

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky

Poddajné řízení průmyslového robotu

Návrh poddajného regulátoru pro silově poddajného
robotu

Valentýn Číhala

Vedoucí: Ing. Vladimír Smutný, Ph.D.
Obor: Kybernetika a robotika
Studijní program: Kybernetika a robotika
Květen 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Čihala** Jméno: **Valentýn** Osobní číslo: **456152**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra řídicí techniky**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Studijní obor: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Poddajné řízení průmyslového robotu

Název diplomové práce anglicky:

Compliant Control of Industrial Robot

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s metodami poddajného řízení průmyslového robotu.
- 2) Navrhněte a implementujte vhodné algoritmy na robotu KUKA LBR. Algoritmy by měly být aplikovatelné i na jiných robotech případně doplněných o snímače externích sil a momentů.
- 3) Algoritmy experimentálně otestujte a výsledky experimentů vyhodnoťte.
- 4) Získané zkušenosti shrňte a navrhněte možná zlepšení.

Seznam doporučené literatury:

- [1] S. Chiaverini, B. Siciliano and L. Villani, "Force/position regulation of compliant robot manipulators," in IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 39, no. 3, pp. 647-652, March 1994.
- [2] Kim, Won S and Hannaford, B. and Bejczy, AK (1992) Force-reflection and shared compliant control in operating telemanipulators with time delay. Robotics and Automation, IEEE Transactions on, 8 (2). pp. 176-185.
- [3] A. Colomé, D. Pardo, G. Alenyà and C. Torras, "External force estimation during compliant robot manipulation," 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Karlsruhe, 2013, pp. 3535-3540.
- [4] Sadun, A.S. & Jalani, Jamaludin & Sukor, J.A.. (2016). An overview of active compliance control for a robotic hand. 11. 11872-11876.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **16.01.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **22.05.2020**

Platnost zadání diplomové práce:

do konce letního semestru 2020/2021

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

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Rád bych věnoval poděkování panu Ing. Vladimíru Smutnému, Ph.D. za podporu při psaní této diplomové práce a cenné rady. Rád bych poděkoval Ing. Vladimíru Petříkovi, Ph.D., Ing. Pavlu Krskovi, Ph.D. a Ing. Ondrovi Holešovskému za jejich cenné rady a Ing. Liboru Wagnerovi za pomoc při provádění experimentů a cenné rady. Děkuji 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 diplomové 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, 22. května 2020

Abstrakt

Tato diplomová práce se věnuje návrhu poddajného regulátoru na robotu KUKA Iiwa 7 v systému ROS. Práce se věnuje řízení robotu na polohu se silovou zpětnou vazbou implementovanou v jazyce C++. Pozornost je věnovaná i kartézské interpolaci trajektorie pro poddajný regulátor. Dále se práce zabývá požadavky reálného času regulátoru pro rychlou odezvu a změně parametrů regulátoru během provozu. Závěr vyhodnocuje naměřené údaje při experimentech.

Klíčová slova: silová zpětná vazba, poddajnost, KUKA, Iiwa, robot, admitanční regulátor, ROS, kontrolér

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

Abstract

This diploma thesis focuses on design of the compliant regulator on the KUKA Iiwa 7 robot in the ROS system. The thesis studies the position controller with force feedback implemented in programming language C++. Attention is also paid to cartesian trajectory planning. The thesis also deals with realtime requirements of the regulator for fast response and change of regulator parameters. The results of the experiments are discussed in conclusion.

Keywords: force feedback, compliance, KUKA, Iiwa, robot, admittance regulator, ROS, controller

Title translation: Compliant Control of Industrial Robot — Design of compliant regulator for force compliant robot

Obsah

Seznam použitých zkratek	1	3.2.1 KUKA aplikace	20
1 Úvod	3	3.2.2 FRI komunikační rozhraní . .	20
2 Současná řešení	5	3.2.3 ROS	20
2.1 Poddajnost	5	4 Návrh řešení	23
2.1.1 Využití poddajnosti	6	4.1 Návrh poddajného regulátoru . .	24
2.2 Měření vnějších sil	6	4.1.1 Přepočet sil	25
2.3 Kartézská interpolace trajektorie	8	4.1.2 Poddajný regulátor	26
2.4 ROS	10	4.1.3 Převod kartézské polohy do kloubových souřadnic	29
3 Použité nástroje	13	4.1.4 Silové působení	29
3.1 Použité vybavení	14	4.1.5 Kompenzace gravitace	30
3.1.1 Robot KUKA Iiwa 7	14	4.1.6 Vynulování vnějších sil	30
3.1.2 Řídicí jednotka KUKA	16	4.1.7 Transformace vnějších sil	32
3.1.3 Řídicí počítač	18	4.2 Kartézská interpolace trajektorie	33
3.1.4 Síťové zapojení robotu	18	5 Implementace	37
3.1.5 Siloměr Sauter FC 500	19	5.1 ROS smyčka	37
3.2 Programové nástroje	20	5.2 Poddajný kontrolér	38
		5.2.1 Fáze kontroléru	38

5.3 Podpůrná vlákna	39	6.2.4 Kolize s prostředím	60
5.3.1 Vlákno pro změnu parametrů	39	6.3 Časová náročnost	62
5.3.2 Vlákno pro výpočet trajektorie	40	7 Závěr	63
6 Experimenty	41	Další práce	65
6.1 Poddajný regulátor	41	A Literatura	67
6.1.1 Změna tuhosti	42	B Přílohy	71
6.1.2 Změna viskózního tlumení . . .	45	Seznam příloh na DVD	71
6.1.3 Poddajnost orientace	48	Výkresy	71
6.1.4 Všechny stupně volnosti	49		
6.1.5 Porovnání odchylek	51		
6.1.6 Kompenzace gravitace	51		
6.1.7 Vynulování vnějších sil	52		
6.1.8 Stabilita poddajného regulátoru	53		
6.2 Sledování kartézské trajektorie .	54		
6.2.1 Změna kartézské rychlosti . . .	55		
6.2.2 Změna tuhosti	56		
6.2.3 Změna viskózního tlumení regulátoru	58		



Seznam použitých zkratk

Iiwa	Intelligent industrial work assistant
FRI	Fast Robotic Interface
ROS	Robot Operating System



Kapitola 1

Úvod

Většina průmyslových robotů je v dnešní době řízena na polohu a pohybuje se po naplánovaných trajektoriích. Specifické aplikace vyžadují působení definovanou silou jako například lepení, broušení, natahování a další. Proto byly roboty vybaveny speciálními nástroji upravenými pro dané úlohy. Kooperace robotu s člověkem byla striktně omezena a naplánovaná tak, aby se zajistilo bezpečí obsluhy, robotu a okolí. Proto byl vyvinut poddajný způsob řízení robotu, u kterého se uvažuje i o interakci s okolím a působení sil mezi okolím a robotem. Hlavní poddajnou metodou je řízení robotu za použití zpětné silové vazby, kdy na základě měřených vnějších sil je stanovena odchylka od trajektorie. Cílem této práce je navrhnout poddajný regulátor, který stanoví odchylku od trajektorie. Řešení bude pro 6 stupňů volnosti a bude obsahovat možnost změnit parametry poddajnosti za běhu systému pro každý stupeň volnosti. Dále se práce zaměří na kartézskou interpolaci trajektorie a její napojení na poddajný regulátor.

Kapitola 2

Současná řešení

2.1 Poddajnost

Článek [1] rozebírá dynamické chování robotu při interakci s okolním světem. Říká, že nelze robota brát jako izolovaný systém od okolí, ale je potřeba robota řešit jako součást okolí a upravit chování za použití poddajného řízení. Většina průmyslových robotů je řízena jako izolovaný systém a úlohy byly tomu přizpůsobené, což vyžadovalo velkou přesnost nebo opakovatelnost polohy robotu. Řada úloh byla obtížně řešitelná. Analytický model a stabilita kontaktu mezi robotem a okolím je diskutována v článku [2]. Poddajnost je vyjádřena v kolmém směru k předmětu a stabilita je zkoumaná za použití Ljapunovy metody.

Existují hlavní dva typy aktivní poddajnosti: impedanční a admitanční, jejich rozdělení je diskutováno v článku [3]. Pro impedanční řízení je vstupní proměnnou měřená poloha a výstupem je síla. Regulátor je stabilní, protože při kontaktu s tuhým prostředím je změna vstupní polohy velmi malá. Admitanční způsob řízení má jako vstupní proměnnou měřenou sílu a výstupní veličinou je poloha. Druhý způsob se vyznačuje lepším řízením na polohu, ale velké kontaktní síly s tuhým předmětem způsobují rozkmitání regulátoru. Oba způsoby kombinuje dohromady hybridní metoda, která mezi nimi přepíná v závislosti na tuhosti prostředí, se kterým interaguje [4]. Další způsob jak dosáhnout poddajnosti je pasivní poddajnost za použití pružných kloubů. Článek [5] popisuje využití a omezení pasivní nastavitelné poddajnosti kloubů robotu pro kartézskou poddajnost.

2.1.1 Využití poddajnosti

Využití poddajnosti nachází velké spektrum možností ve vývoji protéz, a je i vhodné pro manipulaci s předměty robotickou rukou [6]. Použití poddajnosti při vzdálené manipulaci popisuje článek [7]. Vzdálená teleoperace je důležitá pro ovládání robotů, ke kterým nemá člověk normálně přístup (vesmír, životu nebezpečné prostředí, malé prostory a další). V případě takového řízení se začíná projevovat větší zpoždění mezi robotem a operátorem. Experiment zkoumá vliv zpoždění (od 2 do 4096 ms) na dobu provedení jednoduchého úkonu umístění kolíku do otvoru. Experiment byl proveden dvěma způsoby řízení: silová zpětná vazba a sdílené poddajné řízení. Silová zpětná vazba pouze přenášela kontaktní síly zpět k operátorovi a poddajnost zajišťoval operátor. V případě sdílené poddajnosti byla regulační smyčka rozšířena i o poddajnou regulační smyčku na straně robotu, viz obrázek 2.1. Umístění kolíku do otvoru za použití pouze silové zpětné vazby bylo možné do 1 s zpoždění. Sdílené poddajné řízení umožnilo úspěšně uložit kolík i nad 1 s zpoždění. Článek ještě shrnuje oscilace způsobné rukou operátora, při pevném držení lze oscilace snížit pod 0.5 Hz a operátorova ruka se chová jako dolní propust.

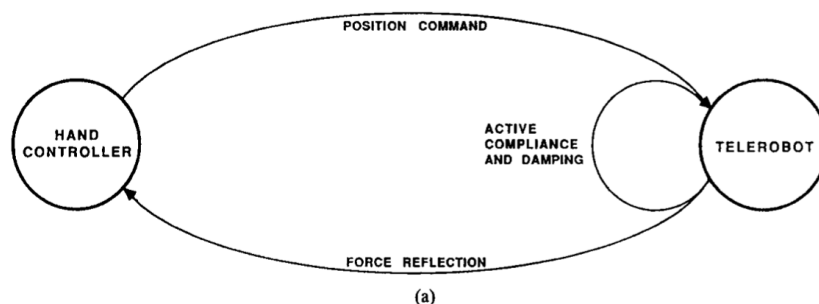
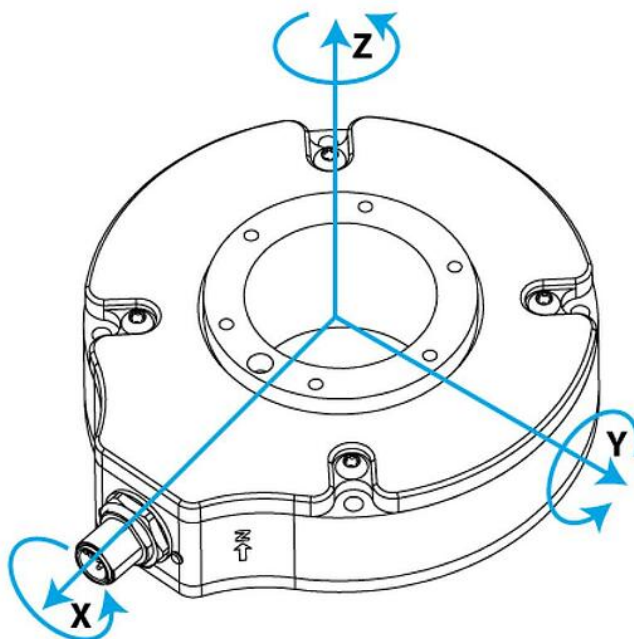


Schéma 2.1: Regulační schéma vzdálené teleoperace s poddajností pod smyčkou [7]

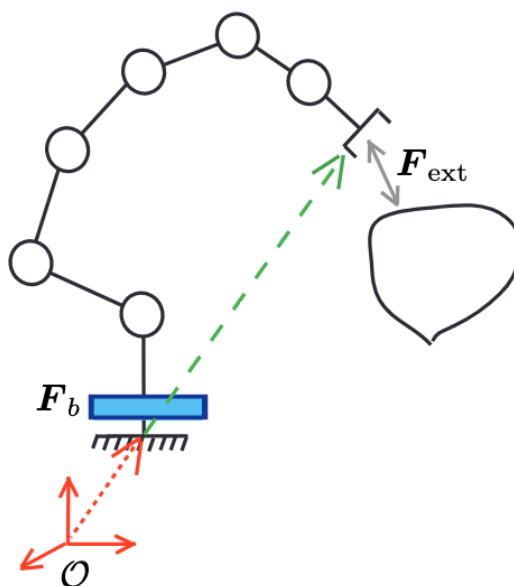
2.2 Měření vnějších sil

Pro poddajnost je klíčové měření vnějších sil vzniklých při kontaktu robotu s okolím. Pro měření vnějších sil lze použít senzor se šesti stupni volnosti připevněný k přírubě robotu [8]. Senzor vrací síly a kroutící momenty v souřadnicovém systému senzoru, viz obrázek 2.2.



Obrázek 2.2: Senzor sil se šesti stupni volnosti [9]

Dalším způsobem měření vnějších sil je umístění senzorů síly na posuvné klouby nebo senzorů krouticích momentů na otočné klouby, jako například obsahuje robot KUKA Iiwa 7 [10] a robot Panda od firmy Franka Emika [11]. Síly a krouticí momenty je potřeba přepočítat do globálního souřadnicového systému. Přepočet lze provést například za použití jakobiánu robotu [12]. Článek [13] se zabývá stanovením vnějších sil robotu během pohybu, za použití strojového učení bez znalosti analytického modelu robotu. Strojovým učením chtějí naučit pozorovatele detekovat vnější síly, čímž se odstraní potřeba analytického modelu robotu. Nevýhoda navrhnutého systému byla, že obsahoval menší zpoždění způsobené použitými filtry. Zpoždění může do poddajných aplikací reálného času vnést nežádoucí nestability. Článek [14] popisuje admitanční řízení, kdy senzor sil je umístěn v základně robotu, viz obrázek 2.3. Senzor vrací síly a krouticí momenty v souřadnicovém systému světa. Výhody oproti senzoru připevněného k přírubě robotu jsou, že lze detekovat kolizi celého robotu. Tato metoda není schopná stanovit přesnou část robotu, která se dostala do kolize. Použití tohoto typu měření může najít uplatnění u robotů vybavených nohama.



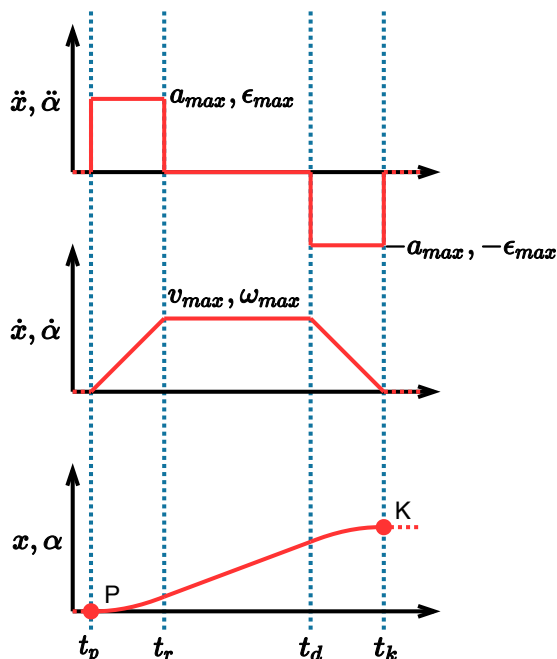
Obrázek 2.3: Senzor sil se šesti stupni volnosti umístěný do základny robotu (modrý obdélník) [14].

2.3 Kartézská interpolace trajektorie

Při poddajnosti je potřeba plánovat trajektorie, po kterých se robot bude pohybovat. Interpolace může probíhat ve spojitém nebo diskrétním čase. Vstup do interpolace je počáteční a koncová kartézská poloha příruby (translace, orientace). Orientaci lze vyjádřit třemi Eulerovými úhly [15]. Při interpolaci v Eulerových úhlech je potřeba dávat pozor na uzamčení Kardanova závěsu. Při uzamčení Kardanova závěsu jsou dvě osy otáčení paralelní a dochází ke ztrátě stupně volnosti rotace. Výstupem interpolace je trajektorie obsahující polohy, rychlosti a zrychlení. U interpolace je potřeba nastavit maximální rychlost v_{max} a zrychlení a_{max} , a maximální úhlovou rychlost ω_{max} a úhlové zrychlení ϵ_{max} .

Počáteční a koncová poloha je lineárně interpolovaná úsečkou, stejně je i počáteční a koncová orientace v prostoru třech úhlů. Interpolace následně probíhá na obou úsečkách zároveň. Interpolace má tři fáze: rozjezd, jízdu a dojezd, viz 2.4. Během fáze rozjezdu probíhá zrychlování podle nastaveného zrychlení a_{max} a ϵ_{max} . Během jízdy je zrychlení nulové a pohybuje se maximální požadovanou rychlostí v_{max} a ω_{max} . Ve fázi dojezdu robot zpomaluje se zrychlením $-a_{max}$ a $-\epsilon_{max}$. Parametry trajektorie lze libovolně měnit a lze použít i vyšší derivace polohy než zrychlení např.: ryv. Pokud je robot

vymodelován i s prostředím, lze během kartézské interpolace kontrolovat i kolize robotu s okolím. Během interpolace je potřeba dbát na časování tak, aby translace a rotace skončily ve stejnou chvíli. Operace translace a rotace trvají různé časové intervaly z počátku do konce a časování lze dosáhnout snížením rychlosti rychlejší operace podle času pomalejší operace [16].



Graf 2.4: Kartézská interpolace trajektorie x je kartézská souřadnice translace, \dot{x} a \ddot{x} jsou její derivace. α je kartézská souřadnice rotace, $\dot{\alpha}$ a $\ddot{\alpha}$ jsou její derivace. Interval fáze rozjezdu $[t_p, t_r]$, interval fáze jízdy $[t_r, t_d]$ a interval fáze dojezdu $[t_d, t_k]$. Na grafu lze pozorovat dosažení limitních rychlostí v_{max} a ω_{max} [16].

Naplánovanou kartézskou trajektorii je potřeba převést do kloubových souřadnic robotu. Nejjednodušší převod je v diskrétním čase. Převod lze provést inverzní kinematickou úlohou [17] a nebo jakobiánem robotu [12]. Naplánovanou kloubovou trajektorii lze interpolovat polynomem a pak provádět vzorkování polynomu každou periodu řídicí smyčky robotu. Trajektorie je dosažitelná, pokud konstrukce robotu dovoluje splnit polohy, rychlosti a zrychlení a nedojde ke kolizi.

2.4 ROS

*Robot operating system (ROS) je nástroj na programování programů určených pro roboty. Je to sbírka nástrojů, knihoven a konvencí, která si dává za cíl zjednodušit návrh komplexního a robustního robotického chování pro široké spektrum robotických systémů.*¹

Pro implementaci poddajného řízení bude použit open source nástroj ROS. ROS podporuje vývoj v jazycích C++ a Python. ROS obsahuje vlastní správu balíčku programů. Každý balíček má definovaný obsah a seznam závislostí na jiných balíčcích. Srdce celého ROS systému je ROS jádro (ROS Core/Master). Obstarává registraci a nastavení komunikace mezi ROS uzly (ROS Node). Každý ROS uzel je samostatný program s vlastním názvem a identifikačním číslem. Uzly mohou běžet na rozdílných počítačích. Komunikace mezi uzly je zařízena použitím ROS proudu (ROS Topic) a ROS služby (ROS Service), které využívají TCP protokol. ROS proud je komunikační proud s definovaným typem zpráv. Libovolný uzel může do ROS proudu posílat zprávy, aniž by jiný uzel zprávy přijímal. Proud zprávy neuchovává a nepřijaté zprávy jsou mazány. Druhý způsob komunikace mezi uzly je ROS služba, která funguje na principu žádost/odpověď s definovaným typem zpráv.

