



**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

F3

**Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky**

Bakalářská práce

Modelování, simulace a návrh řízení pro stabilizaci laserového svazku

Jan Bosák

Studijní program: Kybernetika a robotika

duben 2018

Vedoucí práce: doc. Ing. Zdeněk Hurák Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bosák** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **456971**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra řídicí techniky**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Studijní obor: **Systémy a řízení**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Modelování, simulace a návrh řízení pro stabilizaci laserového svazku

Název bakalářské práce anglicky:

Modeling, simulation and control design for laser beam stabilization

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je analyzovat možnosti i omezení různých konfigurací řídicích systémů (algoritmů) pro stabilizaci laserového svazku pomocí kaskády otočných zrcadel.

1. Seznamte se s jednotlivými komponentami plného systému i jeho zjednodušené laboratorní experimentální verze (motory a jejich drivery, zrcadla, kamery, optické prvky) a jejich propojením (Ethernet, systém EPICS) a popište je.
2. Vytvořte matematický model zjednodušeného laboratorního experimentálního systému, tedy model zahrnující jak optickou cestu a dynamiku aktuátorů a senzorů stejně jako rušivé vlivy jako je teplota. Model implementujte v nějakém běžném prostředí pro numerickou simulaci, nejlépe Simulink, Xcos či (Open)Modelica. Parametry pro matematický model buď získáte z technické dokumentace pro komponenty nebo je odhadnete na základě poskytnutých dat z experimentů.
3. Na základě matematického modelu navrhnete některé jednoduché i případně pokročilejší algoritmy řízení (decentralizované, centralizované, decentralizované s feedforwardem) a jejich funkčnost ověřte v simulacích.

Seznam doporučené literatury:

- [1.] Robert Boge, Jakub Horáček, et al. 'Active cavity stabilization for high energy thin disk regenerative amplifier', Proc. SPIE 10238, High-Power, High-Energy, and High-Intensity Laser Technology III, 102380I (11 May 2017); doi: 10.1117/12.2270607; Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2270607>
- [2.] P. D. Mason, M. Divoky, K. Ertel, Jan Pilar, T. J. Butcher, M. Hanus, S. Banerjee, P. J. Phillips, J. M. Smith, M. De Vido, A. Lucianetti, C. Hernandez-Gomez, C. Edwards, T. Mocek and J. L. Collier, Kilowatt average power 100 J-level diode pumped solid state laser, Optica 4, 4 (2017).

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Zdeněk Hurák, Ph.D., katedra řídicí techniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.01.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

doc. Ing. Zdeněk Hurák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování / Prohlášení

Děkuji doc. Ing. Zdeňkovi Hurákovi Ph.D. za pomoc při vedení bakalářské práce. Mé poděkování patří též Ing. Martinovi Divokému, Ph.D. za konzultace v Centru HiLASE.

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 dne 13. 4. 2018

.....

Abstrakt / Abstract

Tato Bakalářská práce se zabývá návrhem řízení pro stabilizaci svazku laseru v centru HiLASE. Vlivem teplotního driftu se svazek hýbe a musí být stabilizován. V laseru je 11 uzlů, které ovlivňují následující zrcadla.

Cíl této práce je navrhnout optimální řešení stabilizace.

Identifikujeme teplotní drift. Tato práce používá matematický model uzlu implementovaný v Simulinku. Pro stabilizaci kaskády používáme feedforward.

Závěr je, že feedforward je nezbytný pro stabilizování kaskády 8 uzlů. Hlavní priorita je regulace směru. Snížení saturace prvního motoru zlepší stabilizaci polohy i směru svazku.

Klíčová slova: stabilizace svazku, zrcadla, kaskáda, feedforward.

This Bachelor thesis is deal with control design for beam stabilization of laser in HiLASE center. Because of the heat drift, laser beam is moving and must be stabilized. There are 11 nodes in laser, that influence following mirrors.

The term of this thesis is to design optimal solution of stabilization.

We identify the heat drift. This thesis uses mathematical model of node implemented in Simulink. We use feedforward for cascade stabilization.

The conclusion is, that feedforward is necessary to stabilize cascade of 8 nodes. The main priority is direction control. A decrease of first motor saturation improves direction and position stability.

Keywords: beam stabilization, mirrors, cascade, feedforward.

Obsah /

1 Úvod	1
1.1 O projektu HiLASE	1
1.2 Laser Bivoj	1
1.3 Části laseru	2
1.4 Uzel.....	2
1.5 Motivace pro zavedení stabilizace a problematika průchodu svazku laserem.	4
2 Modelování částí laseru	6
2.1 Soustava pro identifikaci parametrů motoru	6
2.1.1 Piezomotor	6
2.1.2 Stojan a zrcadla.....	7
2.1.3 Ovladače	7
2.1.4 Kamera	7
2.2 Popis experimentu pro identifikaci parametrů motoru	8
2.3 Identifikace parametrů motoru	10
2.4 Model motorů v Simulinku ...	12
2.5 Model uzlu	14
2.5.1 Volné šíření prostorem ...	14
2.5.2 Odraz na zrcadle.....	14
2.6 Sestavení modelu uzlu v Simulinku.....	17
2.7 Sestavení modelu laboratorní soustavy	18
2.8 Model laboratorní soustavy v prostoru	19
2.8.1 Model složený ze dvou nezávislých 2D modelů ..	19
2.8.2 Model vytvořený pomocí rovnic přímky a roviny v prostoru	19
2.8.3 Model založený na vzájemném ovlivňování os lineárním přírůstkem	19
2.9 Model laseru Bivoj.....	21
2.10 Doby jednotlivých úkonů systému.....	21
3 Model rušivých vlivů systému	22
4 Návrh regulátoru	26
4.1 Výběr typu regulátoru	26
4.2 identifikace parametrů potřebných k návrhu regulátoru .	27
4.3 Návrh regulátoru pro model laboratorní soustavy ve 2D	28
4.4 Návrh regulátoru pro model laboratorní soustavy ve 3D	30
4.5 Návrh regulátoru pro zjednodušený model laseru Bivoj ..	31
5 Porovnání	32
6 Závěr	40
Literatura	41
A Zkratky a symboly	43
A.1 Zkratky	43
A.2 Symboly	43
B Soubory, které jsou součástí	
Bakalářské práce	45

Tabulky / Obrázky

2.1. Výsledné hodnoty koeficientů k	11	1.1. Rozmístění jednotlivých prvků části Front End.	3
2.2. Výsledné hodnoty koeficientů A	13	1.2. Schéma optické části uzlu.	3
2.3. Zesílení $DCgain$ natočení motoru.	13	1.3. Zobrazení blízké a daleké zóny. ...	4
2.4. Výsledky z experimentu pro identifikaci zesílení $DCgain$ daleké zóny.....	20	2.1. Rozmístění jednotlivých prvků soustavy pro identifikaci parametrů motoru.....	6
4.1. Zesílení $DCgain$ daleké a blízké zóny pro motory modelu laboratorní soustavy.	28	2.2. Umístění motorů ve stojanu.	7
4.2. Zesílení $DCgain$ daleké a blízké zóny pro motory modelu laseru Bivoj.....	28	2.3. Poloha svazku v maximálním vytočení šroubu hor. motoru.....	8
4.3. Hodnoty K_P pro laboratorní soustavu.....	29	2.4. Poloha svazku v minimálním vytočení šroubu hor. motoru.....	9
4.4. Hodnoty K_P pro uzlu laseru Bivoj.	31	2.5. Poloha svazku ve středním vytočení šroubu horizontálního motoru.....	9
		2.6. Poloha svazku v minimálním vytočení šroubu vertikálního motoru.	10
		2.7. Vychýlení svazku (na kameře) při zadání 10000 kroků pro jednotlivé pracovní body...	11
		2.8. Natočení zrcadla při zadání 10000 kroků pro jednotlivé pracovní body.....	11
		2.9. Model vertikálního motoru.....	12
		2.10. Model horizontálního motoru. .	13
		2.11. Zobrazení veličin pro volné šíření prostorem	14
		2.12. Znázornění jednotlivých veličin pro zrcadlo.....	15
		2.13. Model uzlu.....	17
		2.14. Model uzlu včetně motorů a výstupu z kamer.....	18
		2.15. Rozmístění prvků stávající konfigurace lab. soustavy.....	19
		2.16. Schéma zapojení motorů pro model založený na vzájemném ovlivňování os lineárním přírůstkem.	20
		3.1. Naměřená data blízké zóny.....	22
		3.2. Naměřená data daleké zóny. ...	23
		3.3. Schéma 1. měřeného uzlu.	23
		3.4. Schéma 2. měřeného uzlu.	24
		3.5. Schéma 3. měřeného uzlu.	24
		3.6. Graf rušení v podobě úhlu.	25
		3.7. Graf rušení v podobě polohy. ...	25

4.1.	Systém se zpětnou vazbou.	26
4.2.	Zapojení dvou nezávislých regulátoru pro lab. model.	29
4.3.	Regulátor s feedforwardem z před. motoru.	30
4.4.	Regulátor s feedforwardem mezi ver. a hor. motory.	30
5.1.	Porovnání modelu a reálného horizontálního motoru.	32
5.2.	Porovnání modelu a reálného vertikálního motoru.	32
5.3.	Porovnání reálné lab. soustavy, nelineárního modelu, linearizovaného modelu a modelu s přesnou osou otáčení. ...	33
5.4.	Porovnání nelineárního modelu, linearizovaného modelu a modelu s přesnější osou otáčení lab. soustavy.	33
5.5.	Porovnání modelu a lab. soustavy při ovlivnění vertikální osy horizontálním motorem. ...	34
5.6.	Porovnání modelu a lab. soustavy při ovlivnění horizontální osy ver. motorem.	34
5.7.	Porovnání dalekých zón regulátorů pro laboratorní systém. .	35
5.8.	Porovnání blízkých zón regulátorů pro laboratorní systém. .	35
5.9.	Porovnání horizontálních dalekých zón regulátorů pro 3D laboratorní systém.	36
5.10.	Porovnání regulátorů s rozdílnou hodnotou saturace.	37
5.11.	Porovnání regulátorů s rozdílnou hodnotou saturace.	37
5.12.	Porovnání dalekých zón regulátorů pro kaskádu.	38
5.13.	Porovnání blízkých zón regulátorů pro kaskádu.	38
5.14.	Odezva dalekých zón kaskády na jed. skok nezávislých regulátorů.	39
5.15.	Odezva dalekých zón kaskády na jed. skok regulátoru s feedforwardem z před. uzlu. ...	39

Kapitola 1

Úvod

Tato Bakalářská práce analyzuje možnosti a omezení řídicích systémů pro stabilizaci laserového svazku. Laserový svazek se hýbe v důsledku rušivých teplotních vlivů a je zapotřebí ho stabilizovat. Stabilizace pomocí motorizovaných zrcadel je určena pro laser Bivoj v centru HiLASE. V celém laseru je 11 optických soustav zvaných uzly, tvořených z otočných zrcadel. Motorizovaná zrcadla, umístěná v uzlech, jsou jedné aktuátory, kterými lze regulovat svazek. Budeme čelit nesymetrii motorů. Jednotlivá zrcadla ovlivňují celou následující optickou dráhu svazku, proto budeme nuceni využít algoritmus využívající feedforward. Během stabilizace musíme regulovat jak polohu, tak i směr svazku.

Cíle Bakalářské práce jsou následující: seznámíme se a analyzujeme jednotlivé části laseru. Zaměříme se na část zvanou uzel. Analyzujeme použitý hardware (optické cesty, drivery, kamery a podrobně piezomotory). Nastíníme omezení softwaru (zejména systému EPICS¹). Popíšeme důvod zavedení stabilizace a její hlavní omezení. Vytvoříme matematický model motoru, uzlu, laboratorní experimentální verze a zjednodušeného laseru Bivoj a implementujeme modely v prostředí Simulink. Také identifikujeme rušivé vlivy ovlivňující svazek. Navrhne regulátor pro laboratorní soustavu a uzel. Nakonec navrhne regulátor pro kaskádu uzlů.

1.1 O projektu HiLASE

Projekt *HiLASE: Nové lasery pro průmysl a výzkum*², realizující se v Dolních Břežanech, se zaměřuje na výzkum laserů a jejich aplikace v průmyslu, zejména na technologie mikro-oblábní, testování odolnosti optických materiálů, řezání, sváření, odstraňování povlaků a tvrzení materiálu rázovou vlnou³. Výzkum laserů je převážně zaměřen na pulzní lasery s vysokým středním výkonem, založené na diodovém čerpání. Zadavatelem je Fyzikální ústav AV ČR, v.v.i.⁴. V centru HiLASE se nachází vysokoenergetický pulzní laser nazývaný se Bivoj.

1.2 Laser Bivoj

Laser Bivoj je vysokorepetiční pulzní laser se středním výkonem 1 kW a energií v pulzu 100 J. Laserový svazek se využívá nejčastěji k ozařování materiálu, např. měření laserem indukované meze poškození nebo tvrzení materiálů rázovou vlnou. Vlnová délka je 1030 nm, tedy je v neviditelné části spektra lidského oka. Opakovací frekvence na výstupu laseru je 10 Hz s dobou trvání od 2 do 10 ns.

Výhoda pulzního laseru oproti konstantním laserům je, že pulzní laser vysílá krátký pulz trvající jednotky nanosekund. Ve spojení s vysokým výkonem se v krátké době

¹ <https://epics.anl.gov/>

² <http://www.hilase.cz>

³ <http://www.hilase.cz/o-projektu/>

⁴ <http://www.avcr.cz/cs/o-nas/>

předá velká energie bez nežádoucích efektů, jako je například nadměrné zahřívání ozářeného bodu a jeho okolí. Zároveň díky velkému výkonu se může ozařovat větší plocha za jednotku času, a tím je i opracování vzorku rychlejší.

Ve stručnosti je princip laseru založen na energetických přechodech mezi vlastními energetickými hladinami. Při přechodu z vyšší energetické hladiny do nižší hladiny dojde k vyzáření fotonu. Postupně se dodává energie do zesilovače, kde částice přecházejí do vyšší energetické hladiny a energie se zde akumuluje. Jakmile dojde k saturaci uložené energie, vyšle se zesilovačem svazek, který spustí lavinu přechodu na nižší hladinu a dojde k vyzáření obrovského množství fotonů, které se přidají k zesilovanému svazku a násobně zvýší jeho energii.

Celý laser je řízen pomocí softwaru EPICS¹ (Experimental Physics and Industrial Control System), což je distribuovaný soft real-time řídicí systém.

1.3 Části laseru

Celý svazek prochází řadou navazujících soustav. Ze zdroje (zvaného Fibre Seed) o frekvenci 10 kHz a energii 1 nJ putuje svazek do předzesilovače Preamp #1, kde je svazek zesílen na energii 1 mJ [1]. Dále již má svazek frekvenci 10 Hz. Z prvního předzesilovače putuje svazek do druhého předzesilovače Preamp #2, ve kterém je zesílen na energii 100 mJ. Následuje 10 J zesilovač. Nakonec dojde k zesílení ve 100 J zesilovači na konečnou výstupní energii laseru 100 J. Finální svazek je dále rozváděn do okolních laboratoří.

Zesilovač se skládá z oddělených desek z YAG. Mezi deskami proudí helium o teplotě 150 K, které se stará o chlazení zesilovače. YAG pláty pak zajišťují uložení energie a následné vyzáření formou stimulované emise.

Jednotlivé předzesilovače a zesilovače jsou spojeny různými optickými soustavami, které mění vlastnosti svazku (polohu, směr, tvar, intenzitu, atd.). Pro stabilizaci svazku je nejdůležitější optická soustava zvaná uzel, která nám umožňuje pomocí senzorů měřit polohu a směr svazku a následně i tyto veličiny měnit jak manuálně, tak i vzdáleně. Laser také obsahuje části, kde se filtrují nežádoucí prostorové frekvence svazku, tyto části se nazývají prostorové filtry. Zde musí mít svazek minimální odchylky, obzvláště ve směru.

Průřez svazku má tvar čtverce o rozměrech 4x4 mm v části Front End (Fibre Seed, Preamp #1, Preamp #2), 20x20 mm v 10 J zesilovači a 75x75 mm ve 100 J zesilovači.

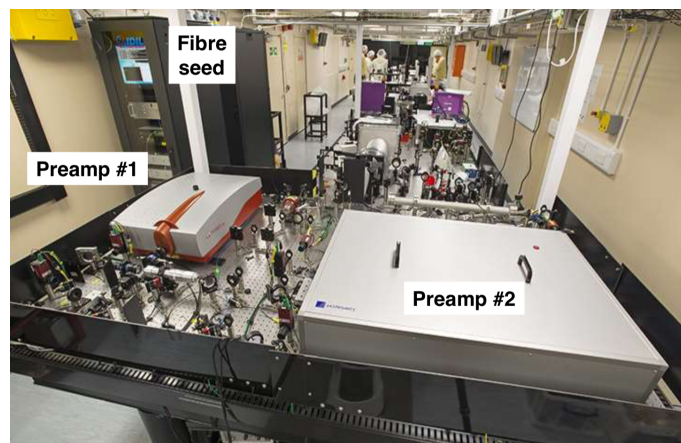
Na obrázku 1.1 můžeme vidět rozmístění části Front End a jejich spojovací optické soustavy.

1.4 Uzel

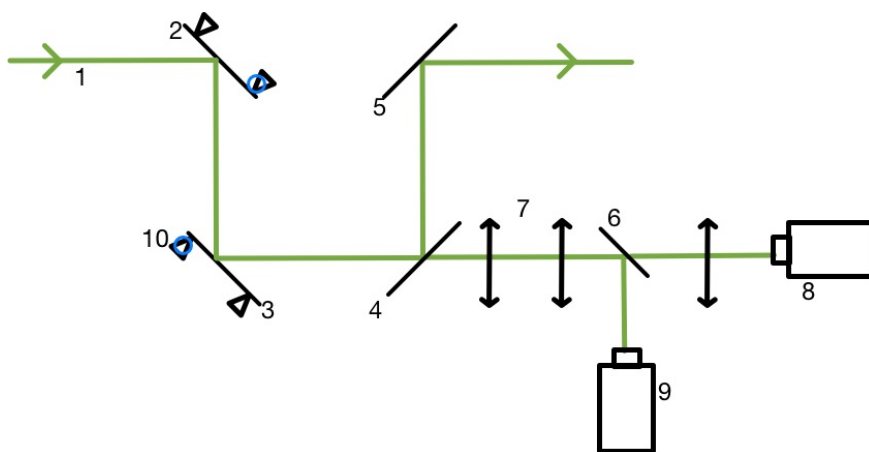
Schéma a umístění jednotlivých prvků v uzlu nám ukazuje obrázek 1.2. V laseru Bivoj je těchto uzlů 11. Svazek procházející uzlem se odráží postupně od čtyř zrcadel. První dvě zrcadla jsou přimontována na stojan s piezo motory, se kterými lze manuálně i vzdáleně pohybovat. Zbývající dvěma zrcadly lze pohybovat pouze manuálně. Polopropustné zrcadlo dělí svazek na dvě části. Odražená část od zrcadla s převážnou většinou energie putuje dále laserem. Zbýlá část projde zrcadlem a využívá se k měření kamerami.

K měření polohy a směru svazku jsou využívány vždy dvě kamery. Pomocí soustavy čoček (slouží k zaostření) je první kamera zaostřena na odrazovou plochu 2. zrcadla a

¹ <https://epics.anl.gov/>



Obrázek 1.1. Rozmístění jednotlivých prvků části Front End (Fibre Seed, Preamp #1, Preamp #2, spojovací optické systémy). Obrázek je převzatý z [1].



Obrázek 1.2. Schéma optické části zvané uzel—1 svazek, 2 první motorizované zrcadlo, 3 druhé motorizované zrcadlo, 4 polopropustné zrcadlo, 5 zrcadlo, 6 polopropustné zrcadlo, 7 soustava čoček, 8 kamera snímající dalekou zónu, 9 kamera snímající blízkou zónu, 10 osa otáčení zrcadla.

sleduje tzv. blízkou zónu (Near Field, také značené jako NF). Pomocí ní můžeme zjistit polohu svazku na povrchu 2. zrcadla. Za soustavou čoček je také umístěna druhá kamera jejíž snímací čip je přímo v ohnisku čočky (kamera je zaostřená do nekonečna). Takto sleduje tzv. dalekou zónu (Far Field, také označovaná jako FF). Pomocí ní identifikujeme směr šíření. Pro blízkou zónu se používají kamery Allied Vision MANTA G145¹ s velikostí pixelu $6.45 \mu\text{m}$, pro dalekou zónu kamera Allied Vision MANTA G125² s velikostí pixelu $3.75 \mu\text{m}$. Obrázek 1.3 znázorňuje tvar blízké a daleké zóny.

