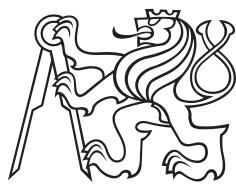


Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra kybernetiky

Čištění obuvi robotem

Využití silově poddajného robota na čištění bot

Valentýn Číhala

Vedoucí: Ing. Vladimír Smutný, Ph.D.

Obor: Robotika

Studijní program: Kybernetika a robotika

Květen 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Číhalá** Jméno: **Valentýn** Osobní číslo: **456152**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra kybernetiky**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Studijní obor: **Robotika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Čištění obuvi robotem

Název bakalářské práce anglicky:

Robotic Shoe Cleaning

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s robotem Kuka LBR, systémem ROS a poddajností robotů.
2. Navrhněte a implementujte v prostředí ROS modul pro řízení poddajných pohybů robotu Kuka LBR.
3. Řešení demonstreujte na úloze kartáčování obuvi nebo na podobné úloze.
4. Proveďte experimenty a výsledky vyhodnoťte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] I. Kuhleemann, A. Schweikard, P. Jauer, and F. Ernst Robust Inverse Kinematics by Configuration Control for Redundant Manipulators with Seven DoF, International Conference on Control, Automation and Robotics, 2016.
[2] Andrea Calanca, Riccardo Muradore, and Paolo Fiorini: A Review of Algorithms for Compliant Control of Stiff and Fixed-Compliance Robots. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics (Volume: 21, Issue: 2, April 2016).

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Vladimír Smutný, Ph.D., robotické vnímání CIIRC

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **13.12.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Vladimír Smutný, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Tomáš Svoboda, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Rád bych věnoval poděkování panu Ing. Vladimíru Smutnému, Ph.D. za podporu při psaní této bakalářské práce a za jeho cenné rady. Rád bych také poděkoval Ing. Vladimíru Petríkovi a Ing. Pavlu Krskovi, Ph.D. za pomoc s robotem a jejich cenné rady. Stejně tak bych rád poděkoval celému oddělení Robotika a strojové vnímání v Českém institutu informatiky, robotiky a kybernetiky za pomoc při realizaci experimentů. Ještě bych rád poděkoval mé rodině a bližním za podporu během psaní bakalářské práce.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 10. května 2018

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá využitím robota LBR KUKA iiwa 7 na čištění bot. Na začátku práce je popsán použitý robot spolu s jeho řídící jednotkou a vybavením. Část práce se zabývá výpočtem inverzní kinematické úlohy robota, která byla v rámci práce i implementovaná v jazyce C++. Hlavní část se věnuje využití silové poddajnosti při čištění bot a problematiky čištění. Závěr zhodnotí naměřené hodnoty při experimentech.

Klíčová slova: silová poddajnost, KUKA, robot, čistič bot, inverzní, kinematika

Vedoucí: Ing. Vladimír Smutný, Ph.D.
Český institut informatiky, robotiky a
kybernetiky, ČVUT,
Jugoslávských partyzánů 3,
160 00 Praha 6

Abstract

This thesis focusses on using the LBR KUKA iiwa 7 robot for the purpose of shoes cleaning. The thesis starts with a description of the robot and its control unit. The inverse kinematic method for the robot is explained afterwards. The main part of the thesis concerns itself with the use of force compliance for the cleaning of shoes, and connected problems that arise. The experiments on the robot were performed and measured values are discussed in the conclusion.

Keywords: compliance, KUKA, robot, shoe, inverse kinematics, shoe cleaner

Title translation: Robotic Shoe Cleaning — Using of compliance robot as shoe cleaner

Obsah

Seznam použitých zkratek	1	3.1 Řízení robota	16
1 Úvod	3	3.2 První úroveň	16
2 LBR KUKA iiwa 7	5	3.2.1 Řídící aplikace běžící v řídící jednotce	16
2.1 Popis robota	5	3.2.2 FRI - C++ rozhraní pro řízení pohybu robota	16
2.2 Denavitova–Hartenbergova notace	7	3.2.3 Řídící systém reálného času	17
2.3 Senzory kroutících momentů v kloubech	9	3.2.4 Řídící algoritmus	17
2.4 Řídící jednotka KUKA Sunrise Cabinet	9	3.3 Druhá úroveň	17
2.5 Dotykový ovládací panel SmartPAD	10	3.3.1 ROS	17
2.6 Rozšířená příruba robota	10	3.3.2 Vizualizace v Rviz	18
2.7 Rozvodná skříň na vstupní a výstupní signály řídící jednotky	11	3.3.3 MoveIt	18
2.8 Externí tlačítko nouzového zastavení	11		
2.9 Propojení externích tlačítek nouzového zastavení	12		
3 Popis systémů a jejich propojení u robota	15		
4.1 Popis kinematiky robota KUKA LBR iiwa 7 a parametrizace redundantnosti	19		
4.2 Inverzní kinematická úloha	22		
4.3 Singulární polohy	22		
5 Implementace inverzní kinematické úlohy	25		

5.1 Úhel mezi vektory	25	8 Implementace poddajné admitanční zpětné vazby	43
5.2 Výpočet úhlu δ	26	8.0.1 Matematický popis poddajného chování robota	44
5.3 Postup implementace inverzní kinematické úlohy.....	28	8.0.2 Jacobiho matice	45
5.4 Testování inverzní kinematické úlohy.....	32	8.1 Implementace poddajné zpětné admitanční vazby	46
5.5 Závěr inverzní kinematické úlohy	32	8.1.1 Implementace odchylkového proporcionálního regulátor	47
6 Montáž motoru s kartáčem na robota KUKA LBR iiwa 7 pro čištění bot	35	9 Experimenty	49
6.1 Výběr rotačního kartáče	35	9.1 Testování Jacobiho matice pro použití v poddajné zpětné vazbě ..	49
6.2 Rozebrání a uchycení čistícího kartáče na robota	36	9.2 Měření nepřesností řídících sil ..	50
6.3 Elektrické zapojení motoru.....	37	9.3 Přechodová charakteristika prvního kloubu	52
7 Silová poddajnost	39	9.4 Testování proporcionálního regulátoru pomocí simulovaných sil	53
7.1 Poddajná zpětná vazba	39	9.4.1 Testování proporcionálního regulátoru pomocí simulovaných sil v ose x	56
7.1.1 Impedanční zpětná vazba ...	40	9.4.2 Testování proporcionálního regulátoru pomocí simulovaných sil v ose y	57
7.1.2 Admitanční zpětná vazba ...	41	9.4.3 Testování proporcionálního regulátoru pomocí simulovaných sil v ose z	58
7.1.3 Hybridní řízení	41		
7.2 Klouby s pružným členem	42		

9.4.4 Testování proporcionálního regulátoru pomocí simulovaných sil při nižších hodnotách tuhosti zpětné vazby	59
9.5 Testování proporcionálního regulátoru na reálných silách	61
9.6 Testování proporcionálního regulátoru se zapnutým čistícím motorem s kartáčem	63
10 Závěr	67
A Literatura	69
B Přílohy	71
Seznam příloh na DVD	71
C Zadání práce	75

Obrázky

2.1 Robot LBR KUKA iiwa 7 [616] . . .	6	3.1 Schéma zapojení dvou robotů R1 a R2 v laboratoři RMP s řídícími jednotkami KRC1 a KRC2 (KUKA Robotic Controller), které jsou připojené přes FRI (Fast Robotic Interface) do ethernetového přepínače. Roboti jsou řízeni pomocí řídícího algoritmu, který běží v systému reálného času CapekPc0. Do systém reálného času jsou pomocí ROS Topic posílané trajektorie a parametry řízení ze strany uživatelů [Vladimír Petrík].	15
2.2 Řez pracovním obálkou robota KUKA LBR iiwa 7 v rovině xz s rozměry [516].	8	3.2 Vizualizace dvou robotů Čapků v Rviz. Model jednotlivých robotických rámů byl převzat z iiwa stack repozitare [HFV ⁺ 16].	18
2.3 Řez pracovní obálkou robota KUKA LBR iiwa 7 ve výšce 0.34 m nad rovinou xy s vyznačeným maximálním natočením prvního kloubů ($-170, 170$) [$^{\circ}$] [516].	8	4.1 Robot s vyzobrazenými body B, S, E, W, F a A a klouby 1 až 7.	20
2.4 KUKA Sunrise Cabinet [816].	10	4.2 Ukázka redundantnosti robota robota KUKA LBR iiwa 7 a kružnice na, které se může nacházet bod, a pořád bude splňovat polohu a natočení příruby.	21
2.5 KUKA SmartPAD s tlačítkem nouzového zastavení a 6D joystickem [18].	10	4.3 Dvě polohy robota prezentující úhel $\delta = 45^{\circ}$, jež svírají vektory \overrightarrow{AE} a $\overrightarrow{AE_0}$	21
2.6 Rozšířená příruba pro uchycení chapadla, nástroje a nebo snímače.	11	4.4 Ukázka dvou kloubů jejichž osy leží v jedné přímce a stává se z nich jeden kloub.	23
2.7 Rozvodná skříň s vyvedenými 40-ti vstupy a výstupy do svorkovnice a seřazené podle dokumentace [616].	12	5.1 Poloha bodu A (zelený) v blízkosti osy z při splnění podmínky [5.29], při které nelze vypočítat úhel γ	27
2.8 Zapojení tlačítka nouzového zastavení do rozvodné skříně na vstupní signál řídicí jednotky [616].	12		

5.2 Postup výpočtu bodu E_{0° . Parametry k , v a l k výpočtu bodu E_{0° od bodu A . Úhel α , který svírá vektor \vec{SA} s plochou xy . Vektor $\vec{SA_p}$ svírající úhel γ s osou x	27	8.2 Regulační schéma s poddajnou zpětnou admitanční vazbou a odchylkovým proporcionalním regulátorem implementováno v programovacím jazyce C++.	46
5.3 Vektory $\vec{n_1}$, $\vec{n_2}$ a rovina ρ . Vektory $\vec{SP_1}$ a $\vec{SP_2}$ svírající s vektorem \vec{SP} úhly Θ_{31} a Θ_{32}	30		
6.1 Čistič bot SPO-17C Klarstein. . .	36	9.1 Schéma pro testování Jacobiho matice pro použití v poddajné zpětné vazbě. Na vstupu jsou simulované odchylky $\vec{x_d}$, které jsou přepracovány na kloubové odchylky $\vec{\Theta_d}$. Na výstupu jsou vypočtené odchylky $\vec{x_{d,v}}$, které jsou porovnávány se požadovanými simulovanými odchylkami $\vec{x_d^*}$. Kontroluje se jestli byly kloubové odchylky $\vec{\Theta_d}$ správně vypočtené.	49
6.2 Čisticí motor připevněný přes kovou spojku k hliníkové podložce a rozšířené přírubě. Osa motoru je otočena od osy příruby x o 45° . . .	36		
7.1 Rozdíl mezi impedanční a admitanční zpětnou vazbou podle tuhosti prostředí [OMN10].	40	9.2 Porovnání požadovaných $\vec{x_d^*}$ a vypočtených $\vec{x_{d,v}}$ odchylek, při zkoumání Jacobiho matice pro použití v poddajné zpětné vazbě. . .	50
7.2 Regulační schéma robota s impedanční zpětnou [OMN10]. . .	40	9.3 Vykonaná trajektorie T_1 při měření nepřesnosti řídících sil $\vec{\tau}_{c,\epsilon}(\vec{\Theta})$. . .	51
7.3 Regulační schéma robota s admitanční zpětnou vazbou [OMN10].	41	9.4 Zaznamenané odchylky $\vec{\tau}'_d$ jednotlivých kloubů během pohybu po trajektorii T_1 při měření nepřesnosti řídících sil $\vec{\tau}_{c,\epsilon}(\vec{\Theta})$. . .	51
7.4 Regulační schéma hybridního řízení s přepínáním mezi impedanční a admitanční zpětnou vazbou podle řešeného problému [OMN10].	41	9.5 Poloha $P_1 = [0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$ kdy byl robot nejmíň zatížen a poloha $P_2 = [0, \pi/2, 0, 0, 0, 0]^T$ kdy byl nejvíce zatížen. Polohy při testování přechodové charakteristiky prvního motoru a požadovaného skoku o velikosti $\Theta_{c,1} = 0.017$ rad.	52
8.1 Ukázka jak by se měl robot chovat jako pružina. Červená - trajektorie poddajného robota opisující tvar boty. Světle modrá - naplánovaná trajektorie $\vec{x_t}$. Odchylky $\vec{x_d}$ od rovnovážného bodu trajektorie $\vec{x_t}$.	44		

9.6 Porovnání přechodových charakteristik zaznamenané kloubové souřadnice $\Theta_{m,1}$ prvního kloubu ...	53	9.12 Přechodová charakteristika vypočtených $\overrightarrow{x_{d,v}}$ a reálných $\overrightarrow{x_{d,r}}$ odchylek při testování proporcionálního regulátoru pomocí simulovaných sil v ose z v bodě příruby F	58
9.7 Regulační schéma pro testování proporcionálního regulátoru pomocí simulovaných sil \vec{F}_d působících v bodě příruby F . Porovnávaly se rozdíly mezi reálnými $\overrightarrow{x_{d,r}}$ a vypočtenými $\overrightarrow{x_{d,v}}$ odchylkami.	54	9.13 Simulované externí síly \vec{F}_d v bodě příruby F střídavě pro záporný a kladný směr pro každou z os x , y a z při testování proporcionálního regulátoru pomocí simulovaných sil v bodě příruby F se sníženou tuhostí poddajné zpětné vazby.	59
9.8 Poloha robota $P_3 = [0, 0.3928, 0, -1.1781, 0, 1.5709, 0]^T$ při testování proporcionálního regulátoru pomocí simulovaných sil \vec{F}_d působících v bodě příruby F	54	9.14 Porovnání vypočtených $\overrightarrow{x_{d,v}}$ a reálných $\overrightarrow{x_{d,r}}$ odchylek při testování regulátoru na simulovaných silách se sníženou tuhostí poddajné zpětné vazby.	60
9.9 Simulované externí síly \vec{F}_d v bodě příruby F střídavě pro záporný a kladný směr pro každou z os x , y a z při testování proporcionálního regulátoru pomocí simulovaných sil v bodě příruby F	55	9.15 Regulační schéma pro testování proporcionálního regulátoru na reálných silách \vec{F}_d . Porovnávaly se rozdíly mezi reálnými $\overrightarrow{x_{d,r}}$ a vypočtenými $\overrightarrow{x_{d,v}}$ odchylkami.	61
9.10 Přechodová charakteristika vypočtených $\overrightarrow{x_{d,v}}$ a reálných $\overrightarrow{x_{d,r}}$ odchylek při testování proporcionálního regulátoru pomocí simulovaných sil v ose x v bodě příruby F	56	9.16 Zaznamenané externí síly \vec{F}_d v bodě příruby F , střídavě záporný a kladný směr pro každou z os y , z a x	62
9.11 Přechodová charakteristika vypočtených $\overrightarrow{x_{d,v}}$ a reálných $\overrightarrow{x_{d,r}}$ odchylek při testování proporcionálního regulátoru pomocí simulovaných sil v ose y v bodě příruby F	57	9.17 Vypočtené $\overrightarrow{x_{d,v}}$ a reálné $\overrightarrow{x_{d,r}}$ odchylky při testování proporcionálního regulátoru na reálných silách.	62
		9.18 Vliv zapnutí a vypnutí čistícího motoru s kartáčem na externí síly \vec{F}_d	64

9.19	Vliv čištění na externí síly \vec{F}_d se zapnutou poddajnou zpětnou vazbou.	65
9.20	Vypočtené $\vec{x}_{d,v}$ a reálné $\vec{x}_{d,r}$ odchylky při testování proporcionálního regulátoru se zapnutým čistícím motorem a poddajnou zpětnou vazbou.	65
B.1	Výkres rozšířené příruby s rozměry umístěné na robotovi KUKA LBR iiwa 7 [Daniel Seifert, Vladimír Smutný].	72
B.2	Schéma propojení řídící jednotky s rozvodnou skříní pomocí 40-ti žilového kabelu.	72
B.3	Propojení tlačítek nouzového zastavení dvou řídících jednotek, přes jejich rozvodné skříně č.1 a č.2 pomocí propojovacího kabelu [616].	73
B.4	Otvory v kovové spojce pro připevnění motoru k rozšířené přírubě a rozměry vyvrtaných děr pro uchycení čistícího motoru k rozšířené přírubě robota.	73
B.5	Elektrické schéma zapojení motoru do rozvodné sítě [nálepka na straně čistícího motoru] se startovacím kondenzátorem.	74

Tabulky

2.1	Základní parametry robota KUKA LBR iiwa 7 [516].	6
2.2	Parametry jednotlivých kloubů robota KUKA LBR iiwa 7 [516].	6
2.3	Denavitovy–Hartenbergovy parametry pro robota KUKA LBR iiwa 7.	7

Seznam použitých zkratek

LBR	Leichtbauroboter
Iiwa	Intelligent industrial work assistant
RMP	Robot Machine Perception
KRC	KUKA Robot Controller
FRI	Fast Robotic Interface
ROS	Robotic Operation System
KLI	KUKA Line Interface

Kapitola 1

Úvod

Využití robotů v každém lidském odvětví se každým dnem zvyšuje. V některých odvětvích roboti lidské pracovníky už plně nahradili, obzvlášť v průmyslu, kde se klade důraz na rychlosť, přesnost a cenu. Roboti také unesou ve srovnání s člověkem mnohem těžší předměty a mohou pracovat ve zdraví nebezpečném prostředí. Automatizace je využívaná ve firmách už dlouho, ale většinou šlo o masovou výrobu, kde je činnost každého robota přesně definovaná. Pokud se nějaká část procesu pokazí nebo dojde k nějaké nepřesnosti, dochází k výrobě zmetkového kusu. Člověk se s nepřesnostmi setkává každý den, je schopný se přizpůsobovat a ovlivňovat svojí činnost, používá k tomu oči, hmat, čich, sluch a chuť. Proto se v poslední době vyvíjí roboti rozšíření o různé senzory, aby byli stejně jako člověk schopní kompenzovat svojí činnost podle nepřesnosti okolního světa. Tyto přidané vlastnosti dávají robotovi možnost bezpečně spolupracovat s člověkem.

Cílem této práce je využití robota KUKA LBR iiwa 7 při čištění bot. Robot je schopný měřit externí kroutící momenty v každém kloubu, čímž je schopný detekovat, že se něčeho dotýká. Využitím této vlastnosti se bude korigovat trajektorie podle tvaru boty. Začátek se věnuje inverzní kinematice pro určení korigované trajektorie.

Hlavní přínos bakalářské práce je vyvedení vstupů a výstupů robota do rozvodné skříně s připojeným tlačítkem nouzového zastavení, inverzní kinematická úloha, poddajná zpětná vazba do řídící smyčky robota.

Kapitola 2

LBR KUKA iiwa 7

V téhle části je popsán robot KUKA LBR iiwa 7, řídící jednotka, vybavení robota a rozšířená příruba. Pak jsou popsány vylepšení, která vznikla během této bakalářské práce. Jedná se o vyvedení vstupů a výstupů do rozvodné skříně. Připojení tlačítka nouzového zastavení do rozvodné skříně. Propojení tlačítek nouzového zastavení dvou robotů pro případnou spolupráci.

■ 2.1 Popis robota

Robot KUKA LBR iiwa 7, který je zobrazen na obrázku [2.1], je robot schopný spolupráce s člověkem díky vestavěným senzorům kloubových momentů. Robot je schopný zaznamenat vnější působící síly a kolize s okolním světem. LBR je německá zkratka pro robota lehké konstrukce ("Leichtbauroboter") a iiwa znamená "intelligent industrial work assistant" [4]. Robot v laboratoři RMP dostal jméno Čapek. Parametry robota KUKA LBR iiwa 7 jsou zobrazeny v tabulce [2.1]. Každý kloub má definovanou maximální rychlosť a rozsah pohybu pro každý kloub viz tabulka [2.2].



Obrázek 2.1: Robot LBR KUKA iiwa 7 [616].

Nosnost	7 kg
Maximální dosah	800 mm
Počet ovladatelných os	7
Přenos opakovaného pohybu	± 0.1 mm
Hmotnost	22 kg
Montážní poloha	Podlaha/Stěna/Strop
Pracovní teplota prostředí	5 °C až 45 °C
Krytí	IP 54

Tabulka 2.1: Základní parametry robota KUKA LBR iiwa 7 [516].

Kloub	Max. rychlosť v_m [°/s]	Min. úhel Θ_{min} [°]	Max. úhel Θ_{max} [°]
1	98	170	-170
2	98	120	-120
3	100	170	-170
4	130	120	-120
5	140	170	-170
6	180	120	-120
7	180	175	-175

Tabulka 2.2: Parametry jednotlivých kloubů robota KUKA LBR iiwa 7 [516].

