2.4, při generování polohových profilů, pomocí kterých se koncový bod robotu přesune po lineární trajektorii, se využívá inverzní úlohy kinematiky. Výsledkem jsou tedy různá řešení, kdy se automaticky vybírá nejminimálnější řešení. V některých případech požadované trajektorie se právě toto minimální řešení blíží singularitě a není proto použitelné. Proto jsou v tomto programu ukládána všechna možná řešení, ze kterých se vybírá optimální řešení. Optimálním se v tomto případě rozumí takové řešení, při kterém nebude v průběhu trajektorie docházet k rychlým změnám v konfiguraci. Program tedy funguje následujícím způsobem.

Nejprve se ukládají přírůstky jednotlivých bodů strojních souřadnic z použitého minimálního řešení ještě před provedením jejich interpolace, ve kterých se následně hledá maximum. Jestliže není maximum každé osy větší, jak desetinásobek průměru všech přírůstků každé osy, lze toto minimální řešení použít. V případě, že alespoň jedno maximum bude větší jak desetinásobek průměru, nelze již toto řešení použít a musí se vyhledat řešení optimální. Toto vyhledání se provádí stejným způsobem, avšak

ze všech předem uložených možných řešení pro každou osu. Pokud existuje alespoň jedno řešení, jehož maximum v každé ose není větší jak desetinásobek průměru, lze ho tedy použít.

V případě, že není možné použít minimální řešení, objeví se na operátorském panelu varování informující o dané situaci s následným možným řešením (viz Obr. 22). Obsluha má na výběr použití optimálního řešení, ignorování varování s následným použitím minimálního řešení, kdy tedy musí počítat s překonfigurováním robotu během pohybu, a modifikování počátečního a koncového bodu trajektorie, kdy se následně musí opět vytvořit profil. U některých požadovaných trajektorií může docházet k překonfigurování a zároveň u nich neexistuje žádné optimální řešení. V tomto případě lze varování pouze ignorovat či je možné modifikovat počáteční a koncový bod trajektorie.



Obr. 22 Varování s následujícím možným řešením (autor)

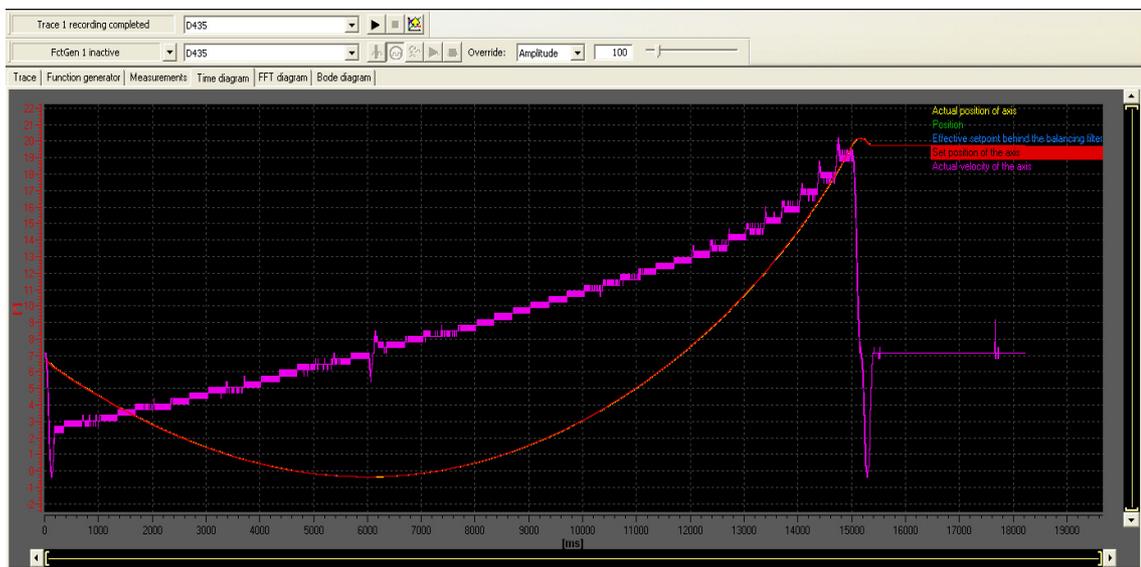
Jestliže je zvoleno použití optimálního řešení, tak se následně již připravené polohové profily jednotlivých os zresetují pomocí příkazu `_resetCam` a příkazem `_addPointToCam` se do nich přidají hodnoty strojních souřadnic daného řešení. Dále se provede interpolace všech profilů příkazem `_interpolateCam` a poté se ještě porovnají strojní souřadnice ze všech profilů v počátečním bodě, které se získají příkazem `_getCamFollowingValue` s aktuálními hodnotami jednotlivých os robotu. V případě, že rozdíl těchto hodnot některé osy je větší jak $0,05^\circ$, je nutné robota překonfigurovat ještě před spuštěním profilu, což je provedeno stejným způsobem jako při PTP řízení pohybu s tím rozdílem, že rychlost je pevně omezena na $10^\circ/\text{s}$ a obsluha nemůže tuto rychlost nijak ovlivnit. Toto omezení je zde z důvodu toho, že ve většině případů použití optimálního řešení robot přechází z horní konfigurace do dolní konfigurace (viz Kapitola 4.2) a mohlo by opět dojít k mimořádné situaci (zranění, zničení