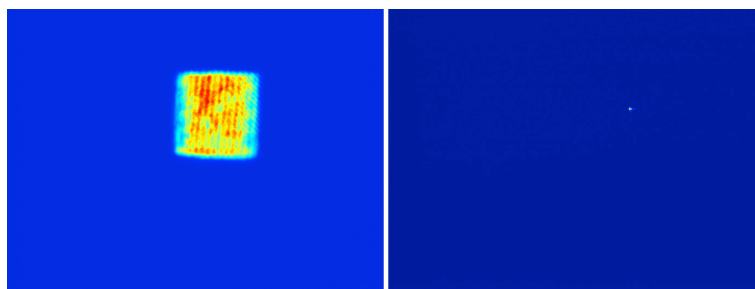
Můžeme vidět, že tvar blízká zóna má tvar čtverce, daleká zóna má tvar malého bodu. Pomocí prvních dvou zrcadel připevněných ve stojanu s piezomotory můžeme měnit polohu i směr šíření svazku. Uzel je jediná část celého laseru, kterou můžeme vzdáleně regulovat svazek.

V uzlu jsou použity ovladače (též nazývány drivery) motorů New Focus Model 8742³. Koncepte těchto ovladačů nedovoluje ovládání jedním ovladačem více motorů současně.

¹ <https://www.alliedvision.com/en/products/cameras/detail/Manta/G-145.html>

² <https://www.alliedvision.com/en/products/cameras/detail/Manta/G-125.html>

³ <https://www.newport.com/p/8742>



Obrázek 1.3. Zobrazení blízké a daleké zóny v části Front End—vlevo: blízká zóna, vpravo: daleká zóna.

1.5 Motivace pro zavedení stabilizace a problematika průchodu svazku laserem.

Dráha, kterou svazek urazí, je dlouhá desítky metrů. Je zapotřebí svazek udržet v pracovní a bezpečné části laseru, což je jeden z hlavních důvodů zavedení stabilizace. S rostoucí délkou dráhy roste velikost vychýlení svazku, to s velkou dráhou klade nárok na přesnost stabilizace.

V okolí laseru jsou různé zdroje tepelné energie (počítače, řídicí jednotky). Nad laserem se nachází klimatizace. Prouděním vzduchu dochází k lokálním tepelným změnám a v důsledku i k tepelné roztažnosti stojanu zrcadla. Navíc svazek má ke konci vysokou energii a část ní předává v podobě tepelné energie zrcadlům a stojanům. Tím zrcadlo změnilo svou polohu a svazek svou trajektorii[1]. Jev, vzniklý v důsledku teplotních změn, se nazývá drift.

Časté zásahy do soustavy a manuální posuvy zrcadel vyžadují následné seřízení poloh motorků.

Vychýlením od pracovní polohy by mohlo dojít k ořezu svazku, ztrátě energie, či poškození laserových prvků. Proto musí být zajištěna optimální poloha i směr průchodu jednotlivými zesilovači a prostorovými filtry.

Zavedení stabilizace je také z důvodu bezpečnosti obsluhujícího personálu, okolí laseru i ochrany samotného laseru. Proto je kladen důraz na nepřekročení limitních hodnot poloh a hlavně směrů svazku. Limitní hodnoty směru jsou nastaveny na $100 \mu\text{rad}$.

Musíme zaručit, že během výstřelu laseru se nesmí žádné zrcadlo hýbat nebo jen velmi malou rychlostí, jinak, např. díky různé rychlosti zrcadel, může výchylna přesáhnout limitní hodnotu.

Také je zde omezení ohledně krátké doby mezi jednotlivými pulzy a dobou, která je k dispozici pro pohnutí zrcadlem. Frekvence výstřelů svazků je 10 Hz, tedy doba pro vykonání akčního zásahu je 100 ms s tím, že do této doby musí systém stihnout veškeré úkony jako například sběr dat, výpočet a komunikace po síti. Vlivem opakovací frekvence laseru získáváme data z kamer pouze jednou za 100 ms.

Doba mezi výstřelem svazku a získáním dat z kamer není konstantní. Navíc nemáme zaručenou dobu získání dat z kamer. Není ani garantovaná maximální doba získání dat. Od této doby se odvíjí doba, kterou máme pro výkon akčního zásahu na motorech.

Celý laser je řízen pomocí systému EPICS, který se nedá považovat za systém reálného času. Nemáme zde garantované doby doručení a přijetí informací. Navíc motor sám nezasílá zprávy u ukončení pohybu. To nám velice ztěžuje návrh a následovnou aplikaci stabilizace. Tím, že nemáme garanci času, nemáme ani garantovaný interval, ve kterém bychom mohli uplatňovat samotnou regulaci odchylky.

Ovladač, který je použit, nemůže hýbat více motory současně. Laser je koncipován tak, že v každém uzlu jsou dva tyto ovladače. Z těchto důvodů je v uzlu omezení, že lze pohybovat pouze dvěma motory současně.

Momentálně je laser řízen operátorem, který kontroluje jednotlivé výchylky. Při větším vychýlení, zadá vzdáleně příkaz ke změně polohy zrcadla. Využití stabilizačního systému nahradí osobu, která manuálně laser reguluje, a tím celý systém do určité míry automatizuje.

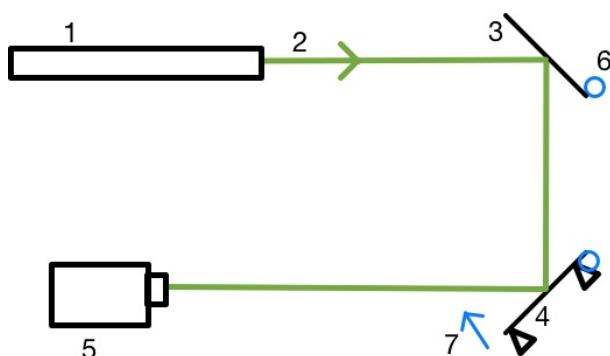
Kapitola 2

Modelování částí laseru

Pro návrh stabilizačního systému musíme nejprve vytvořit model, na který budeme následně aplikovat stabilizaci. Sestavíme laboratorní soustavu reprezentující zjednodušený uzel. Pro úplnou identifikaci parametrů motorů uskutečníme experiment. Vytvoříme matematický model motoru a optických prvků. Také implementujeme modely v prostředí Simulink¹ programu Matlab. Na závěr sestavíme, model laboratorní soustavy a zjednodušený model laseru Bivoj.

2.1 Soustava pro identifikaci parametrů motoru

Pro identifikaci parametrů motoru jsme uskutečnili experiment. Sestavili jsme laboratorní soustavu, která je na obrázku 2.1. Jako zdroj svazku jsme použili helium neonový laser. Svazek měl tvar Gaussovského profilu s průměrem 2 mm.



Obrázek 2.1. Rozmístění jednotlivých prvků laboratorní soustavy pro identifikaci parametrů motoru—1 laser, 2 svazek, 3 fixní zrcadlo, 4 motorizované zrcadlo, 5 kamera, 6 skutečná osa otáčení zrcadla, 7 kladný směr natáčení motoru.

2.1.1 Piezomotor

Motory používané v laseru Bivoj jsou piezomotory Newport Model 8302². Tyto motory jsme využili i našem v experimentu. Motor je připevněn na stojan New focus 8822³, ve kterém je upevněno zrcadlo.

„Piezo motory pracují na principu piezoelektrického jevu. Piezoelektrický jev je schopnost krystalů generovat elektrické napětí při jejich deformaci, popřípadě jev opačný, kdy se krystal v elektrickém poli deformuje.“⁴ Při piezoejevu dochází vlivem napětí k pravidelnému prodlužování a zkracování piezokrystalů. Princip otáčení šroubu je následující: krystal udělá kontakt s podložkou, vlivem napětí šroubem pootočí, následně rychlým pohybem vykoná pohyb zpět, čímž se krystal vrátí do původní polohy. Vlivem rychlého

¹ <https://uk.mathworks.com/products/simulink.html>

² <https://www.newport.com/p/8302>

³ <https://www.newport.com/p/8822>

⁴ http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_11.pdf

pohybu zpět se šroub nedokáže vrátit do původní pozice a zůstane pootočený. Opakovaným jevem motor otáčí šroubem. Spojením s vysokou opakovací frekvencí se jeví pohyb jako kontinuální, bez známek kmitání. Frekvence těchto kroků jsou 2 kHz.

V průběhu pohybu nelze rychlosti a zrychlení měnit. Ty lze aktualizovat pouze před zadáním příkazu k pohybu. V experimentu jsme používali stejnou rychlost, resp. zrychlení, jako používá i laser Bivoj, tedy rychlost 1750 kroků/s, resp. zrychlení 100000 kroků/s².

2.1.2 Stojan a zrcadla

Vzdáleně ovladatelné zrcadlo obsluhují vždy dva piezomotory, které zajišťují pohyb zrcadla v prostoru. Pozici piezomotorů ve stojanu nám ukazuje obrázek 2.2. Z našeho pohledu vpravo dole je fixní osa otáčení, která je realizována kuličkovým ložiskem a pružnou. Motor šroubem pouze tlačí do stojanu a není s ním pevně spojen. O návrat stojanu při zatahování šroubu se stará pružina. Osu otáčení zrcadla dělíme na horizontální osu a vertikální osu. Konstrukce je taková, že jeden motor převážně ovlivňuje horizontální osu zrcadla (dále ho budeme nazývat horizontální motor), druhý zase vertikální osu (dále jen vertikální motor). Z experimentu jsme zjistili, že tyto pohyby se z části navzájem ovlivňují, tedy nejde o dva zcela nezávislé pohyby.



Obrázek 2.2. Umístění motorů ve stojanu—v oblouku je zasazeno zrcadlo, vpravo dole je osa otáčení, vlevo dole je horizontální motor, nahoře je vertikální motor. Obrázek je převzatý z ¹.

2.1.3 Ovladače

Jako driver je používán New Focus Model 8742. Tento driver, ale nemůže hýbat dvěma motory současně. V experimentu máme k dispozici dva drivery (jako v uzlu laseru Bivoj). Můžeme tedy pohybovat dvěma motory naráz.

2.1.4 Kamera

Kamera byla použita Allied Vision MANTA G-145, která má velikost pixelu 6.45 μ m a rozlišení 1388x1038. Kamera sleduje blízkou zónu, ale není zaostřena na povrch zrcadla. Číslování pixelu je z pohledu do čipu kamery z horního levého rohu směrem k dolnímu pravému. Kamera zvládne až 31 snímků za sekundu, nicméně opakovací frekvence byla nastavena na 10 snímků za sekundu jako je u laseru Bivoj.

¹ <https://www.newport.com/p/8822>

2.2 Popis experimentu pro identifikaci parametrů motoru

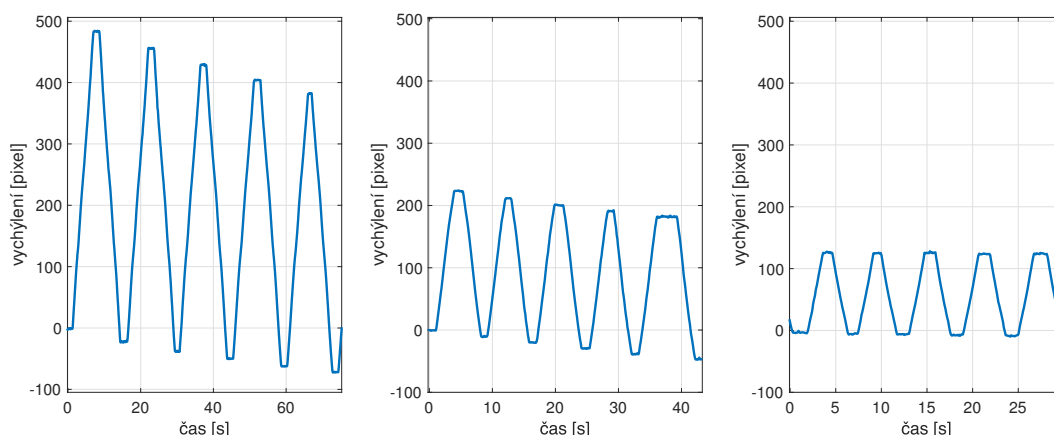
V experimentu jsme měřili závislost polohy svazku na počtu motorem vykonaných kroků. Hýbali jsme s 2. zrcadlem. Motoru jsme zadali počet kroků a zároveň jsme odečítali polohu svazku na kameře. Po ustálení polohy se postup opakoval.

Při identifikaci parametrů motoru jsme uvažovali pohyb šroubu za zcela horizontální a nezávislý od vertikálního šroubu. Provedli jsme několik experimentů v různých polohách vytočení šroubu (mírné vytočení šroubu, střední poloha vytočení, okolí maximálního vytočení), s různým počtem kroků (1000, 3000, 5000 a 10000 kroků) různými směry. Kladný směr definujeme jako směr pohybu při zadání kladného počtu kroků, záporný směr při zadání záporného počtu kroků. Pozici jsme určovali z profilu svazku jako jeho těžiště intenzity. Data jsme získali pomocí programu Labview¹ ve formátu:

čas <tab> poloha x <tab> poloha y.

Z experimentu jsme zjistili, že odezva motoru silně závisí na aktuálním vytočení šroubu, tedy na poloze stojanu. Při různých vytočení šroubu jsme naměřili odlišné výchylky svazku. Odezvy jsou také silně závislé na směru vytáčení šroubu. Příčina nesymetrie může být způsobena konstrukcí. Šroub není pevně spojen se stojanem zrcadla, ale pouze na něj tlačí. Zpětný pohyb obstarává síla pružiny, která táhne proti šroubu. Tím je ovlivněna velikost kroku piezomotoru. Při zvolení záporného pohybu vykoná motor delší trajektorii, než u kladného pohybu.

Pracovní bod, potažmo okolí pracovního bodu je poloha, ve které chceme prvek provozovat[4]. V tomto okolí se prvek nejvíce nachází. Z experimentů jsme identifikovali i oblast vytočení šroubu, která vykazovala velkou symetričnost v obou směrech pohybu. Tato oblast se nachází u konce vytočení šroubu a byla by vhodná jako oblast pracovního bod. Z dodatečných požadavků ale víme, že pracovní oblast zrcadla musí být v blízkosti středního vytočení z důvodů snadné obsluhy systému.

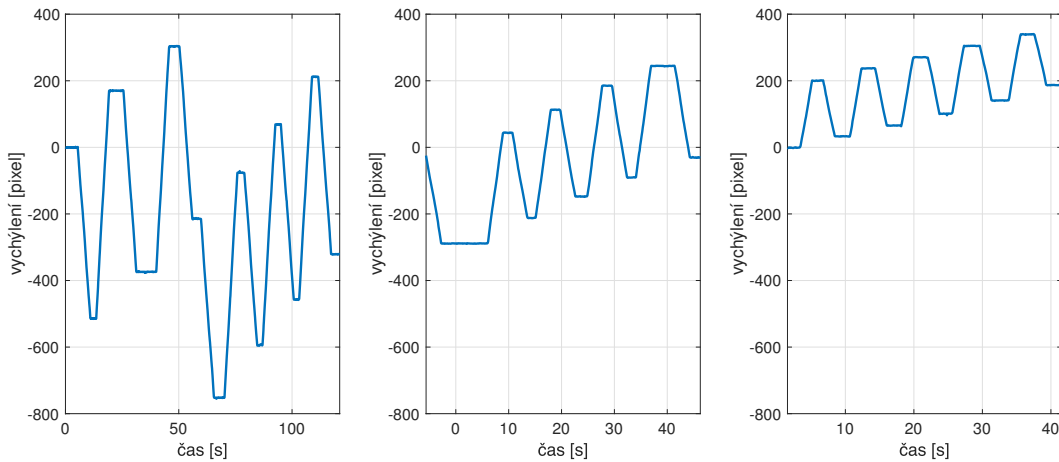


Obrázek 2.3. Závislost polohy svazku na čase při počtu motorem vykonaných kroků v maximálním vytočení šroubu pro horizontální motor—zleva 10000 kroků, 5000 kroků, 3000 kroků, střídání kladného záporného směru.

¹ <http://czech.ni.com/labview>

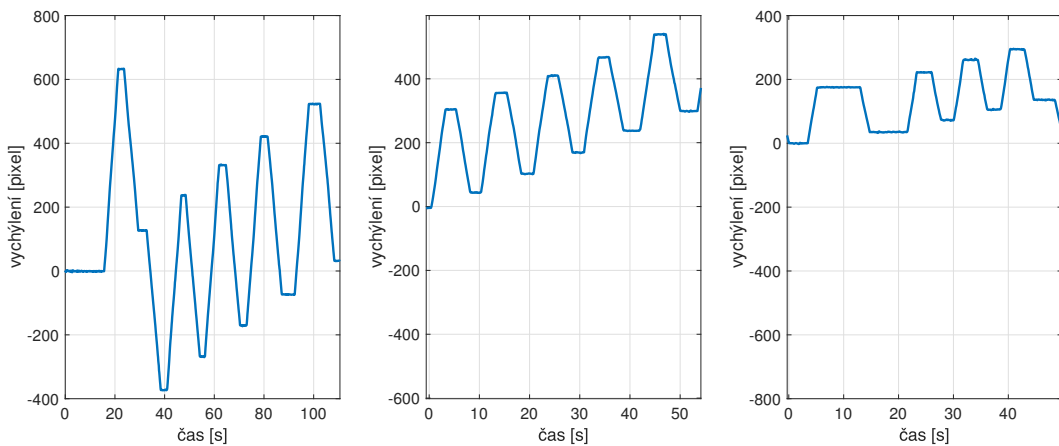
Nesymetrii v jednotlivých místech můžeme pozorovat na grafech 2.3, 2.4 a 2.5. Graf 2.3 ukazuje odezvu v poloze maximálního vytočení šroubu horizontálního motoru. Jednotlivé grafy jsou pro dané počty kroků (10000, 5000 a 3000 kroků). Můžeme zde pozorovat mírnou nesymetrii ve směrech pohybu, nicméně je to místo, kde je nesymetrie nejmenší.

Graf 2.4 ukazuje odezvu v poloze minimálního vytočení šroubu horizontálního motoru. Zde je již nesymetrie značná. Tato poloha není pracovní okolím, tedy bude využívána jen zřídka.



Obrázek 2.4. Závislost polohy svazku na čase při motorem vykonaných kroců v minimálním vytočení šroubu pro horizontální motor—zleva 10000 kroků, 5000 kroků, 3000 kroků, střídání záporného a kladného směru.

Graf 2.5 ukazuje odezvu v poloze středního vytočení šroubu horizontálního motoru. Tato oblast je pracovní oblast laseru, tedy bude využívána nejvíce. Zde můžeme nesymetrii směrů pozorovat nejvíce.

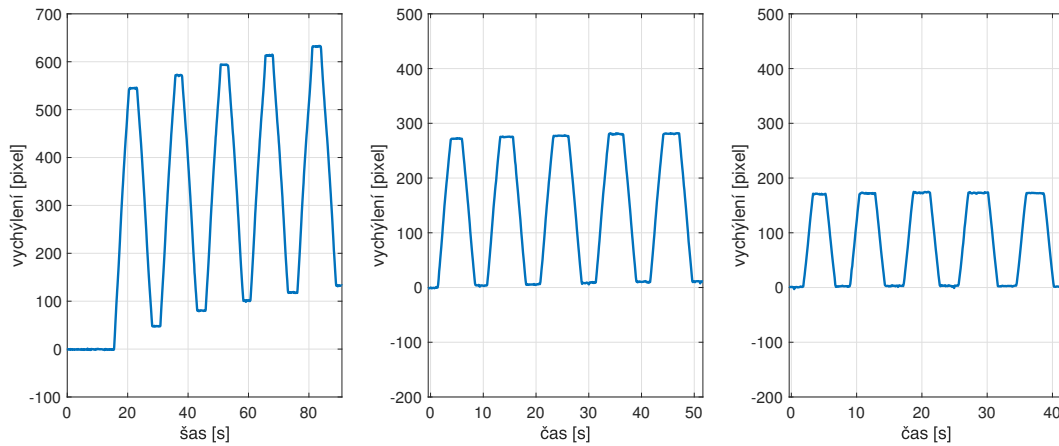


Obrázek 2.5. Závislost polohy svazku na čase při počtu motorem vykonaných kroců ve středním vytočení šroubu pro horizontální motor—zleva 10000 kroků, 5000 kroků, 3000 kroků, střídání kladného a záporného směru.

Náš model motoru bude pro polohu pracovního okolí, tedy střední vytočení šroubu. Při tvorbě přesnějšího modelu motoru bude modelování nesymetrie zásadní a bude

vést v tvorbě modelu motoru například pomocí hybridního systému, kdy celý rozsah si rozdělíme na menší části a budeme uvažovat i rozdílné chování v obou směrech pohybu. Každý tento stav bude mít vlastní přenosovou funkci.

Pro vertikální motor zde uvedeme pouze hodnoty pro okolí minimálního vytočení, neboť tato poloha je brána jako pracovní bod. Jiné polohy nelze používat jako pracovní body z konstrukčních důvodů stojanu. To nám ukazuje graf 2.6. Můžeme zde pozorovat určitou nesymetrii. Ta je ale u pohybu 10000 kroků. U menšího počtu kroků je nesymetrie velmi malá. Budeme tedy vertikální motor v okolí pracovního bodu považovat za symetrický.



Obrázek 2.6. Závislost polohy svazku na čase při počtu motorem vykonaných kroků v minimálním vytočení šroubu pro vertikální motor—zleva 10000 kroků, 5000 kroků, 3000 kroků, střídání kladného a záporného směru.