2.2 Denavitova–Hartenbergova notace

Denavitova–Hartenbergova notace [1318] je konvence na popisování otevřených kinematických řetězců pomocí čtyř parametrů pro každý kloub. Pomocí parametrů lze dopočítat matice polohy a natočení příruby robota 0T_7 :

$${}^0T_7 = \left[\begin{array}{ccc|c} {}^0R_7 & \overrightarrow{{}^0t_7} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right], \quad (2.1)$$

kde 0R_7 je rotační matice 3x3 a $\overrightarrow{{}^0t_7} = [x, y, z]$ je translační vektor 3x1 viz rovnice. Rovnice pro výpočet matice příruby vypadá následovně:

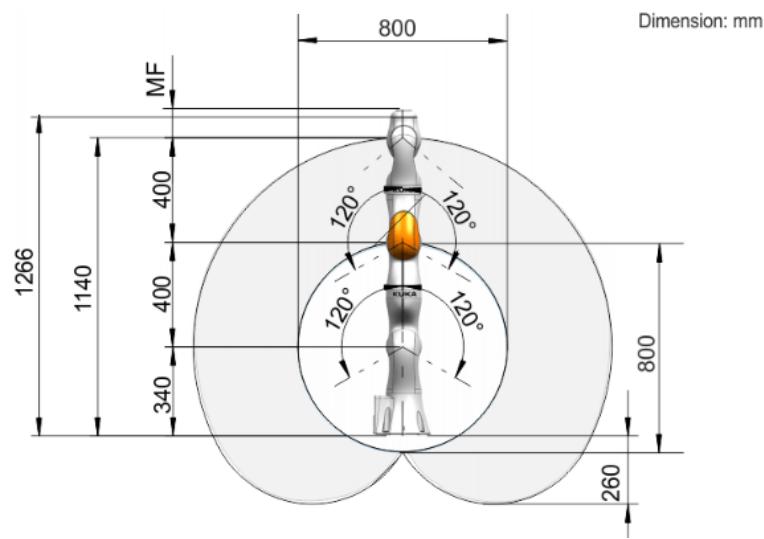
$${}^0T_7 = \prod_{i=1}^7 \left[\begin{array}{ccc|c} \cos(\Theta_i + \theta_i) & -\sin(\Theta_i + \theta_i) \cos \alpha_i & \sin(\Theta_i + \theta_i) \sin \alpha_i & r_i \cos(\Theta_i + \theta_i) \\ \sin(\Theta_i + \theta_i) & \cos(\Theta_i + \theta_i) \cos \alpha_i & -\cos(\Theta_i + \theta_i) \sin \alpha_i & r_i \sin(\Theta_i + \theta_i) \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right], \quad (2.2)$$

kde Θ_i je natočení i-tého kloubu a d_i , a_i , α_i a θ_i jsou parametry robota uvedené v tabulce 2.3.

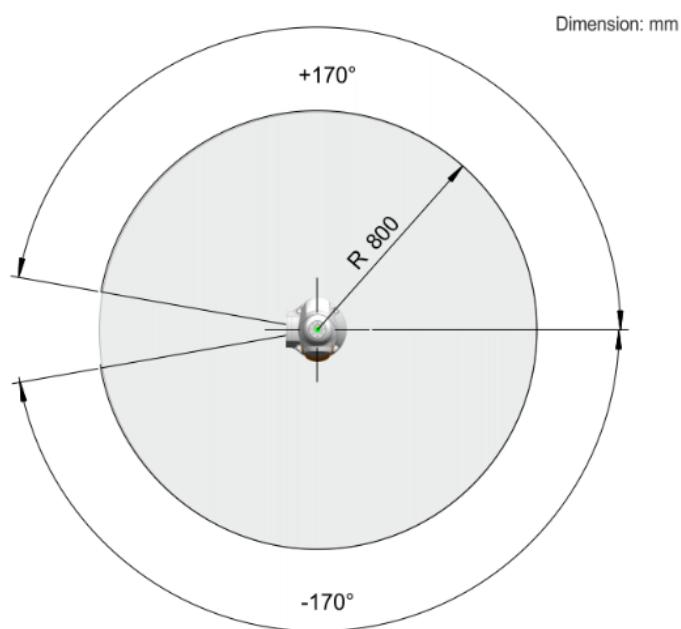
Číslo kloubu	Typ kloubu	θ_i [rad]	d_i [m]	a_i	α_i [rad]
1	Rotační	0	0.34	0	$-\pi/2$
2	Rotační	0	0	0	$\pi/2$
3	Rotační	0	0.4	0	$\pi/2$
4	Rotační	0	0	0	$-\pi/2$
5	Rotační	0	0.4	0	$-\pi/2$
6	Rotační	0	0	0	$\pi/2$
7	Rotační	0	0.126	0	0

Tabulka 2.3: Denavitovy–Hartenbergovy parametry pro robota KUKA LBR iiwa 7.

Robot KUKA LBR iiwa 7 má definovanou pracovní obálku viz obrázky 2.2 a 2.3.



Obrázek 2.2: Řez pracovním obálkou robota KUKA LBR iiwa 7 v rovině xz s rozměry [516].



Obrázek 2.3: Řez pracovní obálkou robota KUKA LBR iiwa 7 ve výšce 0.34 m nad rovinou xy s vyznačeným maximálním natočením prvního kloubů $(-170, 170)^\circ$ [516].

2.3 Senzory kroutících momentů v kloubech

Robot je schopný měřit kroutící moment v každém z kloubů. Senzory měří kroutící momenty $\vec{\tau}_m(\vec{\Theta})$ závislé na kloubových souřadnicích $\vec{\Theta}$:

$$\vec{\tau}_m(\vec{\Theta}) = \vec{\tau}_g(\vec{\Theta}) + \vec{\tau}_n(\vec{\Theta}) + \vec{\tau}_d(\vec{\Theta}), \quad (2.3)$$

kde $\vec{\tau}_g(\vec{\Theta})$ jsou kroutící momenty na kompenzaci gravitačního zrychlení, $\vec{\tau}_n(\vec{\Theta})$ jsou dynamické kroutící momenty, které řídící jednotka používá k řízení robota a $\vec{\tau}_d(\vec{\Theta})$ jsou externí kroutící momenty. Momenty $\vec{\tau}_g(\vec{\Theta})$ a $\vec{\tau}_n(\vec{\Theta})$ lze sloučit do řídících momentů $\vec{\tau}_c(\vec{\Theta})$:

$$\vec{\tau}_c(\vec{\Theta}) = \vec{\tau}_g(\vec{\Theta}) + \vec{\tau}_n(\vec{\Theta}). \quad (2.4)$$

Řídící momenty jsou vypočítávané na základě modelu robota. Řízené síly $\vec{\tau}_c(\vec{\Theta})$ obsahují nepřesnosti řízených sil $\vec{\tau}_{c,\epsilon}(\vec{\Theta})$ z důvodu nepřesností v parametrech modelu robota. Zároveň senzory kloubových momentů obsahují nepřesnosti měření $\vec{\tau}_{s,\epsilon}$.

$$\vec{\tau}_m(\vec{\Theta}) = \vec{\tau}_c(\vec{\Theta}) + \vec{\tau}_d(\vec{\Theta}) + \vec{\tau}_{c,\epsilon}(\vec{\Theta}) + \vec{\tau}_{s,\epsilon}. \quad (2.5)$$

Celková nepřesnost kroutících momentů je:

$$\vec{\tau}_\epsilon(\vec{\Theta}) = \vec{\tau}_{c,\epsilon}(\vec{\Theta}) + \vec{\tau}_{s,\epsilon}. \quad (2.6)$$

Řídící jednotka přes FRI posílá do systému reálného času momenty $\vec{\tau}_c(\vec{\Theta})$, $\vec{\tau}_m(\vec{\Theta})$ a jejich rozdíl externí momenty $\vec{\tau}_d(\vec{\Theta})$, které zahrnují celkovou nepřesnost kroutících momentů $\vec{\tau}_\epsilon(\vec{\Theta})$.

$$\vec{\tau}_d(\vec{\Theta}) = \vec{\tau}_m(\vec{\Theta}) - \vec{\tau}_c(\vec{\Theta}) + \vec{\tau}_\epsilon(\vec{\Theta}). \quad (2.7)$$

2.4 Řídící jednotka KUKA Sunrise Cabinet

KUKA Sunrise Cabinet, dále řídící jednotka, je systém navržený pro řízení robotů s lehkou konstrukcí od firmy KUKA viz obrázek 2.4. Byl navrhován jako bezúdržbový a všechny potřebné komponenty nese v sobě. Na přední části se dají najít konektory na připojení kabelů robota, dvě sítová připojení, Ethercat, konektor pro vstupy a výstupy, DVI konektor pro připojení monitoru a dvě USB. V řídící jednotce běží jádro reálného času obstarávající řízení robota a jádro s embedded Windows [816].



Obrázek 2.4: KUKA Sunrise Cabinet [816].

■ 2.5 Dotykový ovládací panel SmartPAD

KUKA smartPAD je dotykový ovládací panel zobrazený na obrázku 2.5. Zobrazuje podstatné informace o robotovi: polohu kloubů, externí síly, bezpečnostní stav a další informace. Pomocí panelu lze ručně zvolit program, který bude robot vykonávat. Robota lze z panelu ovládat pomocí tlačítek na boku nebo 6D joystickem. V horní části se nachází tlačítko pro nouzové zastavení [18].



Obrázek 2.5: KUKA SmartPAD s tlačítkem nouzového zastavení a 6D joystickem [18].

■ 2.6 Rozšířená příruba robota

Pro potřeby oddělení RMP byla příruba robota rozšířena o příruba s větším poloměrem, na kterou lze připevňovat nástroje, chapadla a snímače, viz obrázek 2.6. Výkres s rozměry příruby v příloze B.1. Váha příraby je 346g i se šrouby. Váha se bude projevovat sílou $F_{d,f,z}$ v záporném směru osy z :

$$F_{d,f,z} = 0.346 \cdot 9.81 = 3.394 \text{ N}. \quad (2.8)$$



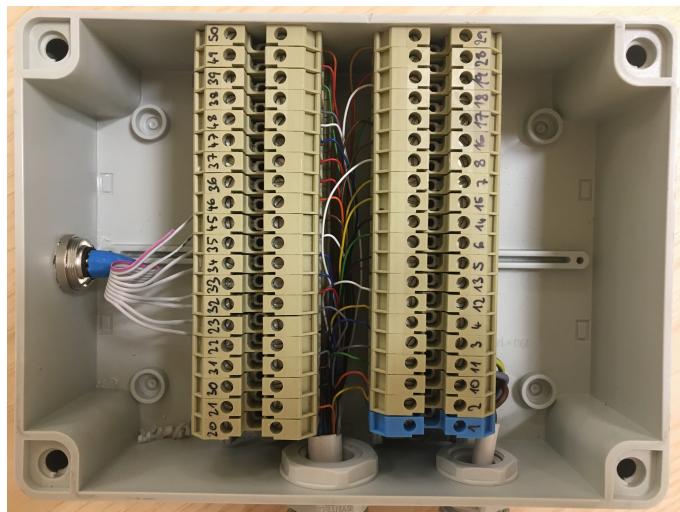
Obrázek 2.6: Rozšířená příruba pro uchycení chlapadla, nástroje a nebo snímače.

■ 2.7 Rozvodná skříň na vstupní a výstupní signály řídící jednotky

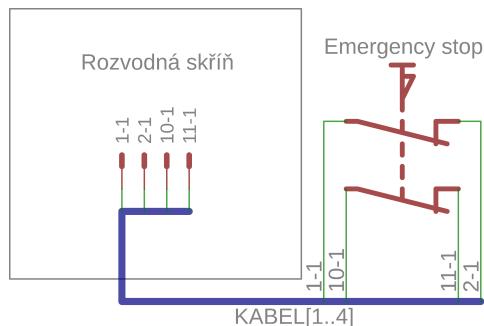
Aby se dalo využívat vstupů a výstupů řídící jednotky, musely se jednotlivé signály vyvést do rozvodné skříně. Proto se zvolila svorkovnice, kterou lze připevnit na DIN lištu. Svorkovnice byla umístěna do plastové rozvodné skříně. Signálů je celkově 40 a z řídící jednotky jsou vedeny 40-ti žilovým kabelem skrz průchodku v rozvodné skříně do 40 svorek, viz obrázek 2.7. Vodiče jsou ve svorkovnici seřazeny tak, aby odpovídaly nastavení signálů podle firmy KUKA [616]. Elektrické schéma připojení rozvodné skříně v příloze B.2. Do rozvodné skříně lze připojit další libovolné zařízení a kabel vyvést pomocí průchodky.

■ 2.8 Externí tlačítko nouzového zastavení

Robot disponuje pouze jedním tlačítkem pro nouzové zastavení, umístěným na SmartPADu. Proto bylo přidáno externí tlačítko pro nouzové zastavení a připojilo se do rozvodné skříně viz obrázek 2.8. Je to rozpínací tlačítko s aretací při zmačknutí a se dvěma okruhy [616]. Tlačítka byly přiřazeny signály 1, 2, 10 a 11.



Obrázek 2.7: Rozvodná skříň s vyvedenými 40-ti vstupy a výstupy do svorkovnice a seřazené podle dokumentace [616].



Obrázek 2.8: Zapojení tlačítka nouzového zastavení do rozvodné skříně na vstupní signál řídící jednotky [616].

■ 2.9 Propojení externích tlačítek nouzového zastavení

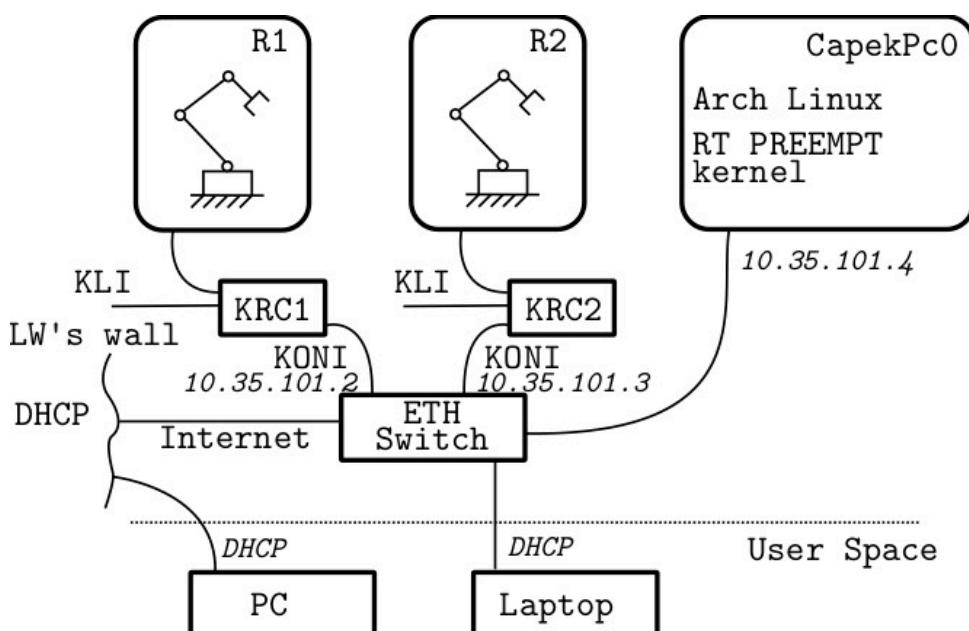
V laboratoři RMP se nacházejí dva roboti KUKA LBR iiwa 7 a při jejich kooperaci je potřeba v případě nebezpečné situace vypnout oba roboty najednou pomocí libovolného emergency stop tlačítka. Řídící jednotky se propojily křížem tak, aby řídící jednotka KRC1 měla na vstupu výstup z řídící jednotky KRC2. Elektrický schéma propojení obou řídících jednotek v příloze B.3. Při zmáčknutí jednoho z tlačítek nouzového zastavení, řídící jednotka zmáčknutého tlačítka rozpojí svůj výstup viz obrázek v příloze (tlačítko s kolečkem) B.3, čímž rozpojí obvod druhé řídící jednotky a zastaví se tím obě řídící jednotky. V případě, že nejsou roboti umístěni vedle sebe, umístí se

..... 2.9. Propojení externích tlačítek nouzového zastavení

místo propojovacího kabelu propojka, která propojí obvody.

Kapitola 3

Popis systémů a jejich propojení u robota



Obrázek 3.1: Schéma zapojení dvou robotů R1 a R2 v laboratoři RMP s řídícími jednotkami KRC1 a KRC2 (KUKA Robotic Controller), které jsou připojené přes FRI (Fast Robotic Interface) do ethernetového přepínače. Roboti jsou řízeni pomocí řídícího algoritmu, který běží v systému reálného času CapekPc0. Do systému reálného času jsou pomocí ROS Topic posílané trajektorie a parametry řízení ze strany uživatelů [Vladimír Petrík].

3.1 Řízení robota

Řízení robota má dvě úrovně. V první úrovni se nachází řídící systém reálného času CapekPc0 a řídící jednotky robotů KRC1 a KRC2 (KUKA Robotic Controller) viz obrázek 3.1. Druhá úroveň obsahuje plánování v MoveIt a vizualizaci Rviz v systému ROS (Robot Operating System).

3.2 První úroveň

3.2.1 Řídící aplikace běžící v řídící jednotce

Řídící aplikace je napsaná v programovacím jazyce Java a běží v řídících jednotkách KRC1 a KRC2, viz obrázek 3.1. Aplikace zprostředkovává připojení řízení robota k FRI (Fast Robotic Interface). Pro programování aplikací a potřeby robota firma KUKA upravila programovací program Eclipse a pojmenovala ho KUKA Sunrise Workbench dále Workbench. Workbench obsahuje veškeré potřebné nástroje na programování, nastavování a seřizování robota. Aplikace a nastavení lze nahrávat do robota přes KLI (KUKA Line Interface) [616].

3.2.2 FRI - C++ rozhraní pro řízení pohybu robota

FRI (Fast Robotic Interface) je rozhraní implementované v jazycích C++ pro řízení robotů KUKA z externích systémů. Komunikace je založena na síťovém protokolu a robot může být řízen přes ethernetovou síť. Komunikace mezi řídící jednotkou a externím řídícím systémem CapekPc0 viz obrázek 3.1 probíhá v periodě 10 ms pro řízení pomocí kloubových souřadnic nebo 5 ms pro řízení za pomoci kroutících momentů. Ze strany robota přicházejí informace o jeho stavu jednou za periodu. Informace obsahují měřenou polohu kloubů $\vec{\Theta}_m$, řízenou polohu kloubů $\vec{\Theta}_c$, měřený kroutící momenty v kloubech $\vec{\tau}_m$, řízené kroutící momenty v kloubech $\vec{\tau}_c$ a externí kroutící momenty v kloubech $\vec{\tau}_d$ [816].

■ 3.2.3 Řídící systém reálného času

Řídící systém reálného času obstarává napojení FRI do ROS systému. Systém reálného času určuje, který řídící algoritmus právě řídí robota (follow joint trajectory [12], external torque limit [Vladimír Petrík], gravity compensation [Vladimír Petrík], compliance mode). Řídící algoritmus každých 10 ms vypočítává další krok robota na základě požadované trajektorie, měřené polohy a externích sil.

■ 3.2.4 Řídící algoritmus

Úkolem řídícího algoritmu je vypočítat nové kloubové souřadnice pro každou periodu. Při pohybu po trajektorii, řídící algoritmus trajektorii approximuje pomocí spline křivky a vzorkuje po 10 ms. Pokud dojde k překročení maximální rychlosti kloubů, řídící algoritmu pohyb zastaví. Řídící algoritmus kontroluje jestli nejsou řízené kloubové souřadnice nebo řízené kroutící momenty mimo meze [12].

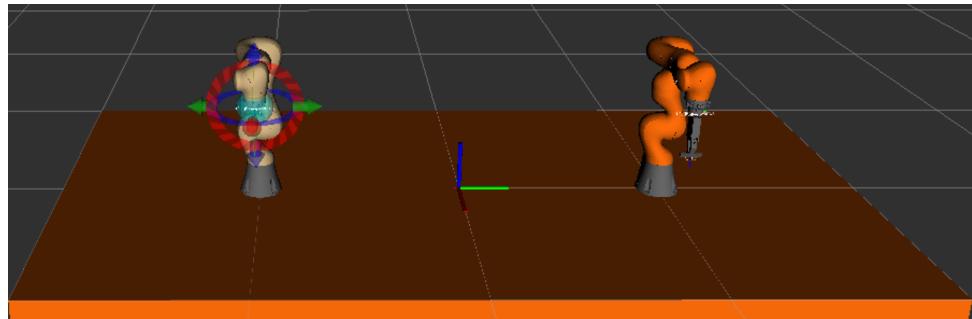
■ 3.3 Druhá úroveň

■ 3.3.1 ROS

Každý uživatel, který chce robota ovládat, si do svého PC nebo notebooku stáhne repozitáře capek_testbed a iiwa_fri. Repozitář capek_testbed obsahuje interface CapekRobotCommander k jednoduššímu programování robota v jazyce C++. Repozitář ještě obsahuje kolizní model a kinematický model pro MoveIt a grafický model pro Rviz. Repozitář iiwa_fri obsahuje FRI interface [Vladimír Petrík]. Kinematický, kolizní a grafický model robota byl převzat z repozitáře iiwa stack [HFV⁺16].