předmětů, atd.) Porovnání strojních souřadnic s aktuálními hodnotami není podmíněno jen použitím optimálního řešení, ale provede se vždy před každým spuštěním profilu. Kdyby tomu tak nebylo, robot se z aktuální pozice do počátečního bodu trajektorie přemístí opět vysokou rychlostí.

Pokud je robot připraven na začátku své trajektorie, lze tedy uskutečnit pohyb. Stiskem tlačítka, které slouží pro spuštění požadovaného pohybu, se příkazem `_runTimeLockedPositionProfile` spouští všech šest polohových profilů zároveň, takže se koncový bod robotu pohybuje v pracovním prostoru po požadované trajektorii. Funkčnost enable tlačítka je i v tomto způsobu řízení zcela zachována, tzn., že musejí být povoleny osy, než dojde k samotnému spuštění profilu.

6.3.2 Předejití „překmitu“ při brzdění v koncovém bodě

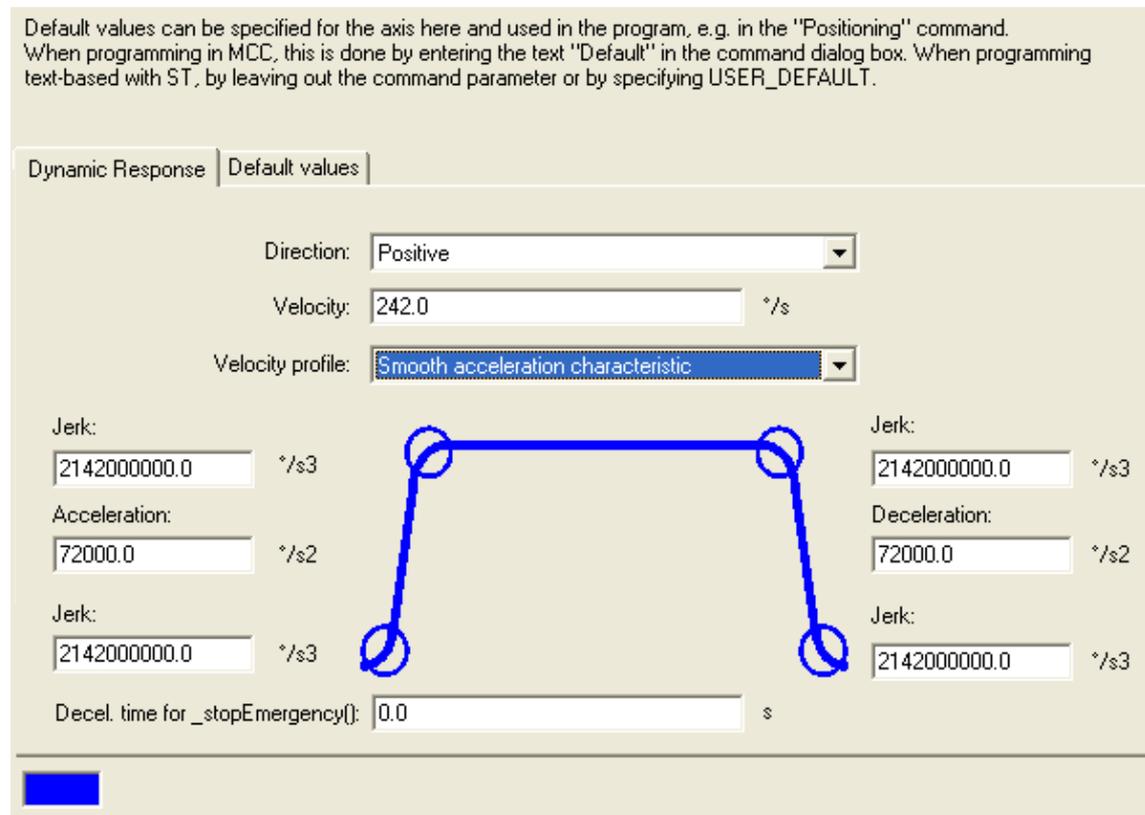
Samotné vyřešení tohoto problému bylo v podstatě jednoduché, i když tomu předcházelo mnoho různých úprav ve zdrojovém kódu, které na vznik „překmitu“ neměly žádný vliv. Po naměření aktuální polohy 2. osy včetně její rychlosti bylo zjištěno, že rychlost na konci pohybu je značně záporná, tzn., že dochází k reverzaci servomotoru (viz Obr. 23).



Obr. 23 Aktuální hodnota polohy a rychlosti (autor)

Bylo usouzeno, že problém by mohl být v nastavení výchozích hodnot dynamické odezvy. Ty lze určit buď přímo v nastavení dané osy (viz Obr. 24), nebo v části programu pomocí parametru příkazu, který v tomto případě spouští dané polohové profily. Výchozí hodnoty byly určovány právě pomocí parametru příkazu, kdy tyto

hodnoty byly oproti hodnotám v nastavení osy značně nižší. Pouhým zrušením těchto parametrů byl problém vyřešen.

