VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

NÁVRH ŘÍDICÍHO SYSTÉMU ROBOTICKÉHO MANIPULÁTORU

CONTROL SYSTEM DESIGN FOR ROBOTIC MANIPULATOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE ŠTĚPÁN KŘIVÁNEK
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. PAVEL HOUŠKA, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Štěpán Křivánek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Aplikovaná informatika a řízení (3902R001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh řídicího systému robotického manipulátoru

v anglickém jazyce:

Control system design for robotic manipulator

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá návrhem a realizací software pro řízení pohybu koncového efektoru plošného robotického manipulátoru Mini-swing. Jedná se o řízení pohybu koncového efektoru z bodu do bodu. Body zájmu zadává obsluha manipulátoru, nebo jsou načítány ze souboru. Zároveň je požadováno, aby software byl schopen po dojetí do zadaného bodu spustit požadovanou akci a po jejím dokončení se přesunout do dalšího bodu zájmu.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je realizovat software pro řízení robotického manipulátoru se dvěma řízenými osami a řízeným koncovým efektorem.

Seznam odborné literatury:

[1] Siciliano B.: Robotics: Modelling, Planning and Control, Springer-Verlag, London 2009, e-ISBN 978-1-84628-642-1
[2] Ďaďo S., Kreidl M.: Senzory a měřící obvody, Skriptum ČVUT, 1999
[3] Noskievič, P.: Modelování a identifikace systémů, Montanex a.s., Ostrava 1999, ISBN 80-7225-030-2
[4] National Instruments: LabVIEW Control Design User Manual[online], June 2009, 371057G-01, dostupné z URL:<http://www.ni.com>

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Houška, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 21.11.2011

L.S.

Ing. Jan Roupec, Ph.D. Ředitel ústavu	prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c. Děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem práce je navrhnout a zrealizovat software pro řízení koncového efektoru plošného robotického manipulátoru Mini-swing.

Úvod práce je zaměřen na obecný popis řešené problematiky. V rešeršní části je zmíněno dělení manipulátorů dle kinematické konfigurace. Následně je nastíněno využití modulu Robotics od společnosti National Instruments. Další kapitola popisuje manipulátor Mini-swing a řešení jeho kinematiky. Následně je rozebrán návrh a realizace softwaru pro řízení koncového efektoru manipulátoru Mini-swing. V závěru jsou shrnuty dosažené výsledky práce.

ABSTRACT

Main goal of this thesis is to design and realize software for controlling planar robotic manipulator “Mini-swing”.

At the beginning, thesis describes general issues of this problem. Research part deals with dividing manipulators in groups by their kinematic configuration. Next part merely outlines usage of National Instruments module “Robotics”. “Mini-swing” manipulator and its kinematic are described in the following part. Design and realization of software for controlling Mini-swing’s ending effector are parsed in next part and at the very end of thesis you can find summarization of accomplished results.

KLÍČOVÁ SLOVA

Robot, manipulátor, inverzní kinematika, CompactRIO, LabVIEW, G-kód

KEYWORDS

Robot, manipulator, inverse kinematics, CompactRIO, LabVIEW, G-code

PROHLÁŠENÍ O ORIGINALITĚ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma: „Návrh řídicího systému robotického manipulátoru“, vypracoval samostatně pod vedením Ing. Pavla Houšky, Ph.D., na základě dostupné literatury a dostupných informačních zdrojů, které jsem všechny odcitoval v seznamu použité literatury.

V Brně…….. Podpis……

BIBLIOGRAFCKÁ CITACE

KŘIVÁNEK, Š. *Návrh řídicího systému robotického manipulátoru.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Houška, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Velmi děkuji vedoucímu své práce Ing. Pavlu Houškovi Ph.D. za odborné rady, trpělivost a značné množství času, které mi věnoval.

OBSAH

Abstrakt ... 5
Klíčová slova ... 5
Prohlášení o originalitě ... 7
Bibliografcká citace ... 7
Poděkování ... 9
Obsah ... 11
1 Úvod ... 13
2 Kinematika robotu ... 15
2.1 Dělení robotů dle kinematické konfigurace ... 15
2.2 Hybridní roboty ... 16
2.3 Přímá/inverzní kinematika ... 16
2.4 LabVIEW Robotics Module ... 17
3 Popis řešeného manipulátoru ... 19
3.1 Manipulátor Mini-swing ... 19
3.2 Kinematický rozbor ... 20
3.3 Pohony a senzorika ... 24
4 Možnosti řízení robotu pomocí NI Robotics Module ... 27
4.1 Nastavení kinematických parametrů ... 27
4.2 Řešení přímé kinematické úlohy v LabVIEW ... 28
4.3 Řešení přímé a inverzní kinematické úlohy v LabVIEW ... 28
4.4 Zobrazení robotu ... 28
5 Řízení pohonů ... 29
5.1 Kaskáda regulátorů ... 29
5.2 Realizace regulátoru ... 29
6 Návrh aplikace ... 31
6.1 Řízení pohonů ... 32
6.2 Volba způsobu programování trajektorie ... 32
6.3 Řešení kinematiky ... 32
7 Realizace ... 33
7.1 Panel pro ovládání manipulátoru ... 33
7.2 Ladění regulátorů ... 33
7.3 DC controller ... 34
7.4 Postup sestavení manipulátoru ... 34
8 Závěr ... 35
9 Použitá literatura ... 37

1 ÚVOD

Cílem mé práce je vytvořit software pro manipulátor Mini-swing. Manipulátor slouží jako názorná učební pomůcka. Lze na něm testovat širokou škálu senzorů, které mohou být umístěny na koncový efektor manipulátoru. Jeho stěžejním úkolem však je odladění softwaru před jeho dalším využitím. Konkrétně se jedná o využití jeho softwaru pro podstatně větší manipulátor stejné koncepce, který bude využit pro měření teplotního pole.

Jde o sériový manipulátor tvořený ze základny, dvou ramen a třech motorů. Dva motory zajišťují pohyb jednotlivých ramen, třetí motor natáčí koncový efektor. Řízení robotu je realizováno pomocí grafického programovacího prostředí LabVIEW.

Výrobci robotických manipulátorů většinou používají pro jejich ovládání vlastní programovací jazyky. Ve většině případů je tedy problematické dohledat konkrétní specifikace v praxi používaných jazyků. Z toho důvodu je u robotu Mini-swing použito pro zadávání souřadnic koncového efektoru v průmyslovém jazyce G-kód. Daleko běžnější využití G-kódu je pro ovládání CNC zařízení, nicméně splňuje všechny požadavky pro řízení manipulátoru Mini-swing. Pro zpracování G-kódu jsem využil již hotové rozhraní, které jsem upravil pro potřeby manipulátoru Mini-swing. Řídicí systém je řešen přímo v prostředí LabVIEW, stejně tak i výpočet přímé a nepřímé kinematické úlohy.

Tato práce přímo navazuje na práce předchozí, ze kterých využívám části nápomocné k řešení řízení manipulátoru.

2 KINEMATIKA ROBOTU

Průmyslové roboty byly poprvé nasazeny přibližně v polovině minulého století. Důvodem bylo zkvalitnění výroby a značné omezení finančních nákladů. Průmyslové roboty lze nasazovat i do podmínek, které jsou pro člověka nepříznivé nebo dokonce nebezpečné. Manipulátory se používají například při lakování, svařování, montáži či ve sklářském průmyslu. Široká škála využitelnosti z nich tvoří skutečně všestranného pomocníka všude tam, kde je vhodné nahradit lidskou pracovní sílu.

2.1 Dělení robotů dle kinematické konfigurace

Tato kapitola vychází z [1], [2].