■ 3.3.2 Vizualizace v Rviz

Rviz je vizualizační nástroj vyvinutý pro systém ROS. Umožňuje zobrazovat polohu a signály robota. Vizuální model byl použit z iiwa stack repozitáře [HFV⁺16], viz obrázek 3.2.



Obrázek 3.2: Vizualizace dvou robotů Čapků v Rviz. Model jednotlivých robotických ramen byl převzat z iiwa stack repozitáře [HFV⁺16].

■ 3.3.3 MoveIt

MoveIt je nástroj vyvinutý za účelem plánování, manipulace, 3D rozpoznávání, počítáním kinematiky, řízení a navigace robotů a různých jiných mechanismů. Dokáže plánovat pohyby pomocí numerických a analytických metod a zároveň prověřuje kolize s okolním světem, který může být buď statický nebo dynamický [I2].

Kapitola 4

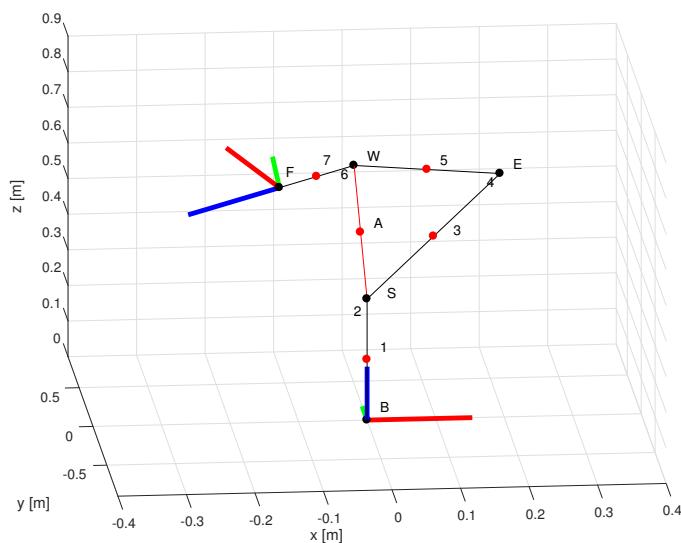
Kinematika robota KUKA LBR iiwa 7

Robot KUKA LBR iiwa je otevřený kinematický řetězec se sedmi stupni volnosti. Sedmý stupeň volnosti způsobuje při výpočtu inverzní kinematické úlohy určité problémy, ale jsou tu i výhody jako je třeba: možnost vyhnout se singulárním polohám nebo minimalizovat zatížení jednotlivých rámů a kloubů. V této části bude popsána kinematika robota a způsob parametrizace redundantnosti robota pro použití při výpočtu inverzní kinematické úlohy. Popsány budou i singulární polohy a jejich okolí, které jsou problematické při výpočtu inverzní kinematické úlohy. Na základě popisu kinematiky robota, bude v další kapitole popsána implementace inverzní kinematické úlohy. Všechny body uvedené v této bakalářské práci jsou v euklidovském tvaru. Homogenní tvar je označený indexem h .

■ 4.1 Popis kinematiky robota KUKA LBR iiwa 7 a parametrizace redundantnosti

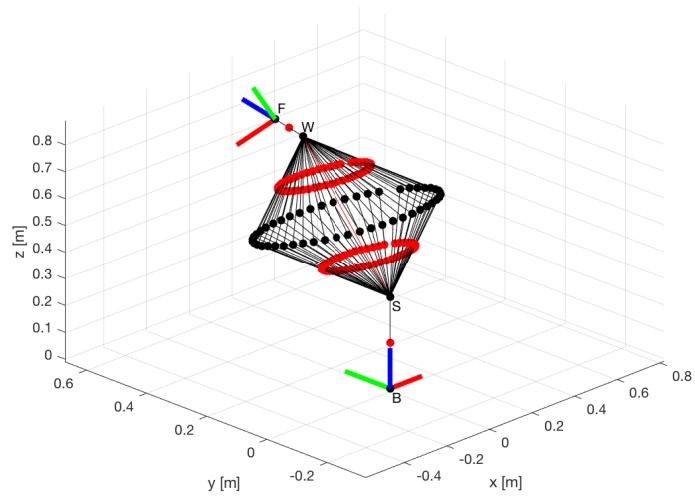
Popis kinematiky robota KUKA LBR iiwa 7 vychází z prací [KSJE16], [NK12] a [ACR14]. Začne se popisem jednotlivých bodů robota. Počátek souřadnicového prostoru je označený B (Base) viz obrázek 4.1. První, druhý a třetí kloub jsou značené jako sférický kloub se středem S (Shoulder). Bod S je při jakékoliv poloze robota pořád na stejném místě. Stejně tak klouby pět, šest a sedm jsou značeny jako sférický kloub se středem W (Wrist). Bod W je vždycky pevně určený při požadované poloze koncového bodu. Také klouby 3, 4 a 5 lze interpretovat jako sférický kloub se středem E (Elbow).

Střed úsečky SW je značen A . Střed souřadného systému příruby je označen bodem F (Flange). Bod E lze rotovat po kružnici ležící na rovině určené bodem A s normálovým vektorem $\hat{\overrightarrow{SW}}$. Počet poloh bodu E na kružnici, při kterých robot splňuje požadovanou polohu a natočení příruby, je nekonečně mnoho. Poloha bodu E lze popsat přidáním úhlu δ . Práce [KSJE16], [NK12] a [ACR14] si zavedou bod, od kterého je úhel δ určován. Úhel δ se odměřuje od bodu E_0° do bodu E . Interval hodnot, kterých může úhel δ nabývat, je pro každou polohu jinak velký, protože je dánmezemi kloubů. Kružnice protíná rovinu určenou body B , S a W ve dvou bodech. Poloha bodu E_0° je průsečík, který má z-tovou souřadnici vyšší než bod A . Orientaci úhlu δ lze stanovit pomocí pravidla pravé ruky: palec ukazuje ve směru vektoru \overrightarrow{AW} a prsty ukazují kladný směr úhlu δ od bodu E_0° , viz obrázek 4.3.

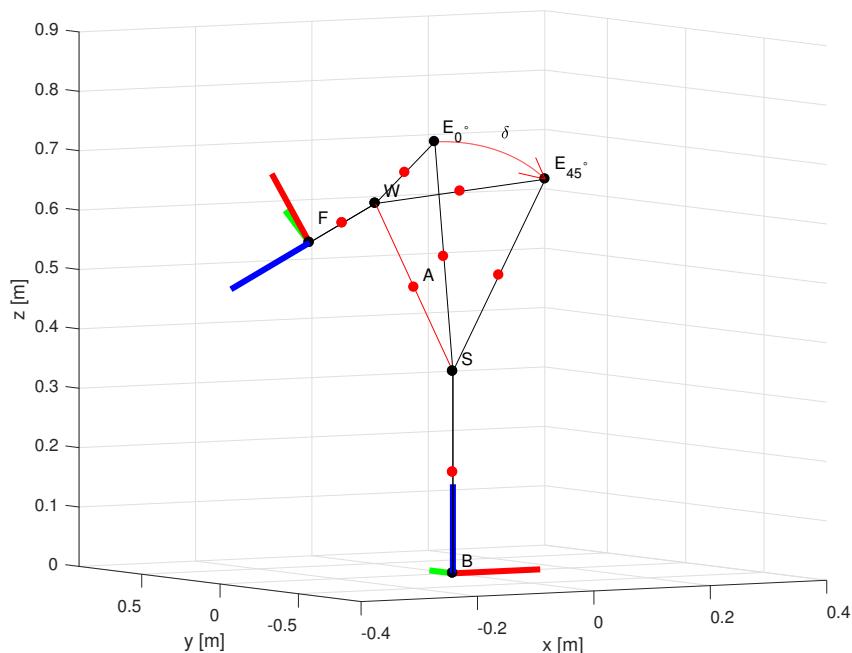


Obrázek 4.1: Robot s vyzobrenými body B , S , E , W , F a A a klouby 1 až 7.

4.1. Popis kinematiky robota KUKA LBR iiwa 7 a parametrizace redundantnosti



Obrázek 4.2: Ukázka redundantnosti robota robota KUKA LBR iiwa 7 a kružnice na, které se může nacházet bod, a pořád bude splňovat polohu a natočení příruby.



Obrázek 4.3: Dvě polohy robota prezentující úhel $\delta = 45^\circ$, jež svírají vektory \overrightarrow{AE} a $\overrightarrow{AE_{0^\circ}}$.

4.2 Inverzní kinematická úloha

Inverzní kinematická úloha je postup pro určení kloubových souřadnic robota při požadované poloze, natočení příruby a úhlu δ . Postup řešení vychází z prací [KSJE16], [NK12] a [ACR14], které popisují různé postupy jak vypočítat inverzní kinematickou úlohu, ale všechny se principiálně schodují v postupu řešení, kdy určí jednotlivé body robota a mezi nimi hledají souvislosti jak popsat úhly kloubů. V případě robota KUKA LBR iiwa 7 v laboratoři RMP je počet řešení osm, jeden pro každou konfiguraci robota. Při výpočtu se musí kontrolovat singulární polohy a meze robota KUKA LBR iiwa 7.

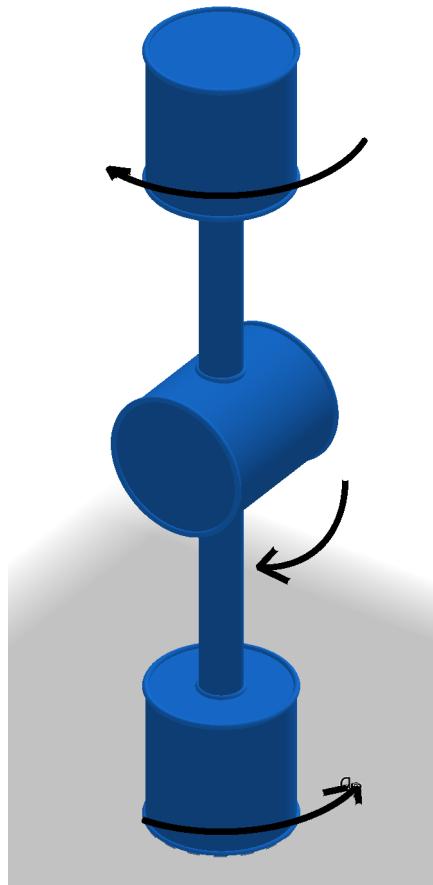
4.3 Singulární polohy

Robot se nachází v singulární poloze, když osy dvou nebo více kloubů leží v jedné přímce. Do téhle polohy se mohou dostat klouby 1, 3, 5 a 7. Jakmile osy dvou kloubů leží v přímce, stává se z nich jeden kloub s kloubovou souřadnicí Θ_{ij} , ale složený je ze dvou kloubů se souřadnicemi Θ_i a Θ_j . Kombinací hodnot kloubů Θ_i a Θ_j je nekonečně mnoho, aby se dosáhlo požadovaného natočení Θ_{ij} :

$$\begin{aligned} \Theta_{ij} &= \Theta_j + \Theta_i, \\ \{i, j \in 1, 3, 5, 7 \mid i \neq j\}, \\ \Theta_i, \Theta_j &\in \langle -2.967, 2.967 \rangle [\text{rad}]. \end{aligned} \tag{4.1}$$

Stejně tak platí podmínky pro víc kloubů:

$$\begin{aligned} \Theta_{ijk} &= \Theta_j + \Theta_i + \Theta_k, \\ \{i, j, k \in 1, 3, 5, 7 \mid i \neq j \vee j \neq k \vee k \neq i\}, \\ \Theta_{1357} &= \Theta_1 + \Theta_3 + \Theta_5 + \Theta_7, \\ \Theta_1, \Theta_3, \Theta_5, \Theta_7 &\in \langle -2.967, 2.967 \rangle [\text{rad}]. \end{aligned} \tag{4.2}$$



Obrázek 4.4: Ukázka dvou kloubů jejichž osy leží v jedné přímce a stává se z nich jeden kloub.

Pokud se robot nachází v singulární poloze, tak má inverzní kinematická úloha nekonečně řešení. Nachází-li se robot v okolí singulární polohy tak inverzní kinematická úlohy nemá řešení.

Kapitola 5

Implementace inverzní kinematické úlohy

V této části bakalářské práci je uveden postup implementace inverzní kinematické úlohy. Závěr této části obsahuje testování inverzní kinematické úlohy. Z testování inverzní kinematické úlohy byly odvozeny velikosti okolí kolem singulárních poloh, při kterých inverzní kinematická úloha nemá řešení. Inverzní kinematická úloha a testování inverzní kinematické úlohy bylo implementováno v jazyku C++. Implementovaný program je uložen na přiloženém DVD k bakalářské práci v souboru InverseKinematics.cpp.

5.1 Úhel mezi vektory

Pro výpočty v inverzní kinematické úloze je potřeba zavést funkci $f_{\angle}(\vec{v_1}, \vec{v_2}, \vec{n})$ viz postup 5.1, která slouží pro výpočet orientovaného úhlu α mezi dvěma vektorů $\vec{v_1}$ a $\vec{v_2}$ ležící na rovině určené normálovým vektorem \vec{n} a procházející nulou. Vycházelo se z postupů uvedených v učebnici [RH95]. Úhel je měřený od referenčního vektoru $\vec{v_1}$ k vektoru $\vec{v_2}$. Vektor. Úhel je kladný pokud vektor $\vec{v_k}$ kolmý na oba vektoru $\vec{v_1}$ a $\vec{v_2}$ ukazuje s normálovým vektorem roviny \vec{n}

stejným směrem:

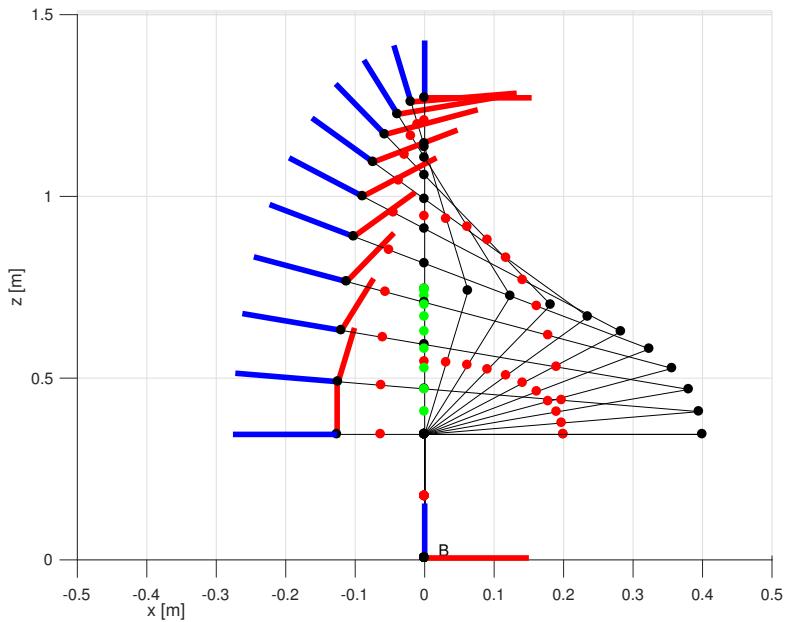
$$\begin{aligned}
 f_{\angle}(\vec{v_1}, \vec{v_2}, \vec{n}) &= \alpha, \\
 \alpha' = \angle(\hat{\vec{v_1}}, \hat{\vec{v_2}}) &= \arccos \frac{\vec{v_1} \cdot \vec{v_2}}{|\vec{v_1}| |\vec{v_2}|}, \\
 \vec{v_k} &= \hat{\vec{v_1}} \times \hat{\vec{v_2}}, \\
 \alpha &= \begin{cases} \alpha' & \text{pokud } \vec{v_k} \cdot \hat{\vec{n}} > 0, \\ 0 & \text{nebo když } \vec{v_k} \cdot \hat{\vec{n}} = 0, \\ -\alpha' & \text{jinak.} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

■ 5.2 Výpočet úhlu δ

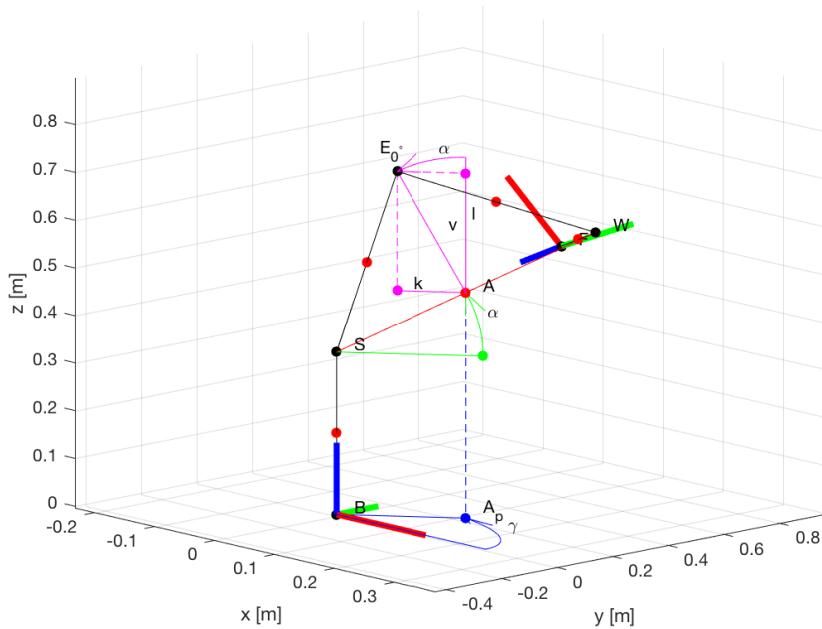
Pro testování inverzní kinematické úlohy je potřeba vypočítat úhel δ z testovacích kloubových souřadnic $\vec{\Theta}_h$. Z kloubových souřadnic $\vec{\Theta}_h$ se dopočítají polohy bodů B, S, E, W, F a A . Úhel δ mezi sebou svírají vektory $\overrightarrow{AE_0}$ a \overrightarrow{AE} viz obrázek 4.3 a orientaci úhlu určuje vektor $\hat{\vec{AW}}$. Bod A se vypočte následovně:

$$A = (W + S)/2 \tag{5.2}$$

Když se bod A nachází v blízkosti osy z , tak se funkce $\text{atan2}(A_{p,y}, A_{p,x})$ s promítnutým bode A_p na rovinu xy v rovnici 5.3 nachází v blízkosti singularity a dochází k chybám při výpočtu úhlu γ .



Obrázek 5.1: Poloha bodu A (zelený) v blízkosti osy z při splnění podmínky 5.29, při které nelze vypočítat úhel γ .



Obrázek 5.2: Postup výpočtu bodu E_{0° . Parametry k , v a l k výpočtu bodu E_{0° od bodu A. Úhel α , který svírá vektor \overrightarrow{SA} s plochou xy . Vektor $\overrightarrow{SA_p}$ svírající úhel γ s osou x.