Parametry systému uchová nástroj ROS parametrický server (ROS Parameter Server). Parametry jsou dostupné ze všech ROS uzlů. Pro definici světa a robotů je v systému ROS použit formát URDF (Universal Robot Description File). URDF má stromovou strukturu dovolující spojovat různé členy (link) použitím kloubů (joint). Členům lze přiřadit barevný 3D model. Kloubům lze definovat jejich typ, jestli jsou pevné, otočné nebo posuvné. Transformace mezi členy jsou ukládány v knihovně transformací tf (tf: The Transform Library). Knihovna poskytuje transformaci mezi dvěma libovolnými členy v libovolný čas. Transformace se dynamicky mění se změnou kloubových poloh [18].

Nástroj Rviz (ROS vizualization) umí URDF formát vizualizovat dohromady s 3D modely jednotlivých členů. Transformace členů Rviz čte z tf knihovny. Rviz umožňuje zobrazovat data z velkého spektra různých senzorů, například mraky bodů, vektory nebo video.

Plánovat trajektorie robotu umožňuje nástroj MoveIt. MoveIt využívá URDF popis k naplánování trajektorie pro specifikované klouby. Pro řízení

¹Překlad definice ze stránky <http://www.ros.org/about-ros/>

robotů ROS poskytuje sadu kontrolérů. ROS systém umožňuje pouze jednomu aktivnímu řídicímu kontroléru řídit robota. Stav robotu může číst libovolný počet kontrolérů. Nejdůležitější kontrolér je Pozorovatel Stavů Robotu (Joint State Publisher), který polohy kloubů robotu odesílá do té knihovny. Kontrolér trajektorie (Trajectory Controller) umožňuje řízení robotu za použití naplánované trajektorie. Pro přepínání mezi kontroléry, které řídí robota, je použit ROS nástroj Správce kontrolérů (Control manager).

Pro potřeby změny parametrů regulátoru je dispozici nástroj ROS dynamická rekonfigurace (Dynamic reconfigure), který splňuje požadavky reálného času a je založen na principu ROS služby. Operace, u kterých je potřeba sledovat stav z důvodu dlouhého trvání, je použit ROS akční server (ROS action server). Akční server přijme operaci za použití ROS služby. Stav vykonávání operace sdílí za použití ROS proudu [19, 20].

Kapitola 3

Použité nástroje

V této části je popsáno použité vybavení a programové nástroje pro testování poddajného regulátoru, viz schéma 3.1.

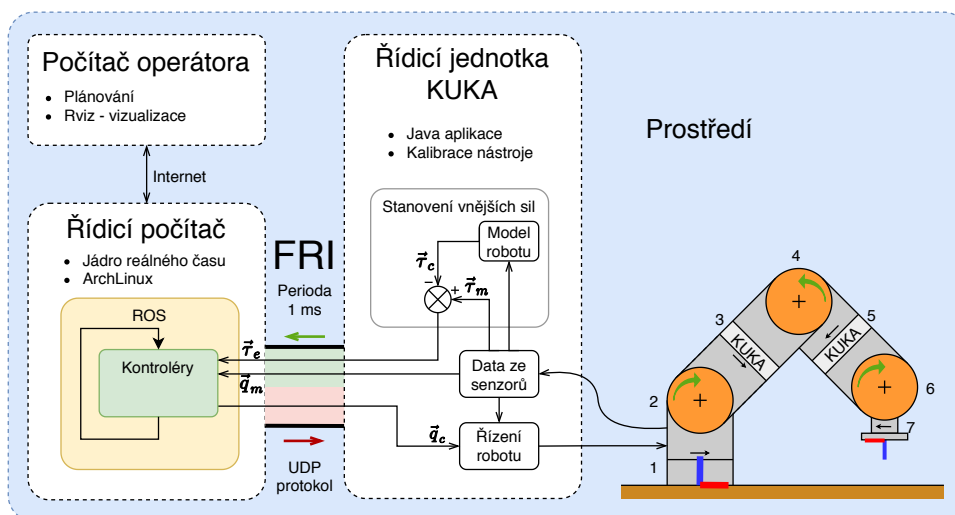


Schéma 3.1: Použitá konfigurace vybavení a programové nástroje. Řídicí smyčka vychází z práce [21] a skládá z pěti částí: prostředí s robotem, Java aplikace s kalibrací nástroje v řídicí jednotce KUKA, komunikační rozhraní FRI, ROS s kontroléry v řídicím počítači a interpolace s vizualizací v počítači operátora.

3.1 Použité vybavení

V této části je popsán použitý robot KUKA Iiwa 7, řídicí jednotka robotu, řídicí počítač a jejich vzájemné síťové propojení.

3.1.1 Robot KUKA Iiwa 7

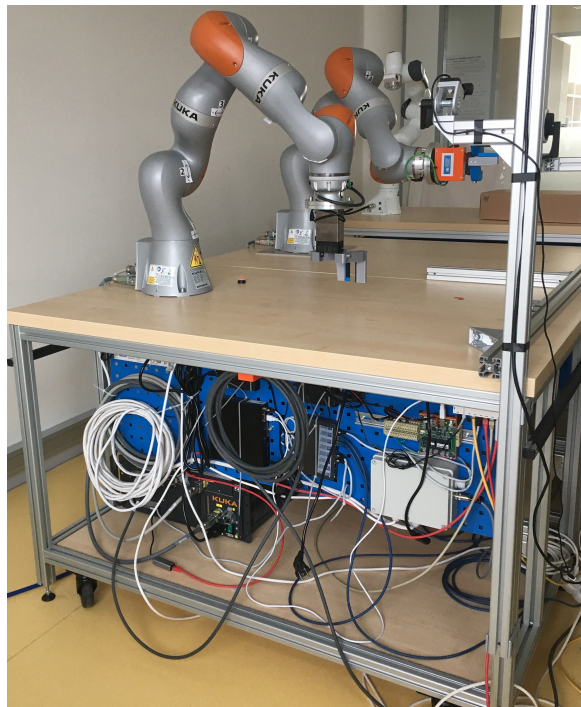
Používán byl robot KUKA Iiwa 7 [10], viz obrázek 3.2. Základní parametry robotu jsou uvedeny v tabulce 3.1. Robot je konstruován jako redundantní otevřený kinematický řetězec se sedmi otočnými klouby. Každý kloub obsahuje sensor polohy a kroutícího momentu. Parametry kloubů jsou uvedeny v tabulce 3.2. Robot je umístěný na dřevěné desce, která je připevněná ke konstrukci z kovových profilů.

Nosnost [kg]	7
Maximální dosah [mm]	800
Počet ovladatelných os	7
Opakovatelnost [mm](ISO 9283)	± 0.1
Hmotnost [kg]	22
Nejistota kroutícího momentů	$\pm 2\%$ z max. rozsahu senzoru kloubu

Tabulka 3.1: Základní parametry robotu KUKA Iiwa 7 [22].

Kloub	1	2	3	4	5	6	7
Max. ω_m [$^\circ/s$]	98	98	100	130	140	180	180
Max. q_{max} [$^\circ$]	± 170	± 120	± 170	± 120	± 170	± 120	± 175
Max. $\tau_{m,max}$ [Nm]	± 320	± 320	± 176	± 176	± 110	± 40	± 40
Nejistota [Nm]	± 6.4	± 6.4	± 3.52	± 3.52	± 2.2	± 0.8	± 0.8

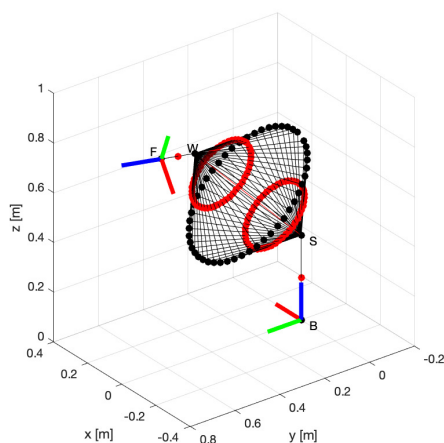
Tabulka 3.2: Parametry jednotlivých kloubů robotu KUKA Iiwa 7. Maximální úhlová rychlost kloubů ω_{max} [$^\circ/s$]. Maximální kloubová poloha q_{max} [$^\circ$]. Maximální měřený kroutící moment $\tau_{m,max}$ [Nm]. Nejistota kroutícího momentů je $\pm 2\%$ z maximálního rozsahu senzoru kloubu [22].



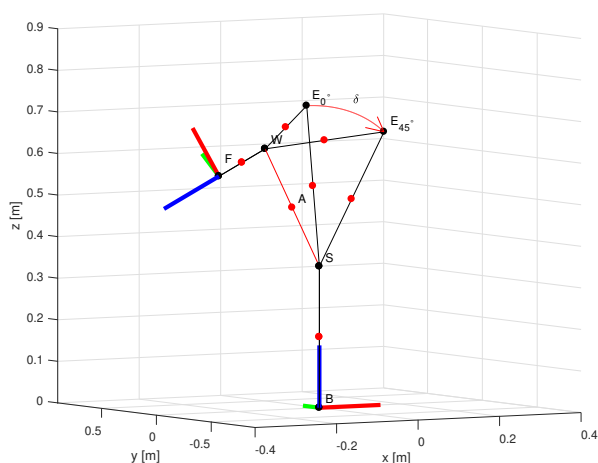
Fotka 3.2: Umístění robotu na konstrukci (Návrh konstrukce stolu [Ing. Vladimír Smutný, Ph.D.]. Rozmístění zařízení, ovládání nástrojů a další úpravy [Ing. Libor Wagner]).

■ Redundantnost robotu

Protože je robot redundantní, není inverzní kinematická úloha robotu KUKA Iiwa 7 jednoznačná. Způsobů jak dosáhnout požadované polohy je nekonečně mnoho, viz obrázek 3.3. K popsání redundantnosti, byl přidán úhel δ , viz obrázek 3.4, který redukuje počet řešení inverzní kinematické úlohy na 8 konfigurací [23]. Inverzní kinematická úloha pro robota KUKA Iiwa 7 byla implementovaná v práci [21].



Graf 3.3: Model robotu znázorňující nekonečné množství kloubových poloh robotu pro dosažení požadované polohy [21, 23].



Graf 3.4: Model robotu znázorňující úhel δ , který redukuje počet řešení inverzní kinematické úlohy na 8 konfigurací [21, 23].

3.1.2 Řídicí jednotka KUKA

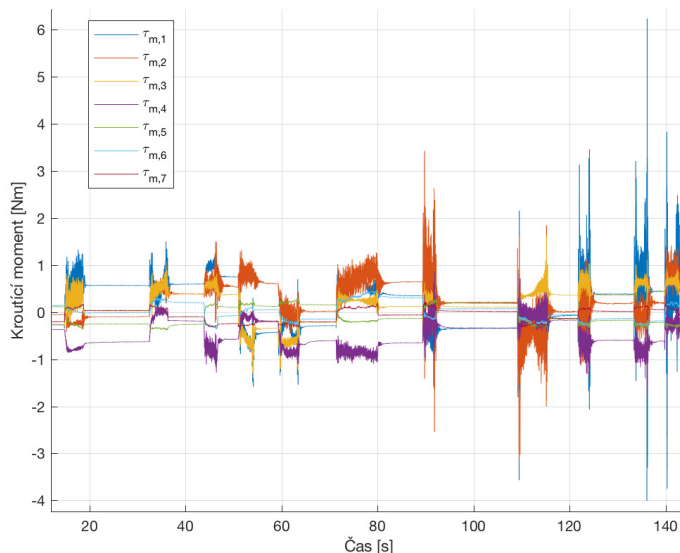
Řídicí jednotka KUKA je uzavřený systém určený pro řízení robotu KUKA Iiwa 7. Systém je postaven na operačním systému Windows 7 Embedded. Zajišťuje bezpečné řízení robotu, čtení dat ze senzorů, ovládací dotykový panel KUKA SmartPad, ovládání vstupů a výstupů, komunikaci po síti a vykonávání Java aplikací. Pro bezpečné vypnutí robotu při výpadku proudu

jsou v jednotce umístěny baterie. Konstrukce řídicí jednotky umožňuje montáž do 19"racku.

Jednotka měří polohy \vec{q}_m a kroutící momenty kloubů $\vec{\tau}_m$, které jsou použity pro stanovení vnějších kroutících $\vec{\tau}_e$ za použití inverzního dynamického modelu robotu, viz schéma 3.1. Vnější kroutící momenty vznikají kontaktem s okolím.

■ Stanovení vnějších kroutících momentů

Stanovení vnějších sil je dáno rovnicí $\vec{\tau}_e = \vec{\tau}_c(\vec{q}_m) - \vec{\tau}_m$, kde $\vec{\tau}_m$ jsou naměřené kroutící momenty v kloubech a $\vec{\tau}_c(\vec{q}_m)$ je inverzní dynamický model robotu. Přesnost stanovení vnější kroutícím momentů $\vec{\tau}_e$ je dáno přesností dynamických parametrů modelu robotu a přesností senzorů kroutících momentů, viz tabulka 3.2. Práce [21] zkoumala nepřesnosti stanovení vnějších kroutících momentů robotu $\vec{\tau}_e$ experimentem, ve kterém robot vykonával trajektorii, při které nebyla na robota vyvíjena vnější síla. Z grafu 3.5 lze pozorovat že největší odchylky jsou při zrychlování a brždění robotu dosahující maximální hodnoty přibližně 6.3 Nm. Na grafu lze pozorovat statickou chybu i když se robot nehýbe. V naměřených silách byly zjištěny oscilace 8 a 17 Hz a jejich zdroj je v řídicí jednotce KUKA.



Graf 3.5: Vnější kroutící momenty $\vec{\tau}_e$ stanovené řídicí jednotkou KUKA během trajektorie, při které nebyla na robota vyvíjena vnější síla [21].

■ Kalibrace nového nástroje

Řídicí jednotka KUKA poskytuje nástroj na kalibraci nového nástroje. Kalibrace stanoví hmotnost, polohu těžiště a momenty setrvačnosti nového nástroje. Nový nástroj připevněný na přírubu robotu je robotem změřen a parametry jsou uloženy do řídicí jednotky. Kalibrace je prováděna za použití dotykového panelu KUKA SmartPad. Řídicí jednotka zahrne parametry zvoleného nástroje do dynamického modelu robotu pro přesnější řízení a stanovení vnějších sil.

■ 3.1.3 Řídicí počítač

Pro řízení robotu za použití ROS systému byl použit řídicí počítač. Na počítač je nainstalován ArchLinux s jádrem reálného času. Jádro reálného času dovoluje nastavit procesu nejvyšší plánovací prioritu a jádro procesoru na kterém poběží. V řídicím počítači běží ROS s kontroléry.

■ 3.1.4 Síťové zapojení robotu

Zapojení robotu je na obrázku 3.6. Robot je kabelem připojený k řídicí jednotce KUKA. Řídicí jednotka je spojena s podsítí robotů (KONI), v podsítí je umístěný řídicí počítač (CapekPc0). Podsítí je spojena s internetovou sítí laboratoře. Operátor se připojí přímo do sítě nebo přes sítí laboratoře.

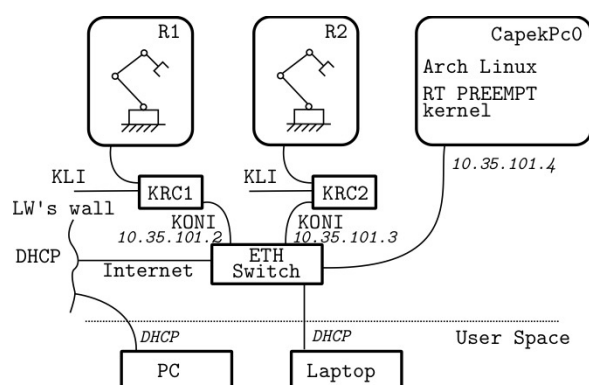


Schéma 3.6: Síťové zapojení robotů v laboratoři (Návrh zapojení [Ing. Libor Wagner], Autor schématu [Ing. Vladimír Petřík, Ph.D.]). Robot je kabelem připojený k řídicí jednotce KUKA. Řídicí jednotka je spojena s podsítí robotů (KONI), v podsítí je umístěný řídicí počítač (CapekPc0). Podsítí je spojena s internetovou sítí laboratoře. Uživatelé se připojí přímo do sítě nebo přes síť laboratoře.

3.1.5 Siloměr Sauter FC 500

Protože stanovení vnějších sil není přesné, byl v experimentech pro porovnání naměřených sil použit siloměr Sauter FC 500, viz obrázek 3.7. Maximální rozsah měřené síly siloměru je ± 500 N. Přesnost siloměru je $\pm 0.2\%$ z maximálního rozsahu. Rozlišení přístroje je 0.1 N. Vnitřní vyčítací frekvence přístroje je 1000 Hz. Z přístroje je možné vyčítat data do ROSu přes USB [24].



Fotka 3.7: Siloměr Sauter FC 500. Maximální rozsah měřené síly siloměru je ± 500 N. Přesnost siloměru je $\pm 0.2\%$ z maximálního rozsahu. Rozlišení siloměru je 0.1 N. Vnitřní vyčítací frekvence siloměru je 1000 Hz. Ze siloměru je možné vyčítat data do ROSu přes USB [24].

■ 3.2 Programové nástroje

V této části je popsána KUKA aplikace, FRI komunikační rozhraní a ROS, viz schéma 3.1.

■ 3.2.1 KUKA aplikace

KUKA aplikace je programovaná v jazyce Java a staví na verzi z práce [21]. Aplikace je spouštěna operátorem z dotykového ovládacího panelu KUKA SmartPad a vykonávána je v řídicí jednotce KUKA. Zajišťuje prvotní nastavení robotu, nastavení nástroje a komunikační rozhraní FRI. Nástroj je zvolen na základě nastavení v systému ROS. Aplikace nastavuje IP adresu a port řídicího počítače v komunikačním rozhraní FRI, které je určené k rychlému řízení robotu. Pro komunikaci aplikace s ROS jádrem, byly použity ROS proudy napsané konkrétně pro řídicí jednotku KUKA v práci [25]. Pro tuto práci byla aplikace opravena a rozšířena o nastavování nástroje.

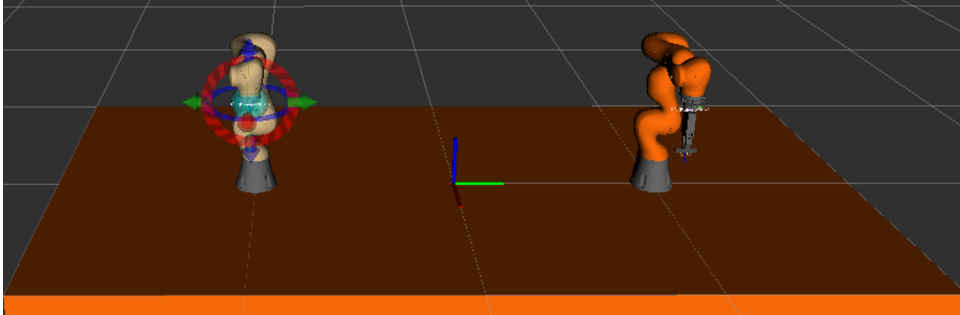
■ 3.2.2 FRI komunikační rozhraní

FRI (Fast robotic interface) je komunikační rozhraní pro řízení robotu z počítače mimo řídicí jednotku KUKA [26]. Periodu komunikace lze nastavit na hodnotu 1 až 10 ms. V této práci byla nastavena perioda řízení na 1 ms. Pro rychlou komunikaci je rozhraní založené na UDP protokolu. Komunikace probíhá podle síťového modelu Master/Slave, kde řídicí jednotka KUKA je Master. Rozhraní na straně Slave bylo naimplementováno v jazyce C++ firmou KUKA. Základní integrace rozhraní do systému ROS smyčky bylo provedeno v práci [21]. Řídicí jednotka posílá data přesně každou periodu, čímž zajišťuje synchronizaci ROS smyčky s řídicí jednotkou. ROS smyčka má jednu periodu na odpověď, jinak je odpojena od řízení robotu.