2.1.1 Sériové roboty

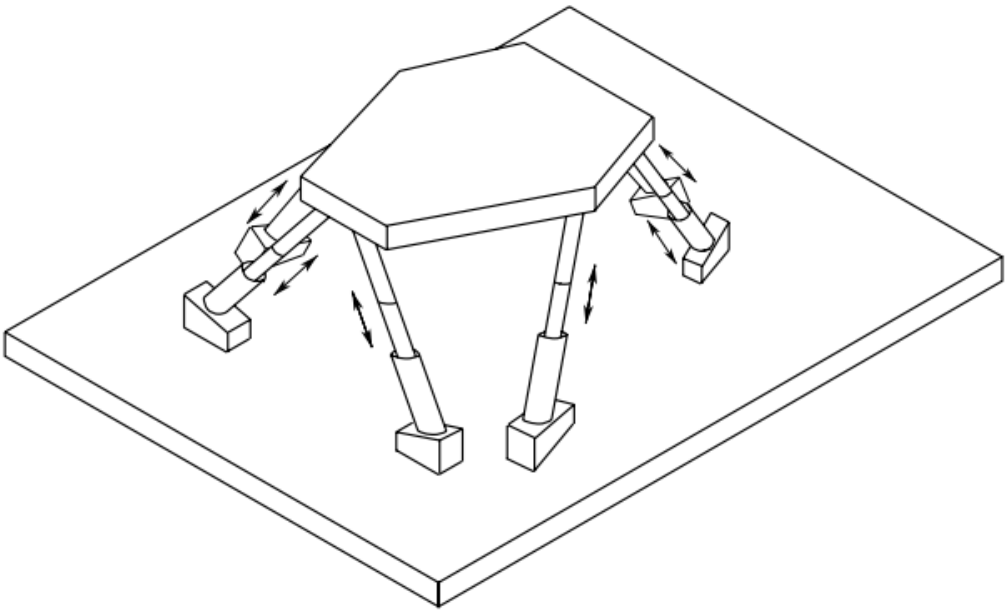
Translační a rotační kinematické dvojice jsou za sebou řazeny do série. Jedná se o dnes běžně používanou kinematickou strukturu. Výsledný pohyb manipulátoru je tvořen pohybem jednotlivých částí robotu, jež na sebe navazují. Tyto části se mohou hýbat nezávisle na sobě. Na efektoru se projeví chyby jednotlivých pohybů.

Obr.1 - Sériový robot ABB IRB 2600 [3].

Uvedená kinematická konfigurace má celou řadu nevýhod. Problémy může způsobovat statické a dynamické kmitání, přesnost polohování, která se pohybuje v řádech desetin milimetru, a v neposlední řadě problematická pohyblivost v provozu s překážkami. Oproti paralelním robotům mají podstatně nižší polohovou tuhost.

2.1.2 Paralelní roboty

Paralelní roboty jsou takové manipulátory, které mají uzavřenou kinematickou strukturu. Koncový člen robotu je spojen s pevnou základnou pomocí několika paralelně řazených kinematických dvojic. Pohyb koncového členu zajišťuje současný pohyb všech jeho částí. Pohyb jedné části způsobí pohyb všech ostatních částí, tudíž se nemůže hýbat nezávisle.



Obr.2 - Paralelní robot [4].

2.2 Hybridní roboty

Jedná se o velmi komplikovanou soustavu, kterou je složité definovat. Obsahuje členy sériové, stejně tak i paralelní.

2.3 Přímá/inverzní kinematika

Tato kapitola vychází z [1], [5], [6].

2.3.1 Přímá kinematická úloha

Kinematiku prostorově orientovaných manipulátorů je možné řešit dvěma způsoby. Zjištění polohy a orientace efektoru, jsou-li zadané základní parametry jako délka ramen a jimi sevřené úhly, se nazývá přímá kinematická úloha. Ze zadaných parametrů lze pomocí goniometrických funkcí vypočítat výslednou polohu efektoru. Pomocí kloubových souřadnic pak můžeme ovládat robot. Řešení přímé kinematické úlohy je vždy zcela jednoznačné.

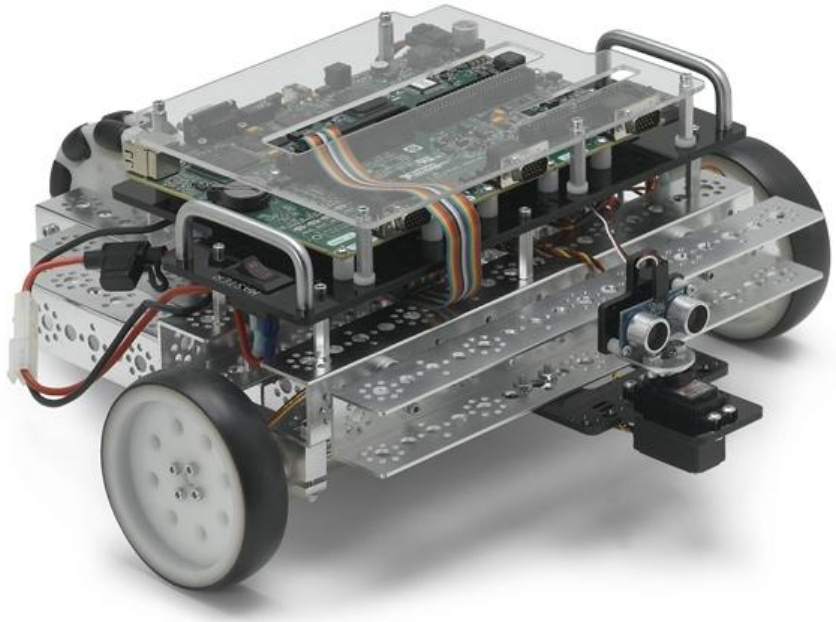
2.3.2 Inverzní kinematická úloha

Umožňuje nám dopočítat kloubové souřadnice, pokud známe polohu koncového efektoru. Můžeme tedy zadávat souřadnice v kartézském souřadném systému a pomocí inverzní úlohy dopočítat, jak se změní kloubové souřadnice. Inverzní kinematika může mít více řešení, může jich být nekonečně mnoho. U sériových robotů je inverzní úloha podstatně složitější než přímá. U algoritmů řešících inverzní kinematiku je důraz kladen především na jejich zrychlení a na jejich univerzálnost. Algoritmus by měl být použitelný pro libovolnou kinematickou strukturu.

2.4 LabVIEW Robotics Module

Tato kapitola vychází z [7]. Od roku 2009 je pro program LabVIEW dostupný modul Robotics. Tento rozšiřující modul slouží k návrhu a simulaci robotických systémů. Robotics disponuje obsáhlou knihovnou pro připojení různých typů senzorů. Velkou výhodou jsou již předprogramované funkce pro řešení dynamiky a kinematiky robotu. Tato funkce se dá výborně propojit se simulací pohybu koncového bodu.

Pro neprůmyslové využití National instruments vyrábí „Starter Kit“. Jedná se o již kompletně sestavený mobilní robot. K řízení robotu se využívá vestavěný systém Single-Board RIO. Dále je osazen několika motory, senzory a baterií. Jednoduchost tohoto robotu je ideální pro naučení se základům robotiky nebo pro vývoj prototypu robotu ovládaného modulem Robotics. „Starter Kit“ také obsahuje předpřipravený program, který obsahuje algoritmus pro vyhýbání se překážkám na základě zpětné vazby od zabudovaných ultrazvukových senzorů. Je možné ho osadit širokou škálou dalších senzorů.



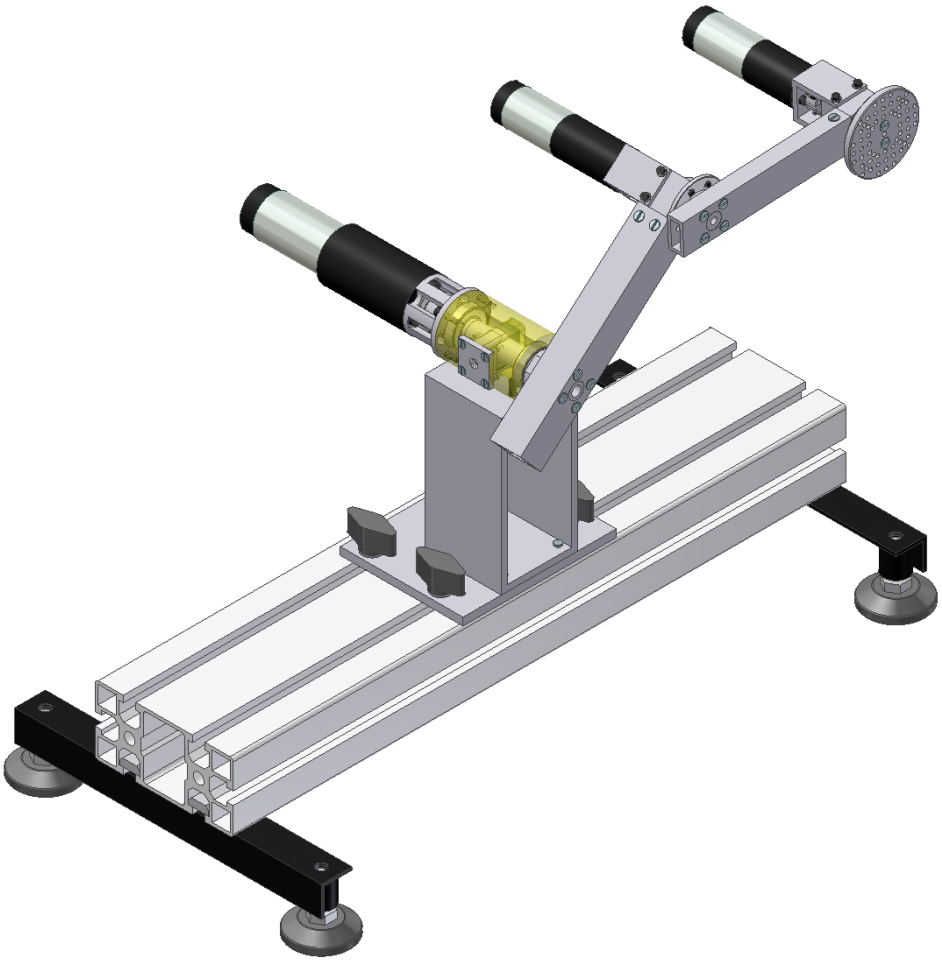
Obr.2 – „Starter Kit” [8].