2.3 Identifikace parametrů motoru

Pro identifikaci parametrů jsme využili data z okolí pracovního bodu (střední vytočení šroubu pro horizontální motor a minimální vytočení pro vertikální motor). Jednotlivé vychýlení na kameře můžeme vidět na grafech 2.7.

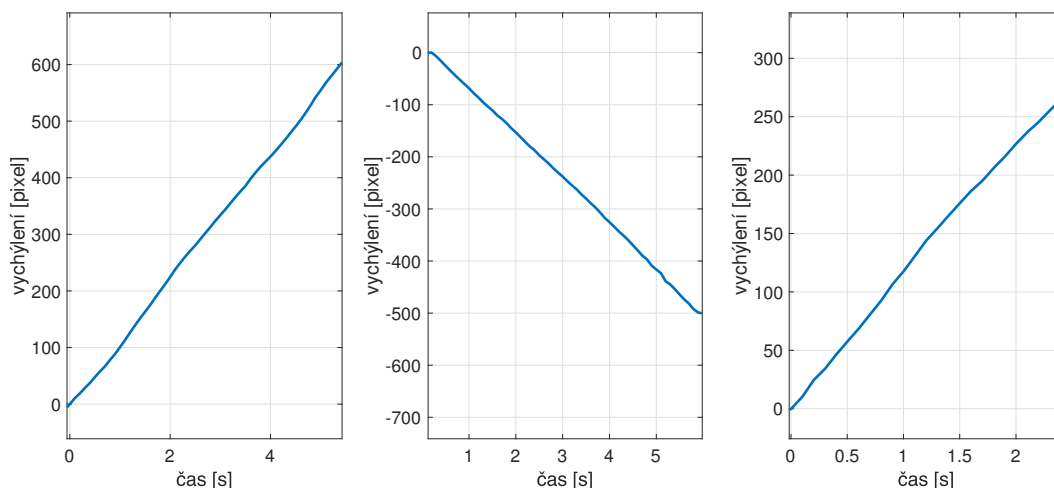
Vzdálenost kamery od zrcadla byla $l = 0.46$ m, velikost pixelu byla $p = 6.45 \mu\text{m}$. Dále platí, že pohybem zrcadla při nehybném svazku se výsledný úhel zdvojnásobí[3]. Pro úhel natočení zrcadla platí

$$\Delta\varphi = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{\Delta np}{l}\right), \quad (1)$$

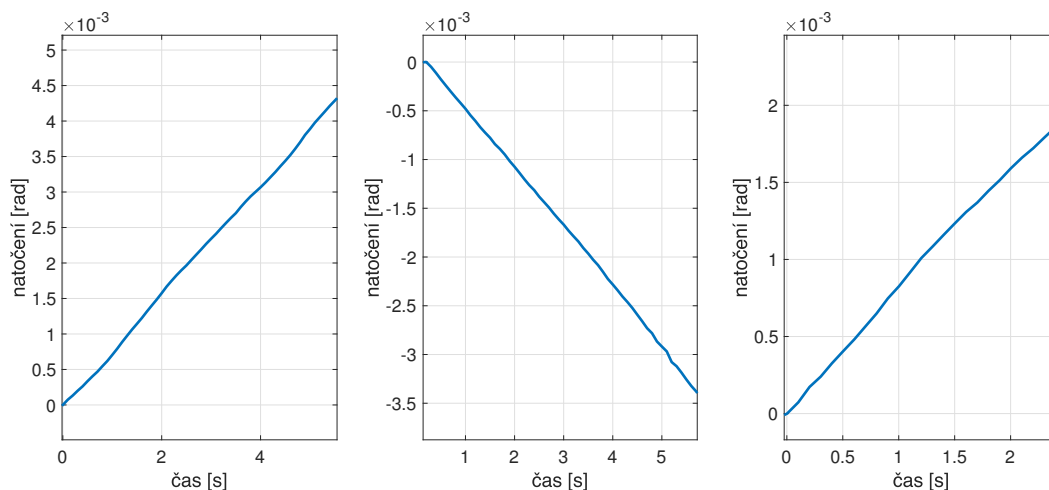
kde n je počet pixelů na kameře. Natočení zrcadel pak můžeme vidět na obrázku 2.8. Jak můžeme vidět z grafů 2.5, zrychlení motoru je natolik velké, že mezi dvěma snímky kamery motor v podstatě dosáhne plné rychlosti. Proto můžeme zrychlení zanedbat. Kmitavé pohyby piezokrystalů ve frekvenci 2 kHz jsou natolik malé, že je můžeme zanedbat.

Přenosová funkce je definovaná jako podíl Laplaceových obrazů výstupní a vstupní veličiny systému při nulových počátečních podmínkách[4]. V grafech 2.8 můžeme vidět, že úhel natočení φ má lineární průběh, tedy můžeme říci, že motor má integrální charakter. Přenosová funkce motoru bude ve tvaru

$$F(s) = \frac{k}{s}, \quad (2)$$



Obrázek 2.7. Závislost vychýlení svazku (na kameře) na čase při zadání 10000 kroků pro jednotlivé pracovní body—zleva horizontální motor kladný směr, horizontální motor záporný směr, vertikální motor.



Obrázek 2.8. Závislost natočení zrcadla φ na čase při zadání 10000 kroků pro jednotlivé pracovní body—zleva horizontální motor kladný směr, horizontální motor záporný směr, vertikální motor.

kde k je rychlost motoru, kterou zjistíme jako směrnici grafů 2.8. Systém je tzv. prvního řádu.

Pro jednotlivé body zjistíme směrnice grafů, ze kterých utvoříme střední hodnotu. Výsledné hodnoty koeficientů k jsou v tabulce 2.1.

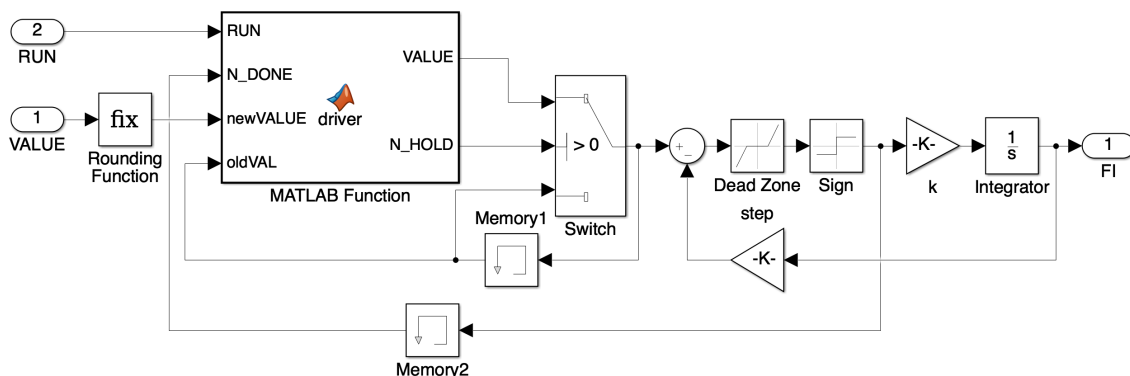
koeficient k pro	k
horizontální motor kladný směr	$781.57 \cdot 10^{-6}$
horizontální motor záporný směr	$607.48 \cdot 10^{-6}$
vertikální motor	$\pm 827.75 \cdot 10^{-6}$

Tabulka 2.1. Výsledné hodnoty koeficientů k pro horizontální motor (dva různé směry) a vertikální motor (koeficient stejný pro oba směry).

2.4 Model motorů v Simulinku

Motor je připojen na driver, který reguluje samotný motor, proto do modelu zahrneme i driver. Utvoříme 3 modely, pro každý charakter motoru zvlášť (viz. tabulka 2.1).

Zapojení modelu pro vertikální motor je na obrázku 2.9. V souboru `modelMotoru.slx` jsou uvedeny modely horizontálního motoru a vertikálního motoru. Vstupní signály jsou: VALUE - počet kroků, které má motor vykonat a RUN - signál, který spouští pohyb motoru (jeli různá od 0, motor začne vykonávat zadaný počet kroků). Výstupním signálem je FI - úhel natočení motoru.



Obrázek 2.9. Model vertikálního motoru včetně driveru.

Můžeme zde vidět blok zesílení k a blok Integrator, které reprezentují přenosovou funkci motoru (2). Pro model driveru využijeme zpětnou vazbu (viz obrázek 4.1) a regulátor bang-off-bang. Regulátor bang-off-bang tvoří bloky Dead Zone a Sign, který je zde z důvodu, že se motor pohybuje konstantní rychlostí buď v kladném směru, záporném směru nebo stojí. Zpětná vazba s blokem zesílení step převádí natočení motoru na počet kroků. Regulační odchylka vstupuje do regulátoru bang-off-bang, který rozhodne o směru pohybu. Akční zásah do motoru je hodnota 1 pro pohyb v kladném směru, -1 pro záporný pohyb 0 pro nehybný motor. Blok Matlab Function volá funkci, která spouští motor a udává požadovanou hodnotu. Jeli motor v pohybu (indikace signálem N_DONE různým od 0), nelze motor zastavit ani měnit jeho parametry. Stojí-li motor, pak se motor spouští signálem RUN různým od 0. Požadovaná hodnota se počítá jako součet uskutečněného počtu kroků a zadaného počtu kroků. Blok Switch a Memory1 za funkcí Matlab Function pouze uchovávají požadovanou hodnotu natočení (signál se změní zvolením hodnoty N_HOLD větší jak 0). Dále je zde blok Rounding function, která zaokrouhluje vstupní signál VALUE na celočíselnou hodnotu. Blok Memory2 je zde z důvodu eliminace algebraické smyčky. Blok zesílení k je totožný s hodnotami k z tabulky 2.1. Dead Zone je nastaven tak, že v rozsahu $(-1.99, 1.99)$ je signál na výstupu nulový.

Zesílení bloku step je $A = \frac{1}{\text{velikost kroku}}$. Rychlost motoru je 1750 kroků/s, tedy zesílení se bude rovnat

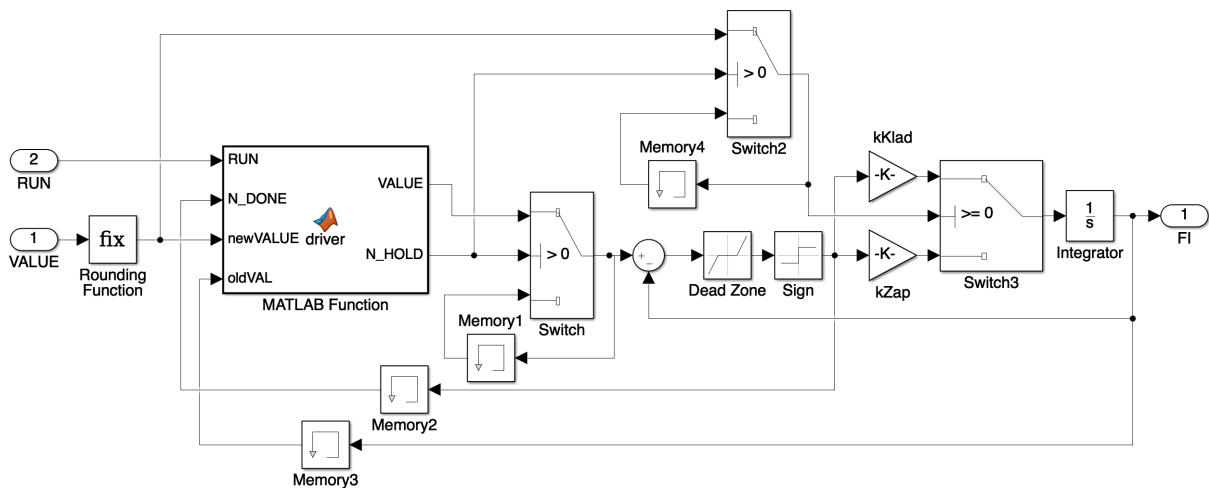
$$A = \frac{1750}{k}. \quad (3)$$

Na základě porovnání simulace a reálného motoru jsme zjistili, že pro vertikální motor neseděla konstanta A (rychlost integrace byla totožná s daty z experimentu, ale výsledná hodnota natočení se lišila). Museli jsme ji upravit z $2.115 \cdot 10^6$ na $2.631 \cdot 10^6$. Výsledné hodnoty A pro jednotlivé motory jsou v tabulce 2.2.

koeficient A pro	A
horizontální motor kladný směr	$2.239 \cdot 10^6$
horizontální motor záporný směr	$2.881 \cdot 10^6$
vertikální motor	$2.631 \cdot 10^6$

Tabulka 2.2. Výsledné hodnoty koeficientů A pro horizontální motor (dva různé směry) a vertikální motor (koeficient stejný pro oba směry).

Horizontální motor (implementující rozdílné směry) vytvoříme tak, že před integrátor vložíme oba bloky zesílení k , které se vybírají podle směru pohybu. Blok Switch2 a Memory4 udávají a uchovávají hodnotu o směru pohybu. Ve zpětné vazbě je natočení motoru (v radiánech). Blok Matlab Function převádí zadaný počet kroků na úhel, který má motor uskutečnit. Model horizontálního motoru je na obrázku 2.10.



Obrázek 2.10. Model horizontálního motoru, implementující rozdílnost chování v kladném a záporném směru.

Nakonec zjistíme zesílení $DCgain$ motoru. Zesílení $DCgain$ popisuje chování systému v ustáleném stavu a je dáno vztahem $DCgain = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{y(t)}{u(t)}$, kde $u(t)$ je buzení systému (v našem případě počet kroků), $y(t)$ je natočení systému[4]. Model vertikálního motoru má konstantní zesílení. Zesílení horizontálního motoru závisí na směru, ale v daném směru je konstantní. Reálný model má ale toto zesílení nelineární a závislé na velikosti buzení, poloze a směru. Tabulka 2.3 udává hodnoty $DCgain$ natočení motoru.

$DCgain$ pro	$DCgain$
horizontální motor kladný směr	$4.39 \cdot 10^{-6}$
horizontální motor záporný směr	$3.46 \cdot 10^{-6}$
vertikální motor	$3.79 \cdot 10^{-6}$

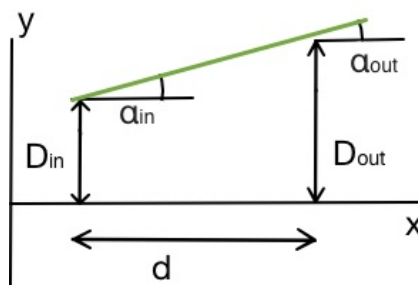
Tabulka 2.3. Zesílení $DCgain$ natočení motoru.

2.5 Model uzlu

Model uzlu můžeme rozdělit na část volného šíření prostorem a část odrazu na zrcadle. Pro každý vytvoříme matematický model.

2.5.1 Volné šíření prostorem

Uvažujme souřadnicovou soustavu Oxy, ve které se šíří svazek ve směru osy x. Pro šíření v svazku v rovině (2D šíření) definujeme vstupní a výstupní bod modelu. Vzdálenost D_{in} bude vzdálenost od osy x ve vstupním bodě. Úhel α_{in} je vstupní úhel svazku. Ve výstupním bodě svazek má polohu D_{out} a úhel α_{out} . Vzdálenost vstupního bodu od výstupního je d . Obrázek 2.11 ukazuje rozmístění jednotlivých veličin.



Obrázek 2.11. Zobrazení veličin pro volné šíření prostorem.

Víme, že šíření volným prostorem nemění směr šíření, tedy platí

$$\alpha_{out} = \alpha_{in} . \quad (4)$$

Pro polohu platí

$$D_{out} = D_{in} + d \tan \alpha_{in} . \quad (5)$$

Rovnice (4) a (5) tvoří model volného šíření svazku v rovině. Protože se svazek bude šířit ve velmi malém úhlu vzhledem k ose x (maximálně stovky μrad), využijeme lineární aproximace a získáme odchylkový model

$$\Delta \alpha_{out} = \Delta \alpha_{in} , \quad (6)$$

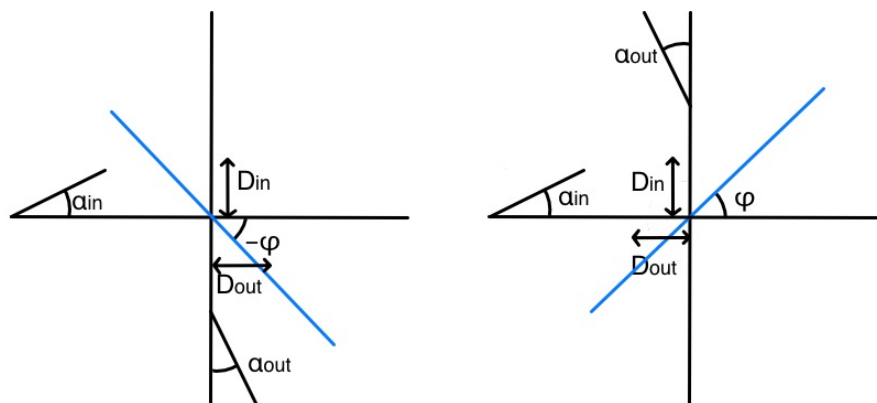
$$\Delta D_{out} = \Delta D_{in} + d \Delta \alpha_{in} . \quad (7)$$

Pro volné šíření v prostoru (3D šíření) použijeme dva modely pro šíření v rovině na sebe kolmé.

2.5.2 Odraz na zrcadle

Pro model dvourozměrný uvažujeme model pro horizontální rovinu zrcadla a model pro vertikální rovinu.

Pro horizontální model v soustavě Oxy umístíme střed zrcadla do počátku soustavy. Vstupní rovina modelu bude osa y, výstupní rovina je osa x. Ve vstupní rovině bude mít svazek vzdálenost od počátku D_{in} a úhel α_{in} s osou x. Na výstupní rovině polohu D_{out} a úhel α_{out} svírající s osou y. Natočení zrcadla φ je úhel svírající zrcadlo s osou y. V souřadnicové soustavě Oxy rozlišujeme model zrcadla odrážející svazek směrem nahoru (úhel φ je kladný) a směrem dolů (úhel φ je záporný). Znázornění jednotlivých veličin



Obrázek 2.12. Znázornění jednotlivých veličin pro odraz na zrcadle—modrá část značí zrcadlo, vlevo: zrcadlo odrážející svazek dolů (úhel natočení zrcadla je záporný, pracovní bod je $\varphi_{PB} = -\frac{\pi}{4}$), vpravo: zrcadlo odrážející svazek dolů (pracovní bod je $\varphi_{PB} = \frac{\pi}{4}$).

a jejich kladnou orientaci ukazuje obrázek 2.12. Pracovní bod je $\alpha_{PB} = 0$, $D_{inPB} = 0$ a $\varphi_{PB} = \pm\frac{\pi}{4}$.

Model se bude opírat o následující postup: nejprve spočteme bod dotyku svazku na zrcadle. Následně vytvoříme přímku odraženého svazku a zjistíme polohu svazku ve výstupní rovině. Rovnice přímky svazku dopadajícího na zrcadlo je

$$y_s = x_s \tan \alpha_{in} + D_{in}, \quad (8)$$

kde $[x_s, y_s]$ je pozice svazku. Pro rovnici přímky, která je ztotožněná se zrcadlem, platí

$$y_z = x_z \tan \varphi, \quad (9)$$

kde $[x_z, y_z]$ je pozice na zrcadle. Bod dotyku $[x_0, y_0]$ je průsečík přímek a platí pro něj

$$x_0 = \frac{D_{in}}{\tan \varphi - \tan \alpha_{in}}, \quad (10)$$

$$y_0 = x_0 \tan \varphi. \quad (11)$$

Ze zákona odrazu[3] víme, že úhel odrazu je roven úhlu dopadu. Pro zrcadlo odrážející svazek nahoru platí

$$\alpha_{out} = -\frac{\pi}{2} + 2\varphi - \alpha_{in}; \quad \varphi > 0. \quad (12)$$

Z rovnice přímky odraženého svazku zjistíme výstupní polohu, která je

$$D_{out} = -x_0 - y_0 \tan \alpha_{out} = -D_{in} \frac{1 + \tan \varphi \tan \left(-\frac{\pi}{2} + 2\varphi - \alpha_{in}\right)}{\tan \varphi - \tan \alpha_{in}}; \quad \varphi > 0. \quad (13)$$

Pro druhé zrcadlo platí

$$\alpha_{out} = \frac{\pi}{2} + 2\varphi - \alpha_{in}; \quad \varphi < 0. \quad (14)$$

$$D_{out} = x_0 + y_0 \tan \alpha_{out} = D_{in} \frac{1 + \tan \varphi \tan \left(\frac{\pi}{2} + 2\varphi - \alpha_{in}\right)}{\tan \varphi - \tan \alpha_{in}}; \quad \varphi < 0. \quad (15)$$

Rovnice (12) a (13), resp. (14) a (15) jsou rovnice modelu zrcadla odrážející svazek směrem nahoru, resp. dolů. Uvažujeme, že svazek i zrcadlo se budou pohybovat okolo

pracovního bodu, tedy nemůže dojít k případu, kdy by rovnice neměly jednoznačné řešení.