■ 3.2.3 ROS

ROS systém poběží v řídicím počítači a bude zajišťovat komunikace přes FRI, změnu parametrů, spravovat kontroléry a přijímat naplánované trajektorie. Poddajný kontrolér byl naimplementován jako ROS kontrolér. ROS dynamická

rekonfigurace umožní změnu parametrů poddajného kontroléru za provozu. Správce kontrolérů je použit pro přepínání mezi kontrolérem trajektorie a poddajným kontrolérem. Akční server je zvolen pro přijímání kartézské trajektorie. Pro testování kontroléru je použit ROS proud reálného času, který poskytuje aktuální stav kontroléru. K vizualizaci poslouží nástroj Rviz, viz obrázek 3.8, s modelem přejatým z práce [25].



Záznam obrazovky 3.8: Vizualizace dvou robotů připevněných na stůl v Rviz [25].



Kapitola 4

Návrh řešení

V první části této kapitoly je popsán návrh poddajného regulátoru. Regulátor bude v další části této práce implementován do ROS kontroléru. Integrace poddajného regulátoru do ROS řídicí smyčky je na schématu 4.1. Druhá část této kapitoly popisuje kartézskou interpolaci vhodnou pro poddajný regulátor. V této práci jsou kartézské polohy reprezentované vektorem $[x, y, z, \alpha, \beta, \gamma]$, kde xyz je translační poloha a $\alpha\beta\gamma$ jsou extrinsické Tait–Bryanovi úhly kolem os xyz , které byly zvoleny kvůli nastavitelné rotační poddajnosti pro každou osu zvlášť [15]. Při úhlu $\beta = \pm 90^\circ$ dochází k uzamčení Kardanova závěsu a osa poslední rotace x je paralelní s první rotační osou z .

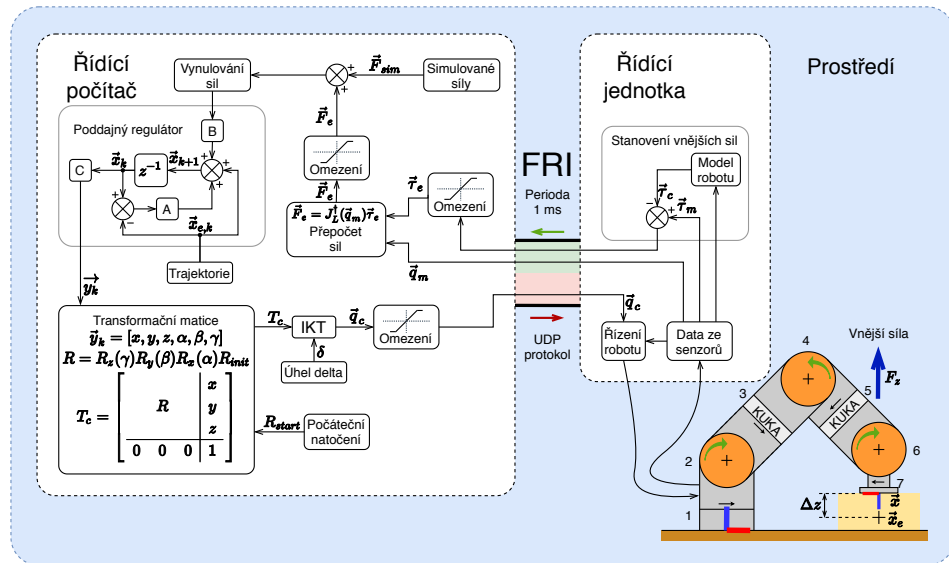


Schéma 4.1: Schéma integrace poddajného regulátoru do ROS řídicí smyčky. Schéma ukazuje poddajné chování regulátoru reagujícího na kolizi s vnějším prostředím.

4.1 Návrh poddajného regulátoru

Nepoddajný robot potřebuje pro bezkolizní provoz přesně popsany pracovní prostor. Ke kolizi může snadno dojít pokud nepoddajný robot operuje v neznámém prostředí nebo v prostředí, kde se vyskytuje operátor. Požadavek na definici pracovního prostoru lze nahradit poddajným chováním, kdy robot upravuje svoje chování na základě měřených vnějších sil vznikajících z kontaktu s prostředím nebo operátorem. Operátor může záměrně rukou vyvíjet vnější sílu na robota. Poddajné chování je vhodné i pro aplikace, při kterých je potřeba, aby robot působil silou na vnější prostředí.

Tato práce staví na práci [21] v níž byla popsána poddajná regulační smyčka, viz schéma 4.2. Původní poddajná smyčka vychází z rovnice pro pružinu $\vec{F}_d = K \vec{X}_d$, která stanoví kartézskou odchylku \vec{X}_d od trajektorie podle vnějších sil \vec{F}_d . Kartézská odchylka \vec{X}_d je převedená do kloubových souřadnic jakobiánem robotu. Převedená odchylka dohromady s kloubovou trajektorií $\vec{\Theta}_t$ tvoří kloubovou referenční polohu $\vec{\Theta}_r$. Robot je řízen na referenční polohu $\vec{\Theta}_r$ proporcionálním regulátorem s diagonální maticí parametrů $K_{p,m}$.

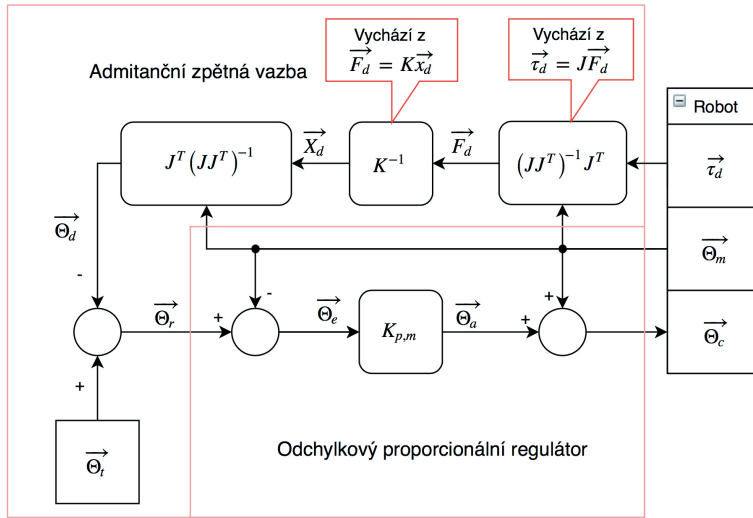


Schéma 4.2: Původní regulační poddajná smyčka. Podle vnějších sil \vec{F}_d je stanovena kartézská odchylka \vec{X}_d od trajektorie. Kartézská odchylka \vec{X}_d převedená do kloubových souřadnic jakobiánem robotu. Převedená odchylka dohromady s kloubovou trajektorií $\vec{\Theta}_t$ tvoří kloubovou referenční polohu $\vec{\Theta}_r$. Robot je řízen na referenční polohu $\vec{\Theta}_r$ proporcionálním regulátorem s diagonální maticí parametrů $K_{p,m}$ [21].

Návrh v této práci sleduje posloupnost admitanční řídicí smyčky: přepočítání krouticích momentů $\vec{\tau}_e$ na kartézské síly a krouticí momenty \vec{F}_e , poddajný regulátor a převod kartézské polohy na kloubové souřadnice \vec{q}_c .

4.1.1 Přepočítání sil

Přepočítání vnějších krouticích momentů na kartézské síly zůstal stejný jako v původní práci [21]. Krouticí momenty $\vec{\tau}_e$ jsou převedeny do kartézských sil a krouticích momentů \vec{F}_e rovnicí:

$$\vec{F}_e = [f_{e,x}, f_{e,y}, f_{e,z}, \tau_{e,\alpha}, \tau_{e,\beta}, \tau_{e,\gamma}]^T = J_L^\dagger(\vec{q}_m)\vec{\tau}_e, \quad (4.1)$$

kde $J_L^\dagger(\vec{q}_m) = (J(\vec{q}_m)J(\vec{q}_m)^T)^{-1}J(\vec{q}_m)^T$ je pseudoinverze jakobiánu robotu v poloze \vec{q}_m a $\vec{\tau}_e$ jsou vnější krouticí momenty. Výsledné vnější síly a krouticí momenty \vec{F}_e jsou v globálním souřadnicovém systému.

Pro zvýšení bezpečnosti řídicí smyčky byla v této práci přidána omezení na vnější krouticí momenty před přepočítání a omezení na kartézské síly a krouticí momenty za přepočítání, viz schéma 4.1.

4.1.2 Poddajný regulátor

Pro lepší dynamické vlastnosti poddajného regulátoru byla rovnice pružiny nahrazena rovnicí 4.2 z článků [27, 28, 29, 30] popisující vztah mezi silou a pohybem obsahující tuhosti, viskózní tření a setrvačnosti. Rovnice vychází z druhého Newtonova zákona:

$$\vec{F}_e = K(\vec{x} - \vec{x}_e) + D(\dot{\vec{x}} - \dot{\vec{x}}_e) + M(\ddot{\vec{x}} - \ddot{\vec{x}}_e), \quad (4.2)$$

kde \vec{F}_e jsou vnější síly a kroutící momenty, K , D a M jsou diagonální matice tuhostí, viskózního tlumení a setrvačností. Veličiny \vec{x} , $\dot{\vec{x}}$ a $\ddot{\vec{x}}$ jsou kartézská poloha, rychlost a zrychlení tělesa. Rovnice obsahuje klidový stav (ekvilibrum), do kterého se regulátor vrací, jakmile přestanou působit vnější síly. Ekvilibrum je popsáno veličinami: kartézská poloha \vec{x}_e , rychlost $\dot{\vec{x}}_e$ a zrychlení $\ddot{\vec{x}}_e$. Z obrázku 4.3 si lze rovnici 4.2 představit jako model virtuálního tělesa s parametry:

$$M = \text{diag}([m_x, m_y, m_z, I_\alpha, I_\beta, I_\gamma]), [\text{kg}, \text{kg}, \text{kg}, \text{kg m}^2, \text{kg m}^2, \text{kg m}^2], \quad (4.3)$$

a polohou:

$$\vec{x} = [x, y, z, \alpha, \beta, \gamma]^T, [\text{m}, \text{m}, \text{m}, \text{rad}, \text{rad}, \text{rad}], \quad (4.4)$$

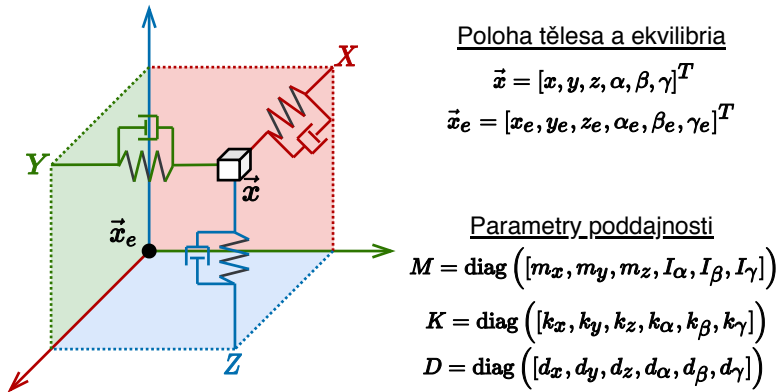
Těleso je připevněné virtuálními pružinami a viskózním tlumením s parametry:

$$K = \text{diag}([k_x, k_y, k_z, k_\alpha, k_\beta, k_\gamma]), [\text{Nm}^{-1}, \text{Nm}^{-1}, \text{Nm}^{-1}, \text{Nm}, \text{Nm}, \text{Nm}], \\ D = \text{diag}([d_x, d_y, d_z, d_\alpha, d_\beta, d_\gamma]), [\text{Nm}^{-1} \text{s}, \text{Nm}^{-1} \text{s}, \text{Nm}^{-1} \text{s}, \text{Nms}, \text{Nms}, \text{Nms}], \quad (4.5)$$

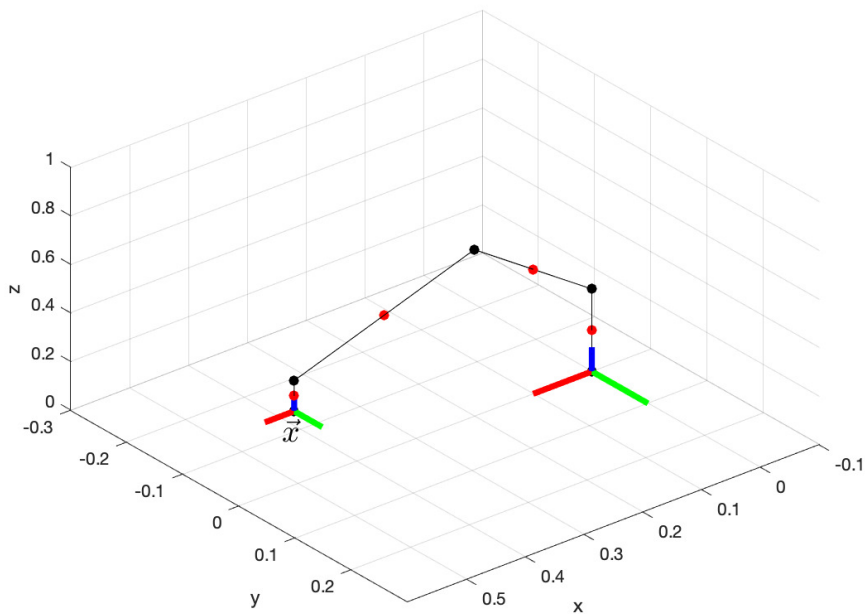
k ekvilibriu s polohou:

$$\vec{x}_e = [x_e, y_e, z_e, \alpha_e, \beta_e, \gamma_e]^T, [\text{m}, \text{m}, \text{m}, \text{rad}, \text{rad}, \text{rad}]. \quad (4.6)$$

Virtuální těleso je připevněné k přírubě robotu, viz graf 4.4. Orientace poddajného souřadnicového systému je stejná jako u globálního souřadnicového systému.



Graf 4.3: Model tělesa s polohou \vec{x} připevněného virtuálními pružinami a viskózním tlumením ve všech šesti stupních volnosti k ekvilibriu \vec{x}_e . Rotační pružiny a viskózní tlumení nejsou zobrazeny, ale nachází se ve stejných osách jako translační pružiny a viskózní tlumení.



Graf 4.4: Poloha virtuálního tělesa s polohou \vec{x} na přírubě robotu.

Řízení robotu probíhá v definované periodě h , takže návrh regulátoru bude v diskrétním tvaru. Pro jednodušší implementaci převedeme rovnici 4.2

do stavového popisu ve tvaru:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k, \\ y_k &= Cx_k + Du_k. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Za využití vztahů pro rychlost a zrychlení:

$$\vec{v}_k = \frac{\vec{x}_{k+1} - \vec{x}_k}{h}, \quad (4.8)$$

$$\vec{a}_k = \frac{\vec{v}_{k+1} - \vec{v}_k}{h}, \quad (4.9)$$

kde h je perioda řídicí smyčky. Rovnice 4.2 byla přepsaná do diskrétního tvaru 4.10. Ekvilibrium bude do rovnic zahrnuto později v této práci.

$$\vec{F}_k = K\vec{x}_k + D\vec{v}_k + M\frac{\vec{v}_{k+1} - \vec{v}_k}{h}. \quad (4.10)$$

Rovnice 4.10 po úpravě přejde do tvaru:

$$\vec{v}_{k+1} = \vec{v}_k - hM^{-1}D\vec{v}_k - hM^{-1}K\vec{x}_k + hM^{-1}\vec{F}_k. \quad (4.11)$$

Rovnice 4.8 přejde do tvaru:

$$x_{k+1} = h\vec{v}_k + \vec{x}_k. \quad (4.12)$$

Rovnice 4.11 a 4.12 přepsané do požadovaného maticového tvaru:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \vec{v}_{k+1} \\ \vec{x}_{k+1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} I - hM^{-1}D & -hM^{-1}K \\ h & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{v}_k \\ \vec{x}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} hM^{-1} \\ 0 \end{bmatrix} \vec{F}_{e,k}, \\ \hat{x}_{k+1} &= A\hat{x}_k + B\vec{F}_{e,k}. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Rovnice 4.13 po přidání ekvilibria, přejde do tvaru:

$$\hat{x}_{k+1} - \hat{x}_{e,k+1} = A(\hat{x}_k - \hat{x}_{e,k}) + B\vec{F}_{e,k}, \quad (4.14)$$

Aby byl pohyb dán pouze parametry poddajnosti a vnějšími silami, zvolíme $\hat{x}_{e,k+1} = \hat{x}_{e,k}$ [30]. Výsledná rovnice je:

$$\hat{x}_{k+1} = A(\hat{x}_k - \hat{x}_{e,k}) + B\vec{F}_{e,k} + \hat{x}_{e,k}, \quad (4.15)$$

Výstupem regulátoru je kartézská poloha:

$$\vec{y}_k = \begin{bmatrix} 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{v}_k \\ \vec{x}_k \end{bmatrix} = C\hat{x}_k = \vec{x}_k. \quad (4.16)$$

Naplánované polohy trajektorie jsou používány jako polohy ekvilibria bez rychlostí. Regulátor bude plynule přecházet mezi polohami trajektorie a stále zůstane poddajný. Translace regulátoru $[x, y, z]$ a ekvilibria $[x_e, y_e, z_e]$ je při startu nastavena na translaci příruby robotu. Orientace regulátoru $[\alpha, \beta, \gamma]$ a ekvilibria $[\alpha_e, \beta_e, \gamma_e]$ jsou nastaveny na nulové úhly. Kartézská interpolace je v absolutních souřadnicích globálního systému. Úhel β systému je omezen na interval $\pm 85^\circ$, aby nedocházelo k uzamčení Kardanova závěsu.

4.1.3 Převod kartézské polohy do kloubových souřadnic

Z výstupní kartézské polohy \vec{y}_k z regulátoru je sestavena transformační matice T_c popisující polohu a natočení příruby robotu v globálním souřadnicovém systému. Transformační matice T_c je sestavena následovně:

$$\vec{y}_k = [x, y, z, \alpha, \beta, \gamma]^T, \quad (4.17)$$

$$R = R_z(\gamma)R_y(\beta)R_x(\alpha)R_{start}, \quad (4.18)$$

$$T_c = \left[\begin{array}{ccc|c} & & & x \\ & R & & y \\ & & & z \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right], \quad (4.19)$$

kde R_{start} je počáteční natočení příruby robotu při startu regulátoru. Transformace T_c a úhel δ jsou použity v inverzní kinematické úloze. Úhel δ byl popsán v kapitole 3.1.1 a je zjištěn při startu z aktuální polohy robotu. Při startu je stanoveno, která konfigurace inverzní kinematické úlohy bude používána, protože existuje 8 kloubových konfigurací robotu pro požadovanou polohu příruby T_c . Úhel β je omezen v poddajném regulátoru na interval $\pm 85^\circ$, proto zde už není omezení potřeba.

4.1.4 Silové působení

Trajektorii lze použít i pro silové působení. Velikost vnější síly, kterou robot vyvíjí na předmět, je dána parametry regulátoru a velikostí odchylky od trajektorie. Výsledná tečná síla F_t a kroutící moment τ_t působící na předmět je dán podle vztahu:

$$\begin{bmatrix} f_{e,x} \\ f_{e,y} \\ f_{e,z} \\ \tau_{e,\alpha} \\ \tau_{e,\beta} \\ \tau_{e,\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_\gamma \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \\ \alpha_e \\ \beta_e \\ \gamma_e \end{bmatrix} \right), \quad (4.20)$$

$$F_t = \sqrt{f_{e,x}^2 + f_{e,y}^2 + f_{e,z}^2},$$

$$\tau_t = \sqrt{\tau_{e,\alpha}^2 + \tau_{e,\beta}^2 + \tau_{e,\gamma}^2}.$$

4.1.5 Kompenzace gravitace

Poddajný regulátor lze využít ke kompenzaci gravitace. Vnější síly jsou zba-veny gravitačních vlivů v řídicí jednotce. Kompenzaci gravitace lze dosáhnout pro libovolný stupeň volnosti nastavením tuhosti $k = 0$ na nulu. Regulátor pro daný stupeň volnosti zůstane v poloze, do které je vnější silou přesunut. Regulátor se z vychýlení vrátí do ekvilibria, pokud je tuhost znovu nastavena na $k > 0$. Například: Je-li vynulovaná tuhost v ose x $k_x = 0$, lze přírubu robotu rukou přemístit na libovolné místo po ose x . V ostatních osách půjde regulátor vychýlit, ale stále se bude vracet ekvilibria po odstranění vnějších sil (V tomhle případě na nejbližší místo osy x).