Praktické využití v průmyslové sféře má především řízení robotického ramena. Právě zde lze využít výpočet přímé a inverzní kinematiky a dynamiky pomocí funkcí implementovaných v Robotics. Také je možné simulovat pohyb celého ramene. Od výrobce je volně dostupný program pro výpočet kinematiky, dynamiky a pro simulaci pohybu ramene. Jedná se konkrétně o průmyslový robot Puma560. Tento program lze poměrně snadno upravit na ovládání prototypů nebo průmyslově využívaných robotů. Prakticky stačí předefinovat kinematické a dynamické parametry pro konkrétní robot.

3 POPIS ŘEŠENÉHO MANIPULÁTORU

3.1 Manipulátor Mini-swing

Manipulátor je tvořen základnou, dvěma rameny a koncovým efektorem s řízeným jedním stupněm volnosti. Základna a ramena jsou vyrobeny z hliníkových profilů. Ramena se pohybují každé v jedné ose. Každé rameno má svůj motor, který umožňuje manipulátoru dosáhnout požadované polohy. Poslední motor umožňuje natáčení koncového efektoru. Tím je zajištěn případný pohyb měřicího zařízení, které může být osazeno. Pohyblivost tohoto manipulátoru je limitována velikostí motorů [9]. Pracovní prostor je limitován délkou jednotlivých ramen.



Obr.3 - Manipulátor Mini-swing.

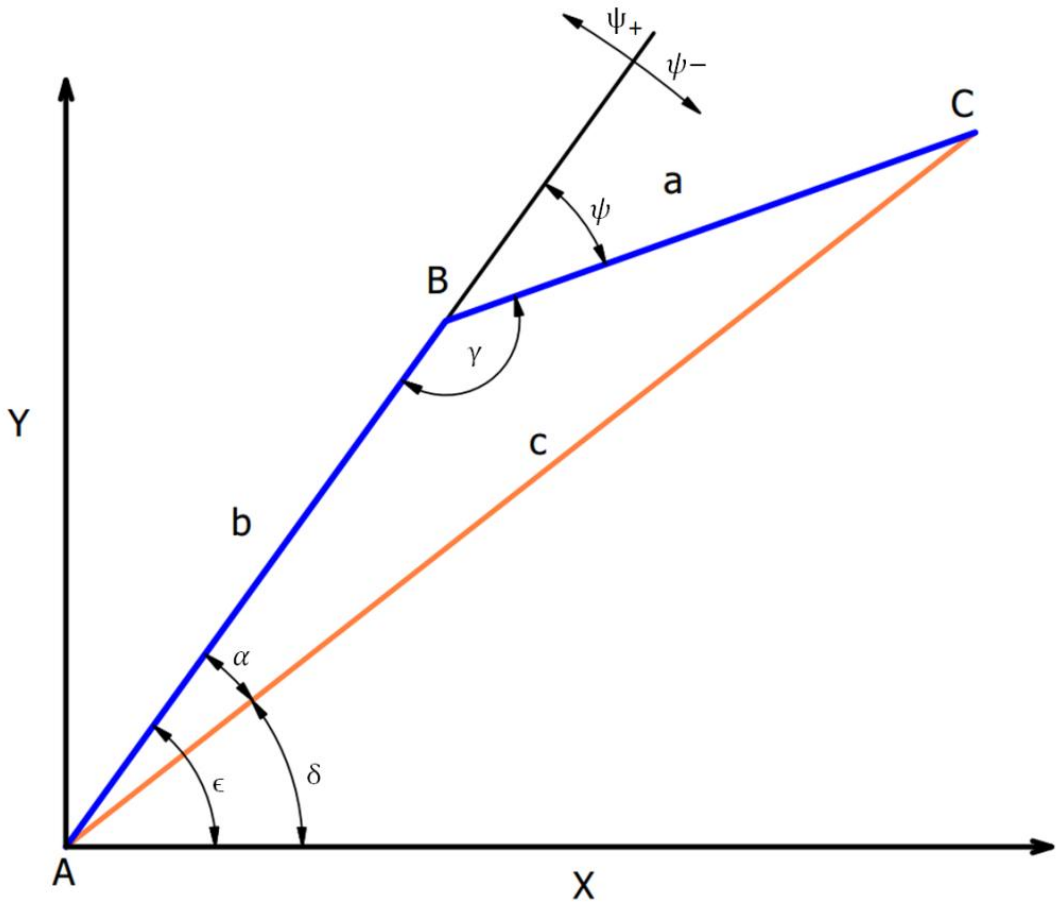
Jedná se o manipulátor se sériovou kinematikou. Je tedy třeba řešit přímou a inverzní kinematickou úlohu. Manipulátor je možné osadit širokou škálou koncových efektorů, které je možné zvolit dle využití manipulátoru. Použité motory jsou osazeny planetovými převodovkami a enkodéry. Ty poskytují řídicímu systému zpětnou vazbu. Řízení pohonů manipulátoru je realizováno prostřednictvím grafického prostředí LabVIEW, na které je připojeno CompactRIO.

3.2 Kinematický rozbor

Celá část zabývající se kinematikou vychází z předchozích prací. [9]

3.2.1 Přímá kinematická úloha

Pohyb koncového bodu manipulátoru je zajištěn změnou vzájemné polohy ramen. Výslednou polohu koncového bodu lze dopočítat pomocí goniometrických funkcí. Ramena mají pevnou délku a je znám úhel, který ramena svírají. Rameno b je spojeno se základnou pomocí rotační vazby. Na druhém konci ramena je další rotační vazba, která ho spojuje s ramenem a. Spojením bodu C a koncového bodu manipulátoru získáme třetí stranu trojúhelníku, která je potřebná pro výpočet.



Obr.4 - Schématické znázornění manipulátoru.

Výsledný trojúhelník má strany a, b, c a úhly α, β, γ. Počátek $A[x_A, y_A]$ leží na souřadnicích $A[0,0]$. Bod B leží na souřadnicích $B[x_B, y_B]$ a koncový bod C má souřadnice $C[x_C, y_C]$.Vzdálenost počátku a koncového bodu je označena písmenem c. Pro její výpočet využijeme kosinovou větu

$$c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cdot \cos(\gamma)} \tag{1}$$

Úhly γ, ε a známé strany jsou využity pro výpočet neznámých veličin, které jsou zapotřebí pro řešení přímé kinematické úlohy. Úhel α se vypočítá dle vzorce 2.

$$\alpha = \arccos\left[\frac{b^2 + c^2 - a^2}{2 \cdot b \cdot c}\right] \tag{2}$$

Zbývá ještě dopočítat úhel, jež svírá osa x a přepona c. Úhel δ se vypočítá odečtením vypočítaného úhlu α od známého úhlu ε.

$$\delta = \varepsilon - \alpha \tag{3}$$

Pro zjednodušení je zaveden úhel ψ, což je doplněk úhlu γ do 180°. Podle natočení k ramenu b bude tento úhel kladný nebo záporný.

$$\psi = \gamma - 180° \tag{4}$$

Tímto se zjistil poslední neznámý úhel. Jelikož jsou všechny strany trojúhelníku již známy, souřadnice bodu B a C mohou být dopočítány. Souřadnice bodu C mají počátek v bodě B. Je tedy označen jako C_1.

$$B_x = b \cdot \cos(\varepsilon) \tag{5}$$

$$B_y = b \cdot \sin(\varepsilon) \tag{6}$$

$$C_{x1} = a \cdot \cos(\psi) \tag{7}$$

$$C_{y1} = a \cdot \sin(\psi) \tag{8}$$

Jelikož má bod C_1 počátek souřadného systému v bodě B, je pro výpočet souřadnic koncového efektoru nutné připočíst souřadnice bodu B. Tak se vypočítají souřadnice bodu C vzhledem k počátku.

$$C_x = \mathrm{C_{x1}} + \mathrm{B_x} \tag{9}$$

$$C_y = \mathrm{C_{y1}} + \mathrm{B_y} \tag{10}$$

Při výpočtu přímé kinematické úlohy se vychází ze základních matematických vyjádření a z goniometrických funkcí.