5. Implementace inverzní kinematické úlohy

Pomocí promítnutého bodu A na rovinu xy vznikne bod A_p a lze určit úhel γ , který vektor $\overrightarrow{SA_p}$ svírá s osou x :

$$\gamma = \text{atan2}(A_{p,y}, A_{p,x}) . \quad (5.3)$$

Vektor \overrightarrow{SW} svírá s rovinou xy úhel α :

$$\alpha = \text{atan2}(A_z, \sqrt{A_x^2 + A_y^2}) . \quad (5.4)$$

Výška trojúhelníku WSE_{0° , pro určení vzdálenosti bodu E_{0° od bodu A :

$$v = \sqrt{|\overrightarrow{SE}|^2 - |\overrightarrow{SA}|^2} . \quad (5.5)$$

Určí se vzdálenost bodu E_{0° v osách x , y a z od bodu A :

$$\begin{aligned} p_x &= -\cos(\gamma) \sin(\alpha)v, \\ p_y &= -\sin(\gamma) \sin(\alpha)v, \\ p_z &= \cos(\alpha)v . \end{aligned} \quad (5.6)$$

A výsledná poloha bodu E_{0° je:

$$E_{0^\circ} = [A_x + p_x, A_y + p_y, A_z + p_z]^T . \quad (5.7)$$

Bod E_{0° se použije na vytvoření následujících vektorů:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{AE} &= E - A, \\ \overrightarrow{AE_{0^\circ}} &= E_{0^\circ} - A . \end{aligned} \quad (5.8)$$

Vektory svírají úhel δ viz obrázek 4.3. Úhel je vypočten za pomocí funkce 5.1:

$$\delta = f_\angle(\overrightarrow{AE_{0^\circ}}, \overrightarrow{AE}, \overrightarrow{AW}) . \quad (5.9)$$

5.3 Postup implementace inverzní kinematické úlohy

Vstupem do inverzní kinematické úlohy je matice přírudy 0T_7 viz rovnice 2.1 a úhel δ . Výstupem inverzní kinematické úlohy je sedm kloubových souřadnic pro každou z osmi konfigurací. Jako první se určí poloha bodů S , W , A a E . Poloha bodu S je vždycky pevně daná:

$$S = [0, 0, d_1] . \quad (5.10)$$

5.3. Postup implementace inverzní kinematické úlohy

Poloha bodu W se dopočítá zpětnou transformací zadané matice příruby 0T_7 :

$${}^0T_6 = {}^0T_7 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5.11)$$

$$W_h = {}^0T_6 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5.12)$$

Bod A se vypočte pomocí rovnice 5.2. Pokud se bod A nachází v blízkosti osy z , tak inverzní kinematická úloha nemá řešení, viz část 4.3. Pokud se bod A nachází na ose z , tak má inverzní kinematická úloha nekonečně řešení. Pro určení bodu E_{0° je použitý postup viz rovnice 5.7. Vektory $\vec{p_E}$ a $\vec{q_E}$ určí rovinu s normálovým vektorem $\hat{\vec{AW}}$ procházející počátkem souřadného systému:

$$\begin{aligned} \vec{p_E} &= E_{0^\circ} - \hat{A}, \\ \vec{q_E} &= \hat{\vec{AW}} \times \vec{p_E}. \end{aligned} \quad (5.13)$$

Vypočítá se otočení v osách $\vec{p_E}$ a $\vec{q_E}$ o úhel δ na kružnici o poloměru $|AE_{0^\circ}|$:

$$\begin{aligned} \vec{E_p} &= \vec{p_E} \cos(\delta) |\vec{AE}_{0^\circ}|, \\ \vec{E_q} &= \vec{q_E} \sin(\delta) |\vec{AE}_{0^\circ}|. \end{aligned} \quad (5.14)$$

Pokud je $|\vec{AE}_{0^\circ}| < 10^{-10}$, tak inverzní kinematická úloha nemá řešení, viz část 4.3. Pokud $\vec{AE}_{0^\circ} = 0$, tak osy kloubů 3 a 5 leží ve stejné přímce a inverzní kinematická úloha má nekonečně řešení. Výsledný bod E je:

$$E = A + \vec{E_p} + \vec{E_q}. \quad (5.15)$$

První kloub může být natočený do dvou poloh:

$$\begin{aligned} \Theta_{11} &= \text{atan2}(E_y, E_x), \\ \Theta_{12} &= \text{atan2}(-E_y, -E_x). \end{aligned} \quad (5.16)$$

Vektory \vec{BS} a \vec{SE} svírají úhly Θ_{21} a Θ_{21} . Pro výpočet úhlů Θ_{21} a Θ_{21} je potřeba vypočítat vektory $\vec{n_1}$ a $\vec{n_2}$, které určí jejich orientaci:

$$\begin{aligned} \vec{n_1} &= [\cos(\Theta_{11} + \pi/2), \sin(\Theta_{11} + \pi/2), 0]^T, \\ \vec{n_2} &= [\cos(\Theta_{12} + \pi/2), \sin(\Theta_{12} + \pi/2), 0]^T. \end{aligned} \quad (5.17)$$

Vypočtené vektory $\vec{n_1}$ a $\vec{n_2}$ se použijí do rovnice 5.1, která vypočítá úhly Θ_{21} a Θ_{21} mezi vektory \vec{BS} a \vec{SE} :

$$\begin{aligned} \Theta_{21} &= f_\angle(\vec{BS}, \vec{SE}, \vec{n_1}), \\ \Theta_{22} &= f_\angle(\vec{BS}, \vec{SE}, \vec{n_2}). \end{aligned} \quad (5.18)$$

5. Implementace inverzní kinematické úlohy

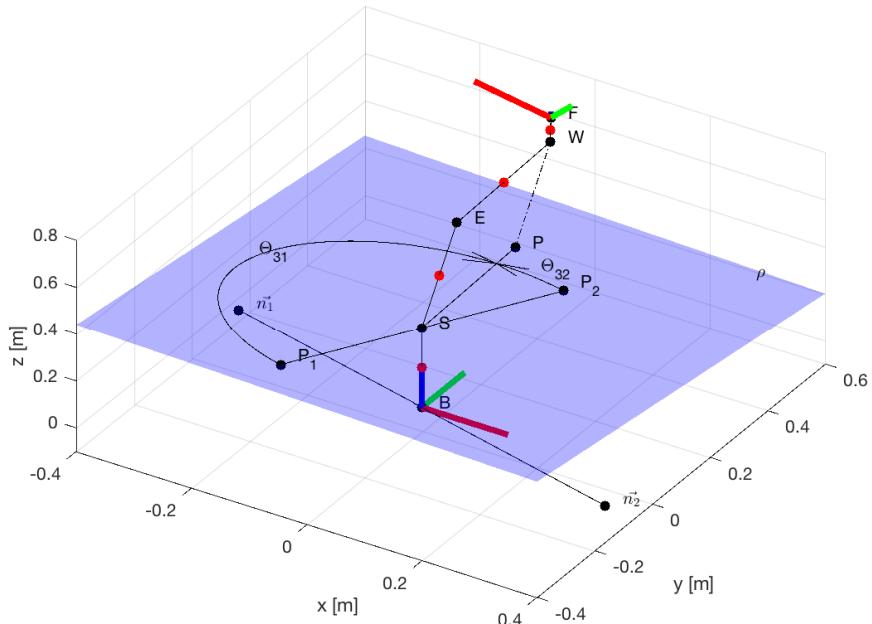
Pro výpočty úhlů Θ_{31} a Θ_{32} se zavede rovina ρ s normálovým vektorem $\hat{\vec{SE}}$ a středovým bodem S , viz obrázek 5.3. Je potřeba vypočítat vektory $\overrightarrow{SP_1}$ a $\overrightarrow{SP_2}$, od kterých se budou určovat úhly Θ_{31} a Θ_{32} :

$$\begin{aligned} P_1 &= S + \hat{\vec{SE}} \times \hat{\vec{n}_1}, \\ P_2 &= S + \hat{\vec{SE}} \times \hat{\vec{n}_2}. \end{aligned} \quad (5.19)$$

Kolmým promítnutím bodu W na rovinu ρ vznikne bod P . Vektory $\overrightarrow{SP_1}$ a $\overrightarrow{SP_2}$ svírají s vektorem \overrightarrow{SP} úhly Θ_{31} a Θ_{32} viz obrázek 5.3. Orientace úhlů je dána vektorem $\hat{\vec{SE}}$. Úhly Θ_{31} a Θ_{32} se vypočtou pomocí postupu 5.1:

$$\begin{aligned} \Theta_{31} &= f_{\angle}(\overrightarrow{SP_1}, \overrightarrow{SP}, \hat{\vec{SE}}), \\ \Theta_{32} &= f_{\angle}(\overrightarrow{SP_2}, \overrightarrow{SP}, \hat{\vec{SE}}). \end{aligned} \quad (5.20)$$

Výpočet čtvrtého kloubu vychází z kosinové věty, kde se vypočítá vnitřní



Obrázek 5.3: Vektory \vec{n}_1 , \vec{n}_2 a rovina ρ . Vektory $\overrightarrow{SP_1}$ a $\overrightarrow{SP_2}$ svírající s vektorem \overrightarrow{SP} úhly Θ_{31} a Θ_{32} .

úhel trojúhelníku SWE u vrcholu E :

$$\begin{aligned} \Theta_{41} &= \pi - \arccos \left(\frac{d_3^2 + d_4^2 - |\overrightarrow{SW}|^2}{2 d_3 d_5} \right), \\ \Theta_{42} &= \arccos \left(\frac{d_3^2 + d_4^2 - |\overrightarrow{SW}|^2}{2 d_3 d_5} \right) - \pi. \end{aligned} \quad (5.21)$$

Zatím vypočítané úhly $\Theta_{11}, \Theta_{12}, \Theta_{21}, \Theta_{22}, \Theta_{31}, \Theta_{32}, \Theta_{41}$ a Θ_{42} se použijí na výpočet transformačních matic ${}^4T_{0,1-4}$ viz rovnice 2.2, které se použijí pro výpočet transformačních matic ${}^4T_{7,1-4}$:

$$\begin{aligned} {}^4T_{7,1} &= {}^0T_7 {}^4T_0(\Theta_{11}, \Theta_{21}, \Theta_{31}, \Theta_{41}), \\ {}^4T_{7,2} &= {}^0T_7 {}^4T_0(\Theta_{11}, \Theta_{21}, \Theta_{32}, \Theta_{42}), \\ {}^4T_{7,3} &= {}^0T_7 {}^4T_0(\Theta_{12}, \Theta_{22}, \Theta_{31}, \Theta_{42}), \\ {}^4T_{7,4} &= {}^0T_7 {}^4T_0(\Theta_{12}, \Theta_{22}, \Theta_{32}, \Theta_{41}). \end{aligned} \quad (5.22)$$

Pro další postup je potřeba inverzní operace, kdy se pro každou matici od ${}^4T_{7,1}$ do ${}^4T_{7,4}$ musí vypočítat úhly Θ_5, Θ_6 a Θ_7 . Vstupem je rotační matice z každé matice od ${}^4T_{7,1}$ do ${}^4T_{7,4}$:

$$\begin{aligned} \Theta_{61} &= \arccos(R(3,3)), \\ \Theta_{62} &= -\Theta_{61}, \\ \Theta_{51} &= \text{atan2}(R(2,3)\sin(\Theta_{61}), R(1,3)\sin(\Theta_{61})), \\ \Theta_{52} &= \text{atan2}(R(2,3)\sin(\Theta_{62}), R(1,3)\sin(\Theta_{62})), \\ \Theta_{71} &= \text{atan2}(R(3,2)\sin(\Theta_{61}), R(3,1)\sin(\Theta_{61})), \\ \Theta_{72} &= \text{atan2}(R(3,2)\sin(\Theta_{62}), R(3,1)\sin(\Theta_{62})). \end{aligned} \quad (5.23)$$

Pokud je podmínka

$$|R(3,3) + 1| < 10^{-10} \vee |R(3,3) - 1| < 10^{-10} \quad (5.24)$$

splněna, tak se robot nachází v okolí singulární polohy a funkce nemá řešení, viz část o singulárních polohách 4.3. Pokud $R(3,3) = 1$ nebo $R(3,3) = -1$ tak osy kloubů 5 a 7 leží ve stejné přímce a inverzní kinematická úloha má nekonečně řešení, viz rovnice 4.1. Každá z matic od ${}^4T_{7,1}$ do ${}^4T_{7,4}$ obsahuje dvě kombinace úhlů Θ_5, Θ_6 a Θ_7 , takže hodnoty kloubů pro každou konfiguraci robota jsou:

$$\left[\begin{array}{cccccccc} \Theta_{51} & \Theta_{52} & \Theta_{53} & \Theta_{54} & \Theta_{55} & \Theta_{56} & \Theta_{57} & \Theta_{58} \\ \Theta_{61} & \Theta_{62} & \Theta_{63} & \Theta_{64} & \Theta_{65} & \Theta_{66} & \Theta_{67} & \Theta_{68} \\ \Theta_{71} & \Theta_{72} & \Theta_{73} & \Theta_{74} & \Theta_{75} & \Theta_{76} & \Theta_{77} & \Theta_{78} \end{array} \right]. \quad (5.25)$$

Výsledek inverzní kinematické úlohy je v našem případě matice 7x8:

$$\left[\begin{array}{cccccccc} \Theta_{11} & \Theta_{11} & \Theta_{11} & \Theta_{11} & \Theta_{12} & \Theta_{12} & \Theta_{12} & \Theta_{12} \\ \Theta_{21} & \Theta_{21} & \Theta_{21} & \Theta_{21} & \Theta_{22} & \Theta_{22} & \Theta_{22} & \Theta_{22} \\ \Theta_{31} & \Theta_{31} & \Theta_{32} & \Theta_{32} & \Theta_{31} & \Theta_{31} & \Theta_{32} & \Theta_{32} \\ \Theta_{41} & \Theta_{41} & \Theta_{42} & \Theta_{42} & \Theta_{42} & \Theta_{42} & \Theta_{41} & \Theta_{41} \\ \Theta_{51} & \Theta_{52} & \Theta_{53} & \Theta_{54} & \Theta_{55} & \Theta_{56} & \Theta_{57} & \Theta_{58} \\ \Theta_{61} & \Theta_{62} & \Theta_{63} & \Theta_{64} & \Theta_{65} & \Theta_{66} & \Theta_{67} & \Theta_{68} \\ \Theta_{71} & \Theta_{72} & \Theta_{73} & \Theta_{74} & \Theta_{75} & \Theta_{76} & \Theta_{77} & \Theta_{78} \end{array} \right]. \quad (5.26)$$

Pokud konfigurace (sloupec) obsahuje hodnotu, která je mimo mez daného kloubu pro ten řádek, tak konfigurace není pro robota KUKA LBR iiwa 7 použitelná, viz tabulka mezi 2.2.

5.4 Testování inverzní kinematické úlohy

Na vstupu testu inverzní kinematické úlohy byly validní kloubové souřadnice $\vec{\Theta}_h = [\Theta_{h,1}, \Theta_{h,2}, \Theta_{h,3}, \Theta_{h,4}, \Theta_{h,5}, \Theta_{h,6}, \Theta_{h,7}]^T$, jež nebyly mimo meze kloubů viz tabulka mezi 2.2 a ani nesplňovali podmínky singulárních poloh viz podmínky 4.2 a 4.1. Pomocí souřadnic $\vec{\Theta}_h$ se dopočítala transformační matice příruby 0T_7 viz rovnice 2.2 a úhel δ pomocí postup popsané v části 5.2. Inverzní kinematická úloha z matice příruby 0T_7 a úhlu δ vypočítala matici řešení 7×8 viz rovnice 5.26. Správnost výsledku byla kontrolována pomocí podmínky:

$$|\Theta_{ij} - \Theta_{h,i}| < 10^{-10}, \quad \forall i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}. \quad (5.27)$$

Výpočet byl označen za správný, pokud kterákoli konfigurace j (sloupec) z matice 5.26 splnila podmínu 5.27.

Proběhly dva druhy testů. V prvním testu bylo zvoleno 2000 validních poloh, jejichž souřadnice $\vec{\Theta}_h$ byly voleny náhodně. Při druhém testu byly intervaly kloubů rozděleny do 6 částí a celkově se tak vyzkoušelo 117649 různých kombinací kloubů. Všechny testy podmínu 5.27 splnily.

Při výpočtu inverzní kinematické úlohy v počítači vznikají v okolí singulárních poloh nepřesnosti způsobené zaokrouhlováním výsledků. Proto je potřeba definovat okolí singulárních poloh, při kterých už není inverzní kinematická úloha z důvodu nepřesností řešitelná. Byly stanoveny tyto meze:

$$|\Theta_2| < 10^{-3} \quad \vee \quad |\Theta_4| < 10^{-3} \quad \vee \quad |\Theta_6| < 10^{-3}, \\ \Theta_2, \Theta_4, \Theta_6 \in \langle -2.094, 2.0944 \rangle \text{ [rad]}. \quad (5.28)$$

Při testování inverzní kinematické úlohy byly stanoveny podmínky, při kterých se bod A se nachází v blízkosti osy z:

$$|2\Theta_2 - \Theta_4| < 10^{-3}, \\ \Theta_2, \Theta_4 \in \langle -2.094, 2.0944 \rangle \text{ [rad]}. \quad (5.29)$$

5.5 Závěr inverzní kinematické úlohy

Při řešení inverzní kinematické úlohy bylo potřeba nastavit velikost okolí singulárních poloh, kde při zaokrouhlování výsledků při výpočtu v počítači

..... 5.5. Závěr inverzní kinematické úlohy

vznikají chyby. Další využití inverzní kinematické úlohy je při plánování v kartézských souřadnicích, kde se musí dát pozor na singulární polohy.

Kapitola 6

Montáž motoru s kartáčem na robota KUKA LBR iiwa 7 pro čištění bot

Tato část práce popisuje montáž a zapojení čistícího motoru s kartáčem na robota KUKA LBR iiwa 7 pro použití při čištění bot. Pro čištění byl na rozšířenou příruba robota namontován čistící motor s kartáčem.

6.1 Výběr rotačního kartáče

První z požadavků na rotační kartáč byl, aby s ním byl robot schopný manipulovat. Robot má specifikovanou nosnost 7 kg, takže se váha kartáče musela vejít do této hranice. Další požadavek byly rozměry, aby po připevnění kartáče zbylo stále dost místa v pracovním prostoru pro pohyb kolem boty. Aby se nemusel provádět výzkum toho, který kartáč a motor je nejvhodnější na čištění bot, rozhodlo se pro nákup již hotového čističe bot pro domácí použití, který se rozebere na části. Na trhu existuje velké množství čističů bot s rotačním kartáčem. Liší se od sebe velikostí, tvarem, výkonem a také cenou. Požadavky z hlediska robota kladené na čistič výběr zúžil o velké a rozměrné čističe. Pro experiment není potřeba nějaký luxusní čistič bot, protože se stejně rozebere na díly a použije se to nejdůležitější, což výběr ještě zúží. Po zvážení všech požadavků byl vybrán typ SPO-17C čističe bot od firmy Klarstein, který je zobrazen na obrázku 6.1.



Obrázek 6.1: Čistič bot SPO-17C Klarstein.

■ 6.2 Rozebrání a uchycení čistícího kartáče na robota

Čistič byl rozebrán na tři kartáče, motor s kabelem, dávkovač čistícího krému a krabici. Motor obsahuje i rozvodnou skříň s připojeným startovacím tlačítkem.



Obrázek 6.2: Čistící motor připevněný přes kovou spojku k hliníkové podložce a rozšířené přírubě. Osa motoru je otočena od osy příruby x o 45° .

Motor byl na robota přimontován pomocí kovové spojky ve tvaru L, aby

robot nepřišel o jeden stupeň volnosti. Do spojky bylo vyvrtáno šest děr pro šrouby na upevnění motoru a jeden větší otvor pro osu motoru. Do druhé části spojky byly vyvrtány dva otvory pro uchycení k hliníkové podložce a k rozšířené přírubě viz obrázek [6.2]. Výkres kovové spojky s rozměry je přiložen v příloze č. [B.4].

Osa motoru je vůči ose příruby x otočena o 45° z důvodu uchycení kovové spojky na přírubu. Motor při rotaci vibruje, což zanáší šum do měřených sil. Proto byla pod hlavy šroubů a mezi spojkou a hliníkovou podložku umístěna pružná guma a mezi spojkou a motor byla zvolena plastová pěna viz obrázek [6.2]. Celková váha motoru s kartáčem je 2645g. Vliv rotace a váhy motoru $\vec{\tau}_b(\vec{\Theta})$ je potřeba zahrnout do rovnice [2.5], která vypadá následovně:

$$\vec{\tau}_m(\vec{\Theta}) = \vec{\tau}_c(\vec{\Theta}) + \vec{\tau}_d(\vec{\Theta}) + \vec{\tau}_\epsilon(\vec{\Theta}) + \vec{\tau}_b(\vec{\Theta}). \quad (6.1)$$

Vliv váhy motoru $\vec{\tau}_b(\vec{\Theta})$ s kartáčem na měřené kloubové momenty $\vec{\tau}_m(\vec{\Theta})$ záleží na poloze robota. Váha motoru bude působit sílou $F_{d,b,z}$ v záporném směru na ose z :

$$F_{d,b,z} = m g = 2.645 \cdot 9.81 = 25.947 \text{ N}. \quad (6.2)$$

6.3 Elektrické zapojení motoru

Motor je připojený do zásuvky typu TN-S. Do rozvodné skříně vedou tři vodiče L - fáze, N - nulový vodič a PE - ochranný a zemnící vodič. Motor je jednofázový s kotvou na krátko. Obsahuje 4 vinutí a startovací kondenzátor o kapacitě $4 \mu F \pm 5\%$. Podle tabulek jsou otáčky motoru někde na hodnotě 1350 za minutu. Motor se spouští kolébkovým vypínačem na prodlužovacím kabelu. Elektrický schéma zapojení motoru v příloze [B.5].