4.1.6 Vynulování vnějších sil

Pro aplikace vyžadující poddajnost pouze v některých stupních volnosti, byla do regulátoru přidána možnost vynulovat kdykoliv za provozu vstupní sílu nebo kroutící moment v libovolném stupni volnosti. Vynulování znamená nastavit danou vnější sílu $f_e = 0$ nebo kroutící moment $\tau_e = 0$ na nulu, viz schéma 4.1. Stupeň volnosti s vynulovanou silou nebo kroutícím momentem nelze dále vnější silou ovlivňovat. Existují čtyři scénáře, které nastanou po vynulování vstupní vnější síly nebo kroutícího momentu v libovolném stupni volnosti:

- Pro parametry $k > 0$ a $d > 0$ přejde regulátor do ekvilibria daného stupně volnosti.
- Pro parametry $k = 0$ a $d > 0$ regulátor zůstane v aktuální poloze daného stupně volnosti.
- Pro parametry $k > 0$ a $d = 0$ začne regulátor oscilovat kolem ekvilibria v daném stupni volnosti. Velikost amplitudy oscilací je dán vzdáleností regulátoru od ekvilibria v čase vynulování.
- Kombinace parametrů $k = 0$ a $d = 0$ je nestabilní a není dovolena.

Vynulování vnějších sil s parametry $k > 0$ a $d > 0$ je způsob, jak stabilizovat regulátor, ale během stabilizace může dojít ke kolizi, na kterou regulátor nezareaguje. Například: vynulováním sil v osách $f_{e,x} = 0$ a $f_{e,y} = 0$ je robot poddajný v ose z . Vynulováním síly $f_{e,z} = 0$ je robot poddajný v rovině xy .

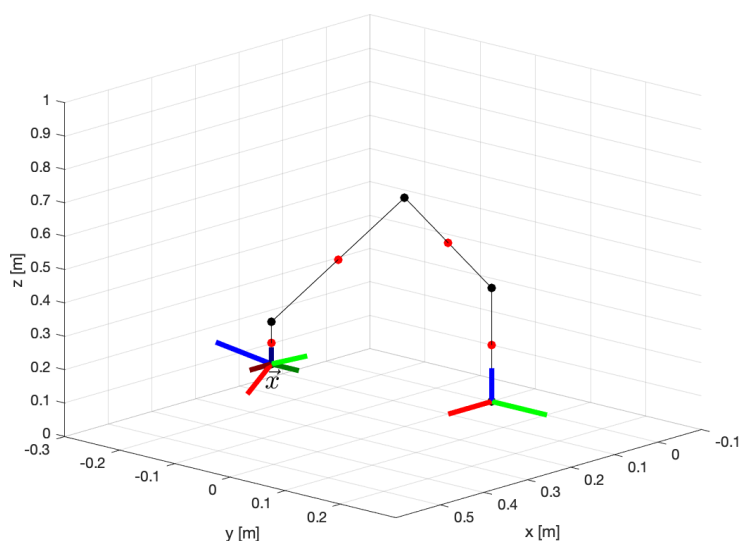
■ Natočená poddajnosť

Vynulování bylo rozšířeno o možnost vynulovat vnější síly a kroutící momenty v natočeném souřadnicovém systému o úhly $\alpha^* \beta^* \gamma^*$, viz obrázek 4.6. Úhly jsou extrinsické Tait–Bryanovi úhly kolem os xyz . Úhel β^* je omezen na interval $\pm 85^\circ$, aby nedocházelo k uzamčení Kardanova závěsu. Nakloněný souřadný systém dovoluje omezit poddajnost na libovolně natočenou osu. Naklonění lze měnit za provozu. Transformace sil a kroutících momentů do natočeného souřadnicového systému je daná rovnicemi:

$$\begin{bmatrix} f_{e,x}^* \\ f_{e,y}^* \\ f_{e,z}^* \\ \tau_{e,\alpha}^* \\ \tau_{e,\beta}^* \\ \tau_{e,\gamma}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_z(\gamma^*)R_y(\beta^*)R_x(\alpha^*) & & & & & \\ & 0 & & & & \\ & & R_z(\gamma^*)R_y(\beta^*)R_x(\alpha^*) & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{e,x} \\ f_{e,y} \\ f_{e,z} \\ \tau_{e,\alpha} \\ \tau_{e,\beta} \\ \tau_{e,\gamma} \end{bmatrix}. \quad (4.21)$$

V nakloněném souřadnicovém systému, lze vynulovat libovolnou sílu $f_e^* = 0$ nebo kroutící moment $\tau_e^* = 0$. Po vynulování jsou síly a kroutící momenty transformovány zpět do poddajného souřadnicového systému inverzní rotací:

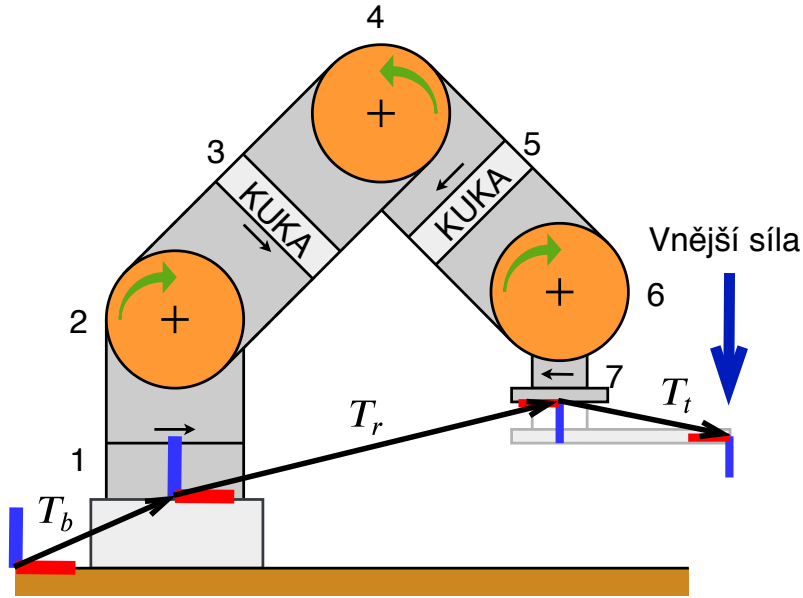
$$\begin{bmatrix} f_{e,x} \\ f_{e,y} \\ f_{e,z} \\ \tau_{e,\alpha} \\ \tau_{e,\beta} \\ \tau_{e,\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_z(\gamma^*)R_y(\beta^*)R_x(\alpha^*))^T & & & & & \\ & 0 & & & & \\ & & (R_z(\gamma^*)R_y(\beta^*)R_x(\alpha^*))^T & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{e,x}^* \\ f_{e,y}^* \\ f_{e,z}^* \\ \tau_{e,\alpha}^* \\ \tau_{e,\beta}^* \\ \tau_{e,\gamma}^* \end{bmatrix}. \quad (4.22)$$



Graf 4.5: Souřadnicový systém poddajnosti nakloněný (světlejší) oproti původnímu (tmavší) souřadnicovému systému. Souřadnicový systém je nakloněný o extrinsické Tait–Bryanovi úhly $\alpha^* = 45^\circ$, $\beta^* = 30^\circ$ a $\gamma^* = 15^\circ$ kolem globálních os xyz

4.1.7 Transformace vnějších sil

K výpočtu vnějších sil a kroticích momentů \vec{F}_e z kroticích momentů τ_m je použit jakobián robotu. Postup výpočtu jakobiánu použije transformaci mezi globálním souřadnicovým systémem a souřadnicovým systémem příruby robotu. Výpočet zaznamenává, jak se mění transformace při infinitesimální změně kloubových souřadnic jednotlivých kloubů [15]. Transformace byla rozšířena o transformaci základny T_b a nástroje T_t z důvodu transformace vnějších sil a kroticích momentů, viz obrázek 4.6. Transformace T_b a T_t lze měnit za běhu systému.

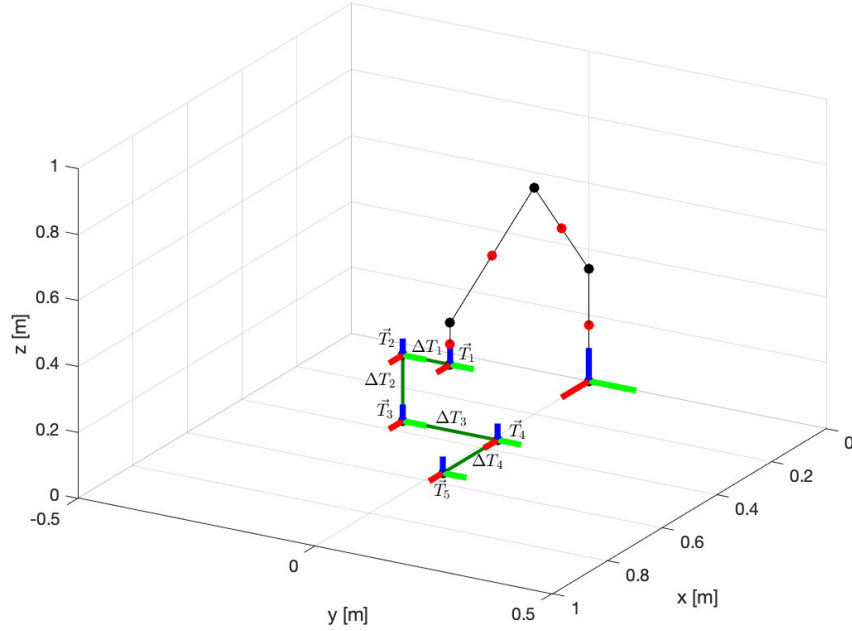


Obrázek 4.6: Model robotu s transformacemi. T_b je transformace k základně robotu, T_r je transformace k přírubě robotu a T_t je transformace ke konci nástroje.

4.2 Kartézská interpolace trajektorie

Pro poddajný regulátor byla navržena kartézská interpolace v absolutních kartézských polohách v globálním souřadnicovém systému. Kartézská poloha je vyjádřena vektorem šesti čísel $\vec{X}_i = [x, y, z, \alpha, \beta, \gamma]$ [m, m, m, rad, rad, rad] kde xyz je translace a $\alpha\beta\gamma$ jsou Tait–Bryanovi extrinsické úhly xyz [31]. Úhel β je omezen na interval $\pm 85^\circ$, aby nedocházelo k uzamčení Kardanova závěsu.

Na vstupu kartézské interpolace je sekvence kartézských poloh $X = [\vec{X}_1, \vec{X}_2, \dots, \vec{X}_M]$, viz obrázek 4.7. Ze sekvence poloh je vytvořena sekvence úseků $\Delta X = [\Delta X_1, \Delta X_2, \dots, \Delta X_{M-1}]$. Úsek ΔX_i má počátek v poloze \vec{X}_i a konec v poloze \vec{X}_{i+1} . Pro každý úsek je specifikovaná translační rychlost v_i a úhlová rychlost ω_i . K sekvenci úseků ΔX odpovídá vektor maximálních translačních rychlostí $\vec{v}_{max} = [v_{max,1}, v_{max,2}, \dots, v_{max,M-1}]$ a maximálních úhlových rychlostí $\vec{\omega}_{max} = [\omega_{max,1}, \omega_{max,2}, \dots, \omega_{max,N-1}]$. Výstupem kartézské interpolace je sekvence (trajektorie) kartézských poloh $X_e = [\vec{x}_{e,1}, \vec{x}_{e,2}, \dots, \vec{x}_{e,O}]$. První poloha sekvence je rovna $\vec{x}_{e,1} = \vec{X}_1$ a koncová poloha sekvence je rovna $\vec{x}_{e,O} = \vec{X}_M$.



Graf 4.7: Sekvence kartézských poloh $\vec{X} = [\vec{X}_1, \vec{X}_2, \vec{X}_3, \vec{X}_3, \vec{X}_4, \vec{X}_5]$ pro kartézskou interpolací trajektorie. Sekvence úseků $\Delta\vec{X} = [\Delta X_1, \Delta X_2, \Delta X_3, \Delta X_4]$.

Interpolace je prováděna pro každý úsek ΔX_i zvlášť. Úsek ΔX_i je rozdělený na sekvenci podúseků $\Delta X_i = [\Delta \vec{x}_b, \Delta \vec{x}_1, \dots, \Delta \vec{x}_{N-1}, \Delta \vec{x}_f]$. Výstupem z interpolace pro úsek ΔX_i je sekvence kartézských poloh $[\vec{x}_b, \vec{x}_1, \dots, \vec{x}_N, \vec{x}_f]$, viz obrázek 4.8. Pro úsek ΔX_i platí, že počáteční poloha \vec{x}_b je rovna poloze \vec{X}_i a koncová poloha \vec{x}_f je rovna poloze \vec{X}_{i+1} . Výsledná sekvence X_e (trajektorie) je sestavena ze sekvencí kartézských poloh jednotlivých úseků ΔX_i . Interpolace začíná výpočtem délky translační L_p a rotační L_θ v úhlových souřadnicích z počáteční \vec{x}_b a koncové \vec{x}_f polohy. Počáteční \vec{x}_b a koncová \vec{x}_f poloha je vyjádřena vektory:

$$\begin{aligned} \vec{x}_b &= [\vec{p}_b, \vec{\theta}_b]^T = [x_b, y_b, z_b, \alpha_b, \beta_b, \gamma_b]^T, \\ \vec{x}_f &= [\vec{p}_f, \vec{\theta}_f]^T = [x_f, y_f, z_f, \alpha_f, \beta_f, \gamma_f]^T, \end{aligned} \quad (4.23)$$

Rozdíly $\Delta\vec{p}$ a $\Delta\vec{\theta}$ mezi počáteční a koncovou polohou

$$\begin{aligned} \Delta\vec{p} &= \vec{p}_f - \vec{p}_b, \\ \Delta\vec{\theta} &= \vec{\theta}_f - \vec{\theta}_b. \end{aligned} \quad (4.24)$$

Translační délka L_p a délka L_θ v úhlových souřadnicích je vypočtena následovně:

$$\begin{aligned} L_p &= \|\Delta\vec{p}\|, \\ L_\theta &= \|\Delta\vec{\theta}\|. \end{aligned} \quad (4.25)$$

U každého úseku ΔX_i je rychlost $v_{max,i}$ a úhlová rychlost $\omega_{max,i}$ přepočtena tak, aby translace a rotace skončila ve stejný čas. Rovnice 4.26 popisují výpočet potřebného času pro dokončení translace t_p a rotace t_θ .

$$\begin{aligned} t_p &= \frac{L_p}{v_{max,i}}, \\ t_\theta &= \frac{L_\theta}{\omega_{max,i}}. \end{aligned} \quad (4.26)$$

Podle delšího časového intervalu jsou v rovnici 4.27 přepočteny rychlosti $v_{max,i}$ a $\omega_{max,i}$ na nové rychlosti $v_{new,i}$ a $\omega_{new,i}$. Pro přepočet je použit delší časový interval, aby nedošlo k překročení maximální rychlosti.

$$\begin{aligned} t_{max} &= \max(t_p, t_\theta), \\ v_{new,i} &= \frac{L_p}{t_{max}}, \\ \omega_{new,i} &= \frac{L_\theta}{t_{max}}. \end{aligned} \quad (4.27)$$

Podúseky se rozdělují na rozjezdové $\Delta \vec{x}_b$, jízdní $\Delta \vec{x}_1$ až $\Delta \vec{x}_N$ a dojezdové $\Delta \vec{x}_f$. Počet jízdních podúseků N je:

$$N = \left\lfloor \frac{t_{max}}{h} \right\rfloor, \quad (4.28)$$

Translační délky a délky v úhlových souřadnicích jízdních úseků $\Delta \vec{x}$ jsou l_p a l_θ a vypočteny jsou podle rovnice 4.29.

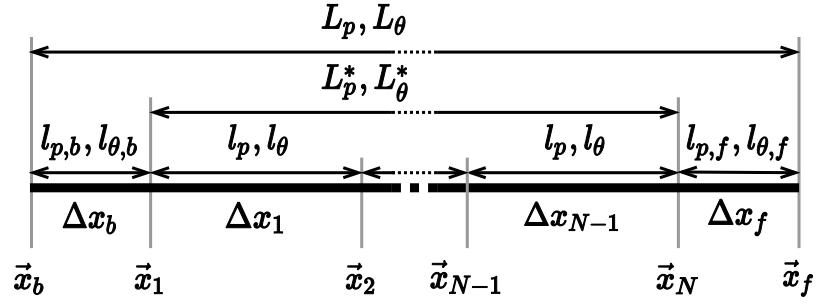
$$\begin{aligned} l_p &= v_{new,i} h, \\ l_\theta &= \omega_{new,i} h. \end{aligned} \quad (4.29)$$

kde h je perioda řídicí smyčky. Translační L_p^* a rotační L_θ^* délka všech jízdních podúseků dohromady je vypočtena podle vztahu:

$$\begin{aligned} L_p^* &= N l_p, \\ L_\theta^* &= N l_\theta. \end{aligned} \quad (4.30)$$

Délky rozjezdového $\Delta \vec{x}_b$ a dojezdového podúseku $\Delta \vec{x}_f$ jsou:

$$\begin{aligned} l_{p,b} = l_{p,f} &= \frac{L_p - L_p^*}{2}, \\ l_{\theta,b} = l_{\theta,f} &= \frac{L_\theta - L_\theta^*}{2}, \end{aligned} \quad (4.31)$$



Obrázek 4.8: Rozložení úseku ΔT_i na sekvenci podúseků $\Delta T_i = [\Delta \vec{x}_b, \Delta \vec{x}_1, \dots, \Delta \vec{x}_{N-1}, \Delta \vec{x}_f]$. Podúseky se rozdělují na rozjezdové Δx_b , jízdní Δx_1 až Δx_N a dojezdové Δx_f . L_p a L_θ jsou translační a rotační délky úseku ΔT_i . L_p^* a L_θ^* jsou translační a rotační délky všech jízdních úseků. l_p a l_θ jsou translační a rotační délky jednoho jízdního úseku Δx . $l_{p,b}$ a $l_{\theta,b}$ jsou translační a rotační délky rozjezdového úseku $\Delta \vec{x}_b$. $l_{p,f}$ a $l_{\theta,f}$ jsou translační a rotační délky dojezdového úseku $\Delta \vec{x}_f$.

Sestavení výstupní sekvence kartézských poloh $[\vec{x}_b, \vec{x}_1, \dots, \vec{x}_N, \vec{x}_f]$ probíhá podle následujícího postupu. Použity budou dva parametry k_p a k_θ , jejichž hodnota je v intervalu $[0,1]$. Poloha \vec{x}_b je rovna \vec{X}_i . Poloha \vec{x}_1 je vypočtena podle rovnice:

$$k_{p,b} = \frac{l_{p,b}}{L_p}, k_{\theta,b} = \frac{l_{\theta,b}}{L_\theta}, \quad (4.32)$$

$$\vec{x}_1 = \vec{x}_b + \begin{bmatrix} k_{p,b} \Delta \vec{p} \\ k_{\theta,b} \Delta \vec{\theta} \end{bmatrix}.$$

Pro polohy \vec{x}_2 až \vec{x}_N platí rovnice:

$$k_p = \frac{l_p}{L_p}, k_\theta = \frac{l_\theta}{L_\theta}, \quad (4.33)$$

$$\vec{x}_{j+1} = \vec{x}_j + \begin{bmatrix} k_p \Delta \vec{p} \\ k_\theta \Delta \vec{\theta} \end{bmatrix}, j \in [1, N-1].$$

Poslední poloha \vec{x}_f je rovna \vec{X}_{i+1} .

Kapitola 5

Implementace

V této části je popsána implementace ROS smyčky a podpůrných vláken. Implementace se dělí do tří částí: ROS smyčka, poddajný regulátor a podpůrná vlákna, viz schéma 5.1.

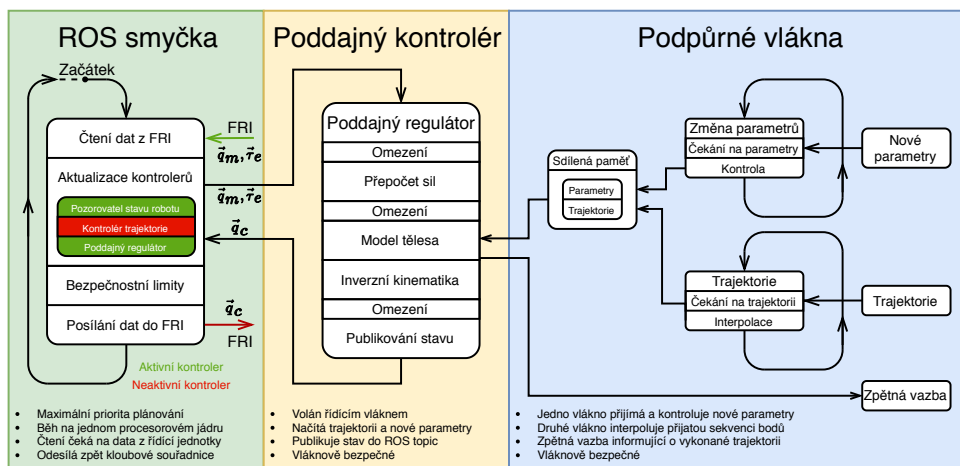


Schéma 5.1: Schéma rozvržení

5.1 ROS smyčka

ROS smyčka je naimplementovaná jak ROS uzel a staví na implementaci z práce [21]. Při startu smyčky načte parametry z ROS parametrického serveru.