Lineární aproximací v pracovním bodě dostaneme rovnice

$$\Delta\alpha_{\text{out}} = 2\Delta\varphi - \Delta\alpha_{\text{in}}, \quad (16)$$

$$\Delta D_{\text{out}} = -\Delta D_{\text{in}}, \quad (17)$$

Pro vertikální model zavedeme výstupní rovinu totožnou s osou y . D_{out} je vzdálenost svazku ve výstupní rovině od počátku a α_{out} je úhel svírající svazek s osou x . Pracovní bod je $\varphi_{PB} = \frac{\pi}{2}$. Ostatní značení a hodnot jsou totožné s horizontálním modelem. Opět uvažujeme bod dotyku $[x_0, y_0]$ daný rovnicemi (10) a

$$y_0 = x_0 \tan \alpha_{\text{in}} + D_{\text{in}}. \quad (18)$$

Pro polohu a úhel na výstupu platí

$$\alpha_{\text{out}} = \pi - 2\varphi + \alpha_{\text{in}}, \quad (19)$$

$$D_{\text{out}} = y_0 + x_0 \tan \alpha_{\text{out}}. \quad (20)$$

Rovnici (20) musíme ještě dodefinovat $D_{\text{out}} = D_{\text{in}}$ pro $\varphi = \frac{\pi}{2}$. V Matlabu hodnotu dodefinovávat nemusíme, $\tan \frac{\pi}{2}$ se definuje jako 0.

Rovnice linearizovaného modelu jsou

$$\Delta\alpha_{\text{out}} = -2\Delta\varphi + \Delta\alpha_{\text{in}}, \quad (21)$$

$$\Delta D_{\text{out}} = \Delta D_{\text{in}}. \quad (22)$$

Dále můžeme model zpřesnit umístěním osy otáčení do reálného místa otáčení. Obrázek 2.2 nám ukazuje správnou polohu osy. Uvažujme rovnici svazku (8) a rovnici zrcadla

$$y_z = (x_z - O_x) \tan \varphi + O_y, \quad (23)$$

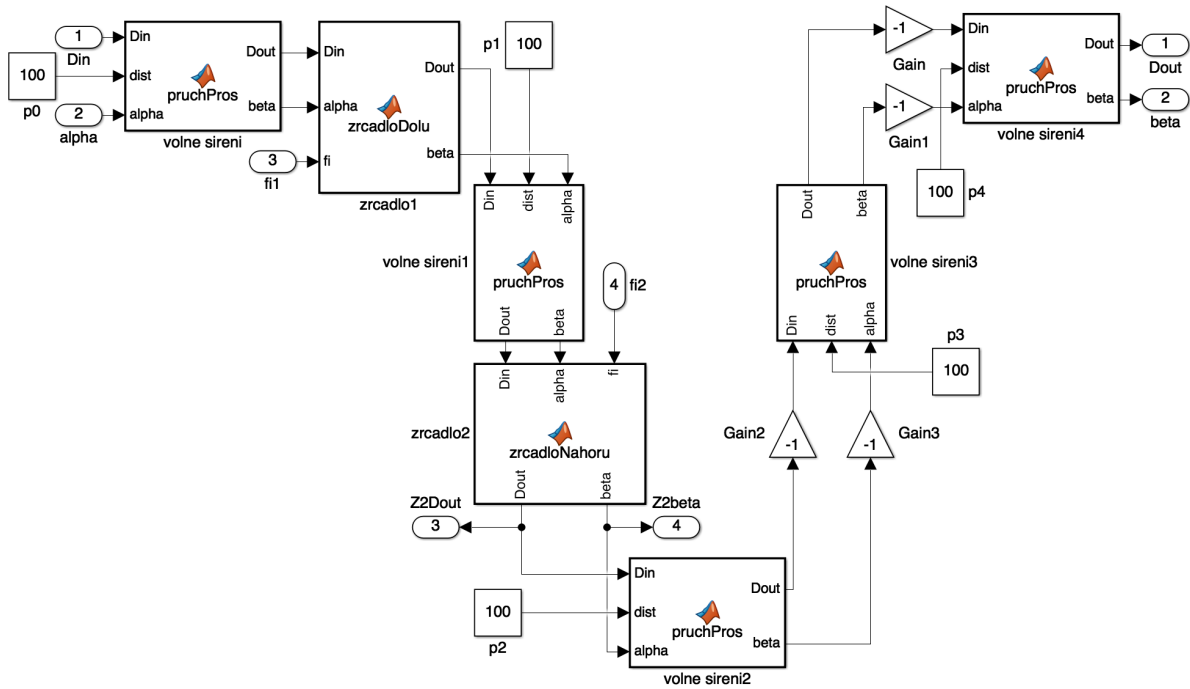
kde $[O_x, O_y]$ je poloha osy otáčení. Pak platí

$$x_0 = \frac{D_{\text{in}} + O_x \tan \varphi - O_y}{\tan \varphi - \tan \alpha_{\text{in}}} \quad (24)$$

$$y_0 = x_0 \tan \alpha_{\text{in}} + D_{\text{in}}. \quad (25)$$

Zbýlý výpočet je již totožný jak pro horizontální i pro vertikální model.

Z experimentu víme, že pohyb 2. zrcadla ovlivňuje i blízkou zónu, resp. polohu svazku. To je způsobeno otáčením zrcadla, ale hlavně polohou osy otáčení mimo střed zrcadla. Malým pootočením zrcadla se výrazně změní jeho poloha a tím i bod dotyku. Jak můžeme vidět na grafu 5.4, při pohybu 2. zrcadlem je značně ovlivněna i blízká zóna. Proto je vhodnější využívat modely s přesnou polohou osy otáčení, než nelinearizovaný či linearizovaný model.



Obrázek 2.13. Model uzlu—průchod prostorem a odraz na zrcadle.

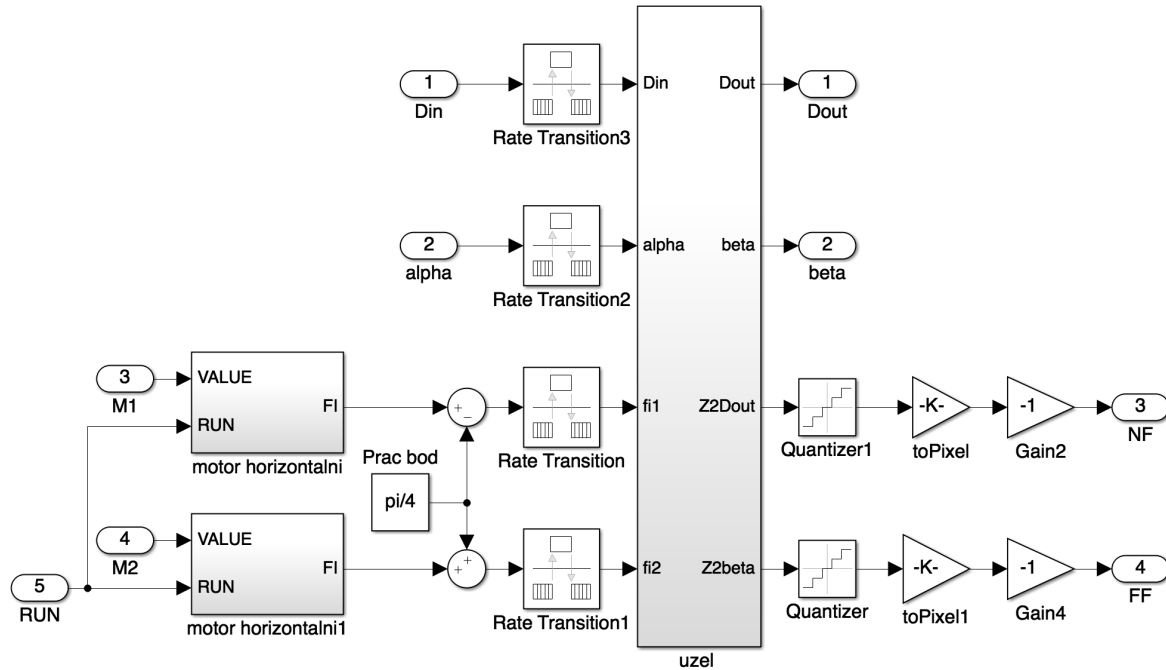
2.6 Sestavení modelu uzlu v Simulinku

Pro 2D model uzlu laseru Bivoj (jako je na obrázku 1.2) vytvoříme z bloků volného šíření prostorem a odrazu na zrcadle. Zapojení je na obrázku 2.13. Jednotky úhlů jsou rad a pro polohu byla zvolena jednotka mm. Vstupní signály jsou D_{in} a α (poloha a směr svazku). Signály fi_1 a fi_2 jsou natočení zrcadel. Výstupní signály D_{out} a β (poloha a směr). Signály $Z2D_{out}$ a $Z2\beta$ jsou poloha a směr svazku na 2. zrcadle. Hodnoty p_0 až p_4 jsou délky volného prostoru. Zrcadlo 1. a 4. jsou modely pro zrcadla odrážející svazek nahoru, 2. a 3. odrážející svazek dolů. Víme, že 3. a 4. zrcadlo je nehybné a natočené na $\pm 45^\circ$. Dosazením úhlu natočení do rovnic (12), (13), (14) a (15) dostaneme $D_{out} = -D_{in}$ a $\alpha_{out} = -\alpha_{in}$. Pro model uvažující přesnou polohu osy otáčení jsou použity modely zrcadel, které implementují posuv osy.

Dále z modelu na obrázku 2.13 vytvoříme subsystem a připojíme k němu modely motorů s posunutými hodnotami do pracovního bodu, viz obrázek 2.14. Do signálů M1 resp. M2 zadáváme počet kroků prvního resp. druhého motoru. Signálem RUN spouštíme pohyb motorů. Bloky Rate Transmission (nastaveny na Zero Order Hold, které načtou hodnotu signálu a po dobu vzorkovací periody ji drží) jsou zde ke snížení náročnosti simulace a modelování opakovací frekvence kamer. Hodnota je nastavena na 0.1. Blok Quantizer reprezentuje nejmenší hodnotu, kterou dokáže kamera a výpočet těžiště rozlišit. Nejmenší dílek jsme nastavili na $\frac{1}{2}$ pixelu. Blok toPixel převádí jednotky rad a mm na pixely.

Pro blízkou zónu je kvantování nastaveno na $\frac{1}{2p}$ a převod na pixely je $\frac{1}{2p}$. Před kamerou na dalekou zónu je čočka s ohniskovou vzdáleností f . Ohnisko je umístěné do kamery. Pro úhel svazku θ padajícího na kameru platí

$$\Delta\theta = \frac{\Delta x_{FF}}{f} = \frac{\Delta np}{f}, \quad (26)$$



Obrázek 2.14. Model uzlu včetně motorů a výstupu z kamer.

kde x_{FF} je vzdálenost na čipu kamery[3]. Proto nejmenší rozlišitelný úhel je $\frac{p}{2f}$. Převod z radiánů na pixely je pomocí konstanty $\frac{f}{p}$. V uzlu laseru Bivoj je kamera na blízkou zónu MANTA G145 s velikostí pixelu $6.45 \mu\text{m}$. Nastavíme hodnotu kvantizace $3.225 \cdot 10^{-3}$ a převod na pixely $\frac{1}{6.45 \cdot 10^{-3}}$. Pro dalekou zónu jsou kamery MANTA G125 s velikostí pixelu $3.75 \mu\text{m}$, čočka má ohniskovou vzdálenost $f = 10 \text{ cm}$. Kvantování je $1.875 \cdot 10^{-5}$ a převod na pixely je $\frac{100}{3.75 \cdot 10^{-3}}$.

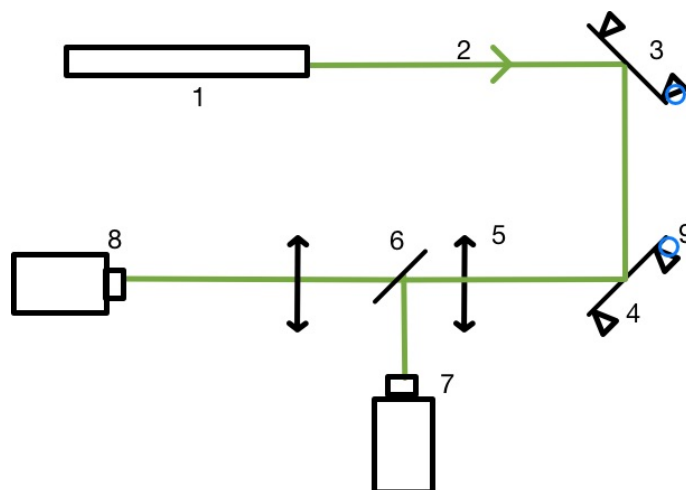
Soubor `uzelHor.slx` obsahuje model horizontálního uzlu, `uzelHorLin.slx` pak jeho lineární aproximaci. Soubor `uzelVer.slx` implementuje model vertikálního uzlu a jeho linearizace je v souboru `uzelVerLin.slx`. Modely zahrnující správnou polohu osy otáčení jsou v `uzel0saDoleHor.slx` pro horizontální uzel a `uzel0saDoleVer.slx` pro vertikální uzel.

2.7 Sestavení modelu laboratorní soustavy

Soustava na obrázku 2.1 byla sestavena za účelem identifikace parametrů motoru.

Nová konfigurace na obrázku 2.15 zahrnuje již dvě kamery Allied Vison MANTA G125B s velikostí pixelu $3.75 \mu\text{m}$ pro detekci daleké a blízké zóny. Je zde použita čočka s ohniskovou vzdáleností 7.5 cm . Model stávající konfigurace je v souborech `LM.slx` a linearizace v `LMLin.slx`. Model s přesnou polohou osy otáčení je implementován v souboru `LM0saDole.slx`.

Obě zrcadla jsou modely odrážející svazek dolů. Poloha osy otáčení je vzdálená 15.9 mm od středu zrcadla v horizontálním i vertikálním směru. Dále musíme uvážit orientaci pohybu motoru (viz. obrázek 2.15) a orientaci zrcadla (obrázek 2.12). Aby byly orientace souhlasné, musíme obrátit znaménko u 2. motoru. Také musíme brát v potaz číslování pixelu na kamere a také upravit výstupy z kamer.



Obrázek 2.15. Rozmístění prvků stávající konfigurace laboratorního modelu—1 laser, 2 svazek, 3 první motorizované zrcadlo, 4 druhé motorizované zrcadlo, 5 čočka, 6 polopropustné zrcadlo, 7 kamera sledující blízkou zónu, 8 kamera sledující dalekou zónu, 9 poloha osy otáčení stojanu.

2.8 Model laboratorní soustavy v prostoru

V této části vytvoříme 3D model uzlu a model laboratorní soustavy.

2.8.1 Model složený ze dvou nezávislých 2D modelů

Tento model utvoříme jednoduchým spojením horizontálního a vertikálního modelu, kdy se tyto dva modely nebudou nijak ovlivňovat. Z experimentu víme, že se osy zrcadla navzájem ovlivňují. Vytvořený model tuto vlastnost nenese. Tento model je obsažen v souboru `LMTriDNezavisly.slx`.

2.8.2 Model vytvořený pomocí rovnic přímky a roviny v prostoru

Pro volné šíření prostorem ve 3D použijeme dva modely volného šíření prostorem ve 2D s na sebe kolmými rovinami průběhu svazku. Pro zrcadlo definujeme vstupní rovinu výstupní rovinu. Výpočet výstupní polohy i směru je totožný jako u 2D modelu. Model zahrnuje i správnou pozici osy otáčení. Tento výpočet odrazu je uskutečněn voláním funkce `MirrorSolver.m`, ve které je pro výpočet průsečíku přímky s rovinou použita funkce `solve()`.

Výpočetní náročnost takového modelu je velmi vysoká. To je způsobeno náročným výpočtem soustavy rovnic reprezentující průsečík přímky s rovinou. Z tohoto důvodu není výhodné tento model používat i přesto, že by byl velmi přesný. Tento model je vytvořený v souboru `LMTriDsoustavaRci.slx`.

2.8.3 Model založený na vzájemném ovlivňování os lineárním přírůstkem

Pro šíření v prostoru použijeme dva nezávislé 2D modely šíření svazku. Model zrcadla je založen na aproximaci, kde výsledné natočení motoru v jedné ose $\Delta\varphi_{\text{fin}X}$ bude součtem natočení motoru v dané ose $\Delta\varphi_X$ a násobkem natočení motoru v opačné ose $\Delta\varphi_Y$. Bude platit

$$\Delta\varphi_{\text{fin}X} = \Delta\varphi_X + M_{YX}\Delta\varphi_Y, \quad (27)$$

$$\Delta\varphi_{\text{fin}Y} = \Delta\varphi_Y + M_{XY}\Delta\varphi_X, \quad (28)$$

pohyb motoru	$DCgain$ pro x_{FF}	$DCgain$ pro y_{FF}
hor. motor kladný směr	$1.335 \cdot 10^{-2}$	$4.5 \cdot 10^{-4}$
hor. motor záporný směr	$1.878 \cdot 10^{-2}$	$6.05 \cdot 10^{-4}$
ver. motor kladný směr	$-8.5 \cdot 10^{-4}$	$9.71 \cdot 10^{-3}$
ver. motor záporný směr	$-9.38 \cdot 10^{-4}$	$1.05 \cdot 10^{-2}$

Tabulka 2.4. Výsledky z experimentu pro identifikaci zesílení $DCgain$ daleké zóny— x_{FF} je poloha x daleké zóny, y_{FF} je poloha y daleké zóny. Data jsou převzata z [2].

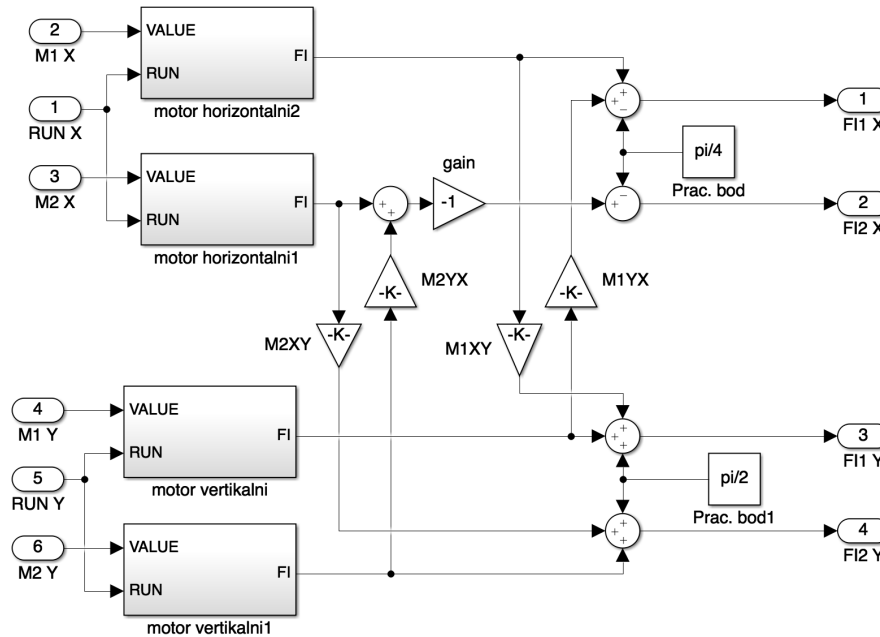
kde M_{XY} a M_{YX} jsou koeficienty vzájemného ovlivnění opačné osy. Pro tuto identifikaci jsme uskutečnili experiment, ze kterého jsme zjistili zesílení $DCgain$ daleké zóny. Výsledky jsou zobrazeny v tabulce 2.4.

Poměry zesílení pro $\frac{y_{FF}}{x_{FF}}$ jsou totožné pro oba směry pohybu, proto hodnoty M_{XY} a M_{YX} budou pro oba směry totožné. Koeficienty M_{XY} a M_{YX} jsou rovny poměrům jednotlivých zesílení a platí

$$M_{XY} = \frac{DCgain_{yFF}}{DCgain_{xFF}} = \frac{3}{89}, \quad (29)$$

$$M_{YX} = \frac{DCgain_{xFF}}{DCgain_{yFF}} = -\frac{85}{971}. \quad (30)$$

Na obrázku 2.16 můžeme vidět schéma zapojení motorů pro model založený na vzájemném ovlivňování os lineárním přírůstkem. Tento 3D model laboratorní soustavy je v souboru `LMvzajOvlivnovani.slx`.



Obrázek 2.16. Schéma zapojení motorů pro model založený na vzájemném ovlivňování os lineárním přírůstkem.

Pro 3D model je nevhodnější použít model založený na vzájemném ovlivňování os lineárním přírůstkem, který nejlépe popisuje chování stojanu se zrcadlem (porovnání na grafu 5.5 a 5.6). Ostatní modely buď ovlivňování os nezahrnují nebo mají vysokou výpočetní náročnost.

2.9 Model laseru Bivoj

Celý laser je velice složitý. Přesné modelování optické cesty všech optických členů je obtížné jak z hlediska výpočtu, tak i uskutečnění experimentů pro identifikaci parametrů. Proto utvoříme zjednodušený model laseru, skládajícího se z osmi uzlů zapojených za sebou. Spojení mezi nimi bude pouze volným prostorem. Žádné jiné optické prvky mezi uzly nebudeme uvažovat.