Kapitola 7

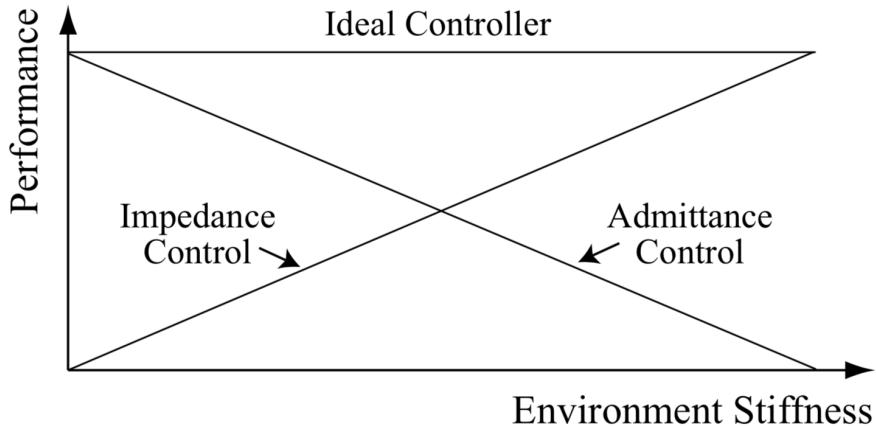
Silová poddajnost

7.1 Poddajná zpětná vazba

Aby se robot choval jako pružina, je potřeba řídící smyčku rozšířit o poddajnou zpětnou vazbu. Články [CMF16] a [SYZ17] popisují souhrn všech způsobů jak upravit řídící smyčku robota, aby byl robot silově poddajný. Článek [BDW⁺17] popisuje uzavřenou silovou smyčku pro dosažení silové poddajnosti a jak jí testovat. Všechny články vycházejí z rovnice popisující vztah mezi sílou a pohybem:

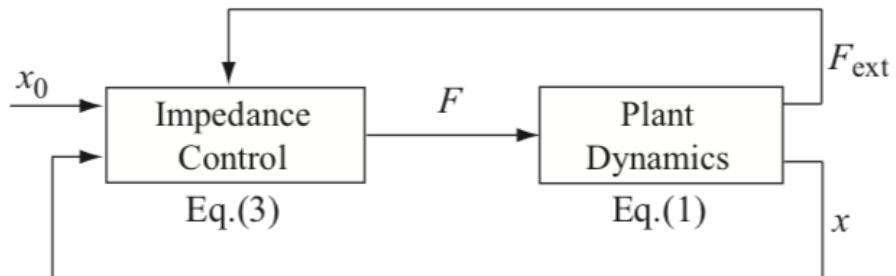
$$F = K(X - X_0) + B(\dot{X} - \dot{X}_0) + J(\ddot{X} - \ddot{X}_0) \quad (7.1)$$

kde F jsou externí síly, K je matice tuhosti, B je matice tlumení a J je matice hmotností. X , \dot{X} a \ddot{X} popisují lineární a úhlový pohyb. Trajektorie je vyjádřená proměnnými X_0 , \dot{X}_0 a \ddot{X}_0 [BDW⁺17]. Podle toho, jestli je robot řízen na kloubové souřadnice nebo na kroutící momenty se rozlišuje typ poddajné zpětné vazby. Při řízení kroutících momentů jde o impedanční zpětnou vazbu. Pro řízení kloubových souřadnic se hovoří o admitanční zpětné vazbě. Lze ještě hovořit o hybridní zpětné vazbě, při které se přepíná mezi impedanční a admitanční zpětnou vazbou podle potřeby řešeného problému. Rozdíl mezi impedanční a admitanční zpětnou vazbou je taky v jejich chování při rozdílné tuhosti prostředí, s kterým manipulují [OMN10], viz graf 7.1.



Obrázek 7.1: Rozdíl mezi impedanční a admittanční zpětnou vazbou podle tuhosti prostředí [OMN10].

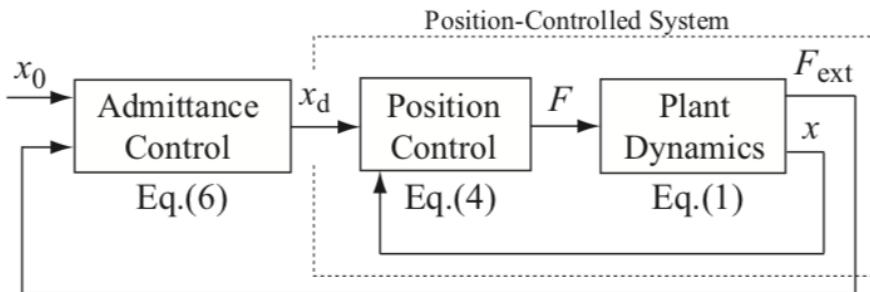
7.1.1 Impedanční zpětná vazba



Obrázek 7.2: Regulační schéma robota s impedanční zpětnou vazbou [OMN10].

Článek [CMF16] popisuje impedanční zpětnou vazbu, která upravuje řízené síly robota na základě měřené poloze robota a požadavků na poddajné chování podle rovnice 7.1. Článek [Law88] popisuje implementaci a stabilitu impedanční zpětné vazby při interakci s okolím.

7.1.2 Admitanční zpětná vazba

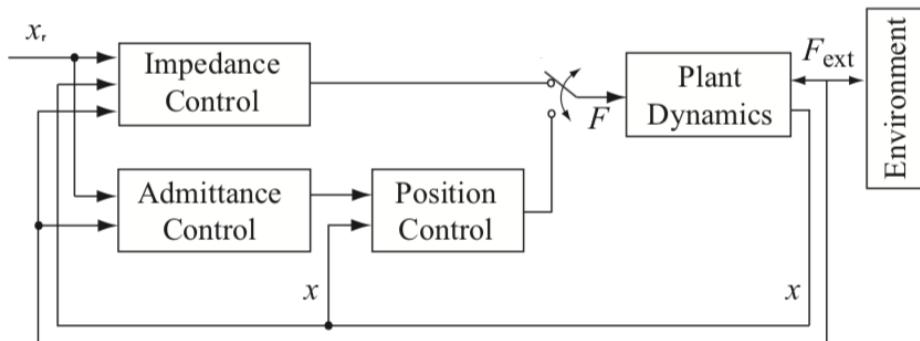


Obrázek 7.3: Regulační schéma robota s admitanční zpětnou vazbou [OMN10].

Článek [CMF16] popisuje admitanční zpětnou vazbu, která upravuje polohu robota na základě měřených externích sil a požadavků na poddajné chování. V regulační smyčce je potřeba regulátoru na polohu, který odřídí robota na požadovanou polohu. V práci [WL16] je psané silově poddajné řízení pomocí modelu robota.

7.1.3 Hybridní řízení

Článek [OMN10] popisoval admitanční a impedanční zpětnou vazbu a jejich použití v hybridním řízení. Při hybridním řízení jde o využití vlastností jak admitanční, tak impedanční zpětné vazby. V podstatě jsou to obě poddajné zpětné vazby dohromady. Mezi zpětnými vazbami se přepíná podle potřeby řešeného problému, zobrazeno na schematicu 7.4.



Obrázek 7.4: Regulační schéma hybridního řízení s přepínáním mezi impedanční a admitanční zpětnou vazbou podle řešeného problému [OMN10].

■ 7.2 Klouby s pružným členem

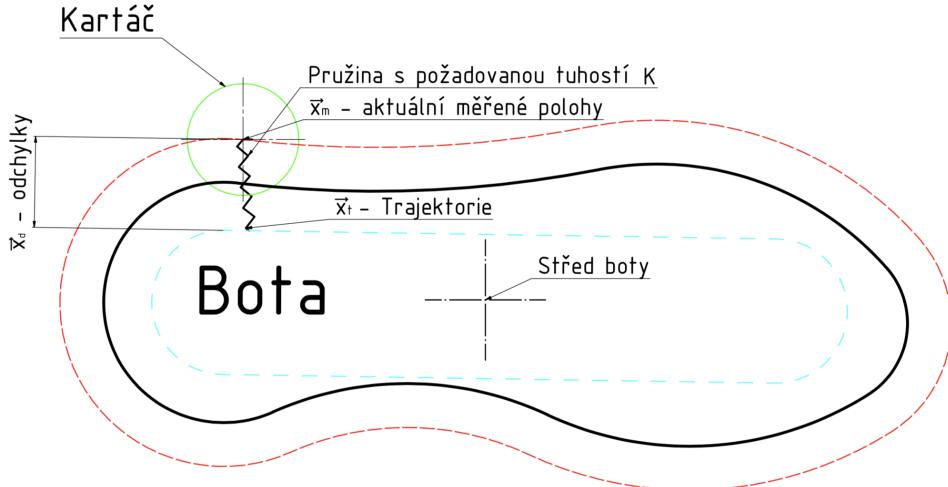
Dalším způsobem jak dosáhnou silové poddajnosti jsou klouby obsahující pružný člen [NCG⁺17]. Při působení externích sil se deformuje vnitřní pružný člen s určitou tuhostí. Při řízení kloubů s pružným členem se musí s pružností počítat a upravit podle toho řízení [KSJE16]. Robot KUKA LBR iiwa 7 je konstruovaný jako tuhý robot a proto u nelze využít pružnosti kloubů a ramen.

Kapitola 8

Implementace poddajné admitanční zpětné vazby

V této části bakalářské práci byla implementovaná admitanční poddajná zpětná vazba v programovacím jazyce C++. Implementovaný program je uložen na přiloženém DVD k bakalářské práci v souboru AdmittanceRegulatorCode.cpp. Impedanční poddajná zpětná vazba byla zamítnuta, protože by bylo potřeba implementovat inverzní dynamickou úlohu pro výpočet trajektorie $\vec{\pi}_t$. Hybridní řízení není možné, protože u robota nelze plynule přepínat mezi řízením na kloubové momenty a polohu.

8.0.1 Matematický popis poddajného chování robota



Obrázek 8.1: Ukázka jak by se měl robot chovat jako pružina. Červená - trajektorie poddajného robota opisující tvar boty. Světle modrá - naplánovaná trajektorie \vec{x}_t . Odchylky \vec{x}_d od rovnovážného bodu trajektorie \vec{x}_t .

Rovnice [7.1] se zjednoduší pouze rovnici maticí tuhosti K , viz rovnice ???. Tuhost robota je volena pro každý stupeň volnosti v kartézském prostoru zvlášť. Pro síly se nastavuje tuhost k_x, k_y, k_z [N/m] a pro kroutící moment se nastavuje torzní tuhost k_{rx}, k_{ry}, k_{rz} [Nm/rad]. Zavede se matice tuhosti K :

$$K = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{rx} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{ry} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{rz} \end{bmatrix}. \quad (8.1)$$

Rovnice pružiny pro robota vychází z Hookova zákona:

$$\vec{F}_m = K(\vec{x}_t - \vec{x}_m), \quad (8.2)$$

kde $\vec{F}_m = [F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z]^T$ je vektor sil [N] a momentů [Nm] působících na přírubu. K je matice tuhosti pružiny. \vec{x}_m je vektor aktuální měřené polohy v kartézských souřadnicích. Robot se kolem boty pohybuje po naplánované trajektorii. Pro každý bod trajektorie jsou vypočítané hodnoty polohy robota: \vec{x}_t v kartézských souřadnicích, $\vec{\Theta}_t$ v kloubových souřadnicích, $\vec{\tau}_t$ v kroutících momentech nebo \vec{F}_t v kartézských silách v bodě příruby F . Ještě je potřeba zavést aktuální měřenou polohu kloubů $\vec{\Theta}_m$ a aktuální měřené kroutící momenty $\vec{\tau}_m$. Jako další je zavedena odchylka od rovnovážného stavu

síly v bodě přírubby F :

$$\vec{F}_d = \vec{F}_t - \vec{F}_m. \quad (8.3)$$

Kartézská odchylka \vec{x}_d od rovnovážné polohy trajektorie \vec{x}_t :

$$\vec{x}_d = \vec{x}_t - \vec{x}_m. \quad (8.4)$$

A jejich ekvivalenty po přepočtení v do kroutících momentů a kloubových souřadnic:

$$\begin{aligned} \vec{\tau}_d &= \vec{\tau}_t - \vec{\tau}_m, \\ \vec{\Theta}_d &= \vec{\Theta}_t - \vec{\Theta}_m. \end{aligned} \quad (8.5)$$

■ 8.0.2 Jacobiho matice

V dalších částech je použita Jacobiho matice a její pravá a levá pseudoinverze. Pravá pseudoinverze je použita pro přepočet odchylek momentů $\vec{\tau}_d$ na odchylky kartézských sil \vec{F}_d a na přepočet odchylek kloubových souřadnic $\vec{\Theta}_d$ na kartézské odchylky \vec{x}_d . Levá pseudoinverze je použita pro inverzní operace předchozích dvou zmíněných přepočtu. Jacobiho matice je matice parciálních derivací polohy koncového bodu $\vec{X}(\vec{\Theta})$ podle jednotlivých kloubových souřadnic.

$$J(\vec{\Theta}) = \frac{\partial \vec{X}(\vec{\Theta})}{\partial \vec{\Theta}}. \quad (8.6)$$

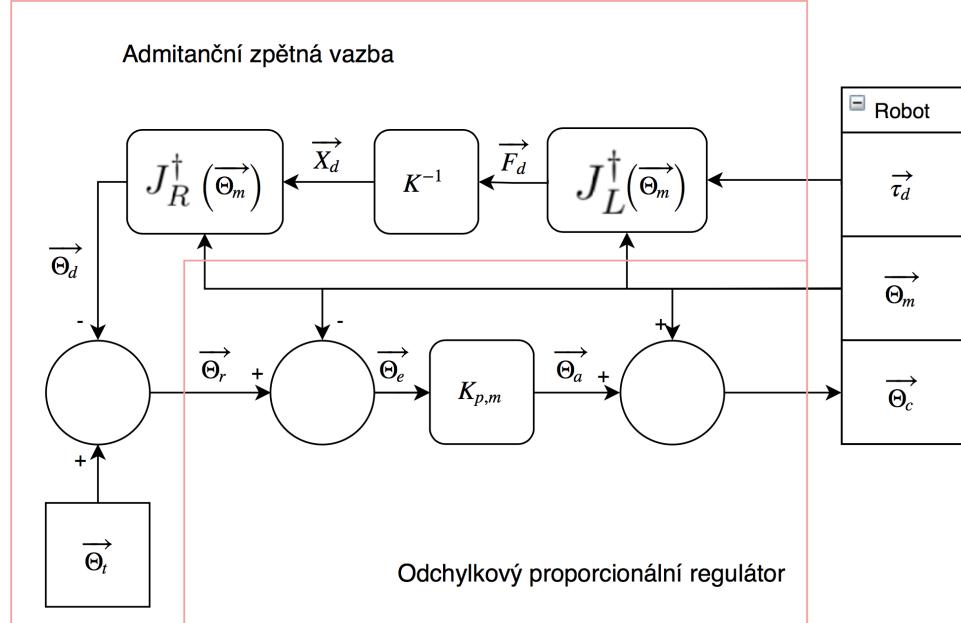
Rozměr matice je 6x7. Z Jacobiho matice se vypočítá levá pseudoinverze o rozměru 6x7:

$$J_L^\dagger = (JJ^T)^{-1}J. \quad (8.7)$$

A takhle vypadá výpočet právé pseudoinverze o rozměru 7x6:

$$J_R^\dagger = J^T(JJ^T)^{-1}. \quad (8.8)$$

8.1 Implementace poddajné zpětné admitanční vazby



Obrázek 8.2: Regulační schéma s poddajnou zpětnou admitanční vazbou a odchylkovým proporcionalním regulátorem implementováno v programovacím jazyce C++.

Implementace popisuje schéma 8.2 krok po kroku a začíná u měřených externích kroutících momentů $\vec{\tau}_d$. Admitanční poddajná zpětná vazba začíná přepočtem měřených externích kroutících momentů $\vec{\tau}_d$ do kartézských sil $F_{d,x}$, $F_{d,y}$ a $F_{d,z}$ [N] a momentů $M_{d,x}$, $M_{d,y}$ a $M_{d,z}$ [Nm] v chapadle:

$$\vec{F}_d = [F_{d,x}, F_{d,y}, F_{d,z}, M_{d,x}, M_{d,y}, M_{d,z}]^T = J_R^\dagger \vec{\tau}_d \quad (8.9)$$

Pomocí inverze matice tuhosti K se vypočítají velikosti odchylek \vec{x}_d od rovnovážných stavů \vec{x}_t (trajektorie) v kartézském prostoru:

$$\vec{x}_d = K^{-1} \vec{F}_d. \quad (8.10)$$

Odchylku \vec{x}_d je potřeba převést do kloubových souřadnic $\vec{\Theta}_d$. Toho lze docílit pomocí pravé pseudoinverze Jacobiho matice viz rovnice 8.8:

$$\vec{\Theta}_d = J_R^\dagger \vec{x}_d. \quad (8.11)$$

Přičtením trajektorie $\vec{\Theta}_t$ k odchylce $\vec{\Theta}_d$ vznikne požadovaná poloha $\vec{\Theta}_r$, na kterou by měl odchylkový regulátor robota řídit.

8.1.1 Implementace odchylkového proporcionálního regulátor

Odchylkový regulátor má za úkol řídit robota na požadované polohy $\vec{\Theta}_r$, které stanovila admitanční zpětná vazba. Určí se regulační odchylky $\vec{\Theta}_e$:

$$\vec{\Theta}_e = \vec{\Theta}_r - \vec{\Theta}_m. \quad (8.12)$$

Proporcionální regulátor násobí regulační odchylky $\vec{\Theta}_e$ diagonální maticí $K_{p,m}$ o rozměrech 7×7 s regulačními konstantami \vec{K}_p na diagonále a dostane akční zásah $\vec{\Theta}_a$ pro každý kloub:

$$\vec{\Theta}_a = K_{p,m} \vec{\Theta}_e \quad (8.13)$$

Regulační konstanta může být nastavena pro každý kloub jinak. Velikosti akčních zásahů závisí na velikosti regulačních konstant \vec{K}_p . Čím větší jsou konstanty \vec{K}_p , tím rychleji se zmenšují regulační odchylky $\vec{\Theta}_e$. Také systém snadněji překmitne požadované polohy $\vec{\Theta}_r$ nebo se rozkmitá. Akční zásahy $\vec{\Theta}_a$ je potřeba omezit v případě, že překročí maximální povolené rychlosti kloubů za periodu $T = 0.01\text{s}$, viz tabulka 2.2.

$$\Theta_{a,i} = \begin{cases} \Theta_{v,max,i} \cdot T & \text{pokud } \Theta_{a,i} > \Theta_{v,max,i} \cdot T \\ -\Theta_{v,max,i} \cdot T & \text{nebo když } \Theta_{a,i} < -\Theta_{v,max,i} \cdot T \\ \Theta_{a,i} & \text{jinak} \end{cases} \quad (8.14)$$

$$\forall i \in 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.$$

Řídící jednotka vyžaduje řídící kloubové souřadnice $\vec{\Theta}_c$ a tak se akčním zásahům $\vec{\Theta}_a$ přičtu aktuální měřené kloubové polohy $\vec{\Theta}_m$.

$$\vec{\Theta}_c = \vec{\Theta}_a + \vec{\Theta}_m \quad (8.15)$$

Vypočtené řídící kloubové souřadnice $\vec{\Theta}_c$ je potřeba omezit, pokud přesáhnou meze kloubů, viz tabulka 2.2 jednotlivých kloubových mezí.

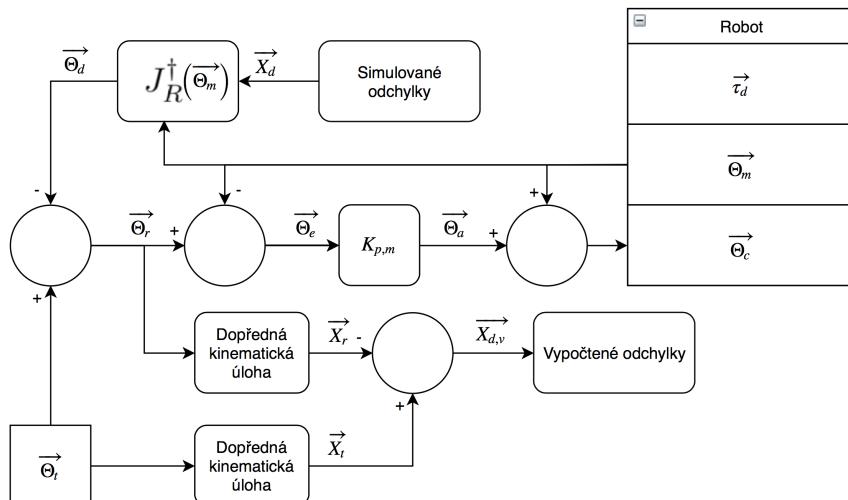
$$\Theta_{c,i} = \begin{cases} \Theta_{max,i} & \text{pokud } \Theta_{c,i} > \Theta_{max,i} \\ -\Theta_{max,i} & \text{nebo když } \Theta_{c,i} < -\Theta_{max,i} \\ \Theta_{c,i} & \text{jinak} \end{cases} \quad (8.16)$$

$$\forall i \in 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.$$

Kapitola 9

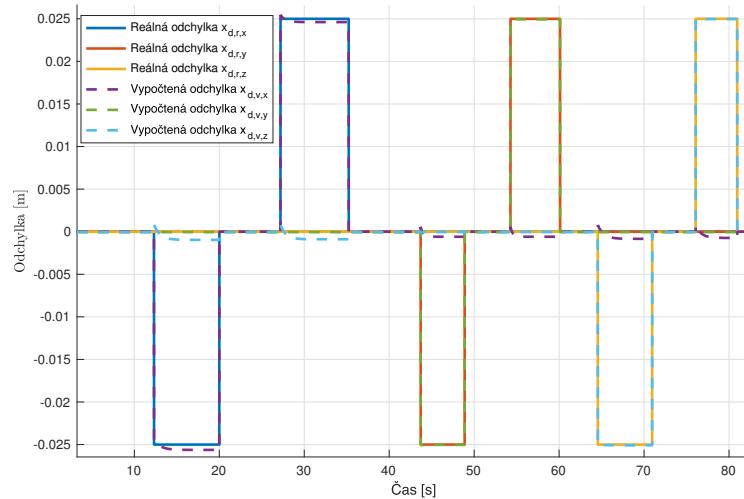
Experimenty

9.1 Testování Jacobiho matice pro použití v poddajné zpětné vazbě



Obrázek 9.1: Schéma pro testování Jacobiho matice pro použití v poddajné zpětné vazbě. Na vstupu jsou simulované odchylky \vec{x}_d , které jsou přepočítané na kloubové odchylky $\vec{\Theta}_d$. Na výstupu jsou vypočtené odchylky $\vec{x}_{d,v}$, které jsou porovnávány se požadovanými simulovanými odchylkami \vec{x}_d . Kontroluje se jestli byly kloubové odchylky $\vec{\Theta}_d$ správně vypočtené.