3.2.2 Nepřímá kinematická úloha

Nepřímá kinematická úloha se liší tím, že je známa poloha koncového bodu a počít se optimální nastavení ramen manipulátoru. Jedná se o opačný postup k přímé kinematické úloze. Je známa poloha koncového bodu $C[x_c, y_c]$ a délka jednotlivých ramen. Opět je použit trojúhelník z Obr.4. Jako první je vypočítána stranu c, což je pomyslná spojnice počátku a koncového bodu. Následně je strana využita pro výpočet úhlu δ. Následně je možné přičíst nebo odečíst úhel α. Výsledkem je úhel ε, který značí úhel mezi osou x a ramenem b.

Výpočet pomyslné strany trojúhelníku c.

$$c = \sqrt{{C_x}^2 + {C_y}^2} \tag{11}$$

Dle vzorce 12 lze dopočítat úhel δ, jenž svírá strana c a osa x.

$$\delta = \arctan\left[\frac{C_y}{C_x}\right] \tag{12}$$

Následně je možné pomocí známých stran trojúhelníku vypočítat úhly $\propto$ a γ.

$$\alpha = \arccos\left[\frac{b^2 + c^2 - a^2}{2 \cdot b \cdot c}\right] \tag{13}$$

$$\gamma = \arccos\left[\frac{a^2 + b^2 - c^2}{2 \cdot b \cdot c}\right] \tag{14}$$

Veškeré úhly nutné k dopočítání úhlu ε jsou známé. Nabízejí se dvě řešení, jak tento úhel vypočítat. V závislosti na poloze ramena b vůči straně c se odečte nebo přič úhel $\propto$. Jelikož se jedná o inverzní kinematickou úlohu, je běžné, že vychází více možných řešení. Oba výsledky tedy představují správné řešení.

$$\varepsilon_1 = \delta + \alpha \tag{15}$$

$$\varepsilon_2 = \delta - \alpha \tag{16}$$

Výsledné dvojí řešení je znázorněno v Obr.5.

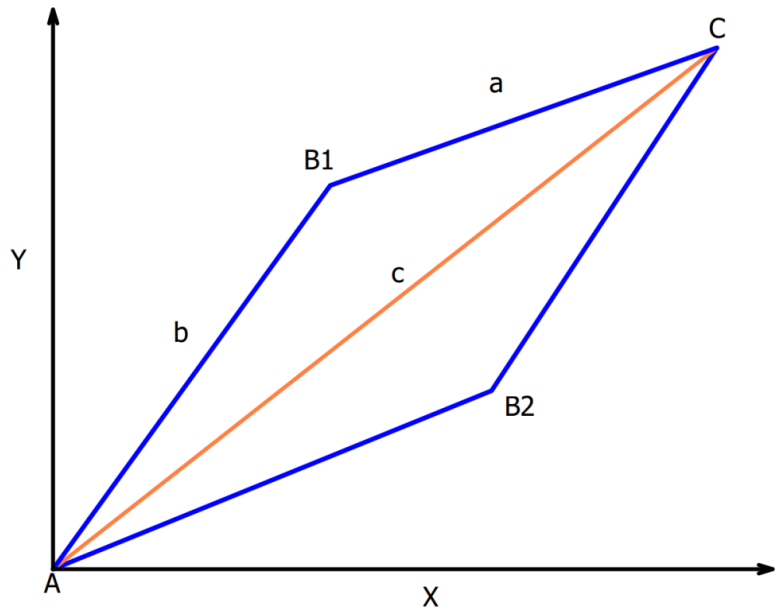
Souřadnice bodu B se vypočítají z úhlu ε a strany b. Jelikož existují dvě různá řešení, dostaneme bod $B_1[x, y]$ a bod $B_2[x, y]$. Pomyslná spojnice počátku a koncového bodu je zároveň osou symetrie jednotlivých konfigurací manipulátoru.

$$B_1(\mathrm{x}) = \mathrm{b} \cdot \cos(\varepsilon_1) \tag{17}$$

$$B_1(\mathrm{y}) = \mathrm{b} \cdot \sin(\varepsilon_1) \tag{18}$$

$$B_2(\mathrm{x}) = \mathrm{b} \cdot \cos(\varepsilon_2) \tag{19}$$

$$B_2(\mathrm{x}) = \mathrm{b} \cdot \sin(\varepsilon_2) \tag{20}$$



Obr.5 – Dvojí řešení inverzní kinematiky.

3.2.3 Dosažení okrajové polohy

Manipulátor dosáhne okrajové polohy tehdy, pokud zasahuje až na okraj svého pracovního prostoru. Okrajová poloha je dána délkou jednotlivých ramen. Okrajové polohy dosáhneme tehdy, je-li úhel γ roven 180°. Polohu bodu $C[x, y]$ v krajní poloze lze vypočítat z délky ramen a úhlu ε.

$$\mathrm{C_x} = \mathrm{a} + \mathrm{b} \cdot \cos(\varepsilon) \tag{21}$$

$$\mathrm{C_y} = \mathrm{a} + \mathrm{b} \cdot \sin(\varepsilon) \tag{22}$$

3.3 Pohony a senzorika

Pro řízení manipulátoru jsou zapotřebí tři pohony. Každý pohon se skládá z motoru, převodovky a enkodéru. Všechny tři motory jsou od firmy MAXON. Jedná se o stejnosměrné motory řady MAXON RE-max a A-max. Motor pohonu v bodě A je výkonnější než zbylé dva, protože pohybuje celým ramenem a nároky na jeho výkon jsou tímto větší než u zbylých dvou motorů. Další dva pohony mají totožný motor, avšak jsou osazeny jinou převodovkou. Řada motorů MAXON RE-max vyniká svými dynamickými vlastnostmi díky magnetům na bázi vzácné zeminy FeNdB [10]. Další výhodou těchto magnetů je větší odolnost vůči rušení a vyšším teplotám.

Obr.6 – Motor z řady MAXON RE-max [11].

Použité enkodéry jsou magnetorezistivní. Magnetický disk enkodéru má stejné otáčky jako hřídel motoru. Magnetický disk vytváří sinusové vlny, které se přetvářejí ve snímači na napětí. Elektrický signál je prahován a nakonec zesílen [9].

Každý motor je osazen planetovou převodovkou. Výhodou planetových převodovek je především jejich velikost a snadné dosažení velkého převodového poměru. Životnost těchto převodovek by měla být větší než u převodovek klasických. Vstupní a výstupní hřídele jsou ve stejné ose.

Motor	Pohon A	Pohon B	Pohon C
Výrobce	Maxon	Maxon	Maxon
Řada	RE-max 29	A-max 22	A-max 22
Nom. Napětí[V]	24	24	24
Nom. Výkon[W]	22	6	6
Nom. Otáčky[n/min]	7680	7430	7430
Nom. Proud[A]	1.08	0.350	6.97
Nom. Moment[mNm]	26.9	6.97	6.97
Rozběhový moment[mNm]	262	24.3	24.3
Rozběhový proud[A]	10.2	1.14	1.14
Moment setrvačnosti[gcm^2]	13.5	4.11	4.11
Rozměry DxL[mm]	29x44.7	22x31.9	22x31.9
Hmotnost[g]	161	54	54

Tabulka 1 - Specifikace jednotlivých motorů. [10]

Převodovka	Pohon A	Pohon B	Pohon C
Výrobce	Maxon	Maxon	Maxon
Řada	GP 32 C	GP 22 C	GP 22 C
Převodový poměr	132:1	370:1	84:1
Max. moment[Nm]	6	1.8	1.2
Moment setrvačnosti[gcm^2]	0.7	0.4	0.4
Rozměr DxL[mm]	32x43	22x45.8	22x39
Hmotnost[g]	194	81	68

Tabulka 2 – Specifikace převodovek. [10]

Enkodér	Pohon A	Pohon B	Pohon C
Výrobce	Maxon	Maxon	Maxon
Řada	Type ML	Type M	Type M
Počet impulsů	1000	512	512
Počet kanálů	3	3	3
Max. operační frekvence[kHz]	200	320	320
Fázový posun[°e]	90±45	90±45	90±45
Napájecí napjetí[V]	5	5	5

Tabulka 3 - Specifikace jednotlivých motorů. [10]