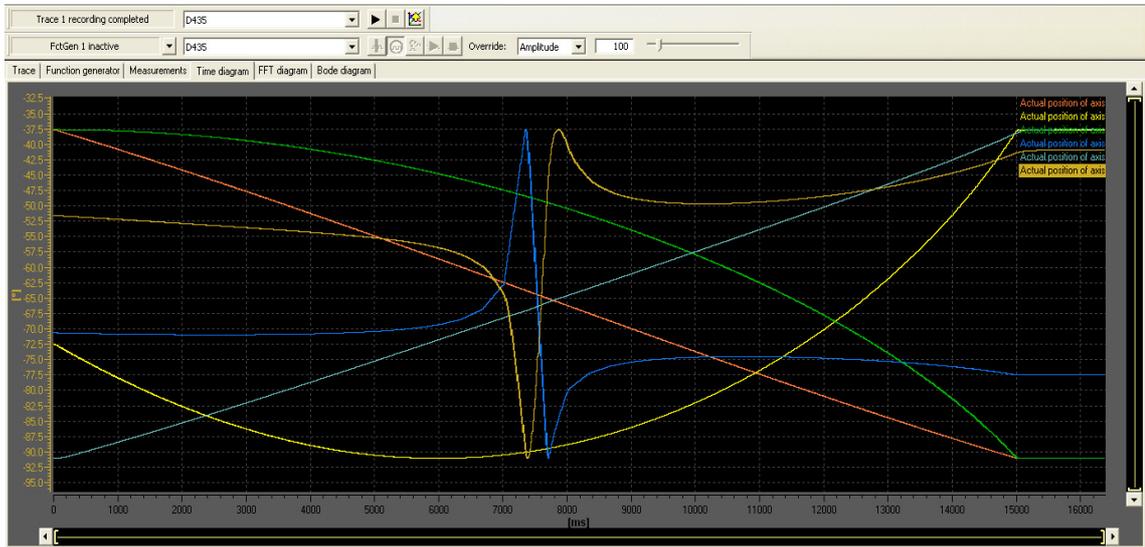


Obr. 24 Výchozí hodnoty dynamické odezvy v nastavení osy (autor)

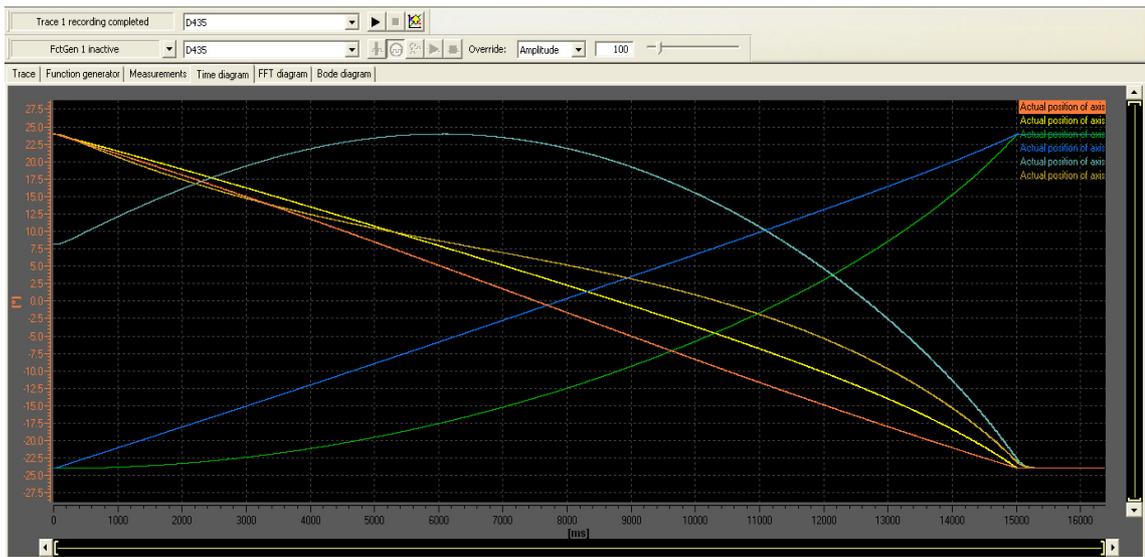
6.4 Testování programu pro výběr optimálního řešení

Vyvinutý program byl testován pro různé trajektorie a i orientace koncového bodu robotu, kdy nejprve byl testován pouze pohyb koncového bodu robotu v ose y, poté v ose y a z a následně ve všech osách. V případě, že trajektorie neprocházela výchozí polohou robotu, tedy v blízkosti singularity, nedocházelo k výběru optimálního řešení a zvolené řešení zajistilo bezproblémový spojitý průběh pohybu. Když však trajektorie byla v blízkosti singularity, nastal výběr optimálního řešení a na operátorském panelu se objevilo upozornění s následným možným řešením situace. Při použití optimálního řešení se robot po spuštění překonfiguroval omezenou rychlostí do počátečního bodu trajektorie a po spuštění profilu se robot opět bezproblémově dostal do konečného bodu po požadované trajektorii. Pokud se při stejné trajektorii zvolí ignorace varování, robot požadovanou trajektorii vykoná, avšak dochází k rychlým změnám v konfiguraci robotu v blízkosti singulárního bodu. Níže jsou zobrazeny naměřené aktuální hodnoty polohy

všech šesti os, avšak v prvním případě se jedná o řešení minimální a v druhém se jedná o řešení optimální (viz Obr. 25 a Obr. 26). Tato obě řešení měly stejný počáteční i konečný bod trajektorie. Z níže zobrazených naměřených hodnot je též patrné zabrzdění ve správné poloze.