Parametry obsahují parametry komunikace FRI, jména kloubů a číslo jádra procesoru. Parametry komunikace FRI jsou složeny z IP adresy a portu řídicí jednotky. Jména kloubů specifikují říditelné klouby. Smyčce je parametrem přiřazeno jádro a nastavena nejvyšší priorita plánování. Před startem komunikace jsou všechny kontroléry inicializovány. Po navázání FRI komunikace jsou aktivní kontroléry nastaveny do aktuálního stavu robotu. Řízení probíhá s periodou 1 ms a synchronizace ROS smyčky s robotem je zajištěna řídicí jednotkou KUKA. Aktivní kontroléry jsou každou periodu aktualizovány s novými daty z FRI. Aktivní řídicí kontrolér stanoví nové řídicí kloubové souřadnice \vec{q}_c . Před odesláním jsou řídicí kloubové souřadnice a rychlosti zkontrolovány, jestli nejsou překročeny limity. V případě, že jsou limity překročeny, je celá smyčka zastavena a odpojena od robotu. Správce kontrolérů při přepínání řídicích kontrolérů jeden kontrolér zastaví a druhý nastartuje. Kontrolér se po nastartování stává aktivním a je mu dovoleno řídit robotu. Druhý kontrolér je deaktivován.

■ 5.2 Poddajný kontrolér

Poddajný kontrolér zabaluje poddajný regulátor pro fungování v ROS systému [32]. Při implementaci poddajného kontroléru byla řešena časová náročnost použitých algoritmů, protože na výpočty je limitovaný čas. Paměť pro proměnné je alokována při startu programu. Pro matematické výpočty a matice byla zvolena šablonovaná C++ knihovna Eigen [33].

■ 5.2.1 Fáze kontroléru

Kontrolér prochází fázemi inicializace, startování, aktualizace a zastavování.

■ Inicializace

Inicializace kontroléru probíhá při startu ROS smyčky. Jsou načteny parametry z ROS parametrického serveru. Nastavena jsou podpůrná vlákna pro změnu parametrů a pro přijímání trajektorie. Konfigurován je ROS proud pro sdílení celého stavu kontroléru.

■ Startování kontroléru

Startování kontroléru (funkce Starting) je prováděno při aktivaci kontroléru. Nastaví poddajný regulátor do polohy příruby. Spočítá počáteční natočení R_{start} , úhel δ a konfiguraci inverzní kinematické úlohy. Kontrolér se stává aktivním a je aktualizován každou periodu.

■ Aktualizace kontroléru

Při aktualizaci kontroléru (funkce Update) je volán poddajný regulátor a je stanovena nová kloubová poloha \vec{q}_c . Načítány jsou nové parametry a trajektorie ze sdílené paměti. Na konci je ROS proudem publikován stav celého kontroléru.

■ Zastavování kontroléru

Při zastavování (funkce Stopping) je bezpečně ukončen provoz kontroléru a je uveden do neaktivního stavu.

■ 5.3 Podpůrná vlákna

Poddajný regulátor obsahuje dvě podpůrná vlákna. Jedno vlákno na změnu parametrů a druhé na zpracování trajektorie. Vlákna předávají data poddajnému kontroléru přes sdílenou paměť, která je vláknově bezpečná.

■ 5.3.1 Vlákno pro změnu parametrů

Vlákno vychází z nástroje ROS dynamické rekonfigurace. Vlákno umožňuje změnu parametrů poddajného regulátoru, posun ekvilibria, simulovat vnější síly, měnit natočení poddajnosti, vynulování sil nebo kroutících momentů a přidávat transformace T_t a T_b . Nové parametry jsou po přijetí zkontrolovány a uloženy do sdílené paměti.

■ 5.3.2 Vlákno pro výpočet trajektorie

Vlákno vychází z ROS akčního serveru. Vlákno přijímá naplánované trajektorie a ukládá do sdílené paměti. Vlákno poskytuje ROS proudem zpětnou vazbu o stavu vykonávané trajektorie.

Kapitola 6

Experimenty

6.1 Poddajný regulátor

V některých experimentech byl z důvodu porovnání vnější síly a síly stanovené robotem použit siloměru Sauter FC 500, viz foto 6.1. Experimenty budou probíhat v poloze robotu s kloubovými souřadnicemi $\vec{q} = [0^\circ, 30^\circ, 0^\circ, -100^\circ, 0^\circ, 50^\circ, 0^\circ]^T$, viz obrázek 6.1.



Fotka 6.1: Poloha robotu během experimentů s kloubovými souřadnicemi $\vec{q} = [0^\circ, 30^\circ, 0^\circ, -100^\circ, 0^\circ, 50^\circ, 0^\circ]^T$. Používání siloměru Sauter FC 500 během experimentů.

6.1.1 Změna tuhosti

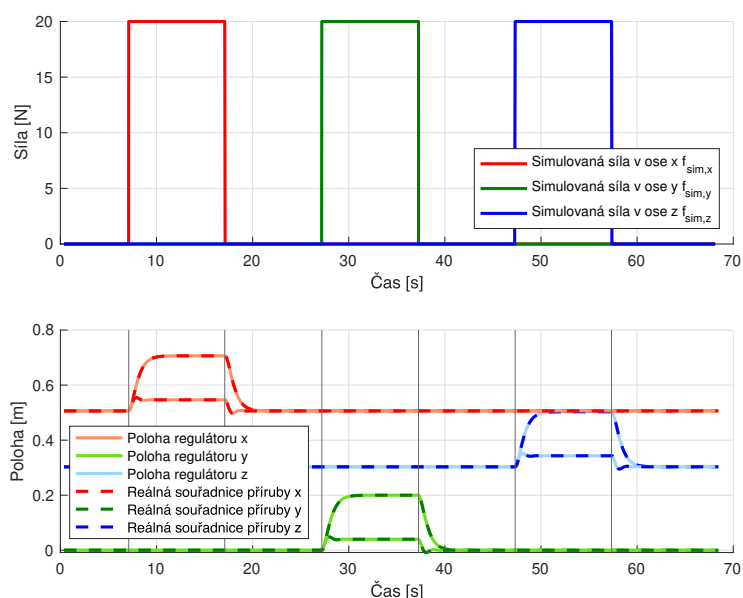
Experiment zkoumal chování poddajného regulátoru na reálném robotu při dvou různých hodnotách tuhosti $k_1 = 100 \text{ Nm}^{-1}$ a $k_2 = 500 \text{ Nm}^{-1}$ v osách xyz. Experiment byl proveden pro simulované síly \vec{F}_{sim} a pro vnější síly \vec{F}_e způsobené rukou operátora.

Simulované síly

Vstupní síla byla simulovaná \vec{F}_{sim} a její hodnoty jsou zobrazeny na grafu 6.2. Vnější síly byly vynulovány. Na grafu 6.2 je porovnávána reálná poloha příruby (čárkovaná čára) sledující polohu regulátoru (plná čára). Odchytky sledování jsou zaznamenány v tabulce 6.1. S klesající tuhostí se zvětšuje velikost výchytky. Parametry poddajnosti:

$$D = \text{diag}([100, 100, 100, 20, 20, 20]) \left[\text{Nm}^{-1} \text{ s}, \text{Nm}^{-1} \text{ s}, \text{Nm}^{-1} \text{ s}, \text{Nms}, \text{Nms}, \text{Nms} \right],$$

$$M = \text{diag}([25, 25, 25, 3, 3, 3]) \left[\text{kg}, \text{kg}, \text{kg}, \text{kg m}^2, \text{kg m}^2, \text{kg m}^2 \right]. \quad (6.1)$$



Graf 6.2: Porovnání poddajného chování robotu při dvou tuhostech $k_1 = 100 \text{ Nm}^{-1}$ a $k_2 = 500 \text{ Nm}^{-1}$ v osách xyz. Na horním grafu jsou zobrazeny simulované vnější síly \vec{F}_{sim} . Na spodním grafu je odezva příruby (čárkovaná čára) na polohu regulátoru (plná čára).

Tuhost [Nm^{-1}]	100	500
Maximální absolutní odchylka v ose x [m]	7.3×10^{-4}	7.5×10^{-4}
Maximální absolutní odchylka v ose y [m]	8.7×10^{-4}	8.0×10^{-4}
Maximální absolutní odchylka v ose z [m]	11.6×10^{-4}	15.6×10^{-4}
Průměrná absolutní odchylka v ose x [m]	0.7×10^{-4}	0.4×10^{-4}
Průměrná absolutní odchylka v ose y [m]	0.4×10^{-4}	0.2×10^{-4}
Průměrná absolutní odchylka v ose z [m]	0.7×10^{-4}	0.4×10^{-4}

Tabulka 6.1: Odchylky příruby od referenční polohy poddajného regulátoru.

■ Vnější síly způsobené operátorem

Na robota byla vyvíjena vnější síla \vec{F}_e rukou za použití siloměru Sauter FC 500. Vnější síly změřené robotem (fialová čára) a siloměrem (černá čára) jsou zaznamenány na grafech . Chyby měření vnějších sil robotem jsou zaznamenány v tabulce 6.2. Na grafech 6.3 je porovnávána reálná poloha příruby (čárkovaná čára) sledující polohu regulátoru (plná čára). Odchylky sledování jsou zaznamenány v tabulce 6.3. Parametry poddajnosti:

$$D = \text{diag}([100, 100, 100, 20, 20, 20]) \left[\text{Nm}^{-1} \text{s}, \text{Nm}^{-1} \text{s}, \text{Nm}^{-1} \text{s}, \text{Nms}, \text{Nms}, \text{Nms} \right],$$

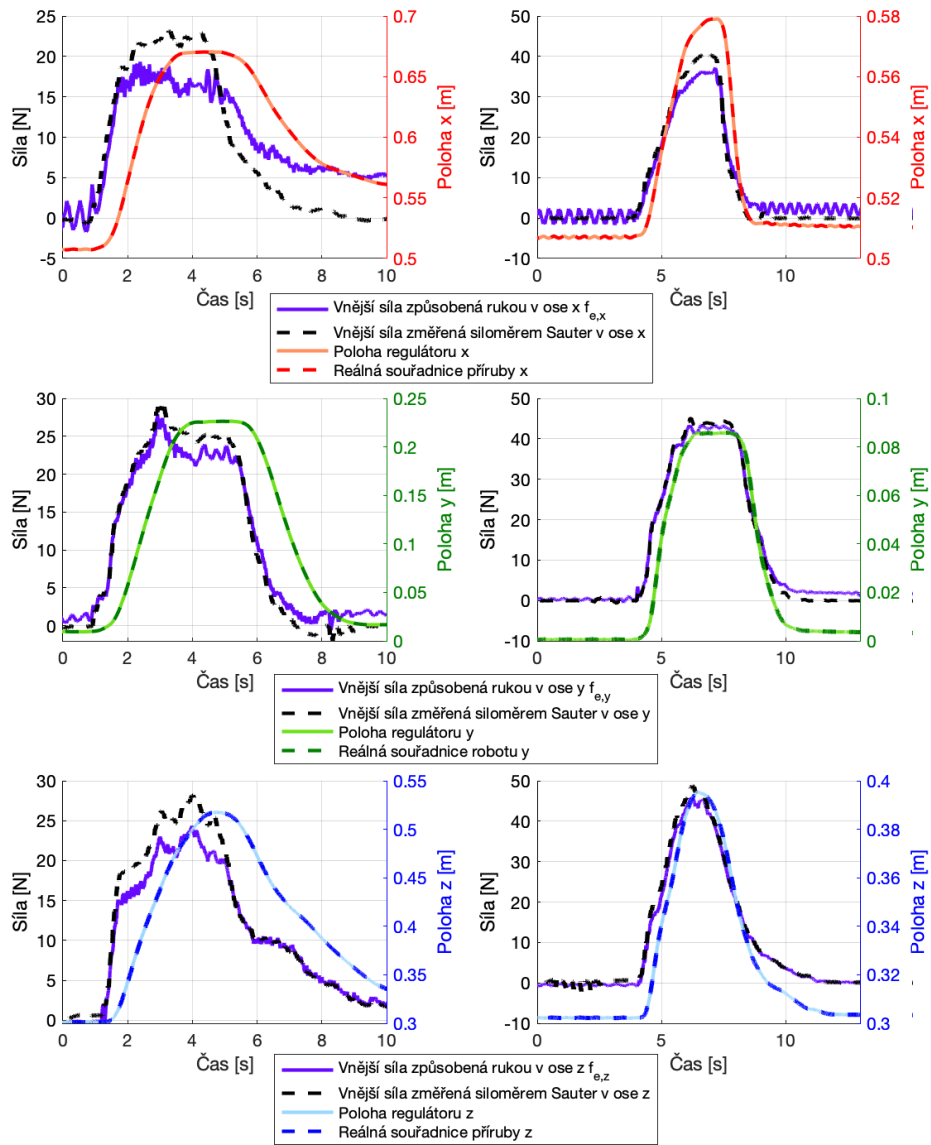
$$M = \text{diag}([25, 25, 25, 3, 3, 3]) \left[\text{kg}, \text{kg}, \text{kg}, \text{kg m}^2, \text{kg m}^2, \text{kg m}^2 \right]. \quad (6.2)$$

Tuhost [Nm^{-1}]	100	500
Maximální absolutní chyba síly $f_{e,x}$ v ose x [N]	7 ± 1	5 ± 1
Maximální absolutní chyba síly $f_{e,y}$ v ose y [N]	4 ± 1	3 ± 1
Maximální absolutní chyba síly $f_{e,z}$ v ose z [N]	5 ± 1	4 ± 1

Tabulka 6.2: Maximální chyba v měřených silách robotem. Stanovena rozdílem od měřených sil siloměrem Sauter FC 500.

Tuhost [Nm^{-1}]	100	500
Maximální absolutní odchylka v ose x [m]	0.44×10^{-3}	0.94×10^{-3}
Maximální absolutní odchylka v ose y [m]	0.16×10^{-3}	0.13×10^{-3}
Maximální absolutní odchylka v ose z [m]	0.33×10^{-3}	0.34×10^{-3}
Průměrná absolutní odchylka v ose x [m]	0.05×10^{-3}	0.07×10^{-3}
Průměrná absolutní odchylka v ose y [m]	0.04×10^{-3}	0.03×10^{-3}
Průměrná absolutní odchylka v ose z [m]	0.03×10^{-3}	0.05×10^{-3}

Tabulka 6.3: Odchylky příruby od referenční polohy poddajného regulátoru.



Graf 6.3: Porovnání poddajného chování robotu při dvou tuhostech $k_1 = 100 \text{ Nm}^{-1}$ a $k_2 = 500 \text{ Nm}^{-1}$ v osách xyz. Na robota byla vyvíjena síla rukou za použití siloměru Sauter FC 500 a je porovnávána se silou naměřenou robotem. Na grafech je zobrazena odezva příruby (čárkovaná čára) na polohu regulátoru (plná čára).

6.1.2 Změna viskózního tlumení

Experiment zkoumal chování poddajného regulátoru na reálném robotu při dvou různých hodnotách viskózního tlumení $d_1 = 50 \text{ Nm}^{-1}\text{s}$ a $d_2 = 200 \text{ Nm}^{-1}\text{s}$ v osách xyz. Experiment byl proveden pro simulované síly \vec{F}_{sim} a pro vnější síly \vec{F}_e způsobené rukou operátora.

Simulované síly

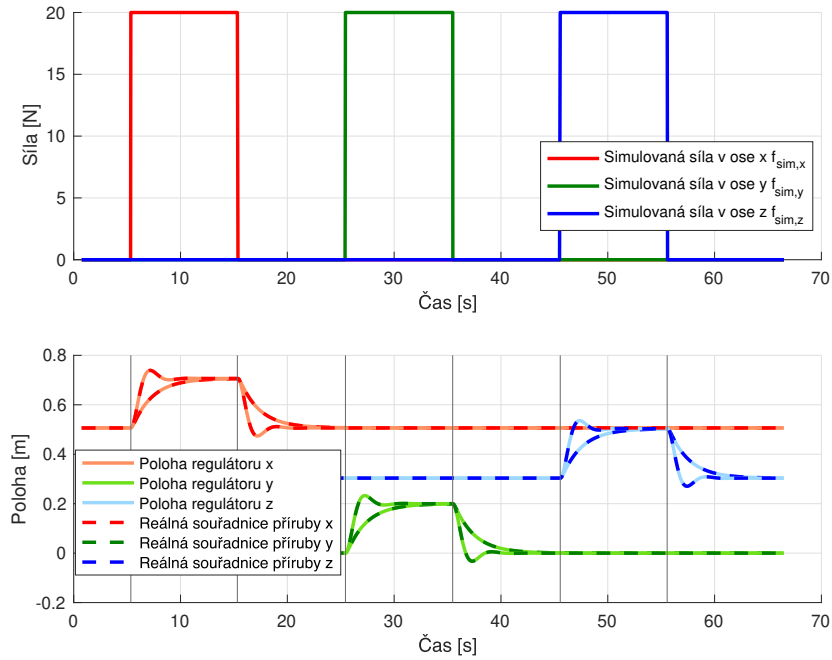
Vstupní síla byla simulovaná \vec{F}_{sim} a její hodnoty jsou zobrazeny na grafu 6.4. Vnější síly byly vynulovány. Na grafu 6.4 je porovnávána reálná poloha příruby (čárkovaná čára) sledující polohu regulátoru (plná čára). Odchytky sledování jsou zaznamenány v tabulce 6.4. Viskózní tlumení regulátoru má vliv na rychlost náběhu a ustálení polohy příruby. S klesající hodnotou viskózního tlumení se zrychluje náběh a zvětšuje se překmit. Parametry poddajnosti byly:

$$K = \text{diag}([500, 500, 500, 30, 30, 30]) \left[\text{Nm}^{-1}, \text{Nm}^{-1}, \text{Nm}^{-1}, \text{Nm}, \text{Nm}, \text{Nm} \right],$$

$$M = \text{diag}([25, 25, 25, 3, 3, 3]) \left[\text{kg}, \text{kg}, \text{kg}, \text{kg m}^2, \text{kg m}^2, \text{kg m}^2 \right]. \quad (6.3)$$

Viskózní tlumení [Nm^{-1}s]	50	200
Maximální absolutní odchylka v ose x [m]	0.2×10^{-3}	0.4×10^{-3}
Maximální absolutní odchylka v ose y [m]	0.5×10^{-3}	1.3×10^{-3}
Maximální absolutní odchylka v ose z [m]	1.1×10^{-3}	1.5×10^{-3}
Průměrná absolutní odchylka v ose x [m]	0.04×10^{-3}	0.05×10^{-3}
Průměrná absolutní odchylka v ose y [m]	0.03×10^{-3}	0.05×10^{-3}
Průměrná absolutní odchylka v ose z [m]	0.13×10^{-3}	0.06×10^{-3}

Tabulka 6.4: Odchytky příruby od referenční polohy poddajného regulátoru.