2.10 Doby jednotlivých úkonů systému

Doba mezi výstřelem svazku a začátkem výkonu akčního zásahu motorů není přesně daná. Přenos je realizován pomocí protokolu TCP. Veškeré zpoždění a doby výpočtu akčních zásahů jsou menší jak perioda výstřelu laseru. Veškerý sběr dat, výpočet a provedení akčního zásahu se stihne v jedné periodě. Tuto dobu jsme pro účely návrhu regulátoru stanovili na 40 ms[5]. Proto dobu výkonu akčního zásahu na motorech zkrátíme ze 100 ms na 60 ms. Tím budeme modelovat dobu potřebnou pro úkony mezi výstřelem svazku a začátkem pohybu motoru, také dobu potřebnou pro bezpečné ukončení pohybu. Toto zpoždění je zvoleno pouze za čelem zavedením zpoždění do systému. V reálném systému tato doba není konstantní.

Kapitola 3

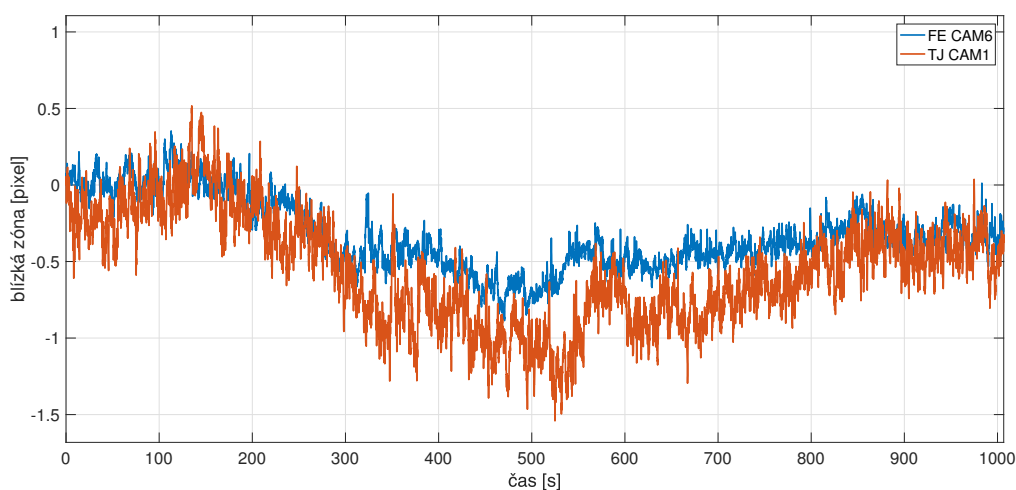
Model rušivých vlivů systému

Pro správný návrh stabilizačního systému, musíme nejprve znát chování jevů, které působí na systém. Mezi hlavní druhy rušení systému patří tzv. teplotní drift. Jak bylo řečeno v kapitole 1.5, drift je způsoben tepelnou roztažností stojanu. Rušení je také způsobeno jemnými otřesy stolu a všech komponent laseru. Vibrace obvykle bývají v řádech stovek až tisíců Hertzů. Otřesy s použitou technologií nelze identifikovat (velmi malé vzorkování kamer) ani regulovat. Proto tento druh rušení nebudeme uvažovat.

Pro identifikaci rušení jsme uskutečnili experiment. Cílem je identifikovat rušení jako polohou ΔD a směr svazku $\Delta\theta$. Vybrali jsme 3 části laseru Bivoj, u kterých jsme po dobu 1 hodiny sbírali data z kamer pomocí programu RayCi¹. Během experimentu se nijak nehýbalo s motory ani jinými částmi laseru a díky tomu jsme mohli pozorovat na kamerách rušení systému. Dané tři části byly: uzel za předzesilovačem Preamp #1 v části Front End, uzel umístěný před 10 J zesilovačem a uzel umístěný před 100 J zesilovačem. Všechny použité kamery byly kamery Allied Vision MANTA G145B s velikostí 1 pixelu $6.45 \mu\text{m}$. Program RayCi sbíral data z kamer a vypočetl těžiště svazku. Výstupní soubor byl ve formátu .pst a data byla uspořádána následovně

č. snímku *<tab>* datum *<tab>* čas *<tab>* dT [ms] *<tab>* dX [px] *<tab>* dY [px] .

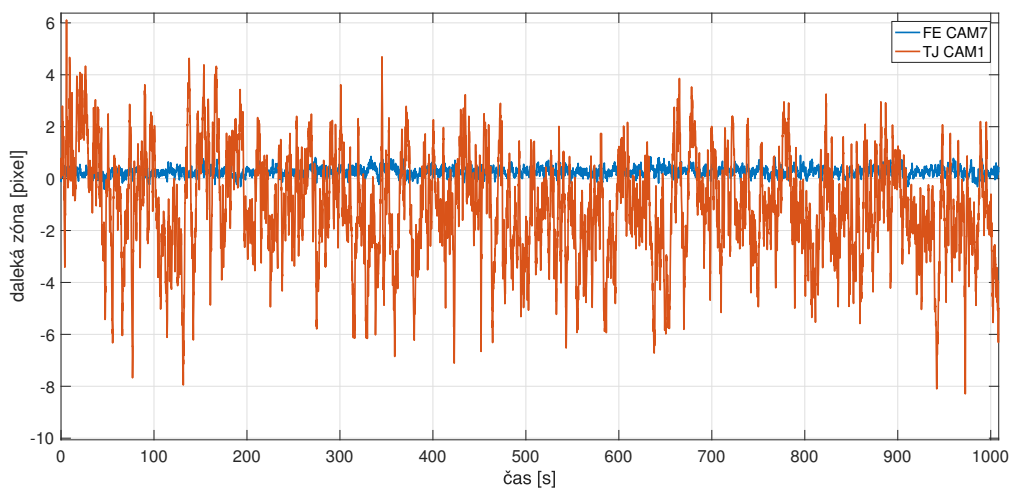
Graf 3.1 ukazuje naměřená data z horizontální polohy blízkých zón 2. a 3. uzlu. Graf 3.2 ukazuje data z horizontální daleké zóny.



Obrázek 3.1. Naměřená data horizontální blízké zóny na 2. a 3. uzlu.

Schéma 1. měřeného uzlu je na obrázku 3.3. Obě kamery sledují blízkou zónu. Rušení v 1. uzlu v podobě polohy zvolíme jako polohu Δx_{CAM1} na kameře FE CAM1. Pro

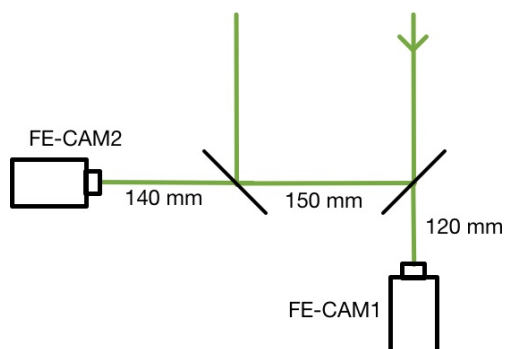
¹ http://www.cinogy.com/html/beam_profiler_software.html



Obrázek 3.2. Naměřená data horizontální daleké zóny na 2. a 3. uzlu.

simulaci budeme všechny veličiny používat v jednotkách rad a mm. Rozdíl optických drah kamer je 170 mm. Rušení v podobě úhlu spočítáme jako

$$\Delta\theta_1 = \frac{\Delta x_{CAM2} - \Delta x_{CAM1}}{170} . \quad (1)$$



Obrázek 3.3. Schéma 1. měřeného uzlu za předzesilovačem Preamp #1, kamery sledují blízkou zónu.

Druhý uzel je uspořádán jako na obrázku 3.4. Hodnotu úhlu zjistíme ze vztahu (26), tedy

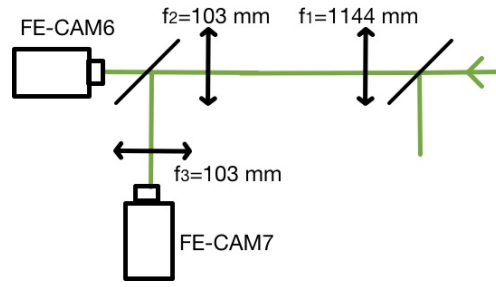
$$\Delta\theta_2 = \frac{\Delta x_{CAM7}}{f_3} \quad (2)$$

a polohu[3] pomocí vztahu

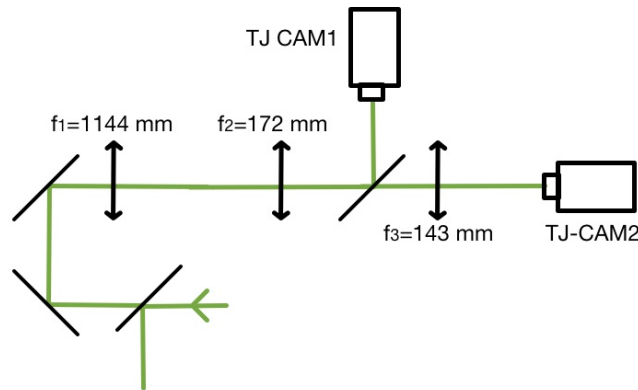
$$\Delta D_2 = \frac{f_1}{f_2} \Delta x_{CAM6} . \quad (3)$$

Třetí uzel je vyobrazen na obrázku 3.5. Vzorec pro zjištění rušení v podobě polohy a směru je stejný jako u předchozího uzlu

$$\Delta\theta_2 = \frac{\Delta x_{CAM1}}{f_3} \quad (4)$$



Obrázek 3.4. Schéma 2. měřeného uzlu před 10 J zesilovačem, kamera FE CAM7 sleduje dalekou zónu, kamera FE CAM6 sleduje blízkou zónu.



Obrázek 3.5. Schéma 3. měřeného uzlu před 100 J zesilovačem, kamera TJ CAM1 sleduje blízkou zónu, kamera TJ CAM2 sleduje dalekou zónu.

a polohu pomocí

$$\Delta D_2 = \frac{f_1}{f_2} \Delta x_{\text{CAM2}}. \quad (5)$$

Výsledky z prvního uzlu lze považovat za konečné. Pro 2. a 3. uzel platí, že výsledek je součtem rušení v daném uzlu a vlivů rušení ze všech předchozích uzlů. Chceme identifikovat pouze rušení v daném uzlu bez všech předchozích. Pro spoje mezi uzly je nejlepší popis následovný: výsledná poloha je a násobkem vstupní polohy a výstupní směr je $\frac{1}{a}$ násobkem vstupního směru. Tento popis vychází z popisu expanzního teleskopu, který se nachází mezi uzly. Pro optickou soustavu mezi 1. a 2. měřeným je vhodné zvolit $a = 10$, mezi 2. a 3. uzlem $a = 3$. Tento popis není v tomto případě zaveden za účelem nejpřesnějšího modelování optické cesty, ale pro první přiblížení je tento model optimální.

Výsledné hodnoty rušení pro jednotlivé uzly jsou

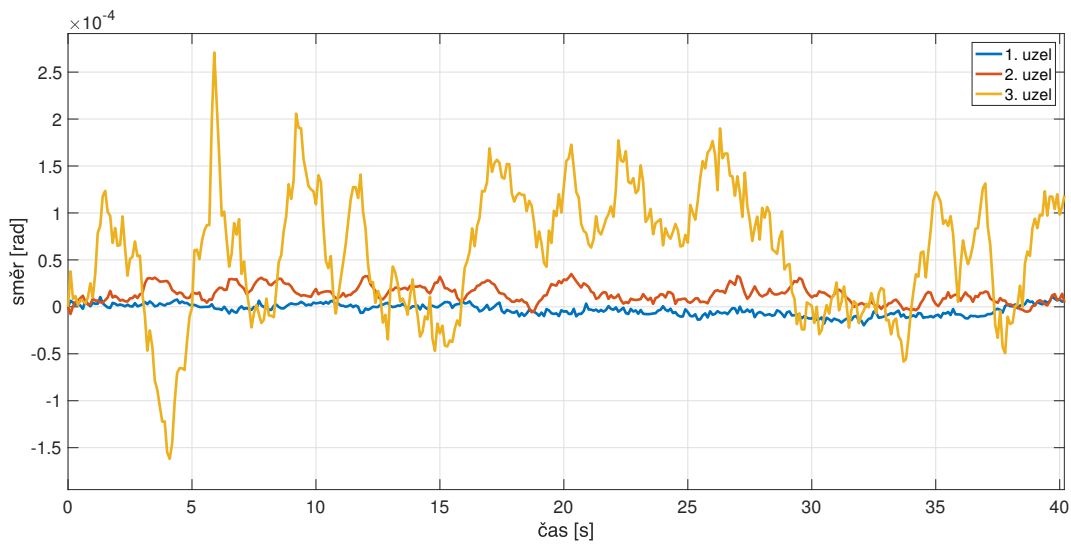
$$\Delta \theta_{2\text{fin}} = \Delta \theta_2 - 0.1 \Delta \theta_1, \quad (6)$$

$$\Delta D_{2\text{fin}} = \Delta D_2 - 10 \Delta D_1, \quad (7)$$

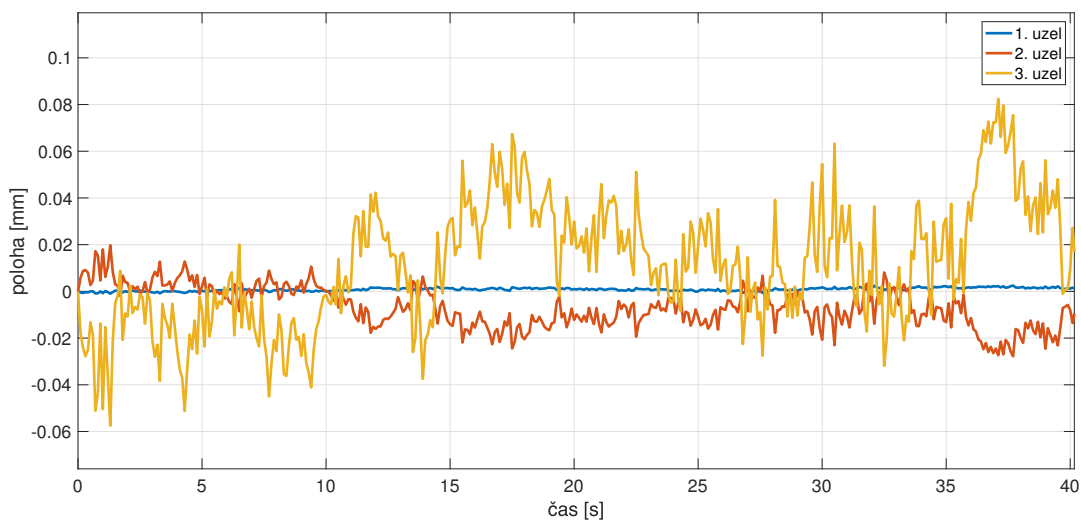
$$\Delta \theta_{3\text{fin}} = \Delta \theta_3 - \frac{1}{3} \Delta \theta_{2\text{fin}}, \quad (8)$$

$$\Delta D_{3\text{fin}} = \Delta D_3 - 3 \Delta D_{2\text{fin}}. \quad (9)$$

Tímto jsme získali data o rušení systému. Pro horizontální polohu je rušení zobrazeno na grafech 3.6 a 3.7. Vidíme, že pro 1. uzel, který je hned na začátku laseru, je rušení polohou a úhlem malé, s rostoucí vzdáleností od počátku laseru a počtem optických členů se rušení zvětšuje. Pro 1. uzel je velikost rušení v řádu jednotek μm , pro 2. uzel



Obrázek 3.6. Graf rušení v podobě úhlu pro 3 měřené uzly.



Obrázek 3.7. Graf rušení v podobě polohy pro 3 měřené uzly.

je ± 0.02 mm, pro 3 uzel je do ± 0.06 mm. Pro 1. uzel je rušení úhlem do $10 \mu\text{rad}$, pro 2. uzel do $40 \mu\text{rad}$ a pro 3. uzel do $\pm 200 \mu\text{rad}$.

Šum způsobený kamerami je velmi malý v řádu desetin pixelu. Tento šum jsme eliminovali zavedením kvantování nad hladinou šumu. Kvantování bylo nastaveno na $\frac{1}{2}$ pixelu.

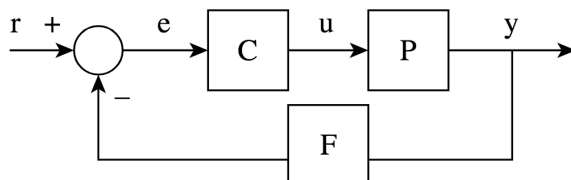
Soubor `ruseni.mat` obsahuje vektory hodnot jednotlivých rušení. Jsou zde uvedeny rušení pro 3 uzly v horizontální i vertikální ose. Každá část obsahuje rušení polohou a rušení směrem. Jako vstup rušení do systému jsme zvolili vstupní polohu uzlu D_{in} a směr α_{in} . Pro kaskádu budeme rušení pouštět do 1., 3. a 6. uzlu.

Kapitola 4

Návrh regulátoru

V této kapitole nejprve objasníme problematiku návrhu regulátoru. Navrhne regulátor pro model laboratorní soustavy, nejprve pro 2D model. Poté návrh rozšíříme na 3D model. Dále navrhne regulátor pro uzel ve 2D. Nakonec utvoříme regulátor pro kaskádu uzlů. V návrhu regulátoru použijeme regulátor se zápornou zpětnou vazbou. Celý návrh regulátoru zahrnuje problematiku výpočtu polohy svazku na kameře, sběru dat, řízení distribuovaného systému, optiky i dodržení bezpečnosti systému.

Regulátor je prvek ovlivňující systém za účelem dosažení požadovaného stavu. Zpětná vazba je systém, který zpracovává hodnotu výstupního a vstupního signálu a ovlivňuje vstup systému[4]. Schéma zapojení se zpětnou vazbou je na obrázku 4.1



Obrázek 4.1. Systém se zpětnou vazbou— y výstupní signál, r vstupní signál (požadovaná hodnota), e regulační odchylka, u akční zásah, C regulátor v přímé vazbě, F regulátor ve zpětné vazbě, P řízený systém. Obrázek převzatý z ¹.

Jako senzory jsou v každém uzlu kamery na blízkou zónu a dalekou zónu. Aktuátory systému (prvky, kterými se ovlivňuje systém) jsou v tomto případě motory zrcadel. Regulovaná veličina je směr a poloha svazku. Požadovaná hodnota, neboli vstupní signál do systému, je 0 pixelů, tedy všechny odchylky jsou od nulové hodnoty. Výstupní signál je hodnota blízké, resp. daleké zóny, tedy poloha resp. směr svazku. Regulační odchylka je rozdíl požadované hodnoty a naměřené hodnoty z kamer. Akční zásah je počet kroků zadaný motoru. Poruchová veličina je v našem případě změna polohy zrcadla, modelovaná jako rušení v podobě úhlu a směru.

4.1 Výběr typu regulátoru

V uzlu jsou použity 4 motory a dva drivery, tedy můžeme hýbat nejvýše dvěma motory současně. Výběr motorů pro paralelní pohyb je jednoznačný. Vždy se budou pohybovat jen horizontální nebo jen vertikální motory. Motory ovlivňují chování svazku v dané ose všech následujících prvků.

Při výstřelu svazku se motory nesmí pohybovat nebo jen velmi malou rychlostí. My se zaměříme na situaci, kdy chceme, aby motor během výstřelu stál a jinak se pohyboval původní rychlostí 1750 kroků/s. Jsou zde dvě základní možnosti střídání regulace os.

¹ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Simple_feedback_control_loop2.svg

První je, že regulace obou os proběhne v jedné periodě, tedy nejprve se bude regulovat první osa a vzápětí osa druhá. Vše se musí stihnout do dalšího výstřelu svazku. Druhá možnost je, že v jedné periodě se zreguluje jedna osa, v druhé periodě druhá osa. Finální rozhodnutí ale závisí na latencích jednotlivých úkonů, na využitelnosti doby akčního zásahu a možnostech implementace v systému EPICS. My zvolíme první metodu, kdy v jedné periodě dojde k regulaci obou os. Vždy budou regulovány všechny uzly najednou. Řízení zvláště každého uzlu není výhodné, perioda střídání uzlů je velká. Navíc jeden motor vždy ovlivňuje následující uzly.

Při regulaci je kladem větší důraz na směr než na polohu, protože se vzdáleností roste odchylka polohy. V laseru jsou optické členy s malým vstupním otvorem (jako například prostorový filtr), ty vyžadují přesný směr pro průchod.

Dobu zpoždění mezi výstřelem svazku a získáním akčních zásahů jsme stanovili na 40 ms. Tím zůstává 60 ms na provedení regulace. Každá osa (horizontální a vertikální) bude mít 30 ms na uskutečnění regulace.