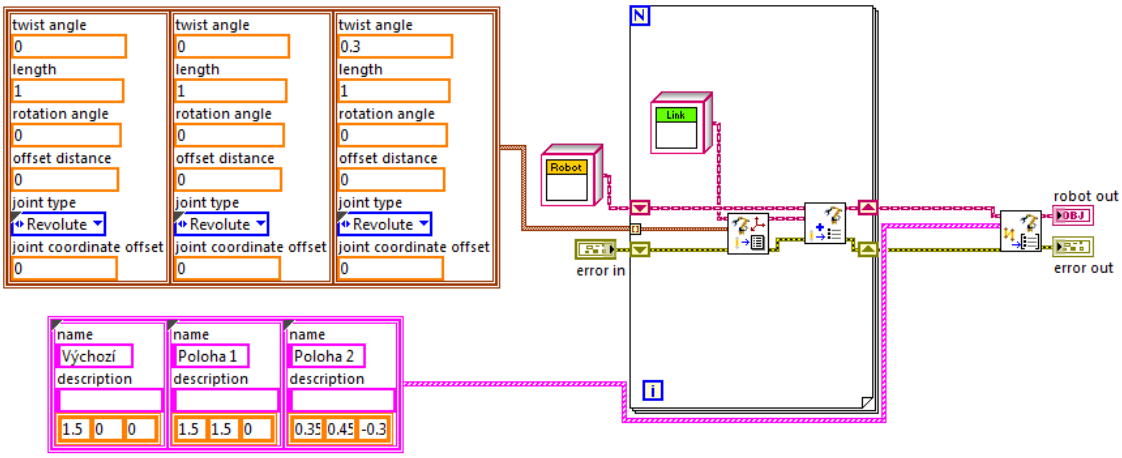
4 MOŽNOSTI ŘÍZENÍ ROBOTU POMOCÍ NI ROBOTICS MODULE

Tato část vychází z manuálu pro LabVIEW Robotics [7]. Názvy funkcí jsou zachovány v anglickém jazyce kvůli eliminaci změny významu při překladu.

4.1 Nastavení kinematických parametrů

Velmi důležitou součástí řízení robotických manipulátorů je řešení kinematiky. Řízení pomocí grafického programovacího prostředí LabVIEW umožňuje využít speciální funkci pro výpočet kinematiky. Konfigurace kinematických parametrů jsou zadávány na vstupu a následně zpracovány funkcí „Set Kinematic Parameters“. Jako první je třeba zadat úhel natočení v radiánech, který udává podélné natočení souřadného systému vazby vůči vazbě předchozí. Dalším parametrem je vzdálenost mezi jednotlivými vazbami. Tato vzdálenost definuje délku ramen manipulátoru, která mají zásadní význam pro kinematiku. Taktéž je možné nastavit úhel, o který bude rameno natočeno vůči předchozímu ramenu v počáteční konfiguraci. Dále je možné definovat vzdálenost ramen podél osy vazby, která je spojuje. Vazby mezi jednotlivými pruty lze zvolit ze dvou možných. Rotační vazba má proměnný úhel natočení mezi pruty a konstantní vzdálenost mezi konci prutů ve vazbě. Další možná vazba je posuvná. Posuvná vazba má konstantní úhel mezi pruty a proměnlivou vzdálenost mezi konci ramen. Posledním volitelným kinematickým parametrem je natočení souřadného systému. Z konstrukčního hlediska je často nemožné, aby ramena mezi sebou dosáhla nulového úhlu. Může tedy být vhodnější si souřadný systém natočit tak, aby se souřadnice lépe zadávaly a nemuseli jsme je stále počítat k jinému než nulovému úhlu.

Funkce „Set Kinematic Parameters“ má ještě další vstupy, které ale kinematiku robotu neovlivňují. Může být přijímána chyba, která je indikována v předchozí části programu. Výstupní chyba naopak signalizuje chybu přímo při načítání kinematických parametrů.



Obr.6 – Zadávání kinematických parametrů.

Výstupem funkce „Set Kinematic Parameters“ je konfigurace celého robotu. Délky ramen, úhly, které svírají, a jejich souřadné systémy jsou dále zpracovány funkcí „Append link“. Dalším výstupem je hlášení o chybách při zpracování kinematických parametrů. Toto hlášení lze využívat v dalších částech programu a reagovat tak na vzniklý problém.

Nastavené kinematické parametry je třeba zakomponovat do ovládání robotu. K tomuto účelem slouží funkce „Append link“. Funkce má za úkol přiřadit k ovládání robotu konkrétní kinematickou konfiguraci. Také je možné zpracovat chyby v jejím nastavení. Aby nedošlo ke kolizi robotu při zapnutí, je vhodné použít funkci „Set poses“. Její použití umožňuje navolit předdefinované konfigurace polohy robotu.

Jelikož je zadávání kinematických parametrů v modulu Robotics jednoduše vyřešeno, stává se z něj efektivní nástroj pro výpočet přímé a inverzní kinematické úlohy.

4.2 Řešení přímé kinematické úlohy v LabVIEW

K řešení přímé kinematické úlohy je vhodné využít funkci „Forward kinematics“. Využijeme již nastavené kinematické parametry, které přivedeme na vstup funkce. Dále je zapotřebí přivést na vstup pole, které obsahuje úhly natočení jednotlivých vazeb. Jelikož je délka ramen konstantní, stávají se úhly natočení vazeb jediným ovládacím prvkem robotu. Pro zobrazení změny polohy lze na výstup z funkce připojit transformační matici koncového efektoru. Další variantou pro demonstraci pohybu robotu je vykreslení trojrozměrné animace.

Jednou z variant využití je zobrazení výsledného bodu koncového efektoru. Toto však není jediná použitelná varianta. Zejména při vykreslování animace je možné využít zobrazení trajektorie pohybu koncového bodu. Funkce „Forward kinematics“ umožňuje vykreslovat animaci a vypisovat matici pohybu. Stačí pouze zadávat úhly natočení jednotlivých vazeb.

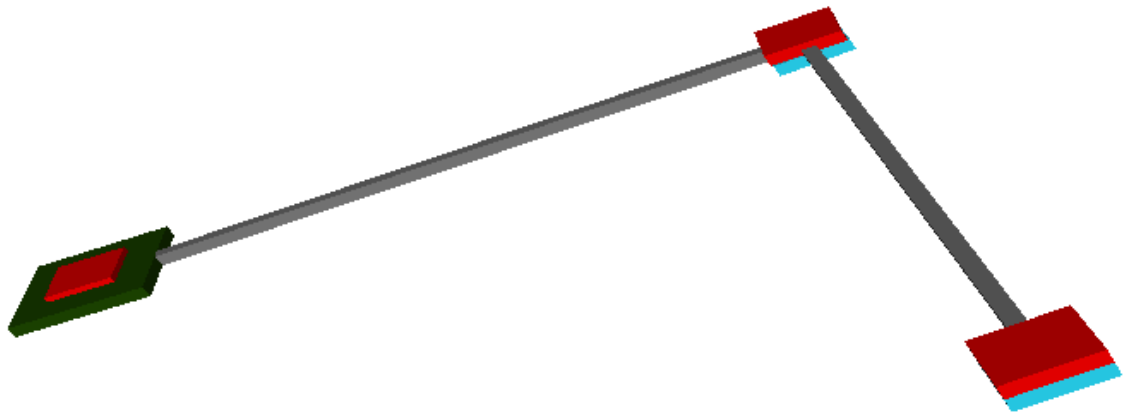
4.3 Řešení přímé a inverzní kinematické úlohy v LabVIEW

Funkce „inverse kinematics“ umožňuje řízení pohybu manipulátoru do konkrétního bodu. Souřadnice v kartézském souřadném systému se zadávají do funkce „Create Transform from Translation“, kde se transformují do transformační matice koncového efektoru. Kinematické parametry jsou do funkce přivedeny ze sub-VI, které jsou parametry načítány.

Pohyb ramena je rozdělen na více kroků. Implicitně je nastavena hodnota 100 kroků, kterou však lze předefinovat přes control. Pomocí pole lze nadefinovat aktuální úhly ve vazbách.

4.4 Zobrazení robotu

Zobrazení robotu lze využít jak pro přímou, tak i pro inverzní kinematickou úlohu. Zobrazuje kinematickou konfiguraci ve výchozí poloze. Konfigurace se dále mění v závislosti na řízení robotu. Tyto změny jsou rovnou vykreslovány ve funkci „3D picture“ .