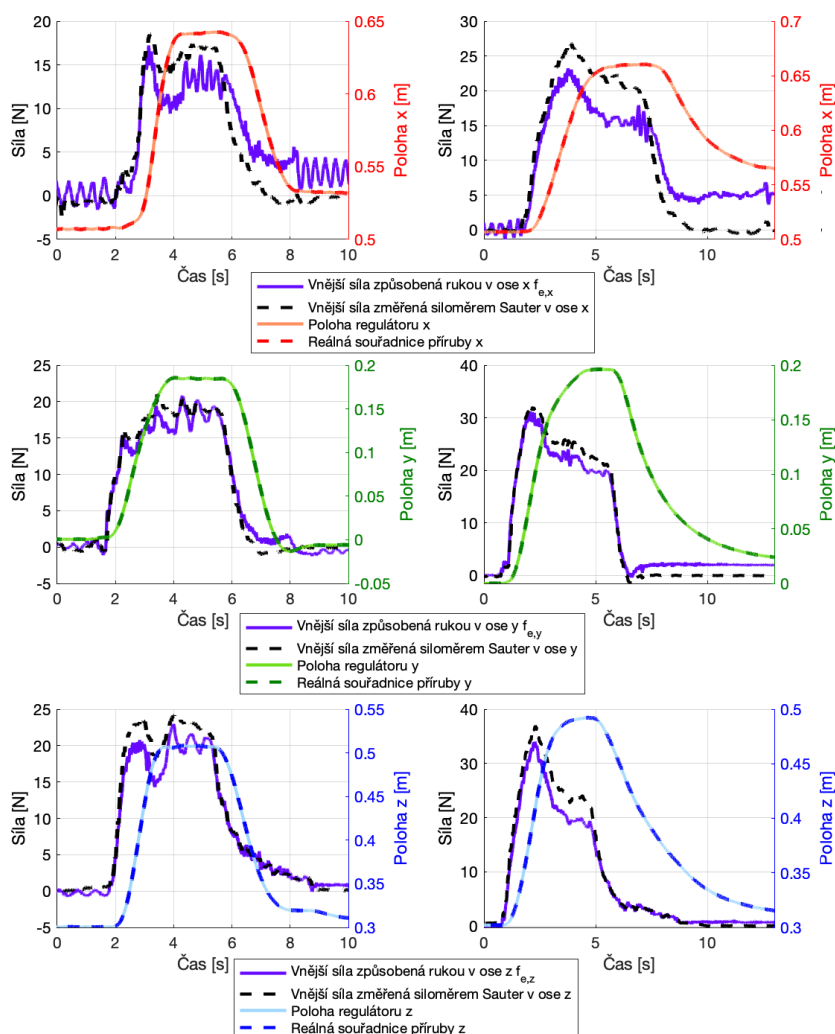
Graf 6.4: Porovnání poddajného chování regulátoru při dvou různých hodnotách viskózního tlumení $d_1 = 50 \text{ Nm}^{-1}\text{s}$ a $d_2 = 200 \text{ Nm}^{-1}\text{s}$ v osách xyz. Na horním grafu jsou zobrazeny simulované vnější síly \vec{F}_{sim} . Na spodním grafu je odezva příruby (čárkovaná čára) na polohu regulátoru (plná čára).

■ Vnější síly způsobené operátorem

Na robota byla vyvíjena vnější síla \vec{F}_e rukou za použití siloměru Sauter FC 500. Vnější síly změřené robotem (fialová) a siloměrem (černá) jsou zaznamenány na grafech 6.5. Chyby měření vnějších sil robotem jsou zaznamenány v tabulce 6.5. Na grafech 6.5 je porovnávána reálná poloha příruby (čárkovaná čára) sledující polohu regulátoru (plná čára). Odchyłky sledování jsou zaznamenané v tabulce 6.6. Parametry poddajnosti byly:

$$K = \text{diag}([100, 100, 100, 30, 30, 30]) \left[\text{Nm}^{-1}, \text{Nm}^{-1}, \text{Nm}^{-1}, \text{Nm}, \text{Nm}, \text{Nm} \right],$$

$$M = \text{diag}([25, 25, 25, 3, 3, 3]) \left[\text{kg}, \text{kg}, \text{kg}, \text{kg m}^2, \text{kg m}^2, \text{kg m}^2 \right]. \quad (6.4)$$



Graf 6.5: Porovnání poddajného chování robota pro dvě hodnoty viskózního tlumení $d_1 = 50 \text{ Nm}^{-1}\text{s}$ a $d_2 = 200 \text{ Nm}^{-1}\text{s}$ v osách xyz. Na robota byla vyvíjena síla rukou za použití siloměru Sauter FC 500 a je porovnávána se silou naměřenou robotem. Na grafech je zobrazena odezva příruby (čárkovaná čára) na polohu regulátoru (plná čára).

Viskózní tlumení [Nm^{-1}s]	50	200
Maximální chyba v síle $f_{e,x}$ v ose x [N]	6 ± 1	7 ± 1
Maximální chyba v síle $f_{e,y}$ v ose y [N]	4 ± 1	4 ± 1
Maximální chyba v síle $f_{e,z}$ v ose z [N]	6 ± 1	5 ± 1

Tabulka 6.5: Maximální chyba v měřených silách robotem. Stanovena rozdílem od měřených sil siloměrem Sauter FC 500.

Viskózní tlumení [Nm^{-1}s]	50	200
Maximální absolutní odchylka v ose x [m]	0.00212	0.00061
Maximální absolutní odchylka v ose y [m]	0.00021	0.00030
Maximální absolutní odchylka v ose z [m]	0.00043	0.00032
Průměrná absolutní odchylka v ose x [m]	0.00024	0.00013
Průměrná absolutní odchylka v ose y [m]	0.00004	0.00012
Průměrná absolutní odchylka v ose z [m]	0.00003	0.00012

Tabulka 6.6: Odchylky příruby od referenční polohy poddajného regulátoru.

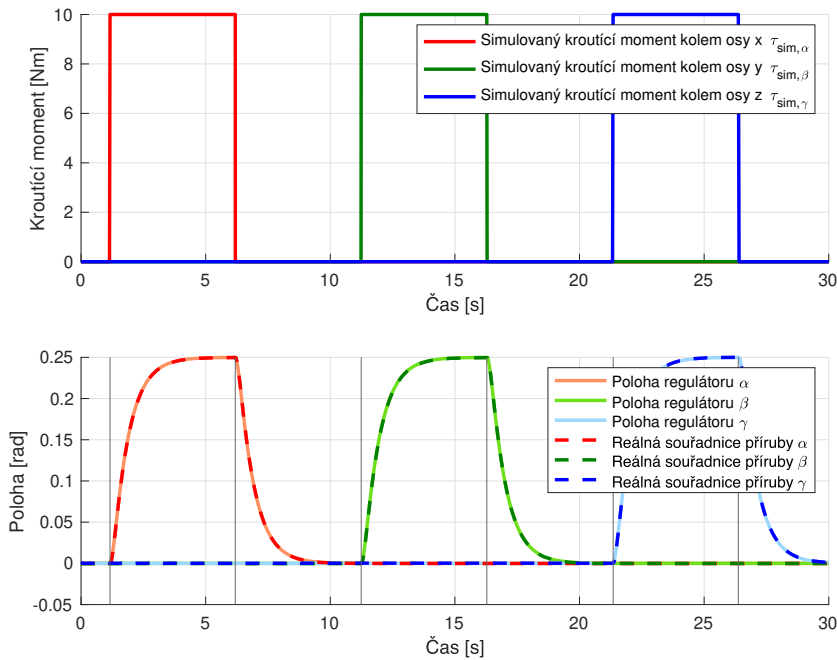
6.1.3 Poddajnost orientace

Experiment zkoumal chování poddajného regulátoru pro rotace kolem os xyz na reálném robotu. Kroutící moment byl simulován \vec{F}_{sim} a hodnoty jsou zobrazeny na grafu 6.6. Na grafu 6.6 je zobrazeno reálné natočení příruby (čárkovaná čára) sledující natočení regulátoru (plná čára). Odchylky sledování jsou zaznamenané v tabulce 6.7. Parametry poddajnosti byly:

$$\begin{aligned}
 K &= \text{diag}([100, 100, 100, 40, 40, 40]) \left[\text{Nm}^{-1}, \text{Nm}^{-1}, \text{Nm}^{-1}, \text{Nm}, \text{Nm}, \text{Nm} \right], \\
 D &= \text{diag}([100, 100, 100, 30, 30, 30]) \left[\text{Nm}^{-1} \text{s}, \text{Nm}^{-1} \text{s}, \text{Nm}^{-1} \text{s}, \text{Nms}, \text{Nms}, \text{Nms} \right], \\
 M &= \text{diag}([25, 25, 25, 3, 3, 3]) \left[\text{kg}, \text{kg}, \text{kg}, \text{kg m}^2, \text{kg m}^2, \text{kg m}^2 \right].
 \end{aligned}
 \tag{6.5}$$

Typ absolutní odchylky	Maximální	Průměrná
Odchylka rotace kolem osy x [rad]	0.0075	0.0009
Odchylka rotace kolem osy y [rad]	0.0074	0.0009
Odchylka rotace kolem osy z [rad]	0.0092	0.0003

Tabulka 6.7: Odchylky příruby od referenční polohy poddajného regulátoru.

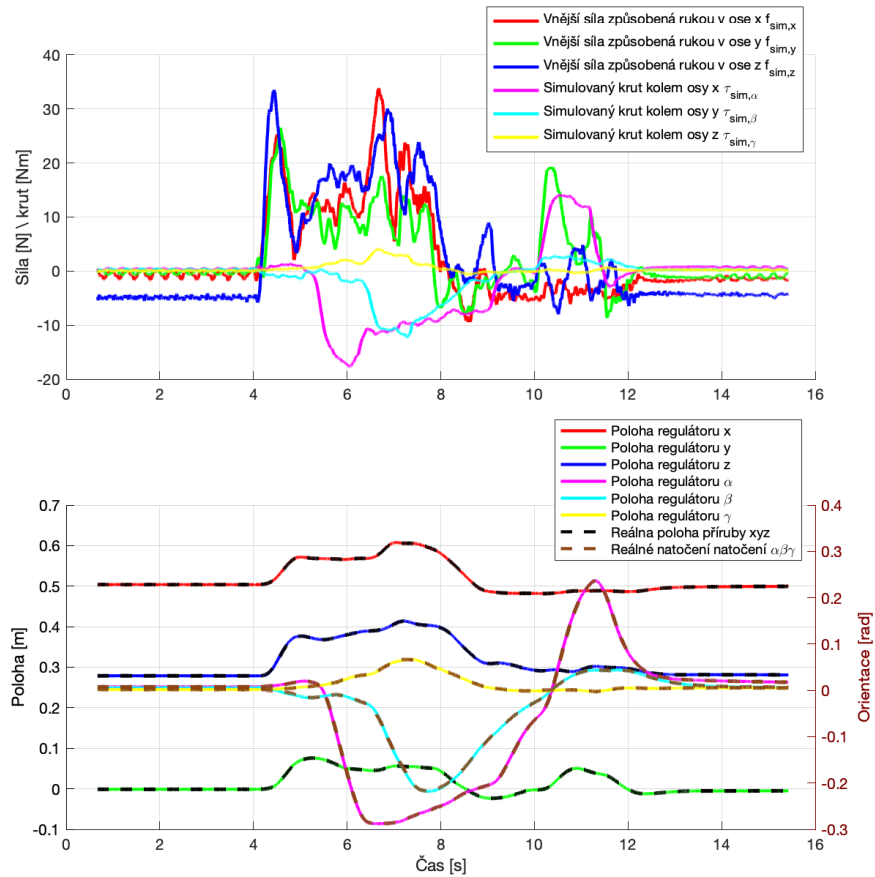


Graf 6.6: Chování poddajného regulátoru pro rotace kolem os xyz na reálném robotu. Na horním grafu jsou zobrazeny simulované kroučící momenty \vec{F}_{sim} . Vnější síly byly vynulovány. Na spodním grafu je odezva orientace příruby (čárkovaná) na orientaci regulátoru (plná čára).

6.1.4 Všechny stupně volnosti

Tento experiment zkoumal schopnost příruby sledovat všechny stupně volnosti ve stejný čas. Na robota byly vyvíjeny vnější síly a kroučící momenty rukou ve všech stupních volnosti najednou, viz horní graf 6.7. Na spodním grafu 6.7 je porovnávána reálná poloha příruby (čárkovaná čára) sledující polohu regulátoru (plná čára). Odchytky sledování jsou zaznamenány v tabulce 6.8. Experiment ukazuje, že příruba je schopná sledovat všechny stupně volnosti najednou. Parametry poddajnosti byly:

$$\begin{aligned}
 K &= \text{diag}([200, 200, 200, 40, 40, 40]) \left[\text{Nm}^{-1}, \text{Nm}^{-1}, \text{Nm}^{-1}, \text{Nm}, \text{Nm}, \text{Nm} \right], \\
 D &= \text{diag}([100, 100, 100, 30, 30, 30]) \left[\text{Nm}^{-1} \text{s}, \text{Nm}^{-1} \text{s}, \text{Nm}^{-1} \text{s}, \text{Nms}, \text{Nms}, \text{Nms} \right], \\
 M &= \text{diag}([25, 25, 25, 3, 3, 3]) \left[\text{kg}, \text{kg}, \text{kg}, \text{kg m}^2, \text{kg m}^2, \text{kg m}^2 \right].
 \end{aligned}
 \tag{6.6}$$



Graf 6.7: Chování poddajného regulátoru ve všech stupních volnosti najednou. Na horním grafu jsou zobrazeny vnější síly a kroutící momenty. Na spodním grafu je odezva příruby (čárkovaná) na polohu regulátoru (plná čára).

Typ odchylky	Translace [m]	Rotace [rad]
Maximální absolutní odchylka v ose x	0.0013	0.0044
Maximální absolutní odchylka v ose y	0.0016	0.0043
Maximální absolutní odchylka v ose z	0.0018	0.0023
Průměrná absolutní odchylka v ose x	0.0002	0.0008
Průměrná absolutní odchylka v ose y	0.0003	0.0007
Průměrná absolutní odchylka v ose z	0.0003	0.0004

Tabulka 6.8: Odchylky příruby od referenční polohy poddajného regulátoru ve všech stupních volnosti.

6.1.5 Porovnání odchylek

Porovnání maximálních odchylek příruby od referenční polohy poddajného regulátoru z experimentů změny tuhosti, viskózního tlumení, orientace a všech stupňů volnosti s předchozí prací [21], viz tabulka 6.9. Přesnost sledování trajektorie přírubou se zlepšila o řád oproti původní práci.

Maximální absolutní odchylka	osa x	osa y	osa z
Translace [m]	0.0021	0.0016	0.0018
Translace [m] původní práce [21]	0.0701	0.0600	0.0656
Rotace [rad]	0.0075	0.0074	0.0092
Průměrná absolutní odchylka	osa x	osa y	osa z
Translace [m]	0.0002	0.0003	0.0003
Translace [m] původní práce [21]	0.0023	0.0013	0.0024
Rotace [rad]	0.0009	0.0009	0.0004

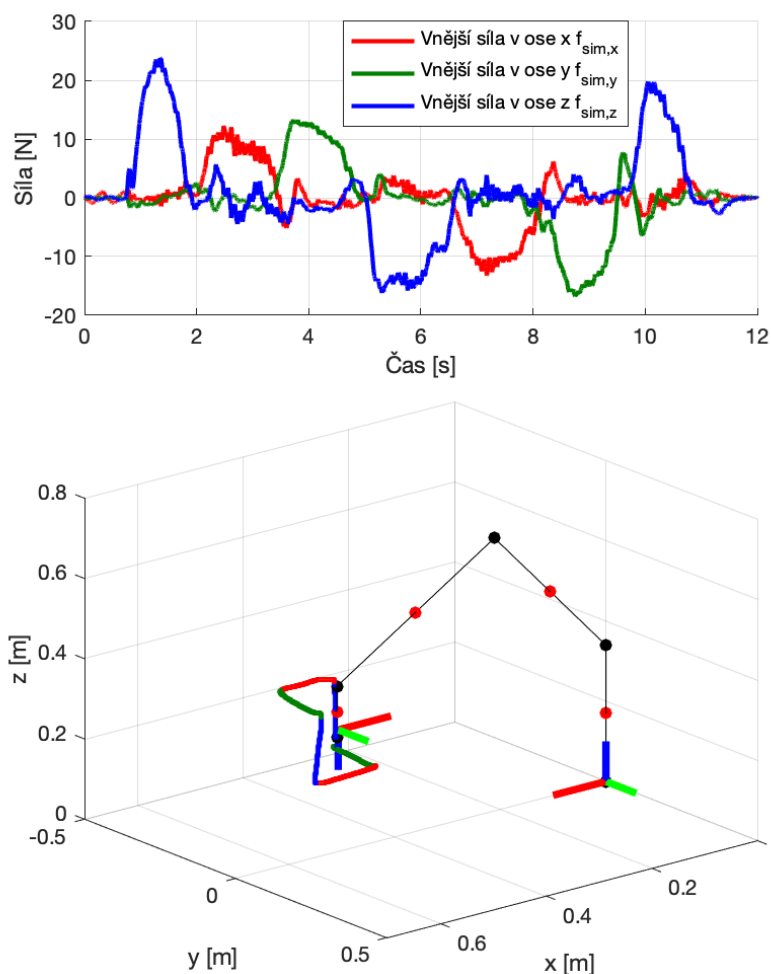
Tabulka 6.9: Odchylky příruby od referenční polohy poddajného regulátoru ze všech experimentů. Hodnoty translace jsou porovnány s hodnotami z původní práce [21].

6.1.6 Kompenzace gravitace

Experiment zkoumal použití poddajného regulátoru pro kompenzaci gravitace. Graf 6.8 ukazuje vykonanou trajektorii příruby. Trajektorie je barevně rozdělená na pohyby po ose x (červená), ose y (zelená) a ose z (modrá čára). V horním grafu 6.8 jsou zobrazeny vnější síly způsobené rukou operátora, které barevně souhlasí s trajektorií. Kompenzaci gravitace lze použít k zaznamenání požadované trajektorie. Parametry poddajnosti:

$$D = \text{diag}([100, 100, 100, 20, 20, 20]) \left[\text{Nm}^{-1} \text{s}, \text{Nm}^{-1} \text{s}, \text{Nm}^{-1} \text{s}, \text{Nms}, \text{Nms}, \text{Nms} \right],$$

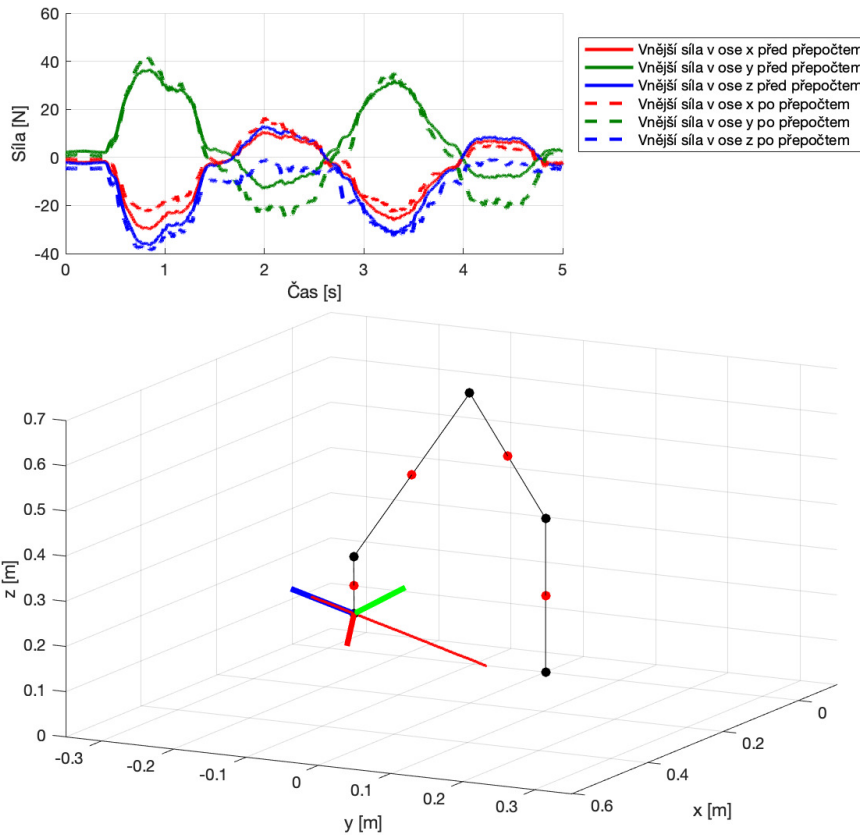
$$M = \text{diag}([25, 25, 25, 3, 3, 3]) \left[\text{kg}, \text{kg}, \text{kg}, \text{kg m}^2, \text{kg m}^2, \text{kg m}^2 \right]. \quad (6.7)$$



Graf 6.8: Testování kompenzace gravitace poddajným regulátorem. Na horním grafu jsou zobrazeny vnější síly a barevně souhlasí s částmi trajektorie. Na spodním grafu je zaznamenaná trajektorie příruby.

6.1.7 Vynulování vnějších sil

Experiment testoval vynulování sil $f_{e,x} = 0$ a $f_{e,y} = 0$ v souřadnicovém systému natočeném o úhly $\alpha^* = -45^\circ$, $\beta^* = -30^\circ$ a $\gamma^* = 0^\circ$. Na grafu 6.9 je natočený souřadnicový systém v přírubě robotu. Na horním grafu 6.9 jsou zobrazeny vnější síly před vynulováním (plná čára) a po vynulování (čárkovaná čára). Na spodním grafu je osa (červená čára), po které se příruba pohybovala. Vynulování způsobilo, že se příruba mohla pouze pohybovat ve směru této osy.