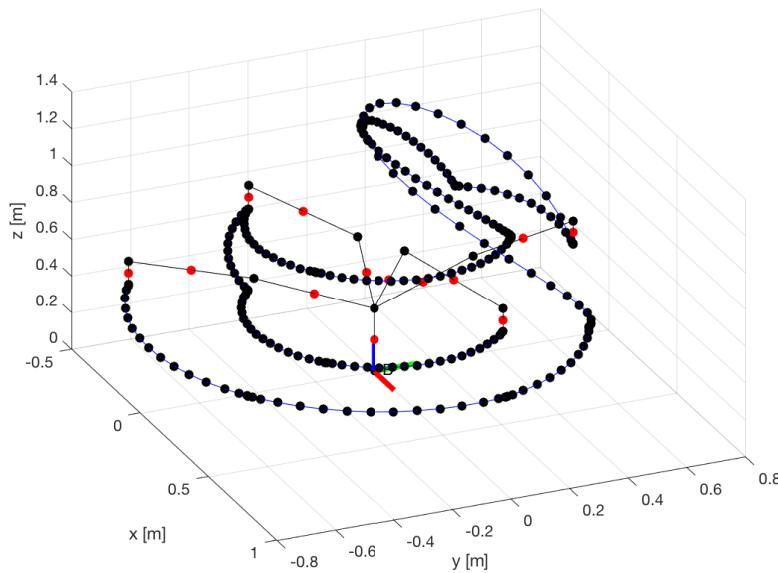
Testování Jacobiho matice pro použití v poddajné zpětné vazbě probíhalo podle schématu 9.1. Testování probíhalo na reálném robotovi a Jacobiho matice byla každý cyklus vypočtena z měřených kloubových souřadnic $\vec{\Theta}_m$. Testování probíhalo následovně: na vstup se nastavovaly simulované požadované odchylky \vec{x}_d a porovnávaly se s vypočtenými odchylkami $\vec{x}_{d,v}$ od rovnovážného stavu \vec{x}_t . Kontroluje se jestli levá pseudoinverze Jacobiho matice kloubové odchylky $\vec{\Theta}_d$ stanovila správně, při kterých bude robot opravdu vychýlen o odchylky \vec{x}_d . Graf 9.2 ukazuje, že přesnost přepočtu kartézských odchylek \vec{x}_d do kloubových odchylek $\vec{\Theta}_d$ je pro další experimenty dostačující. Velikosti nepřesnosti při přepočtu rostou s velikostí přepočítávaných kartézských odchylek \vec{x}_d .



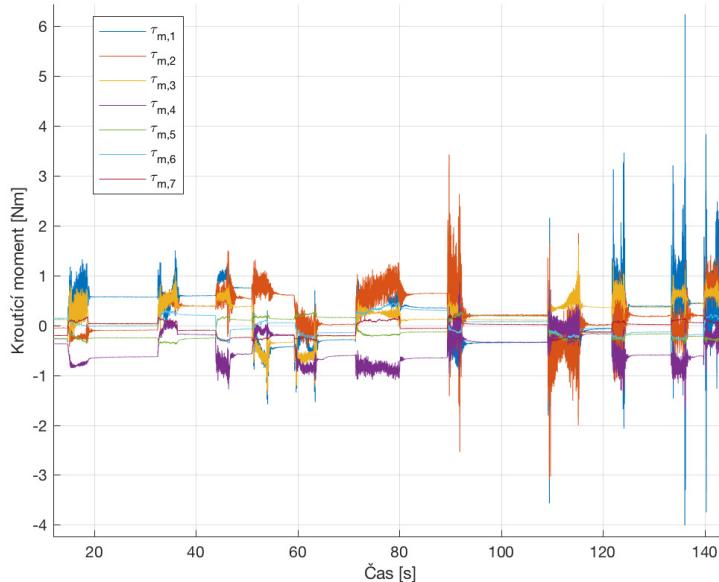
Obrázek 9.2: Porovnání požadovaných \vec{x}_d a vypočtených $\vec{x}_{d,v}$ odchylek, při zkoumání Jacobiho matice pro použití v poddajné zpětné vazbě.

9.2 Měření nepřesnosti řídících sil

Cílem měření bylo stanovit nepřesnosti řídících sil modelu robota $\vec{\tau}_{c,\epsilon}(\vec{\Theta})$. Vykonala se trajektorie T_1 viz obrázek 9.3 a zaznamenali se odchylky momentů $\vec{\tau}_d$. Protože robot nebyl zatížený a nepůsobily žádné externí síly, měly by být odchylky $\vec{\tau}_d$ po celou dobu trajektorie T_1 nulové. Nepřesnosti řídících sil $\vec{\tau}_{c,\epsilon}(\vec{\Theta})$ byly tedy rovny měřeným odchylkám $\vec{\tau}_d$.



Obrázek 9.3: Vykonaná trajektorie T_1 při měření nepřesností řídících sil $\vec{\tau}_{c,\epsilon}(\vec{\Theta})$.



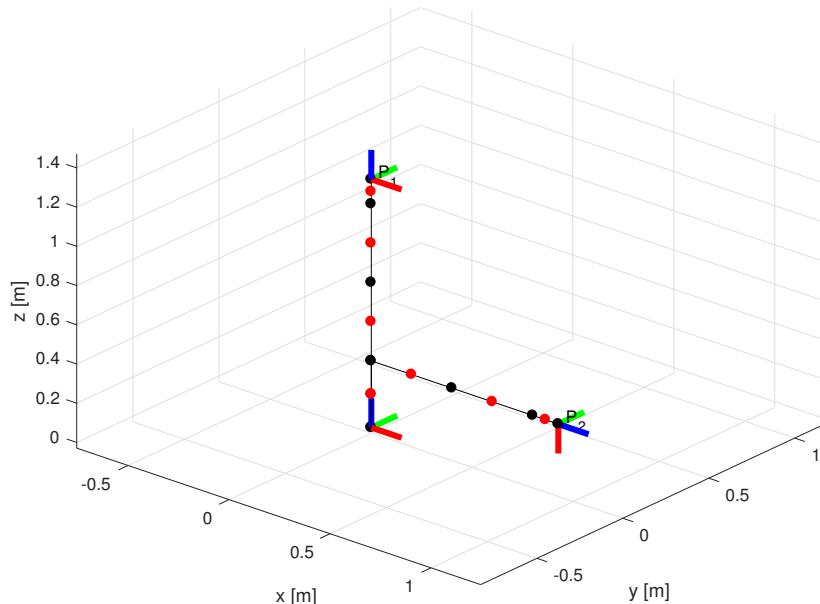
Obrázek 9.4: Zaznamenané odchylky $\vec{\tau}_d$ jednotlivých kloubů během pohybu po trajektorii T_1 při měření nepřesností řídících sil $\vec{\tau}_{c,\epsilon}(\vec{\Theta})$.

Z grafu 9.4 je vidět, že nepřesnosti řídících sil $\vec{\tau}_{c,\epsilon}(\vec{\Theta})$ nejsou nulové. V ustálených stavech jsou vidět nenulové hodnoty $\vec{\tau}_{c,\epsilon}(\vec{\Theta})$, z čehož lze usuzovat

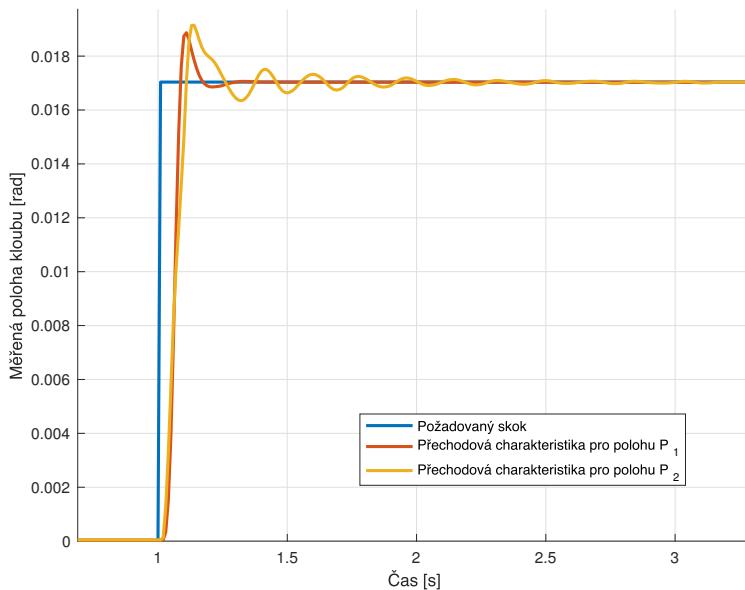
nepřesnosti ve statických parametrech modelu robota v řídící jednotce. Z grafu 9.4 je dále vidět šum během pohybu, což značí nepřesnosti v dynamických parametrech modelu robota v řídící jednotce. V naměřených datech byly změřeny slabé oscilace o frekvencích 17 Hz a 8 Hz. Zdroj oscilací se nachází někde v uzavřeném systému robota.

9.3 Přechodová charakteristika prvního kloubu

V tomhle experimentu se měřila přechodová charakteristika prvního kloubu. Na vstup prvního kloubu se nastavil skok o velikosti maximální povolené rychlosti za jednu periodu pro první kloub $\Theta_{c,1} = 0.01 \cdot v_{max,1} = 0.017$ [rad] (0.974°) a zaznamenávala se měřená poloha kloubu $\Theta_{m,1}$. Testování proběhlo pro dvě polohy robota: poloha $P_1 = [0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$, při které byl první kloub nejméně zatížený viz obrázek 9.5 a poloha $P_2 = [0, \pi/2, 0, 0, 0, 0]^T$, při které byl první kloub nejvíce zatížen.



Obrázek 9.5: Poloha $P_1 = [0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$ kdy byl robot nejméně zatížen a poloha $P_2 = [0, \pi/2, 0, 0, 0, 0]^T$ kdy byl nejvíce zatížen. Polohy při testování přechodové charakteristiky prvního motoru a požadovaného skoku o velikosti $\Theta_{c,1} = 0.017$ rad.

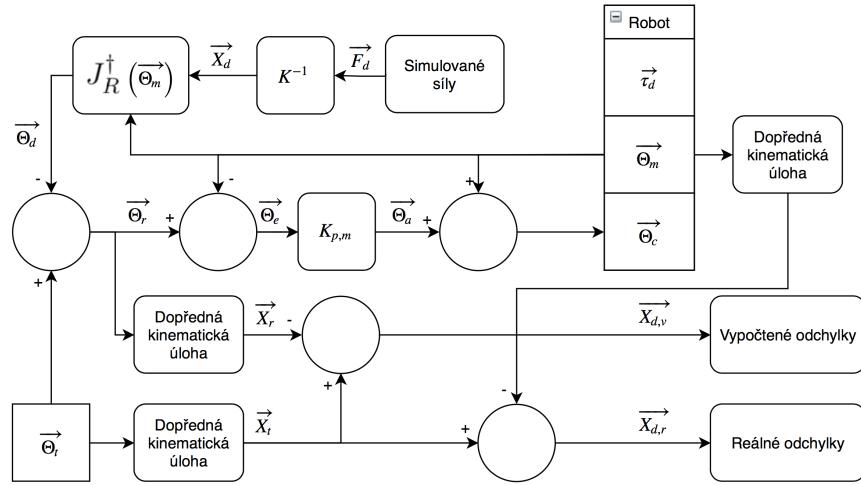


Obrázek 9.6: Porovnání přechodových charakteristik zaznamenané kloubové souřadnice $\Theta_{m,1}$ prvního kloubu.

Naměřeny byly dvě přechodové charakteristiky viz graf 9.6. Graf 9.6 ukazuje, že se jedná o systém vyššího řádu než 2, který asymptoticky sleduje požadovanou polohu. V případě polohy P_2 je možné pozorovat oscilace o frekvenci 50 Hz. Z experimentu je zřejmé, že přenosová funkce systému je rozdílná pro různé polohy robota.

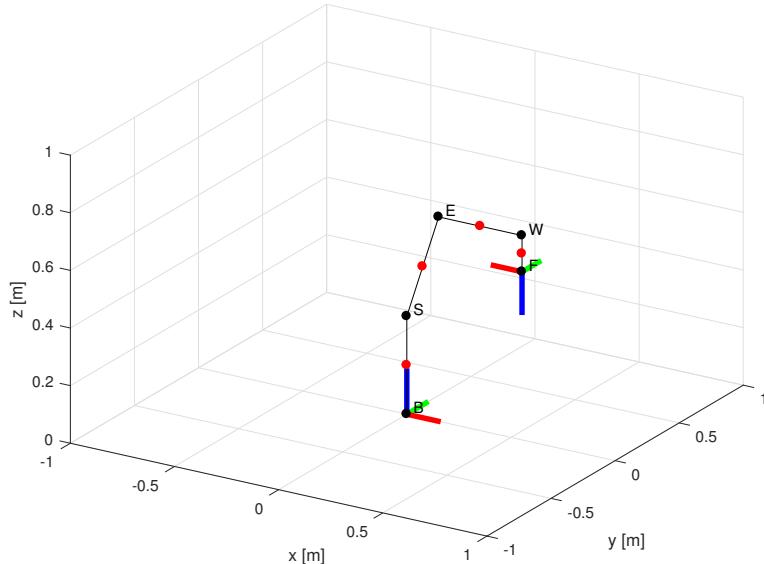
9.4 Testování proporcionálního regulátoru pomocí simulovaných sil

Testování admitanční zpětné vazby probíhalo bez nasazeného čisticího motoru s kartáčem. Robotovi se na vstupu simulovaly externí síly \vec{F}_d působící v bodě příruby F viz schéma.



Obrázek 9.7: Regulační schéma pro testování proporcionálního regulátoru pomocí simulovaných sil \vec{F}_d působících v bodě příruby F . Porovnávaly se rozdíly mezi reálnými $\vec{x}_{d,r}$ a vypočtenými $\vec{x}_{d,v}$ odchylkami.

Porovnávaly se reálné $\vec{x}_{d,r}$ a vypočtené $\vec{x}_{d,v}$ odchylky viz schema [9.7]. Hodnotila se stabilita systému a časové konstanty v jednotlivých osách x , y a z . Jako pracovní bod byla zvolena poloha robota $P_3 = [0, 0.3928, 0, -1.1781, 0, 1.5709, 0]^T$, viz obrázek [9.8].



Obrázek 9.8: Poloha robota $P_3 = [0, 0.3928, 0, -1.1781, 0, 1.5709, 0]^T$ při testování proporcionálního regulátoru pomocí simulovaných sil \vec{F}_d působících v bodě příruby F .

9.4. Testování proporcionálního regulátoru pomocí simulovaných sil

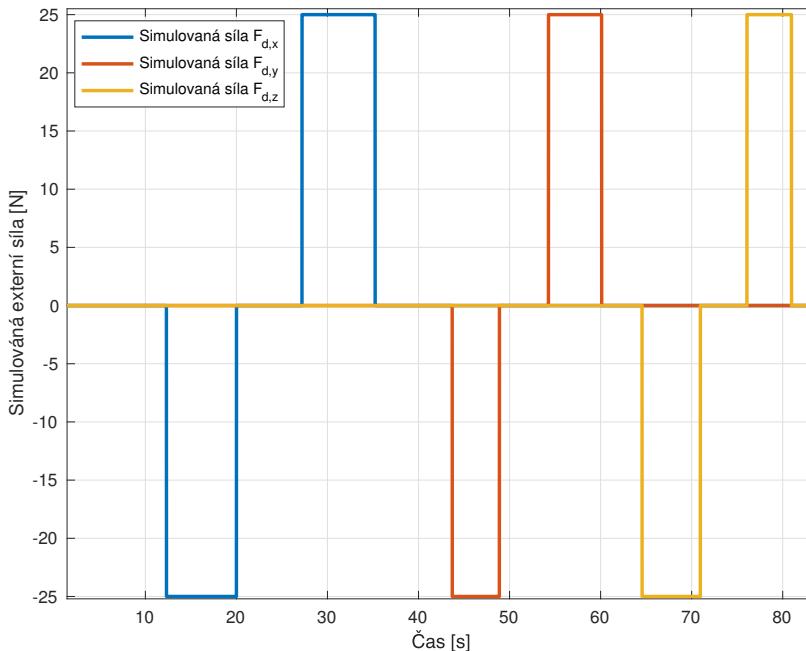
Testování bylo prováděno pouze pro posuv po osách x , y a z . Matice tuhosti K se zvolila:

$$K = \begin{bmatrix} 1000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5000 \end{bmatrix}. \quad (9.1)$$

Pro pracovní bod byly nalezeny regulační konstanty:

$$\vec{K}_p = \begin{bmatrix} 0.035 & 0.015 & 0.05 & 0.015 & 0.05 & 0.015 & 0.05 \end{bmatrix}. \quad (9.2)$$

Regulátor byl testován postupně po jednotlivých osách x , y a z . Testování probíhalo následovně: nastavily se požadované síly \vec{F}_d v bodě příruby F , vyčkalo se až se robot vychýlí a ustálí na požadované výchylky \vec{x}_d a následně se požadované síly \vec{F}_d vrátily zpět na nulu. Testované síly \vec{F}_d byly vždycky postupně 25 N ve všech osách a v obou směrech, viz obrázek 9.9.



Obrázek 9.9: Simulované externí síly \vec{F}_d v bodě příruby F střídavě pro záporný a kladný směr pro každou z os x , y a z při testování proporcionálního regulátoru pomocí simulovaných sil v bodě příruby F .

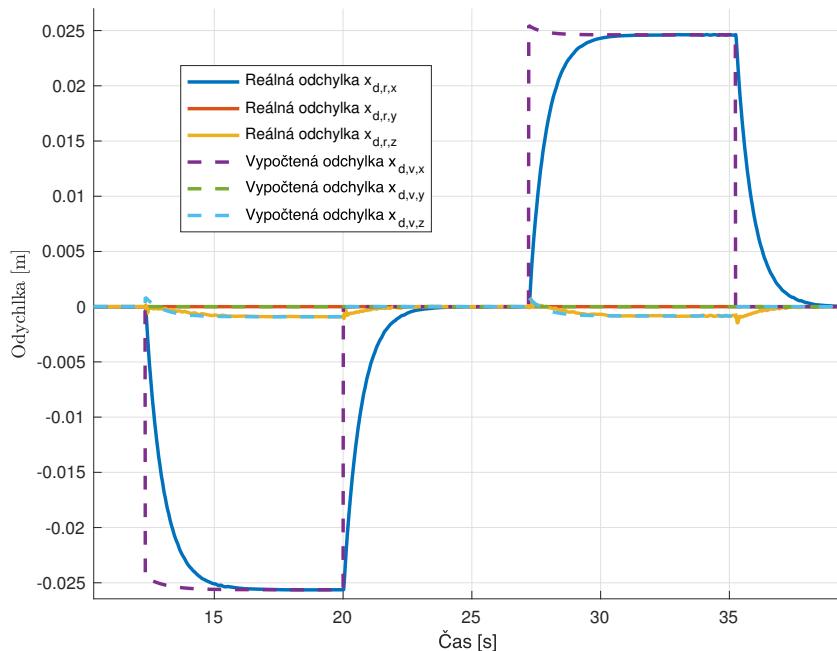
Protože byla tuhost pro všechny osy stejná, byly i požadované výchylky \vec{x}_d

stejné pro všechny osy a směry, např.: pro osu x :

$$x_{d,x} = \frac{1}{k_x} F_{d,x} = \frac{25}{1000} = 0.025 \text{ m}. \quad (9.3)$$

Takže výchylka byla pro všechny osy a směry 0.025 m.