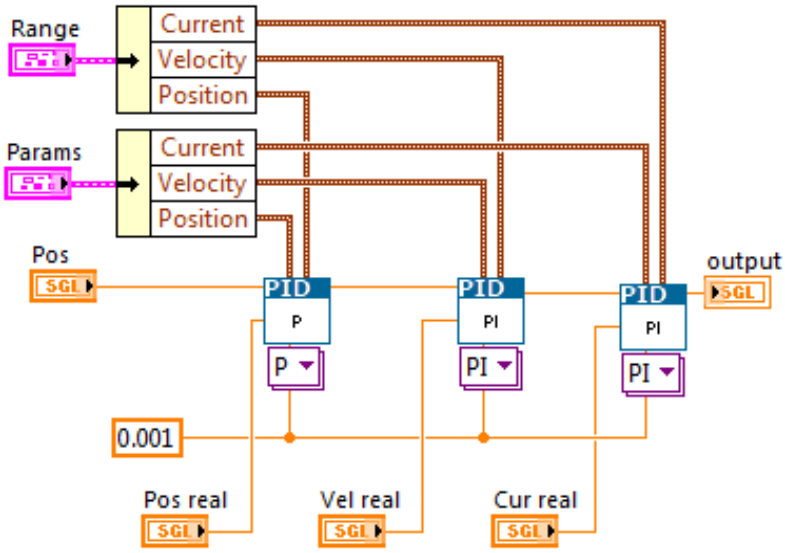


Obr.7 –Vykreslení kinematických parametrů pomocí 3D picture.

5 ŘÍZENÍ POHONŮ

5.1 Kaskáda regulátorů

Pro efektivnější regulaci soustavy je výhodné aplikovat kaskádu regulátorů. To znamená, že pro regulaci využijeme několik za sebou řazených regulátorů. Soustava je rozdělena na tři části. První část reguluje polohu, druhá rychlost a poslední proud.



Obr.8 – Kaskáda regulátorů.

Kaskáda regulátorů je realizována pomocí polymorfního VI. Díky tomu je možné libovolně kombinovat různé typy regulátorů dle potřeby, aniž by bylo nutné zasahovat do struktury programu.

5.2 Realizace regulátoru

Tato část vychází z [12].

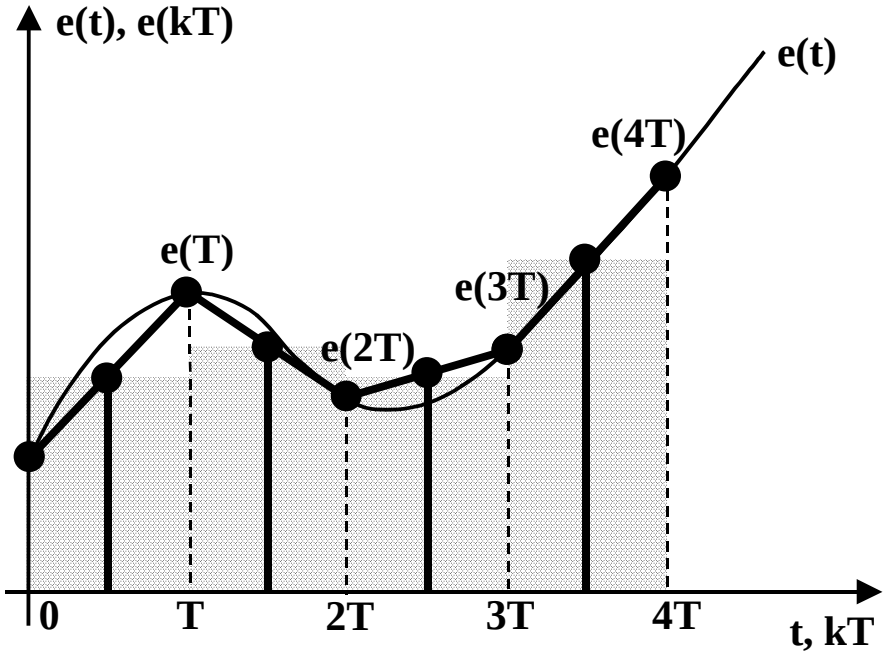
Pro regulaci jsou naprogramovány regulátory P, PD, PI a PID. Nevyužili jsme předprogramovaných regulátorů, jelikož se v minulosti neosvědčily. Kvůli datovému typu *double* byl výrazným způsobem zpomalen chod celého programu.

Vzhledem k použití diskrétního systému nelze realizovat PID regulátor, je proto nahrazen PSD regulátorem. Jelikož od diskrétního regulátoru očekáváme stejnou funkci jako od spojitého, je v programu pojmenován jako PID. Integrační složka regulátoru je nahrazena složkou sumační. Derivační složka je nahrazena složkou diferenční. Pro náhradu integrační složky je nutné zvolit vhodnou numerickou metodu. Jako optimální se ukázala lichoběžníková náhrada. [12]

$$\frac{r_o}{T_i}\int_0^t e(\pi) \approx \frac{r_o T_v}{2T_i}\sum_{i=1}^{k}\big(e(i)+(i-1)\big) = I_L(k) \tag{23}$$

Hodnota původního integrálu je nahrazena plochami lichoběžníků, které nahrazují původní plochu pod křivkou. Šířka jednotlivých lichoběžníků se odvíjí od vzorkovací frekvence.

$$T\,\frac{e(iT)+e(i-1)T}{2} \tag{24}$$



Obr.8 – Lichoběžníková náhrada [12].

Náhrada derivace se běžně realizuje zpětnou diferencí 1. Řádu. Je to rozdíl funkční hodnoty a předchozí funkční hodnoty podělený vzorkovací frekvencí.

$$D(kT) = \frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(kT) - e(k-1)T}{T} \tag{25}$$

6 NÁVRH APLIKACE

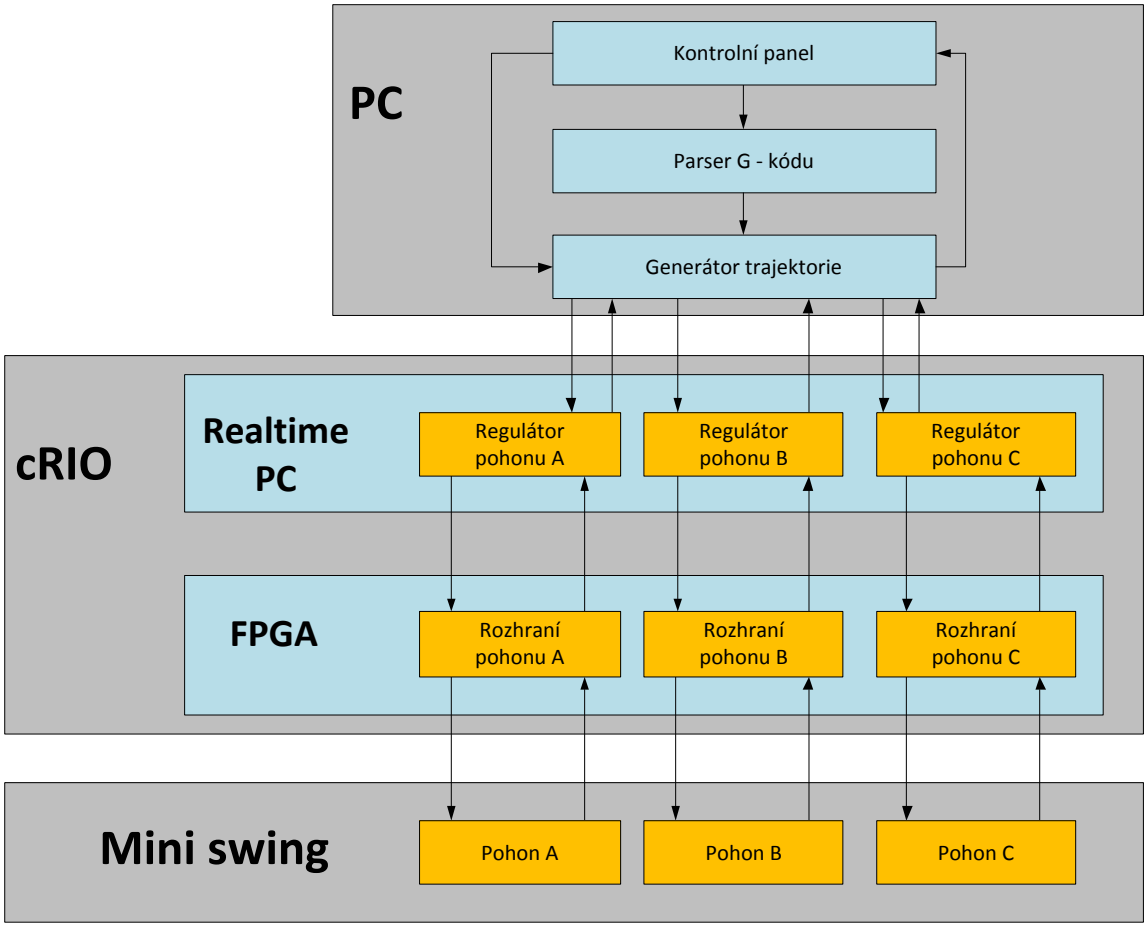
Na obr. 10 je znázorněna hierarchická struktura řídicího systému. Systém se skládá ze softwarových modulů, které běží na embedded systému NI CompactRIO. Ovládání je realizováno z PC. Systém cRIO se skládá z realtimového procesoru a programovatelného hradlového pole (FPGA).