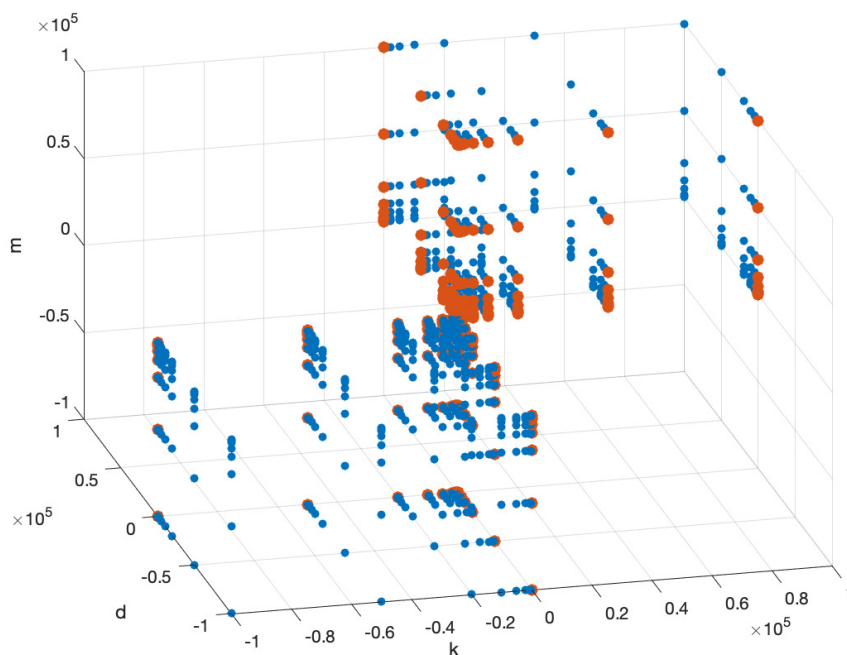
Graf 6.9: Podání vnějších sil v nakloněném souřadnicovém systému o úhly $\alpha^* = -45^\circ$, $\beta^* = -30^\circ$ a $\gamma^* = 0^\circ$. Na horním grafu jsou zobrazeny vnější síly před vynulováním a po vynulování. Na spodním grafu je osa (červená čára), po které se příruba pohybovala. Vynulování způsobilo, že se příruba mohla pouze pohybovat ve směru této osy x.

6.1.8 Stabilita poddajného regulátoru

Tento experiment zkoumal stabilitu řídicí smyčky. Stabilitu řízení na polohu robotu zajišťuje řídicí jednotka KUKA. Stabilita přepočtu kroutících momentů na kartézské síly a kroutící momenty je určena manipulovatelností jacobíánu. V singulárních polohách robotu můžou přepočtené síly způsobit nestabilitu řídicí smyčky, a proto byly přidány omezení kroutících momentů na vstup a omezení kartézských sil a kroutících momentů na výstup přepočtu.

Stabilita poddajného regulátoru v závislosti na parametrech je zaznamenaná na grafu 6.10. Póly regulátoru jsou stabilní i pro záporné hodnoty parametrů k , d a m , ale ty jsou z fyzikálního hlediska zamítnuty. In-

tervaly stability parametrů jsou stanoveny na $k \in (0, \infty) [\text{Nm}^{-1}] \setminus [\text{Nm}] \wedge d \in (0, \infty) [\text{Nm}^{-1}\text{s}] \setminus [\text{Nms}] \wedge m \in (0, \infty) [\text{kg}] \setminus [\text{kg m}^2]$. Pro hodnoty $k = 0 [\text{Nm}^{-1}] \setminus [\text{Nm}]$ nebo $d = 0 [\text{Nm}^{-1}\text{s}] \setminus [\text{Nms}]$ je poddajný regulátor na mezi stability. Frekvenční stabilita je dána volbou parametrů.



Graf 6.10: Stabilita regulátoru v závislosti na parametrech k , d a m . Modré body jsou stabilní kombinace parametrů a oranžové body jsou kombinace na mezi stability.

6.2 Sledování kartézské trajektorie

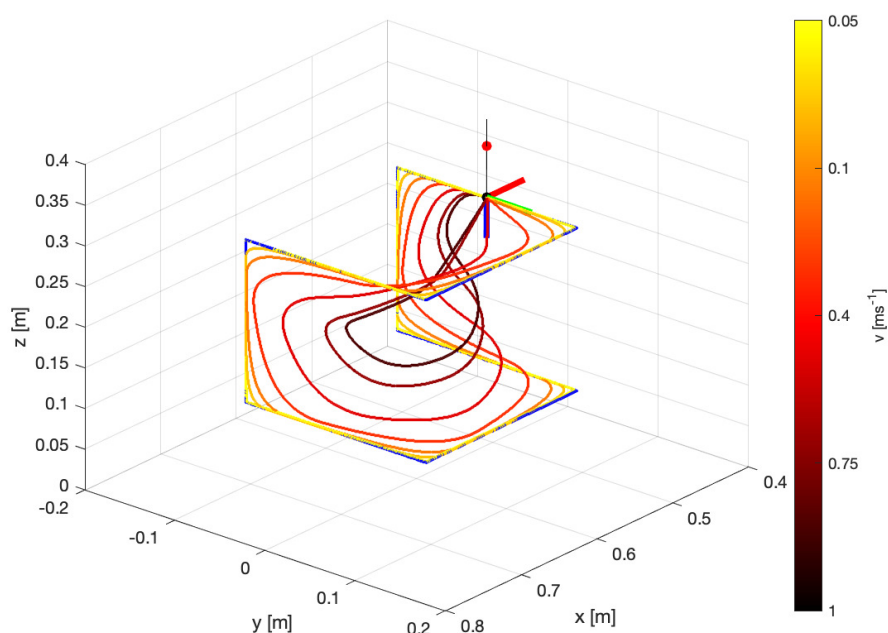
Tato část je zaměřena na testování schopnosti poddajného regulátoru sledovat naplánované kartézské trajektorie. Experimenty byly provedeny pro čtyři rozdílné podmínky: změna kartézské rychlosti trajektorie, změna tuhosti poddajného regulátoru, změna viskózního tlumení regulátoru a při kolizi s prostředím. Schopnost poddajného regulátoru sledovat trajektorii byla hodnocena pomocí kartézské odchylky od trajektorie:

$$\mathbf{d}_k = \sqrt{(x_k - x_{e,k})^2 + (y_k - y_{e,k})^2 + (z - z_{e,k})^2}. \quad (6.8)$$

6.2.1 Změna kartézské rychlosti

Experiment zkoumal schopnost poddajného regulátoru sledovat různě rychlé trajektorie stejného tvaru. Použitá trajektorie měla tvar krychle s délkou strany 20 cm (modrá čára), viz grafu 6.11. Trajektorie byla vykonaná 6 krát, pokaždé s jinou rychlostí. Hodnoty rychlosti v_{max} byly 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.75 a 1 ms^{-1} . Na grafu 6.11 je zaznamenána reálná poloha příruby během sledování trajektorií. Na grafu 6.12 jsou zaznamenané odchylky regulátoru od trajektorií. V tabulce 6.10 jsou zaneseny maximální odchylky. Schopnost sledovat trajektorii se snižuje se vzrůstající rychlostí naplánované trajektorie. Pro vyšší rychlosti lze odladit parametry poddajnosti, které umožní lepší sledování. Parametry poddajnosti:

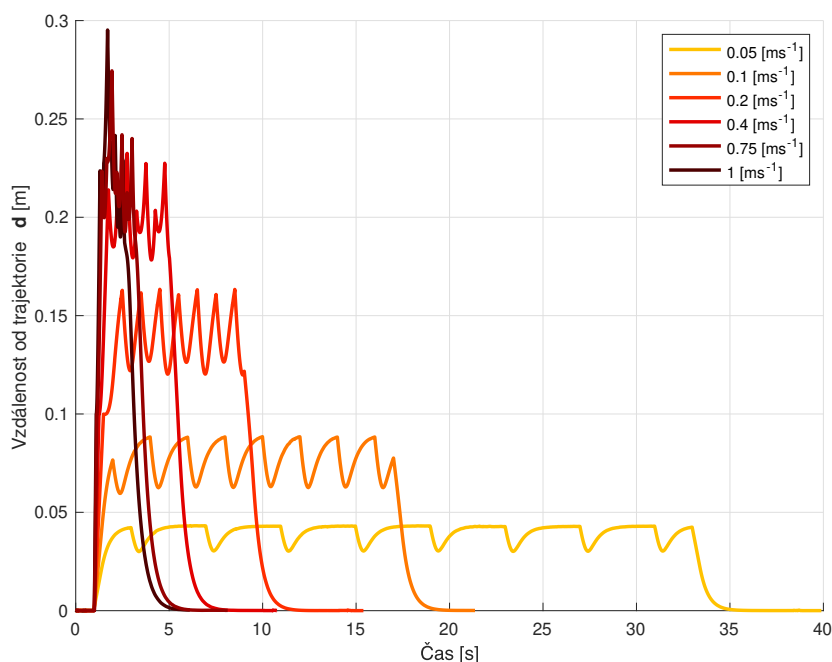
$$\begin{aligned}
 K &= \text{diag}([1000, 1000, 1000, 30, 30, 30]) \left[\text{Nm}^{-1}, \text{Nm}^{-1}, \text{Nm}^{-1}, \text{Nm}, \text{Nm}, \text{Nm} \right], \\
 D &= \text{diag}([500, 500, 500, 20, 20, 20]) \left[\text{Nm}^{-1} \text{s}, \text{Nm}^{-1} \text{s}, \text{Nm}^{-1} \text{s}, \text{Nms}, \text{Nms}, \text{Nms} \right], \\
 M &= \text{diag}([25, 25, 25, 3, 3, 3]) \left[\text{kg}, \text{kg}, \text{kg}, \text{kg m}^2, \text{kg m}^2, \text{kg m}^2 \right].
 \end{aligned}
 \tag{6.9}$$



Graf 6.11: Zaznamenané trajektorie příruby při sledování různě rychlých trajektorií stejného tvaru. Trajektorie byla vykonaná 6 krát, pokaždé s jinou rychlostí. Trajektorie je značena modrou čárou. Rychlosti byly 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.75 a 1 ms^{-1} .

Rychlost [ms]	0.05	0.1	0.2	0.4	0.75	1
Maximální odchylka d [m]	0.043	0.089	0.163	0.233	0.275	0.295

Tabulka 6.10: Zaznamenané odchylky příruby d od trajektorie pro různé hodnoty tlumení.



Obrázek 6.12: Zaznamenané odchylky příruby d od trajektorie pro různě rychlé trajektorie. Rychlosti trajektorií byly 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.75 a 1 ms^{-1} .

6.2.2 Změna tuhosti

Experiment zkoumal schopnost poddajného regulátoru sledovat naplánovanou trajektorii pro různé hodnoty tlumení. Použitá trajektorie měla tvar krychle s délkou strany 20 cm (modrá čára), viz graf 6.13. Trajektorie byla vykonaná 5 krát, pokaždé pro jinou hodnotu tuhosti. Hodnoty tuhosti byly 100, 200, 500, 1000 a 2000 Nm^{-1} . Na grafu 6.13 je zaznamenána reálná poloha příruby během pohybu. Na grafu 6.14 jsou zaznamenané odchylky regulátoru od trajektorie. V tabulce 6.11 jsou zaneseny maximální odchylky. Schopnost sledovat trajektorii se zvyšuje se vzrůstající hodnotou tlumení. Parametry poddajného regulátoru

byly:

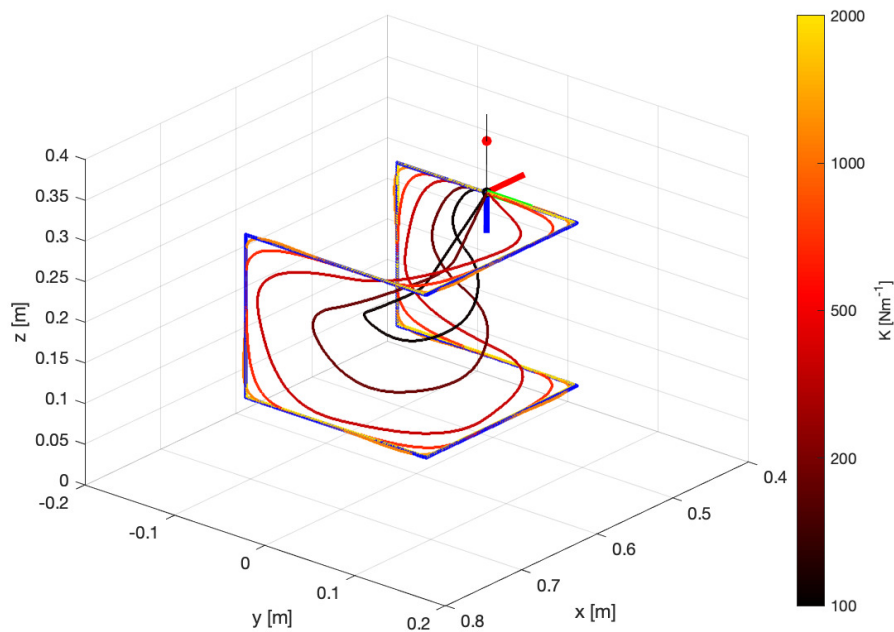
$$D = \text{diag}([500, 500, 500, 20, 20, 20]) \left[\text{Nm}^{-1} \text{s}, \text{Nm}^{-1} \text{s}, \text{Nm}^{-1} \text{s}, \text{Nms}, \text{Nms}, \text{Nms} \right],$$

$$M = \text{diag}([25, 25, 25, 3, 3, 3]) \left[\text{kg}, \text{kg}, \text{kg}, \text{kg m}^2, \text{kg m}^2, \text{kg m}^2 \right].$$

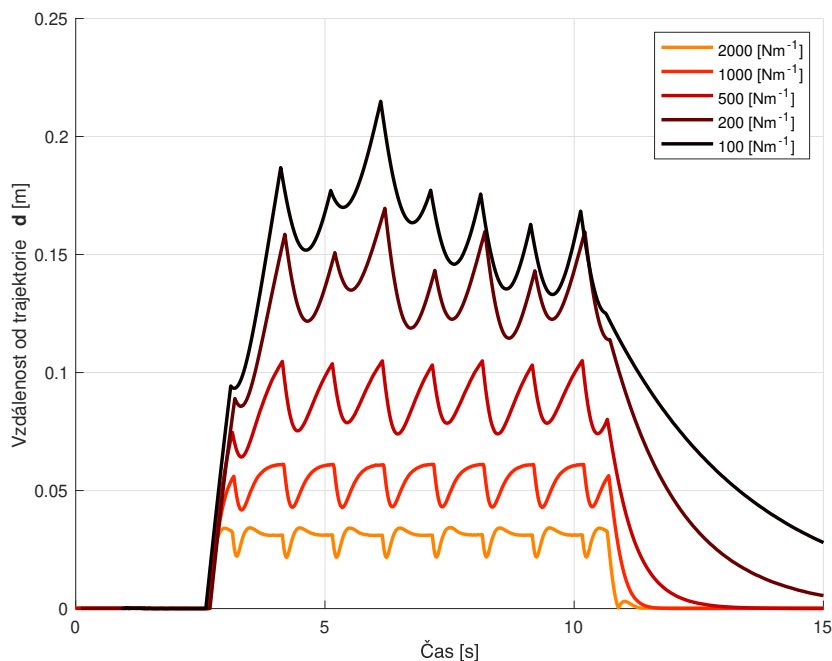
(6.10)

Tuhost [Nm^{-1}]	2000	1000	500	200	100
Maximální odchylka \mathbf{d} [m]	0.115	0.147	0.178	0.212	0.239

Tabulka 6.11: Maximální kartézské odchylky příruby od trajektorie pro různé hodnoty tuhosti poddajného regulátoru.



Graf 6.13: Zaznamenané trajektorie příruby robotu při sledování trajektorie se změnou tuhosti. Trajektorie byla vykonaná 5 krát, pokaždé pro jinou hodnotu tuhosti. Trajektorie je značena modrou čarou. Hodnoty tuhosti byly 100, 200, 500, 1000 a 2000 Nm^{-1} .

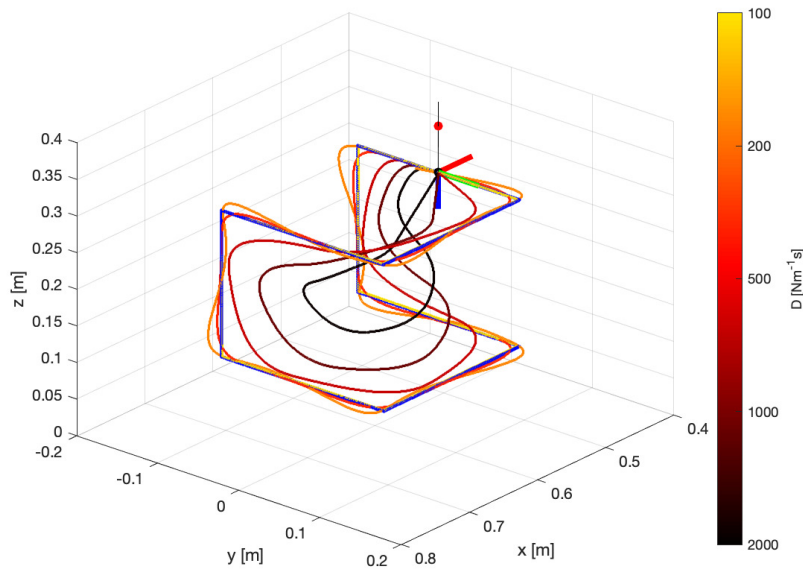


Obrázek 6.14: Zaznamenané odchylky příruby d od trajektorie pro různé hodnoty tuhosti. Hodnoty tuhosti byly 100, 200, 500, 1000 a 2000 Nm^{-1} .

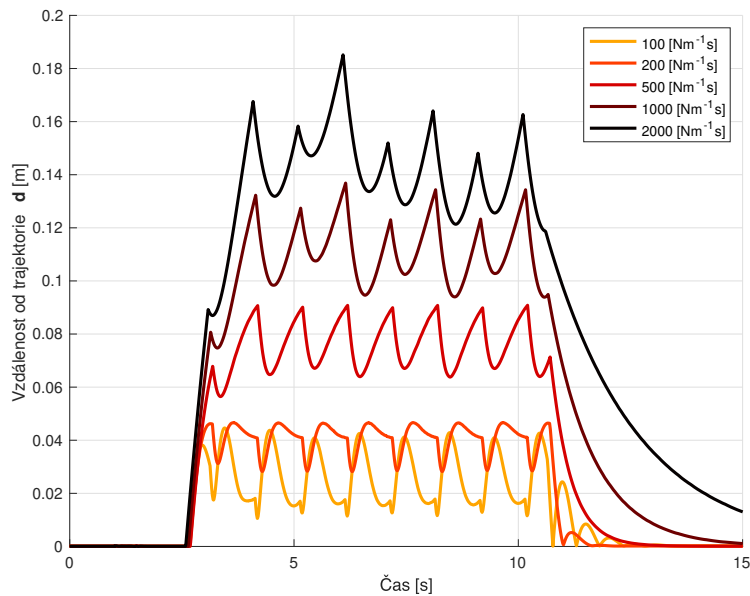
6.2.3 Změna viskózního tlumení regulátoru

Experiment zkoumal schopnosti poddajného regulátoru sledovat naplánovanou trajektorii pro různé hodnoty viskózního tlumení. Použitá trajektorie měla tvar krychle s délkou strany 20 cm (modrá čára), viz graf 6.15. Trajektorie byla vykonaná 5 krát, pokaždé pro jinou hodnotu viskózního tlumení. Hodnoty viskózního tlumení byly 100, 200, 500, 1000 a 2000 Nm^{-1}s . Na grafu 6.15 je zaznamenána reálná poloha příruby během pohybu. Na grafu 6.16 jsou zaznamenané odchylky regulátoru od trajektorie. V tabulce 6.12 jsou zaneseny odchylky regulátoru od trajektorie. Schopnost sledovat trajektorii se snižuje se vzrůstající hodnotou viskózního tlumení. Parametry poddajnosti:

$$\begin{aligned}
 K &= \text{diag}([1000, 1000, 1000, 30, 30, 30]) \left[\text{Nm}^{-1}, \text{Nm}^{-1}, \text{Nm}^{-1}, \text{Nm}, \text{Nm}, \text{Nm} \right], \\
 D &= \text{diag}([500, 500, 500, 20, 20, 20]) \left[\text{Nm}^{-1} \text{s}, \text{Nm}^{-1} \text{s}, \text{Nm}^{-1} \text{s}, \text{Nms}, \text{Nms}, \text{Nms} \right], \\
 M &= \text{diag}([25, 25, 25, 3, 3, 3]) \left[\text{kg}, \text{kg}, \text{kg}, \text{kg m}^2, \text{kg m}^2, \text{kg m}^2 \right].
 \end{aligned}
 \tag{6.11}$$



Graf 6.15: Zaznamenané trajektorie příruby robotu při sledování trajektorie se změnou viskózního tlumení. Trajektorie byla vykonaná 5 krát, pokaždé pro jinou hodnotu viskózního tlumení. Trajektorie je značena modrou čarou. Hodnoty viskózního tlumení byly 100, 200, 500, 1000 a 2000 Nm^{-1}s .