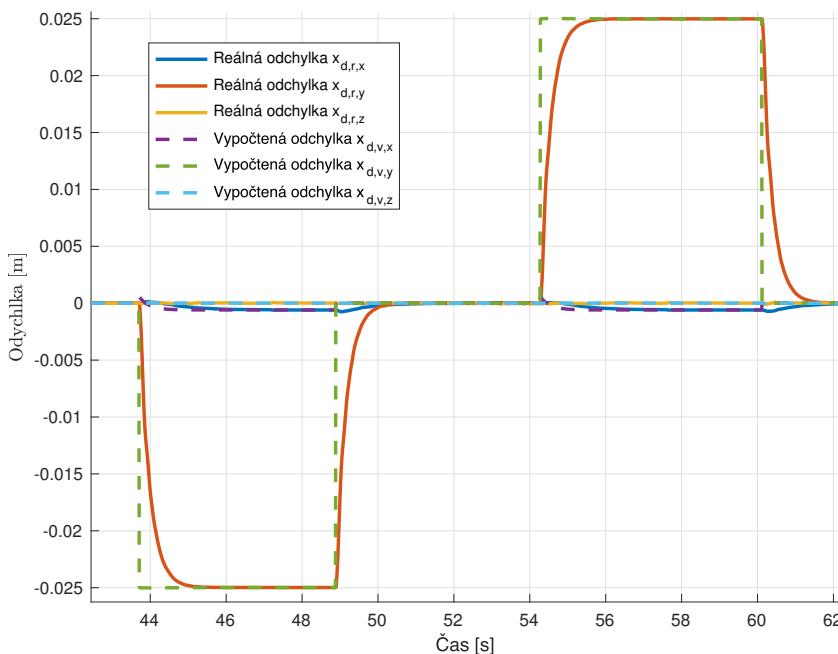
■ 9.4.1 Testování proporcionálního regulátoru pomocí simulovaných sil v ose x



Obrázek 9.10: Přechodová charakteristika vypočtených $\vec{x}_{d,v}$ a reálných $\vec{x}_{d,r}$ odchylek při testování proporcionálního regulátoru pomocí simulovaných sil v ose x v bodě příruby F .

Na naměřené přechodové charakteristice 9.10 byla stanovena časová konstanta $t_{e,x} = 0.66$ s, za kterou byla hodnota vychýlení na 63% ustálené hodnoty. Na grafu je taky vidět vliv přepočtu kartézských odchylek \vec{x}_d na kloubové odchylky $\vec{\Theta}_d$ pomocí pravé pseudoinverze Jacobiho matice viz. experiment 9.1. Rozdíl mezi odchylkami byl změřen na 0.1mm.

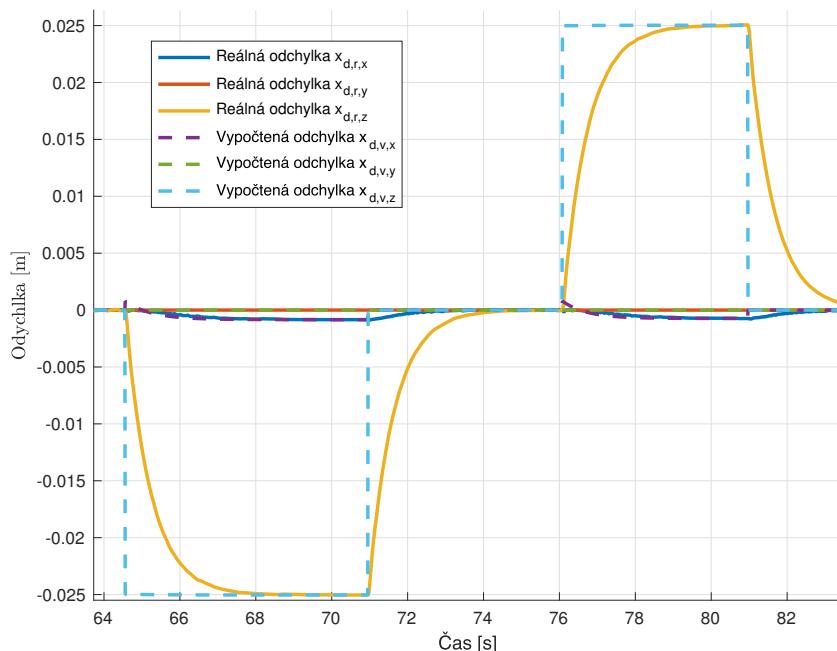
9.4.2 Testování proporcionálního regulátoru pomocí simulovaných sil v ose y



Obrázek 9.11: Přechodová charakteristika vypočtených $\vec{x}_{d,v}$ a reálných $\vec{x}_{d,r}$ odchylek při testování proporcionálního regulátoru pomocí simulovaných sil v ose y v bodě příruby F.

Na naměřené přechodové charakteristice 9.11 byla stanovena časová konstanta $t_{e,y} = 0.27$ s, která je menší než časová konstanta $t_{e,x}$, protože při pohybu po ose y v pracovním bodě $\vec{\Theta}_t = [0, 0.3928, 0, -1.1781, 0, 1.5709, 0]$ jsou hlavně aktivní klouby 1, 3, 5 a 7, které mají větší regulační proporcionální konstanty \vec{K}_p než klouby 2, 4 a 6. V ose y je vliv přepočtu kartézských odchylek \vec{x}_d na kloubové odchylky $\vec{\Theta}_d$ pomocí pravé pseudoinverze Jacobiho matice viz. experiment 9.1 minimální.

9.4.3 Testování proporcionálního regulátoru pomocí simulovaných sil v ose z



Obrázek 9.12: Přechodová charakteristika vypočtených $\vec{x}_{d,v}$ a reálných $\vec{x}_{d,r}$ odchylek při testování proporcionálního regulátoru pomocí simulovaných sil v ose z v bodě příruby F.

Na naměřené přechodové charakteristice 9.12 byla stanovena časová konstanta $t_{e,z} = 0.66$ s, která je stejná jako $t_{e,x}$, protože při pohybu po ose z jsou používané stejné klouby 2, 4 a 6 jako při pohybu po ose x. Stejně jako v předchozích experimentech se objevil minimální vliv přepočtu pomocí pravé pseudoinverze Jacobiho matice viz. experiment 9.1.

9.4.4 Testování proporcionálního regulátoru pomocí simulovaných sil při nižších hodnotách tuhosti zpětné vazby

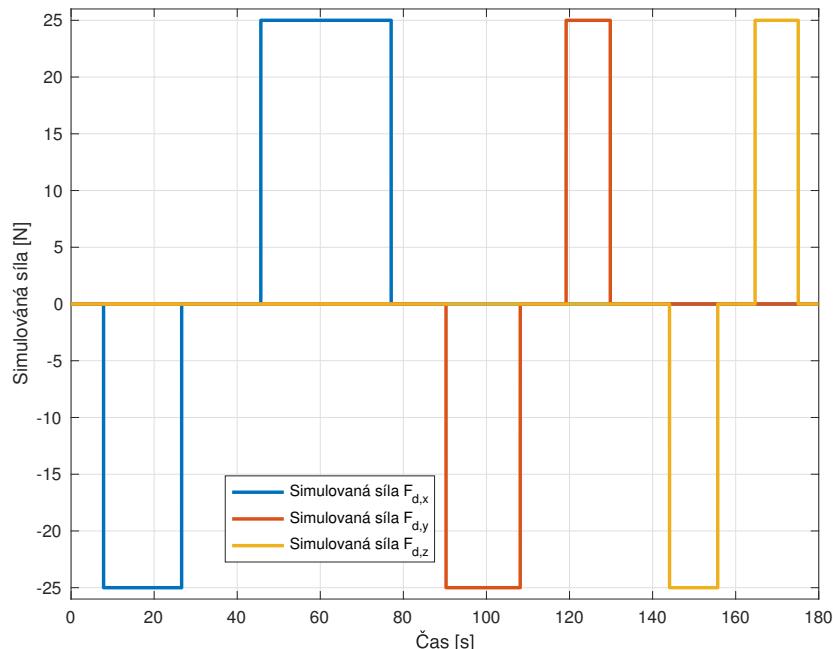
Testování probíhalo při hodnotách tuhosti matice K :

$$K = \begin{bmatrix} 500 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 500 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 500 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5000 \end{bmatrix}. \quad (9.4)$$

Systém se při menší tuhosti matice K rozkmital, a tak byly regulační konstanty sníženy o polovinu na:

$$\vec{K}_p = \begin{bmatrix} 0.0175 & 0.0075 & 0.025 & 0.0075 & 0.025 & 0.0075 & 0.025 \end{bmatrix}. \quad (9.5)$$

Simulované externí síly \vec{F}_d v bodě příruby F byly stejně veliké jako v předchozím měření a to 25 N pro všechny osy a směry, viz obrázek 9.13.

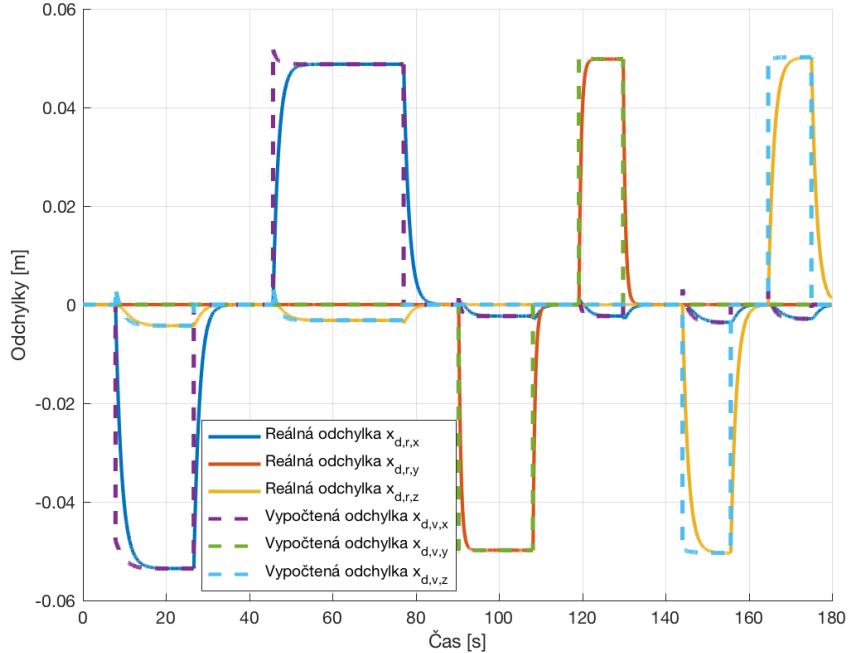


Obrázek 9.13: Simulované externí síly \vec{F}_d v bodě příruby F střídavě pro záporný a kladný směr pro každou z os x , y a z při testování proporcionálního regulátoru pomocí simulovaných sil v bodě příruby F se sníženou tuhostí poddajné zpětné vazby.

Požadované odchylky \vec{x}_d byly stejně veliké pro všechny osy a směry. Podle rovnice 9.3 se určila velikost odchylky $x_{d,x}$, tentokrát pro tuhost $k_x = 500$ Nm:

$$x_{d,x} = \frac{1}{k_x} F_{d,x} = \frac{25}{500} = 0.05 \text{ m}. \quad (9.6)$$

Požadované odchylky \vec{x}_d byly pro všechny osy 0.05 m.



Obrázek 9.14: Porovnání vypočtených $\vec{x}_{d,v}$ a reálných $\vec{x}_{d,r}$ odchylek při testování regulátoru na simulovaných silách se sníženou tuhostí poddajné zpětné vazby.

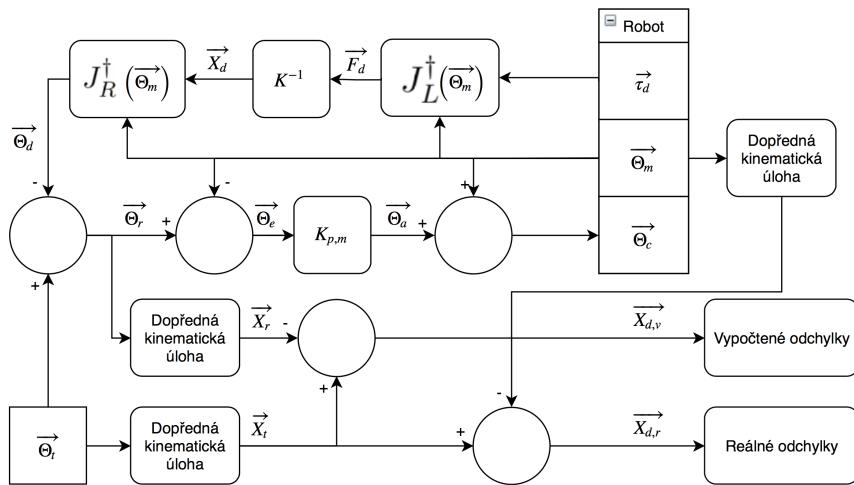
Na grafu 9.14 byly pro jednotlivé přechodové charakteristiky změřeny časové konstanty, za které byly sledované hodnoty na 63% své ustáleno hodnoty:

$$\begin{aligned} t_{e,x-} &= 1.46 \text{ s}, \\ t_{e,x+} &= 1.28 \text{ s}, \\ t_{e,y-} &= 0.54 \text{ s}, \\ t_{e,y+} &= 0.5 \text{ s}, \\ t_{e,z-} &= 0.13 \text{ s}, \\ t_{e,z+} &= 0.13 \text{ s}. \end{aligned} \quad (9.7)$$

Při menších hodnotách tuhosti matice K byly odchylky robota \vec{x}_d od rovnovážných poloh \vec{x}_t větší. Kvůli stabilitě systému byly sníženy proporcionální regulační konstanty \vec{K}_p na polovinu, čímž se zvětšily časové konstanty \vec{t}_e . Časové konstanty se změnily rozdílně, protože jsou víc využívané všechny klouby.

Zvětšily se i nepřesnosti způsobené přepočtem pomocí Jacobiho matice viz. kapitola 9.1.

9.5 Testování proporcionálního regulátoru na reálných silách



Obrázek 9.15: Regulační schéma pro testování proporcionálního regulátoru na reálných silách \vec{F}_d . Porovnávaly se rozdíly mezi reálnými $\vec{x}_{d,r}$ a vypočtenými $\vec{x}_{d,v}$ odchylkami.

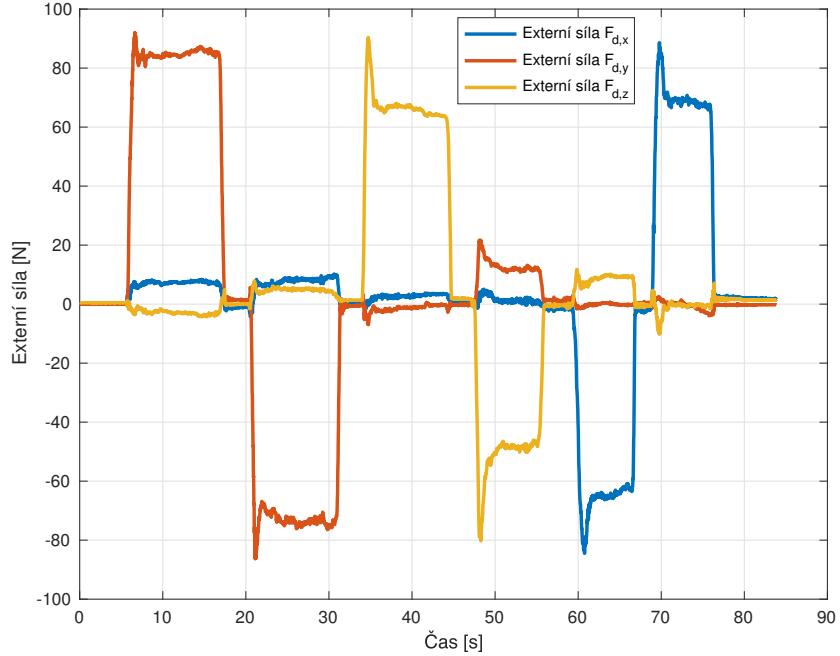
Testování probíhalo na reálných externích silách \vec{F}_d působící v bodě přírub F . Na přírubu robota byly vyvíjeny síly ve všech osách x , y a z v obou směrech. Měřily se externí síly \vec{F}_d a porovnávaly se $\vec{x}_{d,v}$ a reálné $\vec{x}_{d,r}$ výchylky. Pořadí os bylo zvoleno x , y a z . Regulační schéma bylo zapojené podle 9.15. Jako pracovní bod byla zvolena poloha robota $P_4 = [0, 0.3928, 0, -1.1781, 0, 1.5709, 0]$, viz obrázek 9.8. Byla zvolena matice tuhosti s hodnotami:

$$K = \begin{bmatrix} 1000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5000 \end{bmatrix}, \quad (9.8)$$

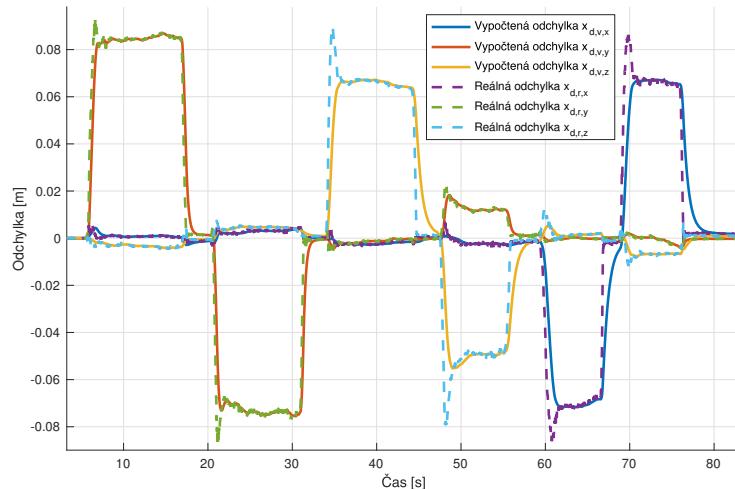
pro kterou jsou odladěné regulační konstanty:

$$\vec{K}_p = [0.035 \ 0.015 \ 0.05 \ 0.015 \ 0.05 \ 0.015 \ 0.05]. \quad (9.9)$$

Na grafu 9.16 jsou vidět reálné externí síly \vec{F}_d se šumem. Při kontaktu s okolím je vidět špička v naměřených externích silách \vec{F}_d . Graf 9.17 ukazuje regulátor sledující výchylku $\vec{x}_{d,v}$ podle působení externích sil \vec{F}_d v bodě příruby F .



Obrázek 9.16: Zaznamenané externí síly \vec{F}_d v bodě příruby F , střídavě záporný a kladný směr pro každou z os y , z a x .



Obrázek 9.17: Vypočtené $\vec{x}_{d,v}$ a reálné $\vec{x}_{d,r}$ odchylky při testování proporcionalního regulátoru na reálných silách.