Obr. 25 Použité minimální řešení (autor)



Obr. 26 Použité optimální řešení (autor)

7 Závěr

Bakalářská práce se zabývala vývojem programu pro řídicí jednotku šestiosého průmyslového robotu KUKA VK-10 zajišťujícím realizaci interpolačních funkcí. Pro vlastní zpracování bylo nutné prostudování odborných relevantních zdrojů zabývajících se transformací souřadnic, přímou úlohou kinematiky, inverzní úlohou kinematiky včetně problematiky singularity. Dále bylo nutné se seznámit s PTP a CP řízením pohybu robotu především po lineární trajektorii včetně jejího plánování. Velmi důležité bylo pochopení stávajícího programu, který byl již pro řídicí jednotku naprogramován a zajišťoval základní operace s robotem. Jednalo se o PTP řízení pohybu, o nastavování orientace koncového bodu robotu a taktéž o CP řízení pohybu po lineární trajektorii. V neposlední řadě bylo nutné se seznámit s uživatelským prostředím operátorského panelu a samotným ovládáním.

Než bylo přistoupeno k vlastnímu řešení, bylo nutné vyhledat a následně odstranit chyby, které byly obsaženy v programu inverzní úlohy kinematiky. Tato část programu je téměř nejdůležitější, jelikož je používána bezmála ke všem následným operacím. Vlastní řešení vycházelo právě z CP řízení pohybu, kdy funkčnost nebyla zcela správná, a tím docházelo k nepřijatelným stavům. Proto bylo nutné tuto část programu co nejlépe odladit a rozšířit ji o nové funkce zajišťující bezproblémové a bezchybné řízení pohybu koncového bodu robotu po lineární trajektorii. S tímto souviselo i přizpůsobení uživatelského prostředí operátorského panelu. Výsledný program byl důkladně několikrát otestován na samotném robotu, kdy již nedocházelo k situacím, které nelze v běžném provozu připustit.

Jelikož CP řízení po lineární trajektorii není zcela dostačující, proto je vhodné se v následujícím vývoji tohoto programu zaměřit na kruhovou trajektorii. Dále je vhodné zaměřit se na samotný rozběh a brzdění jednotlivých os.

Seznam použité literatury

ABB, 2014. *Robotika: Produktová řada, zlepšování produktivity, kvality a bezpečnosti práce* [online pdf]. ©2014 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: [http://www02.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/ddf8adcfcdcfb9c83257ca80038e2c5/\\$file/vyrobni_katalog_2014_final.PDF](http://www02.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/ddf8adcfcdcfb9c83257ca80038e2c5/$file/vyrobni_katalog_2014_final.PDF)

ABB, 2015. *Robotika: Budoucnost robotiky a automatizace závisí na společné práci lidí a robotů* [online pdf]. ©2015 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/191cbbc9809f411aac23d1feeac1a9d0/yumi_background.pdf

ABB, 2016a. Základní údaje. *abb.com* [online]. ©2016 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://new.abb.com/cz/o-nas/zakladni-udaje>

ABB, 2016b. Divize Automatizace výroby a pohony. *abb.com* [online]. ©2016 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://new.abb.com/cz/o-nas/divize/automatizace-vyroby-pohony>

ABB, 2016c. ABB Robotika. *abb.com* [online]. ©2016 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://new.abb.com/products/robotics/cs>

ABB, 2016d. Historicky největší robot od ABB je o 25 % rychlejší než konkurence. *abb.cz* [online]. ©2016 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.abb.cz/cawp/seitp202/5f9ba908d903c7a2c1257ef4002a21a5.aspx>

ABB, 2016e. Technická data pro IRB 8700. *abb.com* [online]. ©2016 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://new.abb.com/products/robotics/cs/prumyslove-roboty/irb-8700/irb-8700-technicka-data>