Na počítači běží moduly pro generování trajektorie, modul parsování G-kódu a modul uživatelského rozhraní. Na realtimovém systému běží regulátory jednotlivých pohonů manipulátoru, které zpracovávají vstupy a výstupy z komunikačních rozhraní umístěných na FPGA.

Generátor trajektorie zpracovává uživatelské vstupy a na jejich základě generuje trajektorii koncového efektoru manipulátoru. Zadané souřadnice se přepočítávají do úhlových souřadnic jednotlivých pohonů. Přepočet probíhá na bázi inverzní kinematické úlohy. Výstup z generátoru je vstupem do regulátorů jednotlivých pohonů.

Dalším modulem je parser G-kódu. Tento modul provádí zpracování instrukcí, které slouží pro zadávání trajektorie koncového efektoru. Parser byl vyvíjen jako společný projekt s cílem vytvořit universální rozhraní pro řízení manipulátorů využívaných ve výuce. Autory projektu byli řešitelé několika bakalářských prací a můj vedoucí Ing. Pavel Houška, Ph.D.

Parser zpracovává zadávané instrukce v jazyce G-kód, který je navržen pro programování CNC strojů. Díky tomu ho lze výhodně využít pro plánování trajektorie.



Obr.10 – Schéma návrhu aplikace.

Zpracování uživatelských vstupů probíhá v řídícím panelu. Řídící panel umožňuje manuální nebo automatický režim. V režimu automatického řízení jsou pohybové instrukce pro

manipulátor zadávány v G-kódu. O jeho zpracování se stará výše popsaný modul, parser G-kódu. Automatický režim umožňuje krokový a kontinuální režim řízení. V kontinuálním režimu je prováděn uživatelský program najednou. Krokový režim vyžaduje potvrzování každého kroku G-kódu obsluhou manipulátoru. G-kód muže být zadáván přímo do editoru nebo načten z předem vytvořeného souboru s uživatelským programem. Manuální režim nevyužívá Parser, ale zasílá instrukce přímo do generátoru trajektorie.

Protože je manipulátor osazen přírůstkovými snímači polohy, je nutné před jakýmkoli spuštěním automatického režimu manuálně najet do výchozí polohy.

6.1 Řízení pohonů

Pro řízení motorů je na hradlovém poli realizováno rozhraní pro zpracování dat ze snímačů. Rozhraní vyhodnocuje natočení z enkodéru, počítá jeho časovou derivaci a také počítá efektivní hodnotu proudu motoru pomocí proudového snímače. Řízení polohy je zajištěno pomocí regulátorů zapojených do kaskády. Regulátory jsou stejně jako generátor trajektorie realizovány na realtimu. Řízení motoru probíhá pro všechny tři motory nezávisle. Návrh kaskády regulátoru je rozebrán v kapitole 5.

6.2 Volba způsobu programování trajektorie

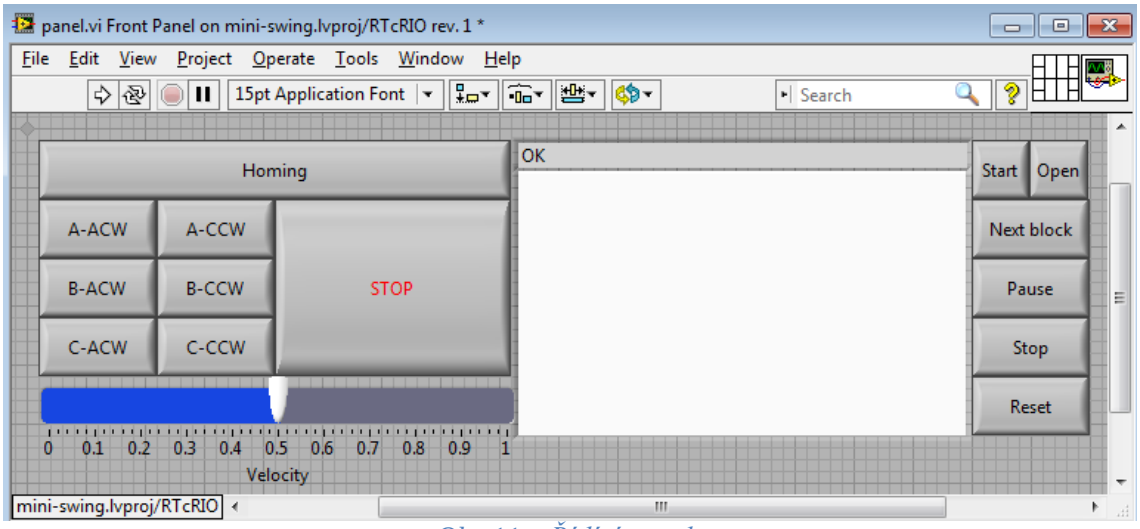
Při volbě programovacího jazyku pro ovládání manipulátoru jsem se zprvu zaměřil na již zaběhlé průmyslově používané programovací jazyky. Zjišťoval jsem informace o jazycích využívaných firmami KUKA a ABB. Po konzultaci na ústavu výrobních systému a robotiky jsem však zjistil, že využití těchto jazyků může být problematické z důvodu nedostupnosti dokumentace. Firmy vyvíjí programovací jazyky jako uzavřené řešení, proto je jejich nasazení pro daný problém nereálné. Dalším programovacím jazykem na poli průmyslových manipulátorů je G-kód. Je navržen pro programování CNC obráběcích strojů, které jsou speciální aplikací manipulátorů. Výhodami tohoto jazyku je jeho primární zaměření na zadávání trajektorie, možnost ovládání koncových efektorů a rozšířenost. Z toho důvodu jsem se připojil do předem zmíněného projektu, který se zabývá vývojem parseru, jakožto univerzálního řídícího rozhraní pro manipulátory využité pro školní potřeby.

6.3 Řešení kinematiky

Jako výchozí řešení kinematiky bylo zvažováno využití modulu Robotics. Bohužel jsem nebyl schopen zcela nadefinovat pracovní prostor mého manipulátoru. Přesahy motorů a hliníková základna manipulátoru komplikují vymezení pracovního prostoru, což by mohlo vést ke kolizím. Kvůli této komplikaci jsem Robotics prozatím nevyužil. Kinematika a generování trajektorie je popsáno v kapitole 6.

7 REALIZACE

Řídící software je realizován v grafickém programovacím prostředí LabVIEW. Ovládací prostředí manipulátoru vychází z ovládání CNC zařízení. Hlavní strukturu programu pro ovládání manipulátoru jsem obdržel od vedoucího práce. Program jsem upravil pro potřeby manipulátoru Mini-swing. Parser G-kódu, který jsem použil, byl primárně vyvíjen pro jiný manipulátor. Bylo nutné jej upravit a odladit pro potřebu manipulátoru.



Obr.11 – Řídící panel.

7.1 Panel pro ovládání manipulátoru

Po zapnutí manipulátoru je nutné, aby se manipulátor dostal do výchozí polohy. Do výchozí polohy je možné najet pouze v manuálním režimu, což předchází kolizím s objekty v pracovním prostoru manipulátoru, případně s osobami v tomto prostoru. Zaznamenání polohy nulového bodu vůči každé ose manipulátoru probíhá stisknutím tlačítka „Homing“. Řízení manipulátoru je možné provádět v manuálním nebo automatickém režimu, který využívá instrukcí v G-kódu. Pro manuální ovládání slouží tlačítka pro natáčení v jednotlivých osách. Tlačítko CCW značí pohyb po směru hodinových ručiček, ACW značí směr proti směru pohybových ručiček. Manuální režim je možné zastavit pomocí tlačítka Stop. Pomocí posuvníku je možné nastavovat rychlost pohybu.

Zadávání G-kódu lze provádět pomocí editoru nebo načtením uživatelského programu ze souboru. Spouštění automatického vykonávání programu se provádí tlačítkem „Start“. Další možností spuštění programu je krokovací režim. Tento způsob řízení vyžaduje potvrzení následujícího bloku G-kódu tlačítkem „Next block“. Pro načtení předdefinovaného programu slouží tlačítko „Open“. Program je možné vypnout pomocí tlačítka „Stop“. Pozastavení Běhu programu se provádí tlačítkem „Pause“. Tlačítkem „Reset“ je možné přerušit chod programu a zároveň převést manipulátor do stavu inicializace.