Graf 6.16: Zaznamenané odchylky příruby d od trajektorie pro různé hodnoty viskózního tlumení. Hodnoty viskózního tlumení byly 100, 200, 500, 1000 a 2000 Nm^{-1}s .

Viskózní tlumení [Nm^{-1}s]	100	200	500	1000	2000
Maximální odchylka d [m]	0.0343	0.0611	0.105	0.170	0.215

Tabulka 6.12: Maximální kartézské vzdálenosti příruby od trajektorie pro různé hodnoty viskózního tlumení poddajného regulátoru.

6.2.4 Kolize s prostředím

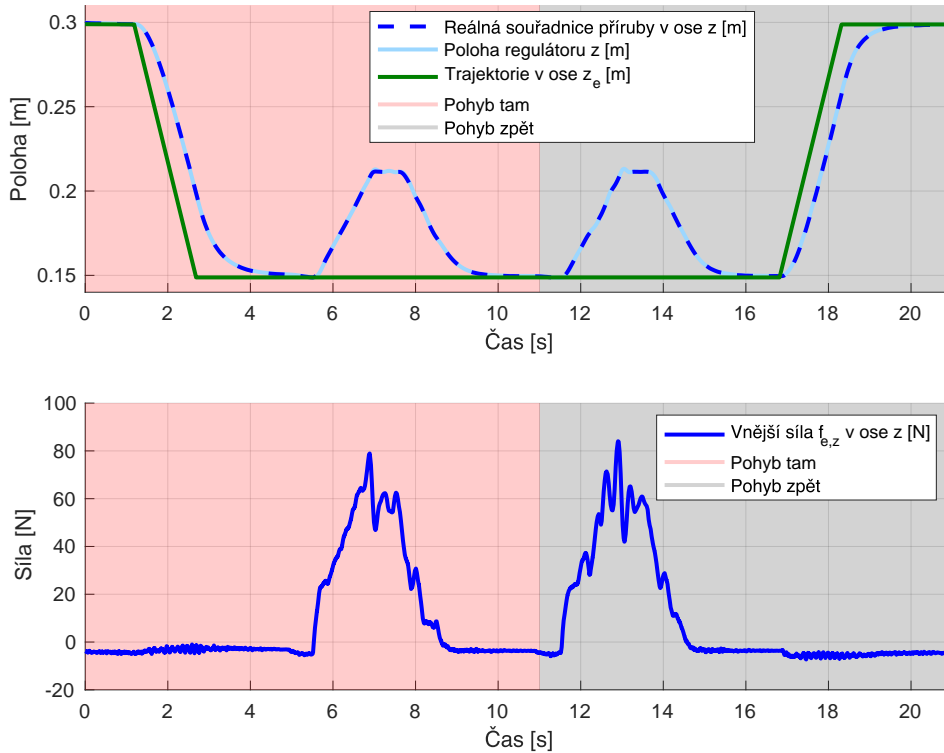
Experiment zkoumá chování poddajného regulátoru při kolizi s prostředím během sledování trajektorie. Pro experiment byl navrhnut nástavec připevněný na přírubu robotu dovolující hladší kontakt s okolím, viz fotka 6.17 a výkres B.1. Kolize probíhala s překážkou z hliníkových profilů potaženou linem pro snížení tření, viz fotka 6.17.



Fotka 6.17: Konfigurace testovacího prostředí pro experiment vychýlení během řízení trajektorií. Na konci příruby je umístěn plastový nástavec dovolující hladší kontakt s překážkou. Překážka je sestavena z hliníkových profilů a kontaktní povrch je potažen linem pro snížení tření. Překážka je připevněna ke stolu, aby nedocházelo k její posunování.

Trajektorie začala pohybem v ose z na úroveň překážky. Následně se začne pohybovat ve směru osy y v kolizním směru s překážkou. Na horním grafu 6.18 je naplánovaná trajektorie v ose z_e (zelená čára), poloha regulátoru (světle modrá) a reálná poloha příruby (pruhovaná modrá). Na spodním grafu 6.18 je naměřená vnější síla $f_{e,z}$ v ose z . Přejezd je prováděn tam a zpět, a proto lze na grafech pozorovat dvě vychýlení. Při kolizi dochází ke kontaktní síle a poddajný regulátor na ni reaguje vychýlením od trajektorie.

$$\begin{aligned}
 K &= \text{diag}([1000, 1000, 1000, 30, 30, 30]) \left[\text{Nm}^{-1}, \text{Nm}^{-1}, \text{Nm}^{-1}, \text{Nm}, \text{Nm}, \text{Nm} \right], \\
 D &= \text{diag}([500, 500, 400, 20, 20, 20]) \left[\text{Nm}^{-1} \text{s}, \text{Nm}^{-1} \text{s}, \text{Nm}^{-1} \text{s}, \text{Nms}, \text{Nms}, \text{Nms} \right], \\
 M &= \text{diag}([25, 25, 25, 3, 3, 3]) \left[\text{kg}, \text{kg}, \text{kg}, \text{kg m}^2, \text{kg m}^2, \text{kg m}^2 \right].
 \end{aligned}
 \tag{6.12}$$



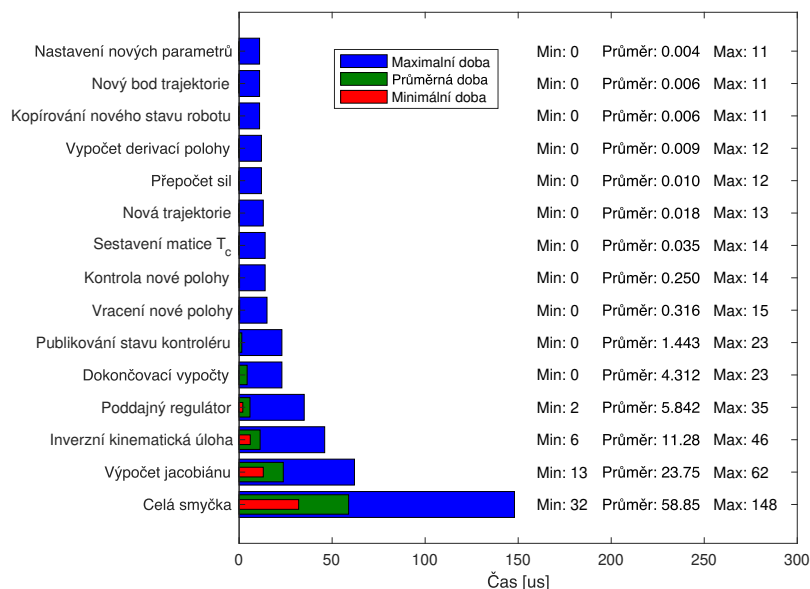
Graf 6.18: Horní graf zobrazuje naměřenou polohu příruby při kolizi s překážkou. Spodní graf ukazuje naměřenou vnější sílu $f_{e,z}$ v ose z . Přejezd je prováděn tam a zpět.

6.3 Časová náročnost

Řízení probíhá ve smyčce s periodou 1 ms a bylo potřeba zjistit, jestli jsou výpočty časově stihnutelné. Experiment byl prováděn na počítači s parametry:

Typ počítače	OptiPlex 3050
Operační systém	Arch Linux x86_64
Verze operačního jádra	4.19.37-rt19-1-rt-lts
Typ procesoru	Intel i3-7100T
Takt procesoru [GHz]	3.4
Počet jader procesoru	4
Typ grafické karty	Intel HD Graphics 630

Graf 6.19 ukazuje minimální, průměrné a maximální doby trvání jednotlivých operací. Nejdéle trvá výpočet jacobíanu, protože se zde počítá pseudoinverze matice. Druhá nejdéle trvající operace je inverzní kinematická úloha, protože obsahuje velké množství matematických operací. Nejdůležitější je ale maximální doba trvání celé smyčky, protože v případě překonání 1 ms je kontrolér odpojen od řízení robotu. Z grafu lze vidět že maximální doba trvání byla 148 us, což lze označit za velmi rychlé v porovnání s periodou řídicí smyčky a dává hodně prostoru pro další výpočty.



Graf 6.19: Časová náročnost poddajné řídicí smyčky. Graf ukazuje minimální, průměrné a maximální doby trvání jednotlivých částí.

Kapitola 7

Závěr

V této práci byly popsány různé způsoby a využití poddajného chování na robotu KUKA Iiwa 7 a byla prezentována poddajná řídicí smyčka za použití ROS systému. Do smyčky byl naimplementován poddajný kontrolér s poddajným regulátorem podle standardů ROS. Použity byly rovnice poddajného regulátoru umožňujícího poddajné chování ve všech stupních volnosti s nastavitelnými parametry pro provoz. Poddajné rovnice byly rozšířené o ekvilibrium, které umožnilo poddajné řízení pomocí kartézské trajektorie. Byla přidána možnost kompenzovat gravitaci, vynulovat vnější síly a transformovat vnější síly při přidání nového nástroje nebo podstavce pod robota. Pro poddajný regulátor byla naimplementována kartézská interpolace.

Experimentálně byly ověřeny vlastnosti poddajného regulátoru. Experimenty ukazují, že se přesnost sledování trajektorie přírubou zlepšila o řád oproti původní práci. Přechodové charakteristiky mají požadovaný tvar pro dané parametry tuhosti, viskózního tlumení a setrvačností poddajného regulátoru. Tuhosti regulátoru určují velikost odchylky od ekvilibria v ustáleném stavu. Viskózní tlumení ovlivňuje rychlost náběhu, dobu ustálení a velikost překmitu. Podařilo se experimentálně ověřit funkčnost kompenzace gravitace a vynulování vnějších sil v natočeném souřadnicovém systému. Vnější síly naměřené robotem byly porovnány se silami naměřenými siloměrem Sauter FC 500. Maximální absolutní rozdíl mezi silami byl 7 ± 1 N. Přesnost stanovení vnějších sil je dána přesností dynamických parametrů modelu robotu a přesností senzorů kroutících momentů.

Testování zkoumalo stabilitu regulátoru. Regulátor je stabilní pro kladné hodnoty parametrů a frekvenční stabilita je dána volbou parametrů.

Experimenty taky ověřily schopnost regulátoru sledovat trajektorii při změně rychlosti trajektorie, tuhosti a viskózního tlumení. Experiment také prokázal schopnost regulátoru reagovat na kolizní vnější sílu během sledování trajektorie.

Poslední experiment ověřil časovou proveditelnost výpočtů v daném limitu. Maximální doba trvání výpočtů byla 148 us.

Práce navrhla poddajný ROS kontrolér s poddajným regulátorem a ověřila použitelnost v laboratorních podmínkách. Rovnice poddajného regulátoru jsou po výměně inverzní kinematické úlohy a výpočtu jakobiánu aplikovatelné i na jiném robotu.

■ Další práce

Shrnutí možných vylepšení pro další práce:

- Použití impedančního regulátoru, který dosahuje stabilnějších interakcí s tuhými předměty.
- Nahrazení poddajné rotace jinou reprezentací, aby se předešlo uzamčení Kardanova závěsu.
- Navrhnout způsob jak měnit orientaci poddajného souřadnicového systému R_{start} za běhu.
- Kartézská interpolace s kontrolou kolizí v definovaném světě.
- Vymodelování prostředí jako odpudivé silové pole. Umožňovalo by vyhnout se kolizím s prostředím při poddajném režimu.
- Pro přesnější stanovení vnější sil by bylo potřeba vytvořit dynamický model robotu a kalibrovat dynamické parametry modelu.
- Navrhnout postupné dávkování trajektorie, aby nedocházelo ke skluzu poddajného regulátoru za trajektorií.

Příloha A

Literatura

- [1] Neville Hogan. Impedance control: An approach to manipulation: Part i—theory. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 107(1):1, 1985.
- [2] S. Chiaverini, B. Siciliano, and L. Villani. Force/position regulation of compliant robot manipulators. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 39(3):647–652, March 1994.
- [3] 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(2):613–624, April 2016.
- [4] Christian Ott, Ranjan Mukherjee, and Yoshihiko Nakamura. Unified impedance and admittance control. In *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 554–561, 2010.
- [5] A. Albu-Schaffer, M. Fischer, G. Schreiber, F. Schoeppe, and G. Hirzinger. Soft robotics: what cartesian stiffness can obtain with passively compliant, uncoupled joints? In *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No.04CH37566)*, volume 4, pages 3295–3301 vol.4, Sep. 2004.
- [6] A.S. Sadun, Jamaludin Jalani, and J.A. Sukor. An overview of active compliance control for a robotic hand. volume 11, pages 11872–11876. Asian Research Publishing Network, October 2016.
- [7] W. S. Kim, B. Hannaford, and A. K. Fejczy. Force-reflection and shared compliant control in operating telemanipulators with time delay. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 8(2):176–185, April 1992.

- [8] Oriol Escoté i Lluís. Six degree of freedom force/torque sensor, master thesis. Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Faculty of the Escola Tècnica d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona, November 2017.
- [9] Mathieu Bélanger-Barrette. Robotiq, 6-Axis Force Torque Sensor, Webpage, 2020-05. [<https://blog.robotiq.com/bid/72841/6-Axis-Force-Torque-Sensor-What-Does-it-Means>].
- [10] KUKA. Robot LBR Iiwa, Webpage, 2020-05. [<https://www.kuka.com/en-gb/products/robotics-systems/industrial-robots/lbr-iiwa>].
- [11] Robot Franka Emika, Webpage, 2020-05. [<https://www.franka.de/>].
- [12] Prof. Alessandro De Luca. Inverse differential kinematics statics and force transformations, pdf presentation, 2020-05. [http://www.diag.uniroma1.it/deluca/rob1_en/12_InverseDiffKinStatics.pdf].
- [13] A. Colomé, D. Pardo, G. Alenyà, and C. Torras. External force estimation during compliant robot manipulation. In *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3535–3540, May 2013.
- [14] Christian Ott and Yoshihiko Nakamura. Admittance control using a base force/torque sensor. *IFAC Proceedings Volumes*, 42(16):467 – 472, 2009. 9th IFAC Symposium on Robot Control.
- [15] Reza N. Jazar. *Theory of Applied Robotics: Kinematics, Dynamics, and Control*. Springer Publishing Company, Incorporated, 2007.
- [16] Prof. Alessandro De Luca. Trajectory planning in Cartesian space, PDF presentation, 2020-05. [http://www.diag.uniroma1.it/deluca/rob1_en/14_TrajectoryPlanningCartesian.pdf].
- [17] Václav Hlaváč. Robot trajectory generation, pdf presentation, 2020-05. [<http://people.ciirc.cvut.cz/hlavac/TeachPresEn/55AutonomRobotics/090RobotTrajectoryGenerationEn.pdf>].
- [18] Tully Foote. tf: The transform library. In *Technologies for Practical Robot Applications (TePRA), 2013 IEEE International Conference on, Open-Source Software workshop*, pages 1–6, April 2013.
- [19] ROS, Powering the world's robots, Webpage, 2020-05. [<http://www.ros.org/>].
- [20] Morgan Quigley, Ken Conley, Brian Gerkey, Josh Faust, Tully Foote, Jeremy Leibs, Rob Wheeler, and Andrew Y Ng. Ros: an open-source robot operating system. In *ICRA workshop on open source software*, volume 3, page 5. Kobe, Japan, 2009.

- [21] Čištění obuvi robotem, využití silově poddajného robota na čištění bot. Bakalářská práce, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická Katedra kybernetiky, 2018.
- [22] Lbr iiwa 7 r800, lbr iiwa 14 r820 specification. volume 7, 5 2016. pdf.
- [23] I. Kuhlemann, A. Schweikard, P. Jauer, and F. Ernst. Robust inverse kinematics by configuration control for redundant manipulators with seven dof. In *2016 2nd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*, pages 49–55, 2016.
- [24] Sauter, 500N Force gauge, Webpage, 2020-05. [<https://www.sauter.eu/shop/en/measuring-instruments/force-gauges/FC/>].
- [25] 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*, 36(2):538–548, 2017.
- [26] KUKA Sunrise.FRI 1.16, PDF. volume 1, 6 2016. pdf.
- [27] H. Wai, W. Hlaing, A. Myo, and T. Sin. Variable admittance controller for physical human robot interaction. In *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pages 2929–2934, Oct 2017.
- [28] C. Liu, J. Gao, Y. Liu, X. Shi, F. Zhao, J. Zhao, and C. Liu. Admittance control of manipulators in unknown environment. In *2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, pages 2157–2162, Aug 2018.
- [29] K. Song and C. Hsu. A compliance control design for safe motion of a robotic manipulator. In *2011 9th World Congress on Intelligent Control and Automation*, pages 920–925, June 2011.
- [30] F. Augugliaro and R. D’Andrea. Admittance control for physical human-quadrocopter interaction. In *2013 European Control Conference (ECC)*, pages 1805–1810, 2013.
- [31] Euler angles, Intrinsic and extrinsic rotations, Webpage, 2020-05. [<https://www.mauriciopoppe.com/notes/computer-graphics/transformation-matrices/rotation/euler-angles/>].
- [32] ROS, Ros control, Webpage, 2020-05. [http://wiki.ros.org/ros_control].
- [33] Eigen, Eigen is a C++ template library for linear algebra: matrices, vectors, numerical solvers, and related algorithms., Webpage, 2020-05. [http://eigen.tuxfamily.org/index.php?title=Main_Page].



Příloha B

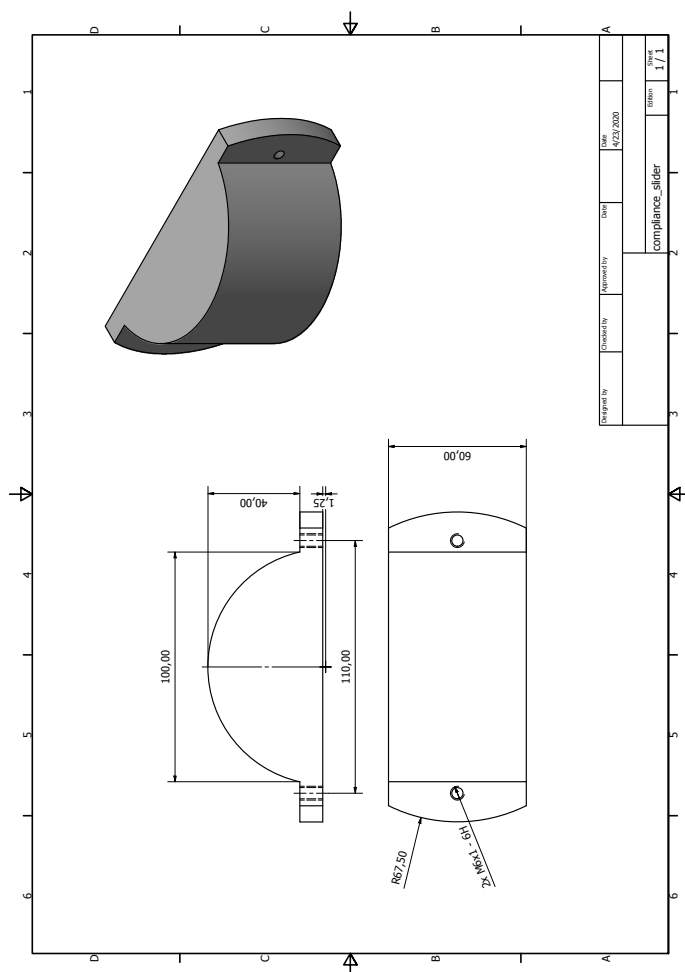
Přílohy



Seznam příloh na DVD

1. Text této diplomové práce ve formátu PDF: **PoddajneRizeniPrumyslovehoRobotuCihala.pdf**
2. Zdrojové kódy ROS kontroléru: **ZdrojoveKodyCihala.zip**
 - Poddajný kontrolér: **ComplianceController.Cpp**
 - Kartézská interpolace: **CartPathInterpolation.cpp**

Výkresy



Výkres B.1: Plastový nástavec pro experiment sledování kartézské trajektorie při kolizi s prostředím.