ABB, 2016f. YuMi® - Společně tvoříme budoucnost automatizace. *abb.com* [online]. ©2016 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://new.abb.com/products/robotics/cs/yumi>

ADEPT TECHNOLOGY, 2007. *Six-Axis Robot Configuration Singularities* [online pdf]. ©2007 [cit. 2016-04-27]. Dostupné z: <http://www1.adept.com/main/KE/DATA/Procedures/Singularity/Singularity.pdf>

BARTOŠÍK, Petr, 2010. S roboty KUKA je automatizace stále jednodušší. *Automa.* **8-9**(17), 58-60. ISSN 1210-9592.

BARTOŠÍK, Petr, 2014. Veletrh Automatica v Mnichově ukázal trendy v robotice

a automatizaci. *Automa*. **8-9**(21), 90-92. ISSN 1210-9592.

CRAIG, John, 2005. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. 3. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall. ISBN 0-13-123629-6

ČSN ISO 8373, 2013. *Roboty a robotická zařízení – Slovník*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 48 s. Třídící znak 18 6501.

HLINOVSKÝ, Martin a Lenka MUDROVÁ, 2014. Postavte si svého robota – roboti ve výuce: (část 1). *Automa*. **6**(21), 8-9. ISSN 1210-9592.

JAZAR, Reza, 2007. *Theory of Applied Robotics: Kinematics, Dynamics, and Control*. New York: Springer. ISBN 978-0-387-32475-3.

KABEŠ, Karel, 2016. Rychlý nástup inteligentních robotů. *Automa*. **4**(23), 29-30. ISSN 1210-9592.

KUKA Robotics, 2016a. S firmou KUKA Robotics do budoucnosti automatizace. *kuka-robotics.com* [online]. ©2016 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: http://www.kuka-robotics.com/czech_republic/cs/company/group/

KUKA Robotics, 2016b. Portfolio výrobků: Vaše aplikace, naše roboty. *kuka-robotics.com* [online]. ©2016 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: http://www.kuka-robotics.com/czech_republic/cs/products/

KUKA Robotics, 2016c. Naše průmyslové roboty. *kuka-robotics.com* [online]. ©2016 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: http://www.kuka-robotics.com/czech_republic/cs/products/industrial_robots/