Model uzlu, včetně motorů s drivery je nelineární systém. Tímto jsme omezení při návrhu regulátoru pomocí klasických metod pro linearizovaný systém. P regulátor je regulátor složený jen ze zesílení ve tvaru K_P , který zesiluje regulační odchylku. S využitím P regulátoru jsme v našem případě schopni vyregulovat systém do nulové regulační odchylky (viz graf 5.10 pro 1. uzlu, který reguluje jednotkový skok do nuly). PI regulátor ve tvaru $K_P + \frac{k_I}{s}$, spojuje zesílení a integraci regulační odchylky. Integrační složka se využívá z důvodu regulace odchylky do nuly. PD regulátor ve tvaru $K_P + K_D s$ a je tvořen proporcionální a derivační složkou. Derivační složka je využívána za účelem eliminace rychlých změn systému[4]. PID regulátor je složen z proporcionální, integrační a derivační složky. P regulátor je v našem případě schopen regulovat odchylku do nuly, proto není zapotřebí využívat PI regulátor a prodlužovat dobu regulace integrací. Reakce na optické cestě se projeví bez zpoždění, motoru se vždy zadá přesný počet kroků a známe velikost kroku a tudíž i vykonanou dráhu. Navíc je motor omezen konstantní rychlostí a po zadání příkazu k pohybu nelze hodnoty měnit. Proto PI, PD a PID regulátor nepřináší žádnou výhodu oproti P regulátoru. Z těchto faktů nejlépe vychází pro návrh regulátoru proporcionální P regulátor.

4.2 identifikace parametrů potřebných k návrhu regulátoru

Nejprve zjistíme zesílení $DCgain$ modelu laboratorní soustavy. Hodnotu zesílení zjistíme z výpočtu a simulace. Například pro zesílení daleké zóny na kameře (podle rovnice (26)) platí

$$DCgain = \frac{\Delta x_{FF}}{n} = \frac{\Delta \theta f}{np} = \frac{2\Delta \varphi f}{np}, \quad (1)$$

Tabulka 4.1 udává výsledné hodnoty zesílení $DCgain$ blízkých a dalekých zón pro jednotlivé motory. Zesílení $DCgain_{M1FF}$ je totožné se zesílením $DCgain_{M2FF}$. To je důsledek toho, že úhel se volným prostorem nemění a úhel odrazu je roven úhlu dopadu.

Dále zjistíme zesílení $DCgain$ pro model uzlu. Výsledky jsou v tabulce 4.2.

$DCgain$ pro	$DCgain_{M2FF}$	$DCgain_{M1NF}$
hor. motor kladný směr	$1.756 \cdot 10^{-2}$	$2.342 \cdot 10^{-2}$
hor. motor záporný směr	$1.385 \cdot 10^{-2}$	$1.847 \cdot 10^{-2}$
vertikální motor	$1.517 \cdot 10^{-2}$	$2.023 \cdot 10^{-2}$

Tabulka 4.1. zesílení $DCgain$ daleké a blízké zóny pro motory modelu laboratorní soustavy— $DCgain_{M2FF}$ je zesílení daleké zóny vyvolané 2. motorem, $DCgain_{M1NF}$ je zesílení blízké zóny vyvolané 1. motorem.

$DCgain$ pro	$DCgain_{M1FF}$	$DCgain_{M1NF}$	$DCgain_{M2FF}$
hor. motor kladný směr	$2.342 \cdot 10^{-2}$	$1.145 \cdot 10^{-2}$	$-2.342 \cdot 10^{-2}$
hor. motor záporný směr	$1.847 \cdot 10^{-2}$	$9.029 \cdot 10^{-3}$	$-1.847 \cdot 10^{-2}$
vertikální motor	$2.023 \cdot 10^{-2}$	$1.176 \cdot 10^{-2}$	$2.023 \cdot 10^{-2}$

Tabulka 4.2. zesílení $DCgain$ daleké a blízké zóny pro motory modelu laseru Bivoj— $DCgain_{M2FF}$ je zesílení daleké zóny vyvolané 2. motorem, $DCgain_{M1NF}$ je zesílení blízké zóny vyvolané 1. motorem, $DCgain_{M1FF}$ je zesílení daleké zóny vyvolané 1. motorem.

4.3 Návrh regulátoru pro model laboratorní soustavy ve 2D

Pro laboratorní model nejprve využijeme 2 regulátory nezávislé na sobě. První regulátor s proporcionální složkou K_{P1} má vstupní signál blízkou zónu a bude řídit první zrcadlo. Tím docílíme, že na druhém zrcadle bude svazek přímo ve středu zrcadla. Druhým regulátorem se složkou K_{P2} budeme řídit druhé zrcadlo pomocí dat z daleké zóny. Tím se bude regulovat směr svazku.

Hodnoty složek jsme nejprve stanovili na základě zesílení $DCgain_{M1NF}$ pro K_{P1} a $DCgain_{M2FF}$ pro K_{P2} jako $K = \frac{1}{DCgain}$. Z teorie a také ze simulace víme, že není vhodné volit takto P složku regulátoru. Výsledné akční zásahy jsou velké, proto je dobré volit P složku o trochu menší.

Chování motoru závisí na směru pohybu, proto navrhne regulátor tak, aby na tyto rozdílnosti reagoval. Celý P regulátor vytvoříme jako regulátor se dvěma stavy. P složka se bude vybírat na základě požadovaného směru. Protože musíme zaručit ukončení pohybu motoru do začátku dalšího výstřelu svazku, omezíme výstup regulátoru saturací. Doba na uskutečnění akčního zásahu je 30 ms a motor má rychlost 1750 kroků/s, nastavíme saturaci druhého motoru na ± 52 kroků. Ze simulace (viz graf 5.10) víme, že pohyb prvního motoru silně ovlivňuje dalekou zónu a druhý motor pak nestíhá směrovou odchylku korigovat. Řešení je v podobě snížení saturace regulátoru prvního motoru. Hodnotu jsme stanovili na ± 20 . Tím sice zpomalíme regulaci blízké zóny, ale snížíme tím směrovou odchylku, protože druhý motor bude více stíhat. Snížením směrové odchylky se nebude svazek s rostoucí optickou dráhou více vychylovat v poloze. Drift v podobě polohy není nijak rychlý, proto není zapotřebí tolik hýbat prvním motorem. Navíc prioritní veličina je směr.

Na základě těchto zjištění a zesílení z tabulky 4.1 vychází ze simulace nejlépe volba regulátorů

$$K_{P1} = \frac{3}{5DCgain_{M1NF}}, \quad (2)$$

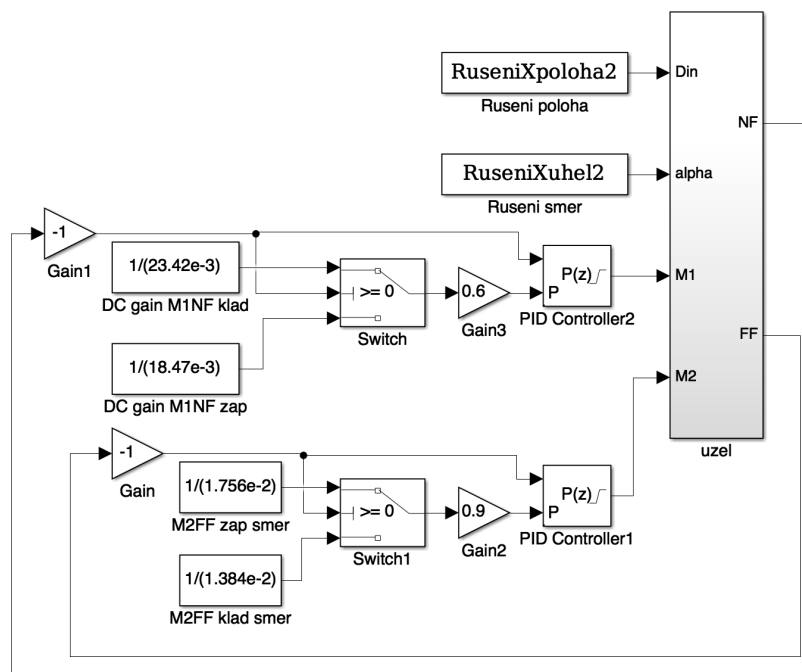
$$K_{P2} = \frac{9}{10DCgain_{M2FF}}. \quad (3)$$

K_P pro	K_{P1}	K_{P2}
hor. motor kladný směr	25.619	51.253
hor. motor záporný směr	32.485	65.029
vertikální motor	39.552	44.488

Tabulka 4.3. Hodnoty K_P pro laboratorní soustavu.

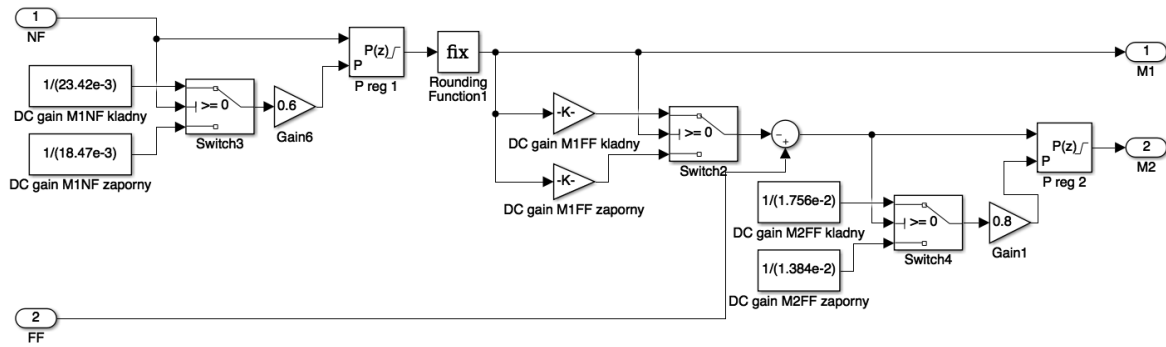
Takto navržený regulátor je implementován v souboru `regLMnez.slx`. Výsledné hodnoty proporcionálních složek P regulátoru jsou v tabulce 4.3.

Použití regulátoru je na obrázku 4.2. Regulátory jsou zapojeny se zápornou zpětnou vazbou. Protože akční zásah se bude uplatňovat pouze jednou za periodu výstřelu, použijeme diskrétní regulátor. Hodnota P složky je dána externím signálem, který je volen na základě směru pohybu. Rušení systému je v podobě vstupních signálů směru a úhlu svazku.



Obrázek 4.2. Zapojení regulátoru pro laboratorní model—2 nezávislé regulátory.

Takto zvolené regulátory pracují nezávisle nedokáží na sebe navzájem reagovat. Navrhujeme regulátor, který pro výpočet akčního zásahu druhého zrcadla bude brát v potaz akční zásah prvního zrcadla. Nazveme ho regulátor s feedforwardem z předchozího motoru. V návrhu bude P regulátor prvního motoru totožný s předchozím návrhem. Pomocí zesílení $DCgain_{M1FF}$ zjistíme změnu směru svazku po vykonání pohybu prvního motoru. Tuto změnu odečteme od zpětné vazby daleké zóny. Na takto vzniklou regulační odchylku budeme následně aplikovat regulaci. Způsob předávání informace z prvního motoru do druhého jsme zvolili z důvodu, že první motor se snaží minimalizovat polohu a přitom ovlivní směr. Druhý motor ovlivňuje směr, ale polohu blízké zóny jen minimálně. P regulátor s feedforwardem z předchozího motoru je na obrázku 4.3. Výsledná implementace je v souboru `regLMff.slx`.

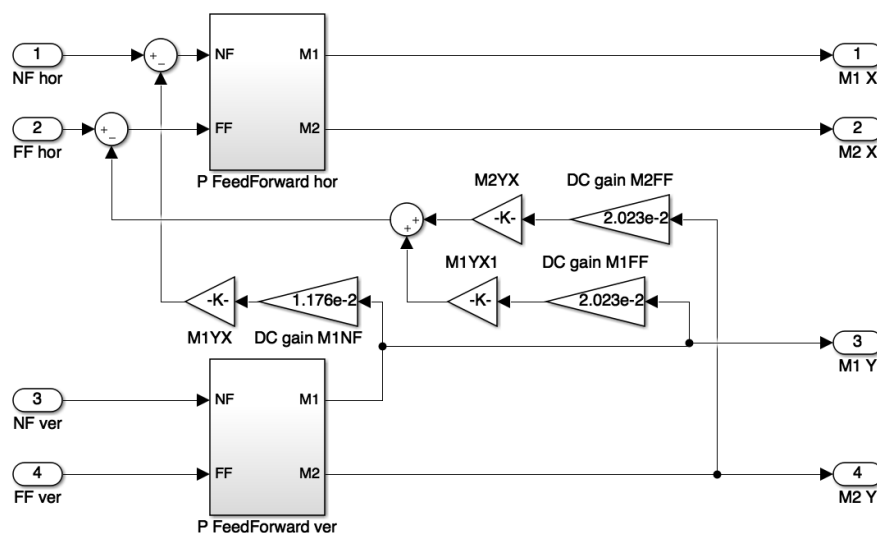


Obrázek 4.3. Regulátor s feedforwardem z předchozího motoru—druhý motor bere v potaz pohyb prvního motoru.

4.4 Návrh regulátoru pro model laboratorní soustavy ve 3D

Navrhne regulátor jako 2 nezávislé regulátory pro horizontální a vertikální směr. Jednotlivé regulátory budou regulátory s feedforwardem z předchozího motoru. Výsledné hodnoty P složek jsou v tabulce 4.3. Implementace je v souboru `regLMTriD.slx`.

Motor neovlivňuje jen svou osu, ale i osu opačnou. Navrhne regulátor, který vykoná nejprve vertikální pohyb, následně horizontální pohyb s tím, že pro výpočet akčních zásahů se bude využívat i odchylka způsobená vertikálními motory. Takovýto regulátor nazveme regulátor s feedforwardem mezi hor. a ver. motory. Schéma je na obrázku 4.4 a implementace je v souboru `regLMTriDFFhorVer.slx`. Pomocí zesílení $DC\ gain$ z se z akčního zásahu vertikálního P regulátoru zjistí odchylka, ze které za pomoci koeficientů M_{XY} a M_{YX} zjistíme odchylku vzniklou na opačné ose. Ta se odečte od naměřené odchylky horizontálního směru.



Obrázek 4.4. Regulátor pro 3D model s feedforwardem mezi ver. a hor. motory—horizontální motor získává informaci o natočení vertikálního motoru.

4.5 Návrh regulátoru pro zjednodušený model laseru Bivoj

Nejprve utvoříme regulátor pro uzel. Návrh regulátoru pro uzel bude stejný jako v kapitole 4.3 s tím, že použijeme rozdílné hodnoty zesílení $DCgain$. Hodnoty zesílení použijeme z tabulky 4.2. Vhodné hodnoty jsou $K_{P1} = \frac{4}{5DCgain_{M1NF}}$ a $K_{P2} = \frac{9}{10DCgain_{M2FF}}$. Výsledné hodnoty proporcionalních složek jsou uvedeny v tabulce 4.4.

K_P pro	K_{P1}	K_{P2}
hor. motor kladný směr	69.87	-38.43
hor. motor záporný směr	88.6	-48.73

Tabulka 4.4. Hodnoty K_P pro uzel laseru Bivoj.

Pro porovnání vytvoříme kaskádu uzlů s nezávislými regulátory v uzlu a kaskádu s regulátory s feedforwardem z před. motoru.

Víme, že pohyb motoru ovlivňuje svazek v jeho celé následující dráze. Pokud motory neznačí změny svazku vyvolané předchozími motory, reagují pouze na aktuální hodnotu z kamer a nekorigují změny vyvolané předchozími motory. Akční zásahy mnoha předchozích motorů můžou vychýlit svazek za mez limitních hodnot. Proto by bylo vhodné, aby každý následující motor věděl o změnách svazku vyvolaných všemi předchozími motory. Tento regulátor nazveme regulátor s feedforwardem z předchozího uzlu. K takovému návrhu nejprve musíme zjistit všechna zesílení $DCgain$ blízkých a dalekých zón následujících uzlů vyvolané motory z prvního uzlu. Protože máme 8 stejných uzlů platí, že zesílení druhého uzlu vyvolané prvním uzlem je totožné se zesílením třetího uzlu vyvolaného druhým uzlem.

Z akčního zásahu motoru zjistíme pomocí zesílení $DCgain$ změny svazku v následujících všech uzlech a ty přičteme k jednotlivým zpětným vazbám. Tím se do regulátorů všech uzlů dostane i informace o změnách svazku vyvolaných předchozími motory.

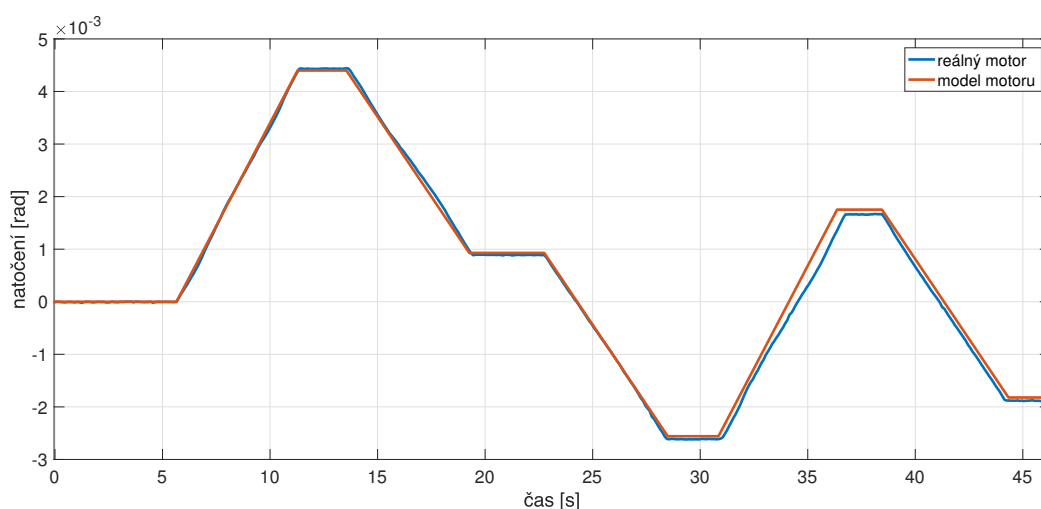
Implementace jednotlivých nezávislých regulátoru pro kaskádu je v souboru `Bivoj-Nez.slx`. Implementace regulátoru, kde každý uzel má regulátor s feedforwardem z před. motoru, je v souboru `BivojFFzPredMot.slx`. Regulátor předávající informaci všem dalším uzlům je v souboru `BivojFFdalsimUzlum.slx`.

Kapitola 5

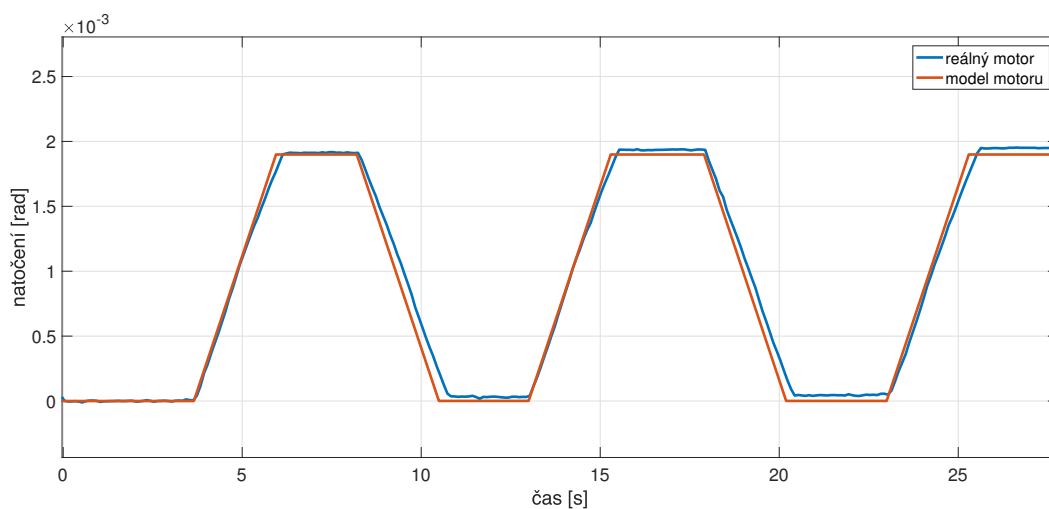
Porovnání

Na závěr porovnáme vytvořené modely s reálným laboratorním systémem. Také porovnáme vytvořené regulátory.

Porovnání pohybu modelu horizontálního motoru s daty z reálného systému (viz. konfigurace na obrázku 2.1) můžeme vidět v grafu 5.1 a vertikálního motoru v grafu 5.2. Hodnoty natočení z kamer jsou převedeny na natočení motoru pomocí vztahu (1).