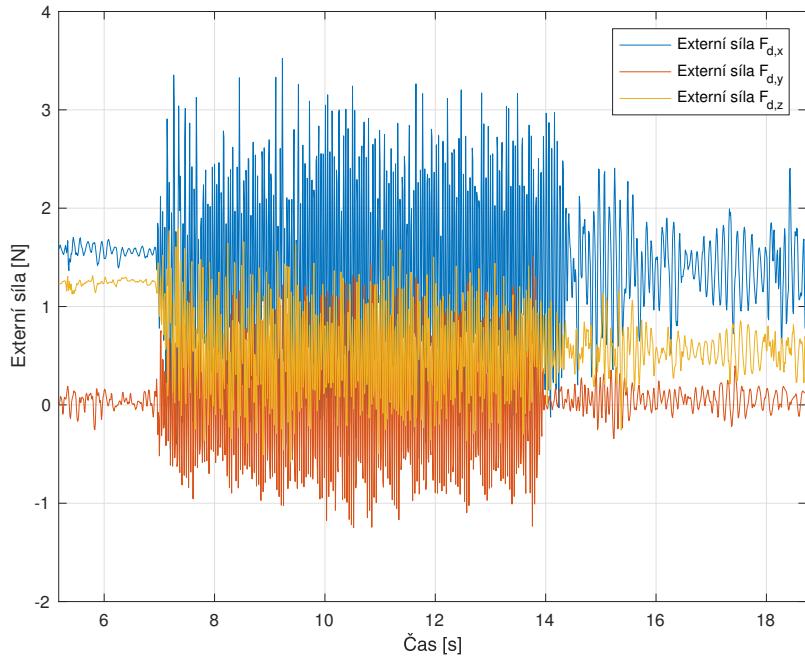
9.6 Testování proporcionálního regulátoru se zapnutým čistícím motorem s kartáčem

Testoval se vliv rotace rotoru a kartáče na externí síly \vec{F}_d bez kontaktu a následně při kontaktu s čištěným předmětem. Při kontaktu točícího se kartáče s čištěným předmětem byly čištěným předmětem na robota vyvíjeny síly \vec{F}_d . Regulační schéma bylo zapojené podle 9.15. Zaznamenávaly se externí síly \vec{F}_d působící v bodě příruby F . Porovnávaly se $\vec{x}_{d,v}$ a reálné $\vec{x}_{d,r}$ výchylky. Protože na robotovi byla přimontovaná příruba s čisticím motorem, bylo potřeba odečíst vliv jejich váhy $F_{d,f,z} = 3.394\text{N}$ a $F_{d,b,z} = 25.947\text{N}$ od externí síly $F_{d,z}$. Jako pracovní bod byla zvolena poloha robota $P_5 = [0, 0.3928, 0, -1.1781, 0, 1.5709, -0.7853]$. Jako tuhost v admitanční zpětné vazbě byla zvolena matice s hodnotami:

$$K = \begin{bmatrix} 500 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 500 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 500 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5000 \end{bmatrix}, \quad (9.10)$$

pro kterou jsou odladěné regulační konstanty:

$$\vec{K}_p = \begin{bmatrix} 0.0175 & 0.0075 & 0.025 & 0.0075 & 0.025 & 0.0075 & 0.025 \end{bmatrix}. \quad (9.11)$$

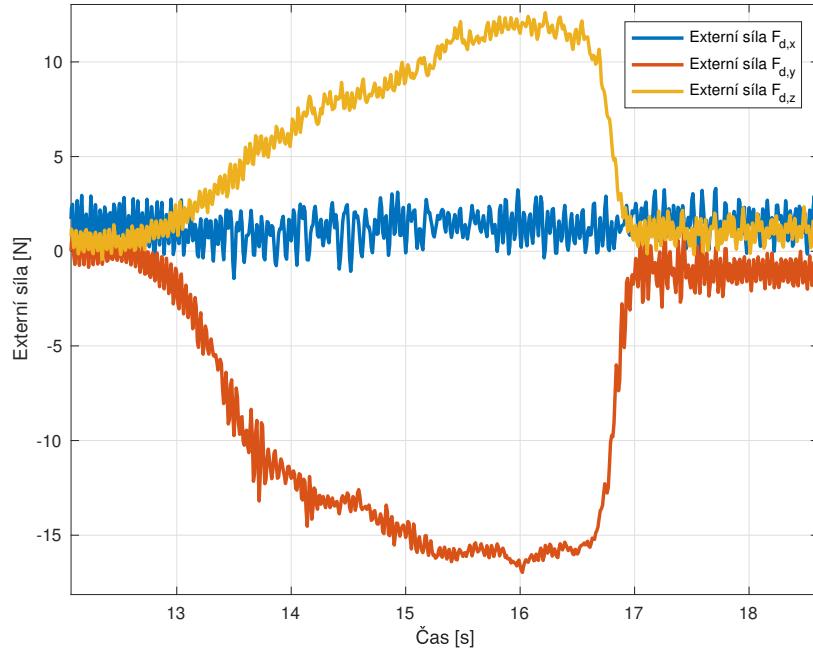


Obrázek 9.18: Vliv zapnutí a vypnutí čistícího motoru s kartáčem na externí síly \vec{F}_d .

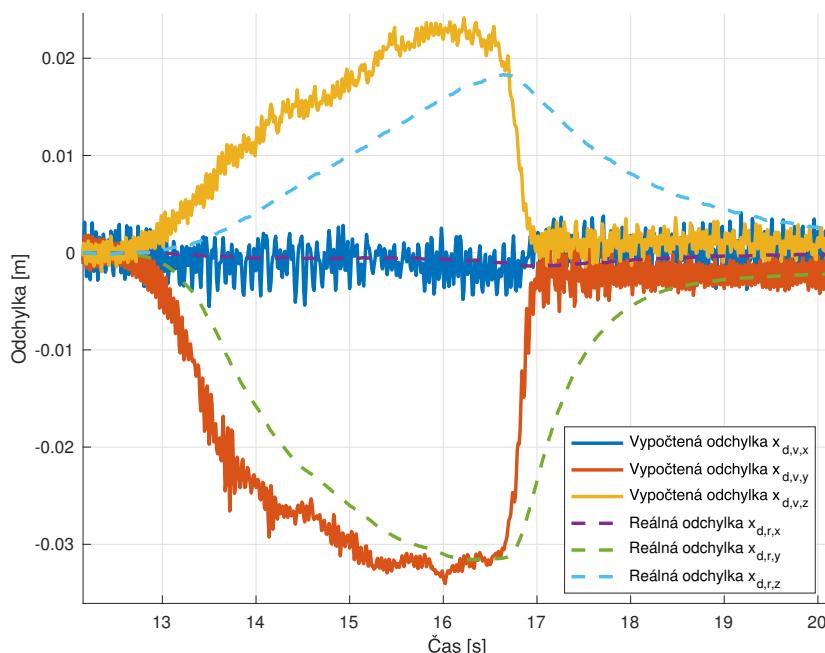
Na grafu 9.18 je vidět šum v měřených silách \vec{F}_d způsobený točícím se rotem s kartáčem. V čase 7s je vidět zapnutí motoru a v čase 14s jeho vypnutí. Frekvence šumu je 24.6Hz, což odpovídá 1476 otáčkám za minutu. Střední hodnota šumu pro osu x je 1.376N a směrodatná odchylka 0.052N. Pro osu y je střední hodnota šumu 0.06N a směrodatná odchylka 0.002N. Na ose z je střední hodnota šumu 0.5746N a směrodatná odchylka 0.021N. Amplituda šumu je pro každou osu rozdílná, protože rotace motoru ovlivňuje každou osu jinak, záleží na poloze a natočení motoru. Zapnutí motoru způsobilo změnu offsetu v měřených silách \vec{F}_d od nuly. Zdroj změny nebylo možné identifikovat, protože je robot uzavřený systém. Se změnami je při dalších experimentech počítáno.

Graf 9.19 ukazuje externí síly \vec{F}_d při kontaktu s čištěným předmětem. Z grafu 9.20 je vidět vliv malé časové konstanty $t_{e,z}$, protože regulátor nesledoval požadovanou výchylku $x_{d,v,z}$. Za to v ose y , kde je časová konstanta $t_{e,y}$ menší je vidět, že regulátor zmenšoval regulační odchylku rychleji než v ose z .

9.6. Testování proporcionálního regulátoru se zapnutým čistícím motorem s kartáčem



Obrázek 9.19: Vliv čištění na externí síly \vec{F}_d se zapnutou poddajnou zpětnou vazbou.



Obrázek 9.20: Vypočtené $\vec{x}_{d,v}$ a reálné $\vec{x}_{d,r}$ odchylky při testování proporcionálního regulátoru se zapnutým čistícím motorem a poddajnou zpětnou vazbou.

Kapitola 10

Závěr

Tato práce měla za cíl popsat využití robota KUKA LBR iiwa na čištění bot za pomoci silové poddajnosti.

Pro snadnější připojování dalších zařízení byl robot rozšířený o rozvodnou skříň s vyvedenými vstupy a výstupy z řídící jednotky. Robot byl dovybaven externím tlačítkem nouzového zastavení. Pro případnou spolupráci dvou robotů lze externí tlačítka obou robotů propojit mezi sebou, aby se oba roboti zastavili po zmáčknutí libovolného tlačítka nouzového zastavení. Robot byl vybaven motorem s kartáčem pro čištění bot.

Byly popsány vlastnosti robota vyplývající z redundantnosti sedmého stupně volnosti. Byl zaveden úhel δ , při jehož specifikování se stává inverzní kinematická úloha jednoznačná. Byla implementovaná inverzní kinematická úloha.

Řízení robota bylo rozšířené o poddajnou zpětnou vazbu s nastavitelnými hodnotami tuhosti a regulátor, který robota řídí na požadovanou polohu podle trajektorie a externích sil. Regulátor byl odladěn a otestován pouze pro posuv po kartézských osách. Nepodařilo se odladit regulátor, který by dokázal robota řídit s malými regulačními časovými konstantami a zároveň byl stabilní. Regulátor řídil polohu s trvalou regulační konstantou, protože neobsahoval integrační složku, což ale v případě silové poddajnosti lze zanedbat. Při testování se objevily neznámé odchylky od požadované polohy, u kterých se nepodařilo identifikovat původ a vyžadují další zkoumání.

Pro přesnější výpočet externích sil byly změřeny vlivy na měřené síly způsobené zapnutým motorem s kartáčem. Při testování nezatíženého robota byly naměřeny nepřesnosti v řídících kroutících momentech, které značí nepřesnosti v statických a dynamických parametrech modelu robota v řídící jednotce. Pro správnější určení externích sil bude potřeba vytvořit model a identifikovat statické a dynamické parametry robota.

Silová poddajnost fungovala, ale při experimentech se ukázalo, že regulátor není dostatečně stabilní při nižších hodnotách tuhosti. Z tohoto důvodu nebylo zatím provedeno čištění bot se zapnutou silovou poddajností. Bude potřeba lépe porozumět systému robota a navrhnut robustnější zpětnou vazbu.

Příloha A

Literatura

- [12] *Moveit! motion planning framework.*
- [1318] *Denavit–hartenberg parameters*, Wikimedia Foundation, Feb 2018.
- [18] *Kuka smartpad*, [\[https://www.kuka.com/en-hu/products/robotics-systems/robot-controllers/smartpad\]](https://www.kuka.com/en-hu/products/robotics-systems/robot-controllers/smartpad).
- [4] *Lbr iiwa*, [\[https://www.kuka.com/en-gb/products/robotics-systems/industrial-robots/lbr-iiwa\]](https://www.kuka.com/en-gb/products/robotics-systems/industrial-robots/lbr-iiwa).
- [516] *Lbr iiwa 7 r800, lbr iiwa 14 r820 specification*, vol. 7, 5 2016, pdf.
- [616] *Kuka sunrise cabinet*, vol. 7, 5 2016, pdf.
- [816] *Kuka sunrise.fri 1.11*, vol. 1, 6 2016, pdf.
- [ACR14] H. H. An, W. I. Clement, and B. Reed, *Analytical inverse kinematic solution with self-motion constraint for the 7-dof restore robot arm*, 2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, July 2014, pp. 1325–1330.
- [BDW⁺17] Y. Bin, W. Dongkun, L. Wenfeng, L. Yaliang, B. Kaixian, and K. Xiangdong, *The dynamic compliance composition of force-based impedance control and its experimental research*, 2017 2nd International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM), Aug 2017, pp. 19–24.
- [CMF16] A. Calanca, R. Muradore, and P. Fiorini, *A review of algorithms for compliant control of stiff and fixed-compliance robots*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics **21** (2016), no. 2, 613–624.

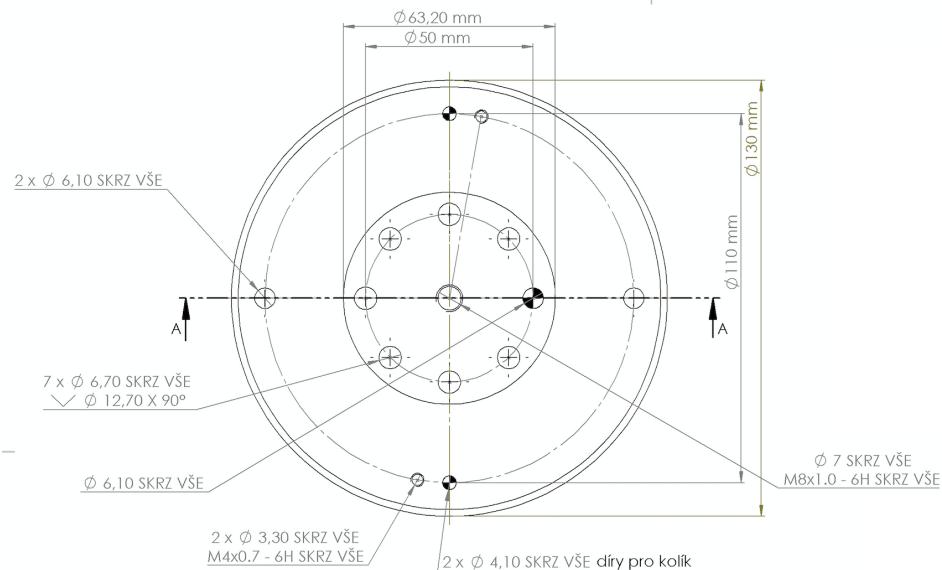
- [HFV⁺16] Christoph Hennersperger, Bernhard Fuerst, Salvatore Virga, Oliver Zettinig, Benjamin Frisch, Thomas Neff, and Nassir Navab, *Towards mri-based autonomous robotic us acquisitions: A first feasibility study*, IEEE transactions on medical imaging (2016).
- [KSJE16] I. Kuhlemann, A. Schweikard, P. Jauer, and F. Ernst, *Robust inverse kinematics by configuration control for redundant manipulators with seven dof*, 2016 2nd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR), April 2016, pp. 49–55.
- [Law88] D.A. Lawrence, *Impedance control stability properties in common implementation*, 1185 – 1190 vol.2.
- [NCG⁺17] F. Negrello, M. G. Catalano, M. Garabini, M. Poggiani, D. G. Caldwell, N. G. Tsagarakis, and A. Bicchi, *Design and characterization of a novel high-compliance spring for robots with soft joints*, 2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), July 2017, pp. 271–278.
- [NK12] Takashi Nammoto and Kazuhiro Kosuge, *An analytical solution for a redundant manipulator with seven degrees of freedom*, International Journal of Automation and Smart Technology **2** (2012), no. 4.
- [OMN10] Christian Ott, Ranjan Mukherjee, and Yoshihiko Nakamura, *Unified impedance and admittance control*, Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2010, pp. 554–561 (English (US)).
- [RH95] Karel Rektorys and Karel Horák, *Přehled užité matematiky*, Prometheus, 1995.
- [SYZ17] P. Song, Y. Yu, and X. Zhang, *Impedance control of robots: An overview*, 2017 2nd International Conference on Cybernetics, Robotics and Control (CRC), July 2017, pp. 51–55.
- [WL16] A. Wahrburg and K. Listmann, *Mpc-based admittance control for robotic manipulators*, 2016 IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC), Dec 2016, pp. 7548–7554.

Příloha B

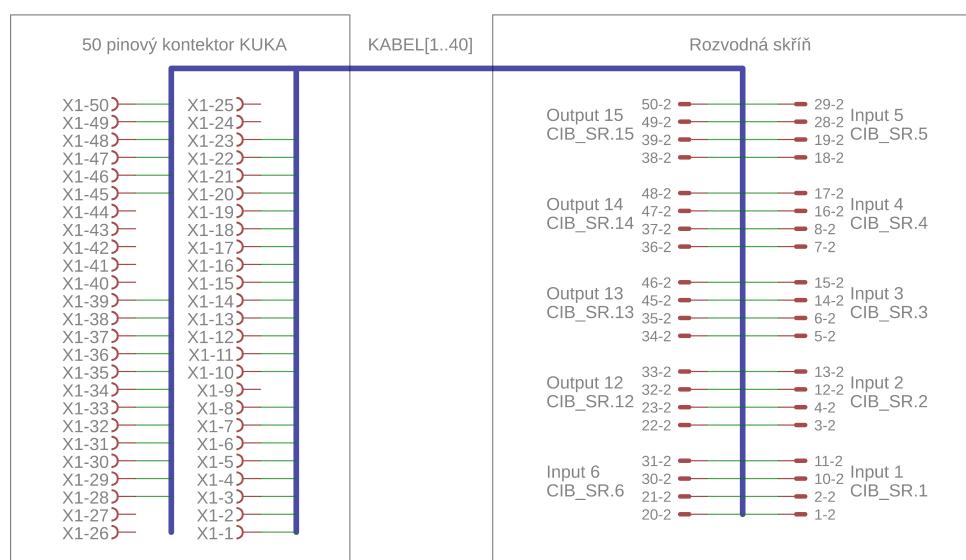
Přílohy

■ Seznam příloh na DVD

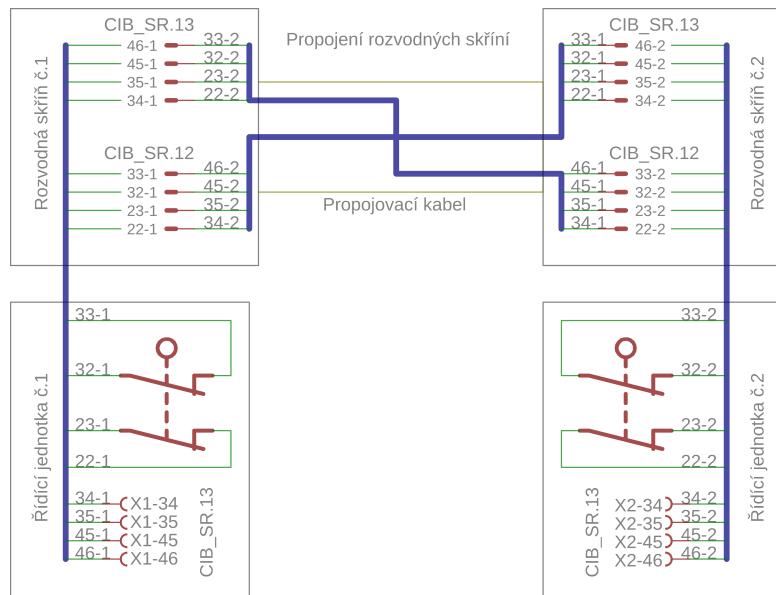
1. Text této bakalářské práce ve formátu PDF: CistenBotPomociSilove-PoddajnehoRobotaCihala.pdf
2. Zdrojový kód inverzní kinematické úlohy: InverseKinematics.cpp
3. Zdrojový kód řídícího systému s poddajnou zpětnou vazbou: AdmittanceRegulatorCode.cpp



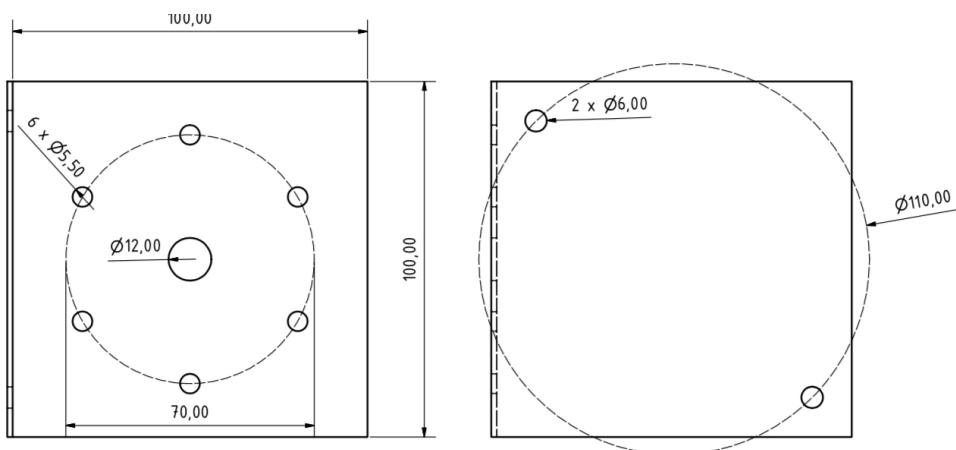
Obrázek B.1: Výkres rozšířené příruby s rozměry umístěné na robotovi KUKA LBR iiwa 7 [Daniel Seifert, Vladimír Smutný].



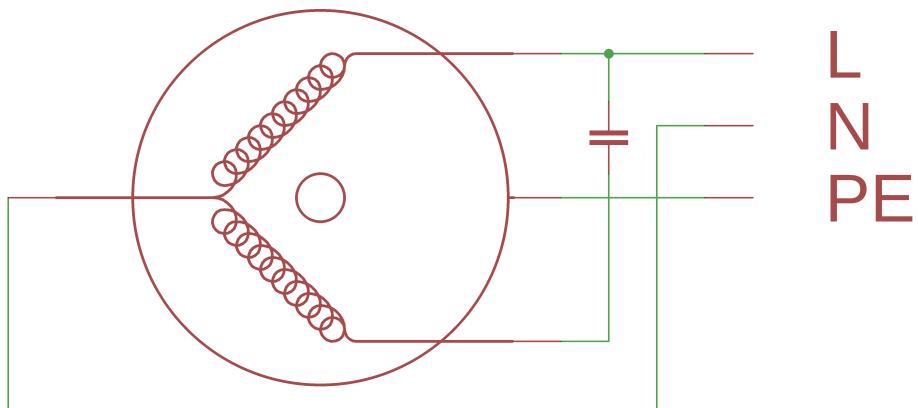
Obrázek B.2: Schéma propojení řídící jednotky s rozvodnou skříní pomocí 40-ti žilového kabelu.



Obrázek B.3: Propojení tlačítek nouzového zastavení dvou řídících jednotek, přes jejich rozvodné skříně č.1 a č.2 pomocí propojovacího kabelu [616].



Obrázek B.4: Otvory v kovové spojce pro připevnění motoru k rozšířené přírubě a rozměry vyvrstaných děr pro uchycení čistícího motoru k rozšířené přírubě robota.



Obrázek B.5: Elektrické schéma zapojení motoru do rozvodné sítě [nálepka na straně čistícího motoru] se startovacím kondenzátorem.