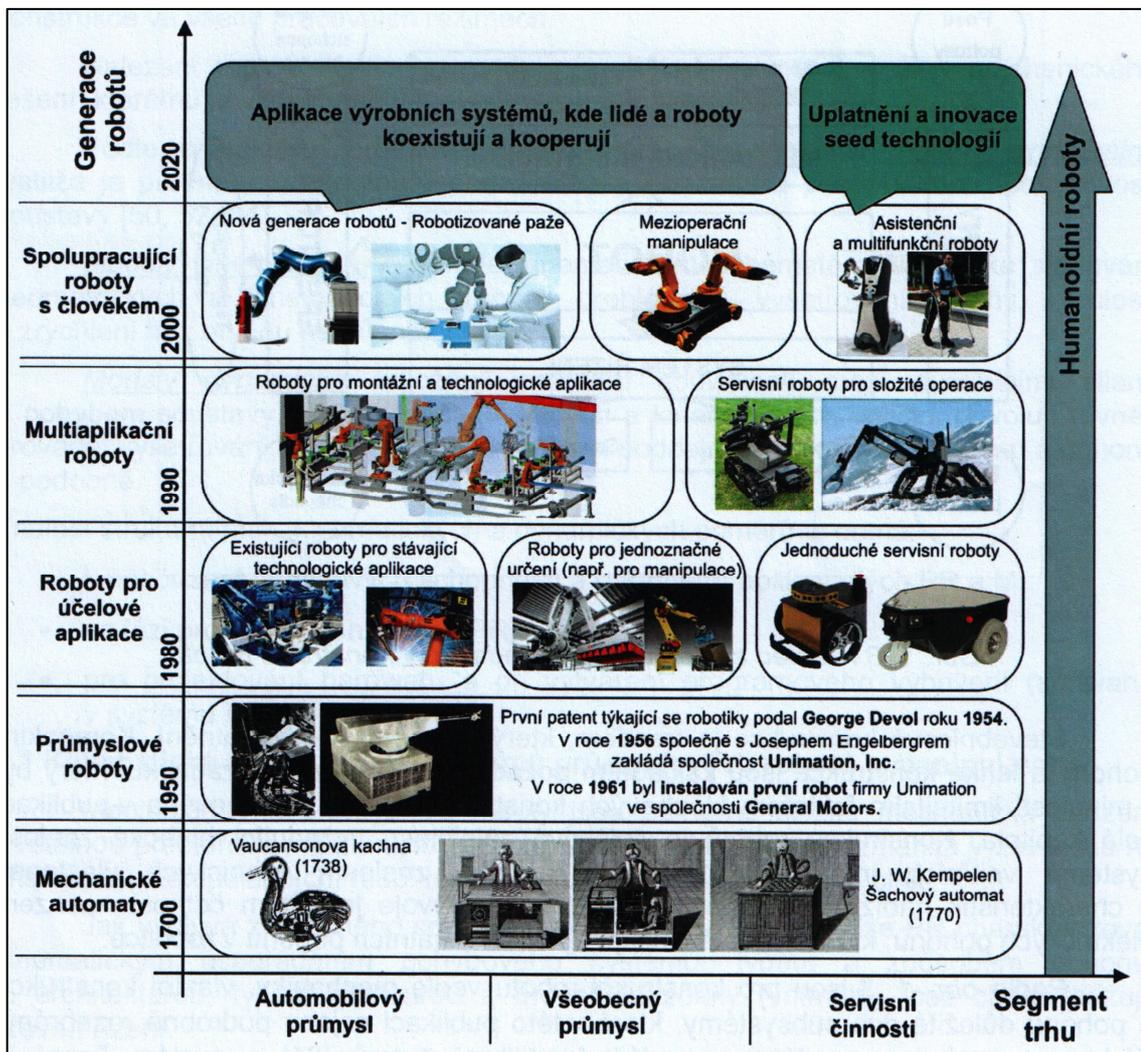
KUKA Robotics, 2016d. KR 1000 1300 TITAN PA. *kuka-robotics.com* [online]. ©2016 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: http://www.kuka-robotics.com/czech_republic/cs/products/industrial_robots/special/palletizer_robots/kr1000_1300_titan_pa/

KUKA Robotics, 2016e. KUKA Software. *kuka-robotics.com* [online]. ©2016 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: http://www.kuka-robotics.com/czech_republic/cs/products/software/

KUKA Robotics, 2016f. LBR iiwa. *kuka-robotics.com* [online]. ©2016 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: http://www.kuka-robotics.com/czech_republic/cs/products/industrial_robots/sensitiv/

- LEHTLA, Tõnu, 2008. *Introduction to Robotics* [online pdf]. ©2008 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/projekt_3.php?keel=eng&leht=1
- NOVOTNÝ, František a Marcel HORÁK, 2015. *Konstrukce robotů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci. ISBN 978-80-7494-216-7.
- ROBOTI, 2012. Robotika v ČR. *Roboti.cz* [online]. ©2012 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.roboti.cz/aktuality/Robotika-v-CR>
- SKAŘUPA, Jiří, 2007. *Průmyslové roboty a manipulátory: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-1522-0.
- ZÁDA, Václav, 2012. *Robotika, matematické aspekty analýzy a řízení*. Liberec: Technická univerzita v Liberci. ISBN 978-80-7372-882-3.

Příloha A Evoluce robotů v průběhu několika let



Obr. 27 Generace robotů (Novotný a Horák, 2015)

Příloha B Obsah přiloženého CD

- text bakalářské práce
 - Bakalarska_prace_2016_Martin_Kostalek.pdf
- zdrojový kód programu
 - pro řídicí jednotku Simotion D435
 - pro operátorský panel Simatic HMI OP177B