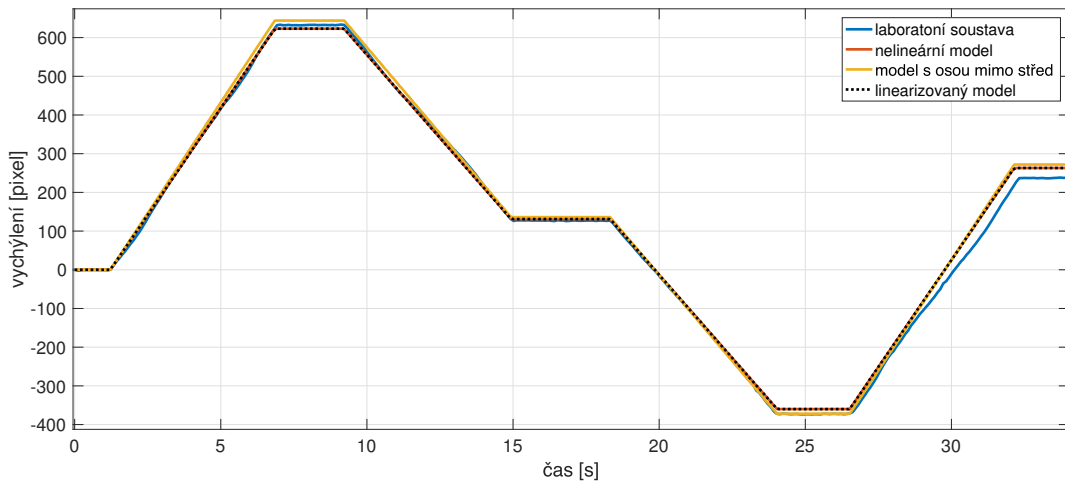
Obrázek 5.1. Porovnání natočení modelu horizontálního motoru a reálného systému pomocí závislosti natočení motoru na čase - zadaných 10000 a -10000 kroků.



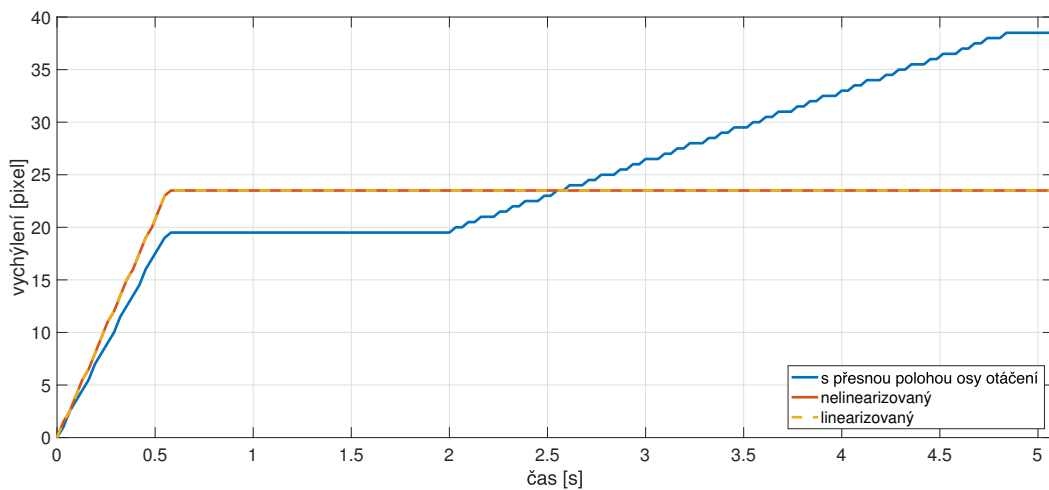
Obrázek 5.2. Porovnání natočení modelu vertikálního motoru a reálného systému pomocí závislosti natočení motoru na čase - střídání 10000 a -10000 kroků.

Vidíme, že chování modelu je velmi podobné chování reálného systému, nicméně můžeme pozorovat nepřesnosti, které jsou způsobené rozdílným chováním motoru v různých polohách.

Porovnáme reálnou laboratorní soustavu (viz. konfigurace na obrázku 2.15) s modelem nelinearizovaným, linearizovaným a s přesnější polohou osy otáčení. Z grafu 5.3 vidíme, že výsledky linearizovaného a nelinearizovaného modelu jsou totožné. To je způsobeno tím, že jsme pohybovali pouze 2. zrcadlem a na zrcadlo dopadal svazek s velmi malou vstupní výchylkou. Při nenulových výchylkách svazku, který dopadá na 2. zrcadlo, by byl rozdíl znatelný (viz graf 5.4 pro model s přesnou polohou osy otáčení).

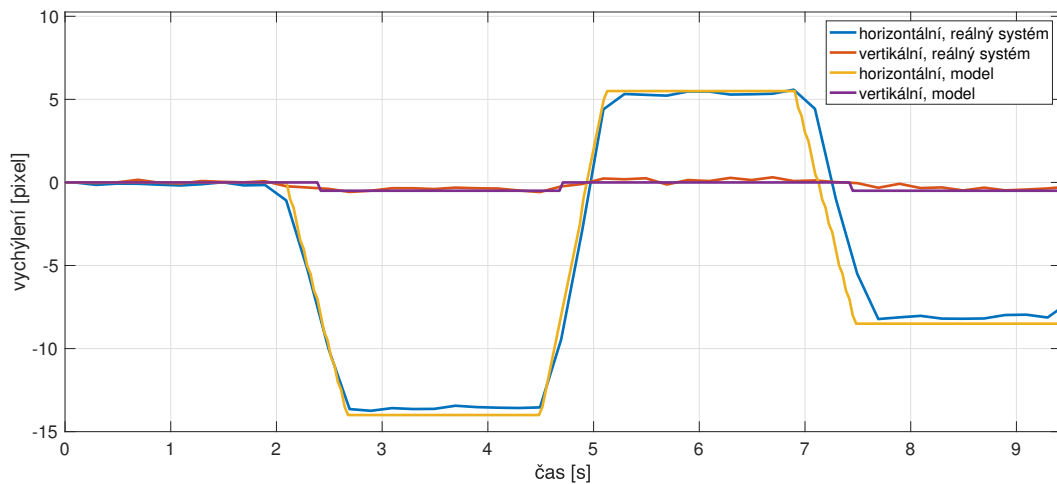


Obrázek 5.3. Porovnání reálné laboratorní soustavy, nelineárního modelu, linearizovaného modelu a modelu s přesnou osou otáčení. Porovnání je pomocí závislosti výchylky na čase. Pohnutí 2. zrcadlem v čase $t = 1.2$ s: 10000 kroků, v $t = 9.2$ s: -10000 kroků, $t = 18.5$ s: -10000 kroků, $t = 26.5$ s: 10000 kroků.



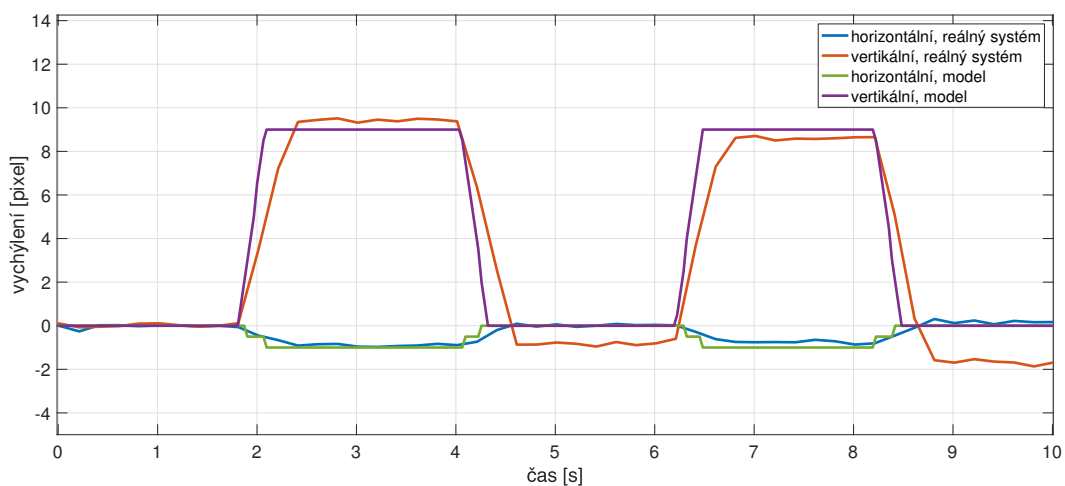
Obrázek 5.4. Porovnání nelineárního modelu, linearizovaného modelu a modelu s přesnější polohou otáčení laboratorní soustavy. Porovnání je pomocí závislosti výchylky na čase. Pohyb 1. zrcadlem v čase $t = 0$ s: 1000 kroků, 2. zrcadlem v čase $t = 2$ s: 5000 kroků.

V grafu 5.4 vidíme porovnání pro linearizovaný model, nelinearizovaný model a model s přesnou osou otáčení při pohybu oběma zrcadly. Je patrné, že osa otáčení, která je umístěná mimo střed zrcadla, velice ovlivňuje polohu svazku. To koresponduje s chováním pozorovaným při experimentu s laboratorní soustavou v současné konfiguraci. Toto chování nijak nepostihuje linearizovaný model a nelinearizovaný model jen minimálně. Porovnání úhlů není potřebné, neboť všechny modely mají stejné rovnice. Model s přesnou polohou osy otáčení nejlépe popisuje reálný systém.



Obrázek 5.5. Porovnání modelu a lab. soustavy. Graf ukazující ovlivnění vertikální osy daleké zóny horizontálním motorem. Závislost výchylky na čase. Buzení: 2. zrcadlo motor horizontální $t = 2.1$ s: -1000 kroků, $t = 4.5$ s: 1000 kroků, $t = 6.8$ s: -1000 kroků.

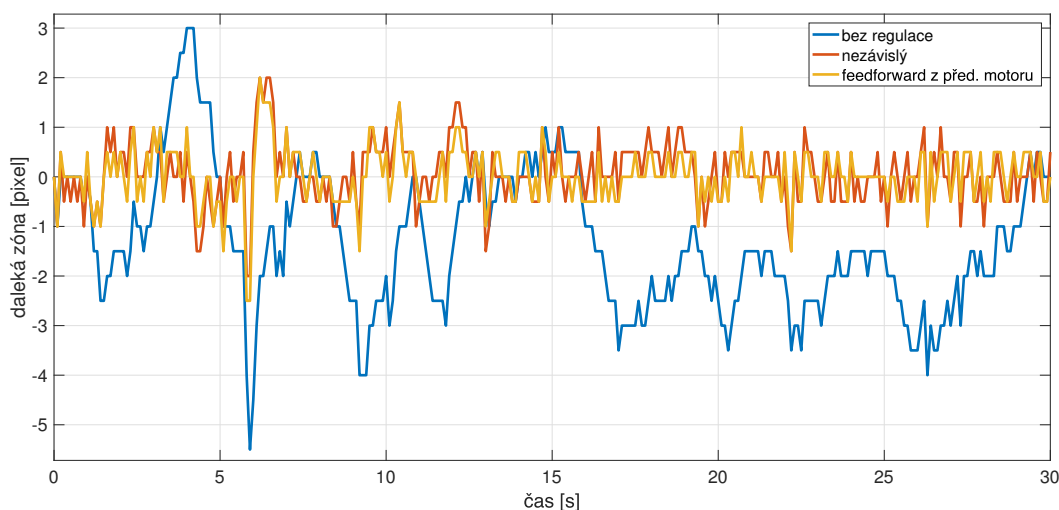
Dále porovnáme data z reálného systému s modelem implementujícím ovlivňování opačné osy. Graf 5.5 ukazuje, jak je ovlivněna vertikální osa, když hýbneme horizontálním motorem. Při kladném vytočení šroubu horizontálního motoru se zrcadlo natočilo mírně i ve vertikálním kladném směru.



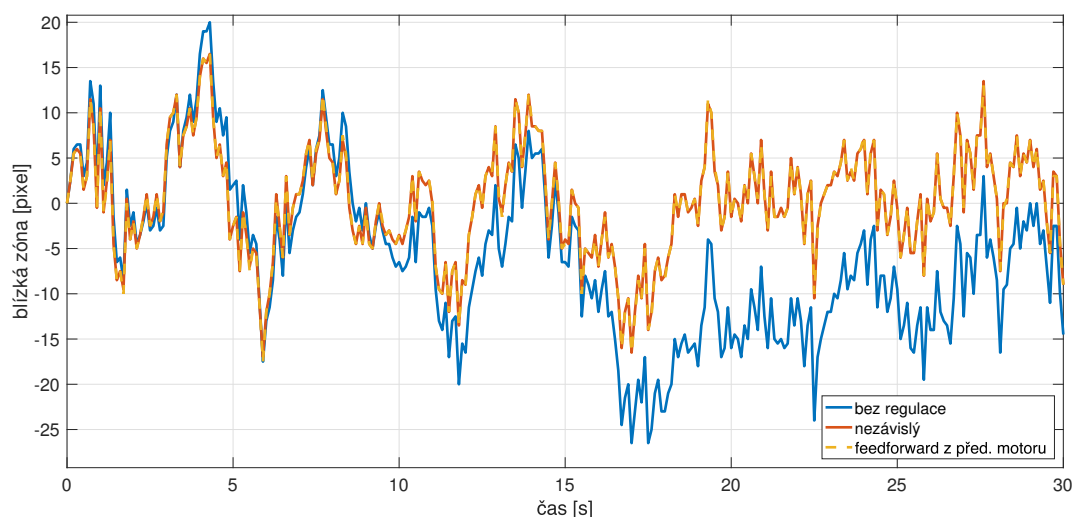
Obrázek 5.6. Porovnání modelu a lab. soustavy. Graf ukazující ovlivnění horizontální osy daleké zóny vertikálním motorem. Závislost výchylky na čase. Buzení: 2. zrcadlo motor horizontální $t = 1.8$ s: 700 kroků, $t = 4$ s: -700 kroků, $t = 6.4$ s: 700 kroků, $t = 8.4$ s: -700 kroků.

Graf 5.6 ukazuje ovlivnění horizontální osy vertikálním motorem. V tomto případě je ovlivnění větší než u opačného jevu. Můžeme pozorovat nesymetrii ve vertikálním směru. Tu jsme ale při návrhu modelu motoru zanedbali. Při kladném pohybu vertikálního motoru můžeme pozorovat mírné natočení opačné osy v záporném směru.

Na závěr porovnáme také navrhnuté regulátory. Jako rušení jsme zvolili rušení naměřené na třetím uzlu z kapitoly 3. Graf 5.7 porovná daleké zóny regulátoru pro laboratorní soustavu. Blízké zóny jsou v grafu 5.8.



Obrázek 5.7. Porovnání dalekých zón regulátorů pro laboratorní systém—bez regulace, dva nezávislé regulátory, regulátor s feedforwardem z předchozího motoru.

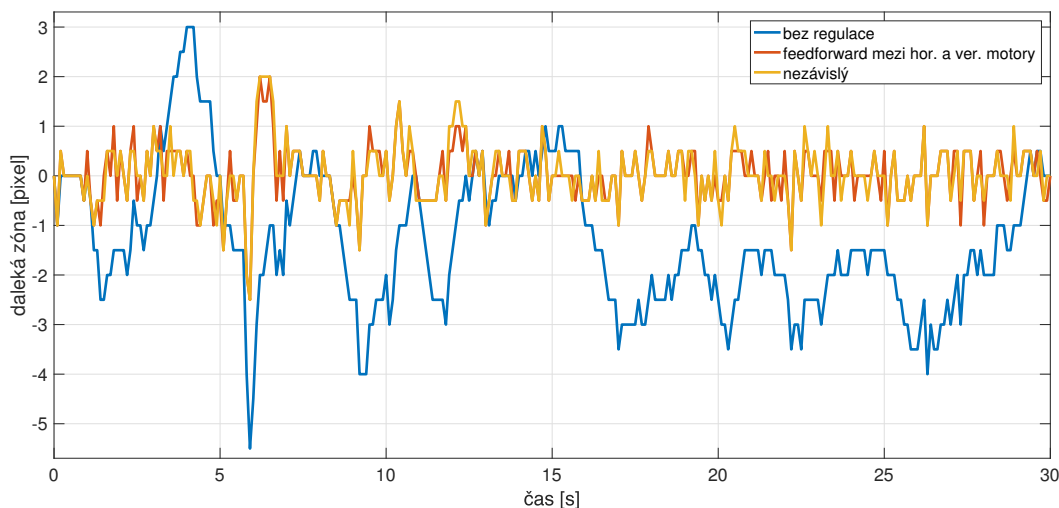


Obrázek 5.8. Porovnání blízkých zón regulátorů pro laboratorní systém—bez regulace, dva nezávislé regulátory, regulátor s feedforwardem z předchozího motoru.

Z blízkých zón vidíme, že rozdíly mezi regulátory jsou minimální. Regulace není nijak velká, to je způsobeno tím, že jsme omezili saturaci prvního motoru za účelem snížení

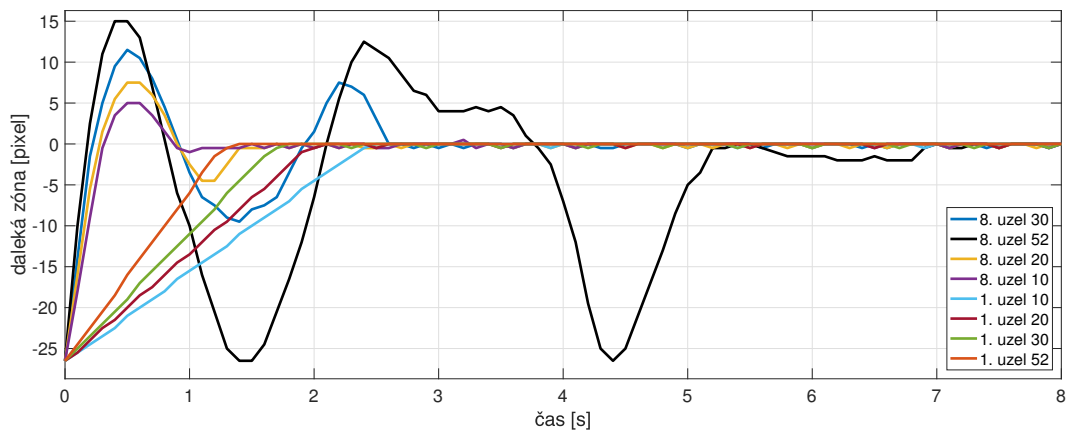
odchylky ve směru. Priorita regulace polohy není vyšší jak priorita směru, navíc odchylky jsou maximálně 0.07 mm, proto je stávající regulace polohy dostačující. Použitím feedforwardu z předchozího motoru dochází ke snížení odchylky směru více než u nezávislých dvou regulátorů. Regulátory dokáží dodržet limitní hodnotu $100 \mu\text{rad}$. Překmitý do opačného směru než bez regulace je způsobeno kombinací regulace směru a polohy a pohybem obou motorů, kdy motory ovlivňují obě veličiny ovlivňují se navzájem.

Horizontální daleké zóny regulátorů pro 3D model laboratorní soustavy vidíme v grafu 5.9. Můžeme pozorovat, že rozdíl není větší jak 0.5 pixelu. Rozdíl mezi těmito regulátory je velmi malý, protože ovlivňování opačné osy je velmi malé. Daleké zóny ve vertikálním směru si jsou též velmi podobné, protože modifikace regulátoru spočívala v předávání informace z vertikální do horizontální osy. Tento regulátor sice počítá s ovlivněním druhé osy, nicméně zlepšení regulace je minimální.

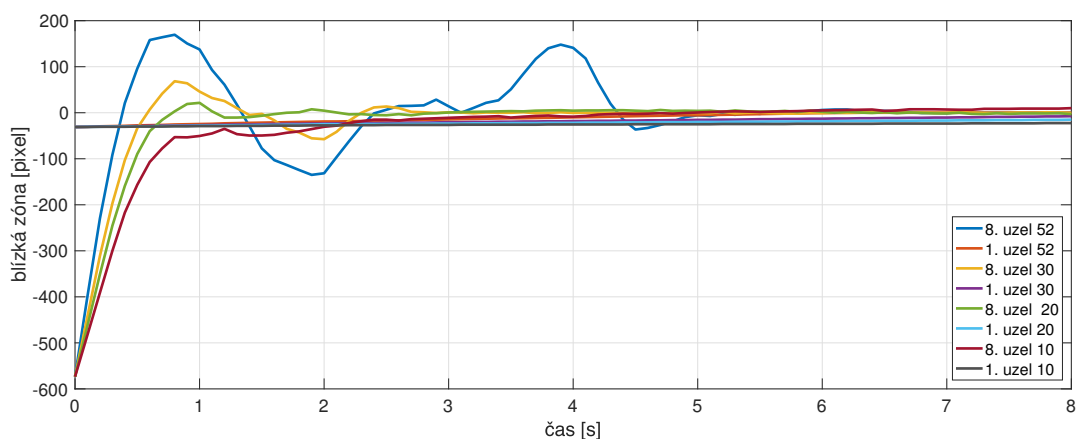


Obrázek 5.9. Porovnání horizontálních dalekých zón regulátorů pro 3D laboratorní systém—bez regulace, dva nezávislé regulátory (pro každou osu zvlášť), regulátor s feedforwardem mezi horizontálními a vertikálními motory.

Porovnání regulátoru s feedforwardem z před. uzlu pro rozdílné saturace prvního motoru je v grafu 5.10 a 5.11. Vidíme, že při volbě saturace ± 52 vyvolává první motor rychlé změny směru, na které nedokážou další motory reagovat a tím vzniká v dalších uzlech odchylky v poloze. Se snižující saturací na ± 30 a ± 20 je snižuje překmit a doba ustálení obou veličin, protože první motor nevytváří tak rychlé změny a ostatní motory více stíhají změnu směru korigovat. S ohledem na rychlost regulace polohy je saturace ± 10 příliš nízká. Nejvhodnější je použití hodnoty ± 20 .