Při každém spuštění manipulátoru probíhá inicializační proces, který ověřuje konfiguraci manipulátoru. Po úspěšné inicializaci manipulátor přechází do stavu Připraven, kde je připraven k další činnosti.

7.2 Ladění regulátorů

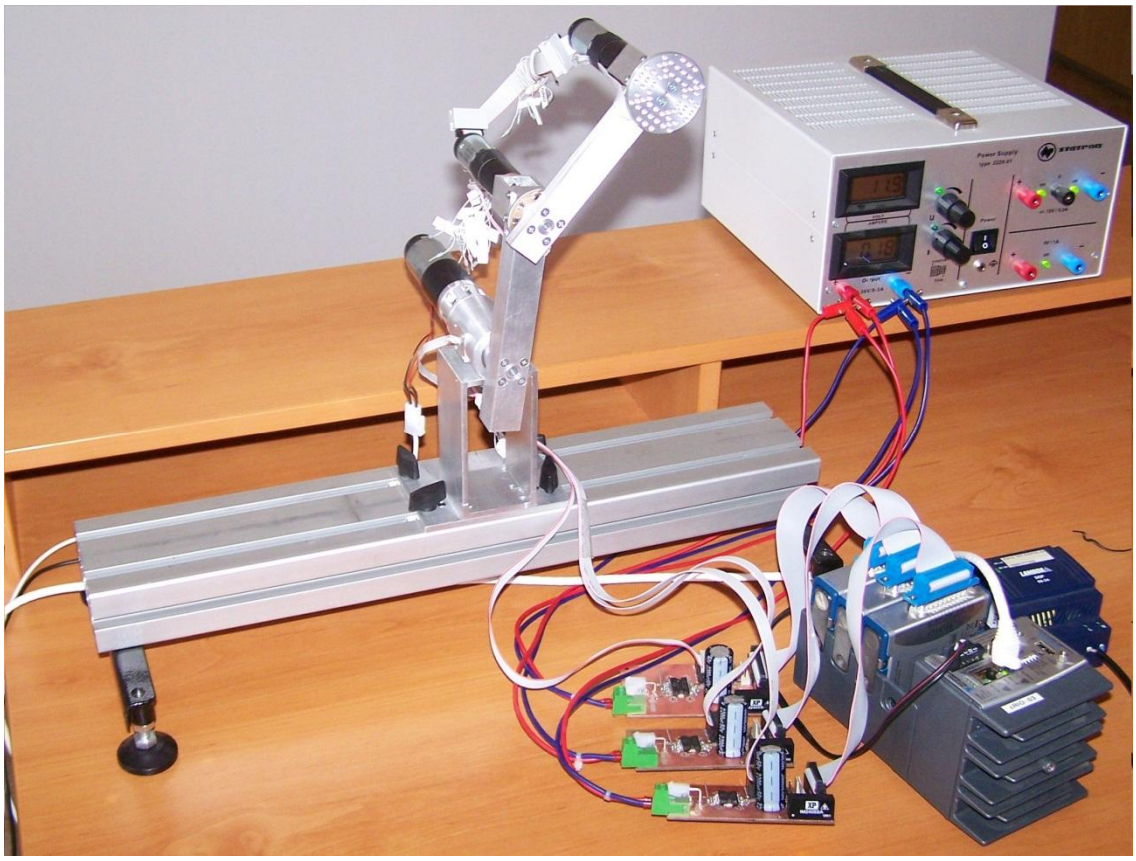
Pro ladění regulátoru byla využita manuální metoda *pokus – omyl*. Jedná se o online metodu, ladění tedy probíhá za běhu systému. Na základě předchozích znalostí jsem postupně nastavil jednotlivé parametry regulátoru. Laděním bylo dosaženo požadované kvality regulace.

7.3 DC controller

Významné množství času jsem věnoval úpravě a výrobě desky „DC controlleru“, která ovládá motor. Deska byla vylepšena o proudovou smyčku, taktéž byla celkově optimalizována. Do návrhu desky bylo potřeba zakomponovat A/D převodník a zesilovač. Tato úprava nám umožnila odečítat proud. Měření proudu je důležité pro řízení motoru. Poté byla deska vytvořena frézováním přímo na VUT. Desku jsem sám osadil a následně jsem provedl ověření správností její funkce. Při následném testování byl zaznamenán silný šum na proudovém snímači. Toto vedlo ke změně v rozmístění některých komponentů. Následně bylo vyrobeno pět kusů již upravených desek. Desky jsem taktéž osadil a otestoval. Desky mohou být nadále použity ve výuce pro řízení motorů při laboratorním cvičení.

7.4 Postup sestavení manipulátoru

Nejprve jsem prověřil funkčnost jednotlivých motorů, než byly umístěny na manipulátor. Ověřil jsem správnost chodu motorů. Poté jsem sestavil manipulátor do jeho výsledné podoby a naladil regulátory jednotlivých pohonů.



Obr.12 –Sestavený manipulátor.

8 ZÁVĚR

Podařilo se mi navrhnout a zrealizovat software pro řízení manipulátoru z bodu do bodu. Žádaná poloha se zadává do ovládacího panelu. Pro řízení manipulátoru jsem zvolil programovací jazyk G-kód. Pro jeho načítání software využívá parser, který dokáže G-kód zpracovat. Díky tomu je možné vykonat předdefinovaný pohyb efektoru po najetí do požadovaného bodu.

Na ovládacím panelu je možné manuálně měnit polohu manipulátoru a načítat jazyk G-kód. Souřadnice se zadávají v kartézských souřadnicích, které se přepočítávají na úhlové. Ovládací panel i přepočet souřadnic je realizován na PC. Regulátory jsou realizovány na realtimu. Zpracování vstupních a výstupních dat pohonů je vyřešeno na hradlovém poli FPGA.

Podařilo se rozšířit „DC controller“ o proudovou smyčku. Nyní je tedy možné měřit proud, který odebírá motor. Tato inovovaná deska bude nadále využívána v rámci laboratorního cvičení. Regulátory byly naladěny na požadovanou kvalitu regulace manipulátoru.

V práci se mi povedlo zrealizovat software pro řízení koncového efektoru manipulátoru Mini-swing. Naladil jsem jednotlivé regulátory na dostatečnou kvalitu regulace. Dále jsem inovoval „DC controller“. Manipulátor je osazen absolutními snímači polohy. Jsou sice již umístěny na motorech, zatím se je však nepodařilo zprovoznit. Do budoucna je tedy možné zprovoznit tyto snímače. Jako další rozšíření lze realizovat výpočet kinematiky pomocí modulu Robotics. To se zatím nepodařilo v plném rozsahu, jelikož jsem nebyl schopen přesně nadefinovat pracovní prostor manipulátoru.

9 POUŽITÁ LITERATURA

[1] SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2007. ISBN 978-80-248-1522-0.

[2] *Automatizace výrobních zařízení* [online], [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12135-VSZ/download/obor_stud/VSZ_-_2351054/VSZ_-_Priprava.pdf>

[3] *ABB* [online], [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www04.abb.com/global/gad/gad02007.nsf/0/65DEA9FE80B0359DC12576240058B859/$File/57509-0010B_720.jpg>

[4] SICILIANO, Bruno, Lorenzo SCIAVICCO a Luigi VILLANI. *Robotics*: *modelling, planning and control*. London: Springer, 2011, 632 s. ISBN -10 : 1846286417.

[5] MOSTÝN, Vladimír a Václav KRYS. *MECHATRONIKA PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2610-3. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FS/MePR/texty/Mechatronika%20prumyslovych%20robotu.pdf>

[6] ŠOLC, František a Luděk ŽALUD. *Robotika*. Brno: Vysoké učení v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. Dostupné z: <http://matescb.skvorsmalt.cz/robotika_kybernetika/VUT_Brno_Robotika.pdf>

[7] *National Instruments* [online], [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/372983B-01/lvrobovi/robotics_pal/>

[8] *National Instruments* [online], [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.ni.com/cms/images/devzone/tut/DaNI_2_angled.jpg>

[9] PRAŽÁK, Ondřej. *Ovládací software manipulátoru Mini-Swing*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing.Pavel Houška, Ph.D.

[10] *Katalog MAXTON, Maxton Program 08/09*.

[11] *Intex* [online], [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.intexconnect.com/media/images/products/maxon-motor/maxon-motor-re-max1.jpg>

[12] *Číslicové regulátory* [online], [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: https://moodle.dce.fel.cvut.cz/pluginfile.php/1700/mod_resource/content/0/_slicov_-regul_tory.doc