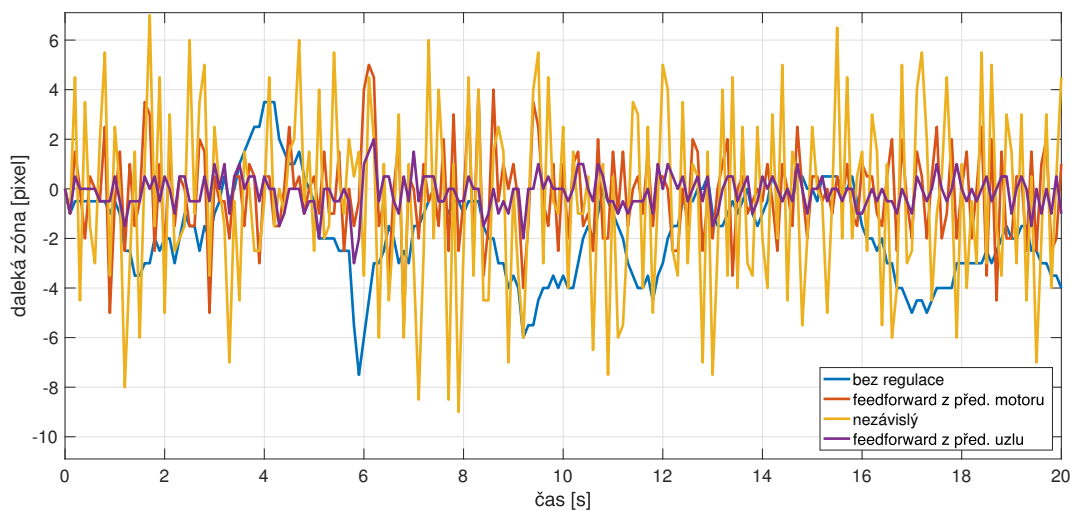


Obrázek 5.10. Porovnání regulátorů s rozdílnou hodnotou saturace pomocí odezvy dalekých zón kaskády na jednotkový skok $\alpha_{in}=0.001$. Porovnání saturace $\pm 52, \pm 30, \pm 20$ a ± 10 pro 1. a 8. uzel.

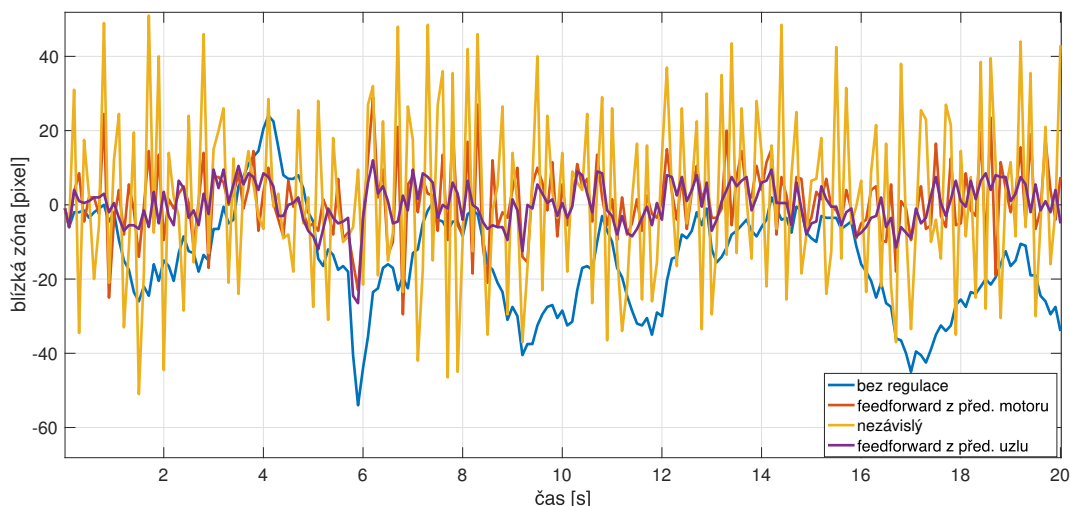


Obrázek 5.11. Porovnání regulátorů s rozdílnou hodnotou saturace pomocí odezvy blízkých zón kaskády na jednotkový skok $\alpha_{in}=0.001$. Porovnání saturace $\pm 52, \pm 30, \pm 20$ a ± 10 pro 1. a 8. uzel.

Nakonec porovnáme regulátory pro kaskádu. Graf 5.12 ukazuje porovnání dalekých zón v posledním uzlu. Graf 5.13 je pro blízké zóny. Rušení bylo přidáno do 1., 3. a 6. uzlu. Můžeme vidět, že nezávislé regulátory mají mnohem horší výsledek oproti zbylým regulátorům. Dokonce je výchylka horší než bez regulace. V posledním uzlu byly odchylky směru až $300 \mu\text{rad}$ a poloha až 0.4 mm . Regulátory s feedforwardem z předchozího motoru již vykazují lepší výsledek, nicméně odchylky v posledním uzlu jsou až $200 \mu\text{rad}$ a 0.2 mm . Nejlépe vychází regulátor s feedforwardem z předchozího uzlu. Odchylky na posledním uzlu byly do $60 \mu\text{rad}$ a 0.1 mm . V některých místech můžeme pozorovat, že u feedforwardu z před. uzlu dochází k menším překmitům v okolí pracovního bodu oproti ostatním regulátorům. Překmity jsou způsobené tím, že motory neznají reakci předchozích motorů.

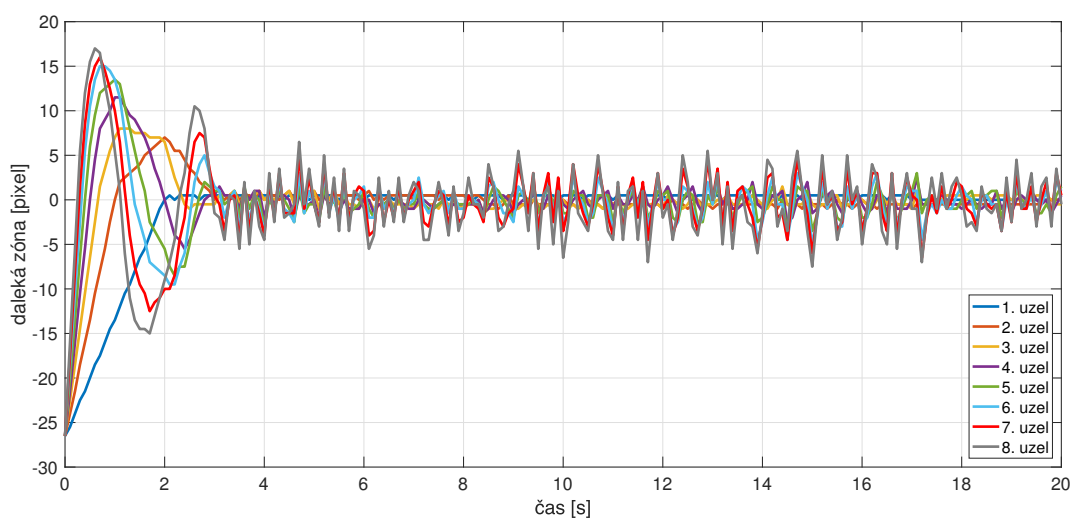


Obrázek 5.12. Porovnání dalekých zón regulátorů pro kaskádu—bez regulace, dva nezávislé regulátory na jeden uzel, regulátor s feedforwardem z předchozího motoru, regulátor s feedforwardem z předchozího uzlu.

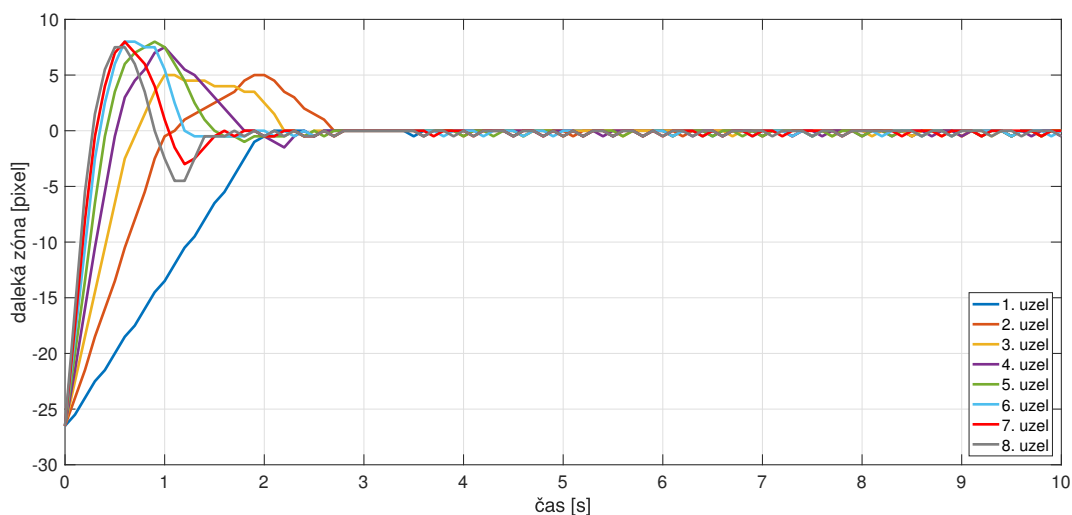


Obrázek 5.13. Porovnání blízkých zón regulátorů pro kaskádu—bez regulace, dva nezávislé regulátory na jeden uzel, regulátor s feedforwardem z předchozího motoru, regulátor s feedforwardem z předchozího uzlu.

Abychom demonstrovali, jak je účinné využití feedforwardu. Porovnáme odezvy na jednotkový skok. Jednotkový skok zvolíme úhel 0.001 na začátku celé kaskády. Reakci dalekých zón s nezávislými regulátory vidíme na grafu 5.14. Porovnat ho můžeme s grafem 5.15, který je pro regulátor s feedforwardem z předchozího uzlu. Můžeme vidět, že feedforwardem snížíme kmitání a dobu ustálení. Amplituda kmitů je také nižší. Na grafech můžeme pozorovat překmity i v regulátoru s feedforwardem z předchozího uzlu. Tyto překmity jsou způsobeny tím, že v dalších uzlech jsou velké reakce všech předchozích uzlů, na které motory nestíhají reagovat. Jemné kmitání u regulátoru s feedforwardem je způsobeno dlouhou dobou ustálení polohy v důsledku nízké saturace prvních motorů.



Obrázek 5.14. Odezva dalekých zón kaskády na jednotkový skok $\alpha_{in}=0.001$ pro nezávislé regulátory.



Obrázek 5.15. Odezva dalekých zón kaskády na jednotkový skok $\alpha_{in}=0.001$ pro regulátor s feedforwardem z před. uzlu.

U kaskády u prvních motorů byly akční zásahy převážně na hranici saturace. To je díky nízké hodnotě saturace ± 20 . Neznámá to, že by odchylka ve směru byla vyšší než u vyšší saturace, protože druhý motor následně více stíhá korigovat i změny způsobené prvním motorem a díky malé směrové odchylce je pak i odchylka polohy menší. Akční zásahy druhých motorů v uzlu jsou zřídka na hranici saturace. Tedy stíhají korigovat směr do ± 52 kroků pro jeden pulz. Snížením saturace prvních motorů není zapotřebí větších akčních zásahů druhých motorů a tím není zapotřebí zvyšovat dobu akčních zásahů. Pokud bychom chtěli snížit odchylku polohy, museli bychom zvýšit saturaci prvních motorů a následně navýšit dobu akčních zásahů druhých motorů, například přidáním driverů nebo zrychlením motorů.

Kapitola 6

Závěr

Cílem této Bakalářské práce byla analýza možností a omezení řídicího systému pro stabilizaci laserového svazku pomocí kaskády motorizovaných zrcadel. Důvod zavedení stabilizace byl rušivý vliv teplotního driftu.

Popsal jsem problematiku průchodu svazku a důvod zavedení stabilizace. Podrobně jsem analyzoval optickou soustavu uzlu a její hlavní části (motor, stojan, driver, kamera). Nastínil jsem softwarové omezení. Z experimentu jsem identifikoval silnou nesymetrii motoru a vzájemné ovlivňování os stojanu. Vytvořil jsem matematické modely motoru. Výsledný model motoru byl v porovnání s reálným motorem velmi podobný. Vytvořil jsem matematický model optických prvků volného šíření prostoru a odrazu na zrcadle. Všechny matematické modely jsem následně implementoval v prostředí Simulink. Zjistil jsem, že nejvhodnější model zrcadla je model s přesnou polohou osy otáčení. Model jsem rozšířil na systém šíření svazku ve 3D. Nejvhodnější byl model založený na vzájemném ovlivňování os lineárním přírůstkem, který se velmi podobal reálnému systému. Sestavil jsem zjednodušený model laseru Bivoj. Dále jsem uskutečnil měření rušivých vlivů laseru.

Stabilizaci jsem navrhl s ohledem na vyšší prioritu regulace směru oproti poloze svazku. Nejvhodnější regulátor byl P regulátor, který jsem omezil saturací. První motor jsem stabilizoval pomocí dat z blízké zóny, druhý motor pomocí dat z daleké zóny. Regulátor jsem navrhl tak, aby reagoval na rozdílné chování motorů ve směrech. Z důvodu ovlivňování všech následujících prvků jsem musel silně omezit saturaci prvních motorů v uzlech a využít feedforward. Pro laboratorní soustavu byl nejvhodnější regulátor s feedforwardem z předchozího motoru. Feedforward mezi horizontální a vertikální osou nepodával výraznější výsledky oproti druhému regulátoru. Nejvhodnější byly dva nezávislé regulátory.

Pro regulaci kaskády jsem zhodnotil jako nejlepší souběžný pohyb všech horizontálních nebo jen vertikálních motorů a využil jsem předávání informace o změnách odchylky směru a polohy svazku vyvolané daným motorem všem následujícím motorům. Zde byl feedforward z předchozího uzlu dokonce nezbytný, aby motory dokázaly reagovat na rušivé vlivy a zároveň na změny předchozích motorů. Ukázal jsem, že je mnohem důležitější stabilizovat směr, než polohu. Nejzásadnější pro regulaci bylo zavedení feedforwardu a priorita regulace směru, tedy snížení saturace prvního motoru.

Cíle této Bakalářské práce jsem naplnil. Navrhl jsem řídicí algoritmus pro stabilizaci laserového svazku a vybral optimální řešení.



Literatura

- [1] P. D. Mason, M. Divoky, K. Ertel, Jan Pilar, T. J. Butcher, M. Hanus, S. Banerjee, P. J. Phillips, J. M. Smith, M. De Vido, A. Lucianetti, C. Hernandez-Gomez, C. Edwards, T. Mocek and J. L. Collier, Kilowatt average power 100 J-level diode pumped solid state laser, *Optica* 4, 4 (2017).
- [2] NOVÝ, Martin. Návrh a realizace prototypovacího řídicího systému pro stabilizaci laserového paprsku. Praha, 2018. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Zdeněk Hurák Ph.D.
- [3] MALÝ, Petr. Optika. Praha: Karolinum, 2008. ISBN 9788024613420.
- [4] RICHARD C. DORF a ROBERT H. BISHOP. Modern control systems. 11th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2008. ISBN 0132270285.
- [5] Robert Boge, Jakub Horáček, et al. 'Active cavity stabilization for high energy thin disk regenerative amplifier', *Proc. SPIE 10238, High-Power, High-Energy, and High-Intensity Laser Technology III*, 102380I (11 May 2017); doi: 10.1117/12.2270607; Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2270607>
- [6] ORTEGA, M.G., J. ARACIL, F. GORDILLO a F.R. RUBIO. Bifurcation analysis of a feedback system with dead zone and saturation. *IEEE Control Systems Magazine* [online]. 20(4), 91-101 [cit. 2018-05-18]. DOI: 10.1109/37.856182. ISSN 02721708. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/856182/>

Příloha A

Zkratky a symboly

A.1 Zkratky

YAG	yttrito-hlinitý granát
FF	Z anglického sousloví Far Field, neboli daleká zóna.
NF	Z anglického sousloví Near Field, neboli blízká zóna.
AV ČR, v.v.i.	Akademie Věd České republiky, veřejná výzkumná instituce.
P	Proporcionální regulátor.
PI	Proporcionálně integrační regulátor.
PD	Proporcionálně derivační regulátor.
PID	Regulátor s proporcionální, integrační a derivační složkou.
EPICS	Experimental Physics and Industrial Control System, systém používaný k ovládání laseru.
FE	Front End, část laseru.
CAM	Kamera.
TJ	Ten Joule, 10 J zesilovač.
TCP	Protokol TCP, Transmission Control Protocol, protokol používaný ve čtvrté vrstvě Opne System Interconnection modelu.
tab	Tabulátor.

A.2 Symboly

l	Vzdálenost kamery a zrcadla.
p	Velikost jednoho pixelu.
n	Počet kroků.
φ	Natočení motoru.
F	Přenosová funkce.
s	Komplexní frekvence.
k	Rychlost motoru.
A	Velikost kroku motoru.
$DCgain$	Zesílení systému v ustáleném stavu.
t	Čas.
$y(t)$	Vstupní signál.
$u(t)$	Výstupní signál.
D_{in}	Vstupní poloha.
α_{in}	Vstupní úhel.
D_{out}	Výstupní poloha.
α_{out}	Výstupní směr.
d	Vzdálenost vstupní a výstupní roviny pro model volného šíření prostorem.

α_{PB}	Pracovní bod úhlu svazku α .
φ_{PB}	Pracovní bod úhlu natočení motoru φ .
D_{PB}	Pracovní bod polohy svazku D .
x	Poloha x v souřadnicové soustavě Oxy.
y	Poloha y v souřadnicové soustavě Oxy.
x_s	Poloha x svazku v souřadnicové soustavě Oxy.
y_s	Poloha y svazku v souřadnicové soustavě Oxy.
x_z	Poloha x zrcadla v souřadnicové soustavě Oxy.
y_z	Poloha y zrcadla v souřadnicové soustavě Oxy.
x_0	Poloha x bodu dotyku svazku a zrcadla v souřadnicové soustavě Oxy.
y_0	Poloha y bodu dotyku svazku a zrcadla v souřadnicové soustavě Oxy.
O_x	Poloha x osy otáčení v souřadnicové soustavě Oxy.
O_y	Poloha y osy otáčení v souřadnicové soustavě Oxy.
f	Ohnisková vzdálenost.
θ	Úhel svazku.
x_{FF}	Horizontální poloha svazku na kameře.
y_{FF}	Vertikální poloha svazku na kameře.
M_{XY}	Koeficient vzájemného ovlivnění vertikálního motoru horizontálním motorem.
M_{YX}	Koeficient vzájemného ovlivnění horizontálního motoru vertikálním motorem.
φ_{finX}	Výsledný horizontální úhel φ .
φ_{finY}	Výsledný vertikální úhel φ .
φ_X	Horizontální úhel φ .
φ_Y	Vertikální úhel φ .
$DCgain_{x_{FF}}$	Zesílení daleké zóny v horizontální poloze.
$DCgain_{y_{FF}}$	Zesílení daleké zóny ve vertikální poloze.
K_P	Hodnota proporcionální složky regulátoru.
K_I	Hodnota integrační složky regulátoru.
K_D	Hodnota derivační složky regulátoru.
D_{fin}	Výsledná poloha svazku.
θ_{fin}	Výsledný úhel svazku.
x_{CAM}	Poloha svazku na kameře.
$DCgain_{M1FF}$	Zesílení daleké zóny prvním motorem.
$DCgain_{M2FF}$	Zesílení daleké zóny druhým motorem.
$DCgain_{M1NF}$	Zesílení blízké zóny prvním motorem.
π	Ludolfovo číslo.
Δ	Rozdíl hodnoty.

Příloha B

Soubory, které jsou součástí Bakalářské práce

<code>modelMotoru.slx</code>	Soubor obsahující model horizontálního motoru a vertikálního motoru.
<code>MirrorSolver.m</code>	Soubor s kódem pro výpočet polohy a úhlu svazku při odrazu na zrcadle ve 3D.
<code>ruseni.mat</code>	Soubor s daty reprezentující rušení systému v podobě polohy a směru svazku. Data jsou pro 3 uzly, horizontální a vertikální směry.
<code>uzelHorLin.slx,</code> <code>uzelVerLin.slx</code>	Linearizovaný model horizontálního a vertikálního uzlu.
<code>uzelHor.slx,</code> <code>uzelVer.slx</code>	Nelinearizovaný model horizontálního a vertikálního uzlu.
<code>uzelOsaDoleHor.slx,</code> <code>uzelOsaDoleVer.slx</code>	Model horizontálního a vertikálního uzlu s osou otáčení mimo střed zrcadla.
<code>LM.slx,</code> <code>LMLin.slx,</code> <code>LMOsaDole.slx</code>	Model horizontální lab. soustavy—nelinearizovaný, linearizovaný, s osou otáčení mimo střed zrcadla.
<code>LMTriDNezavisly.slx,</code> <code>LMvzajOvlivnovani.slx,</code> <code>LMTriDsoustavaRci.slx</code>	Model 3D laboratorní soustavy—bez ovlivňování opačných os, ovlivňování os lineárním přírůstkem, pomocí soustavy rovnic.
<code>regLMnez.slx</code> <code>regLMff.slx,</code>	Regulátor pro 2D laboratorní soustavu—dva nezávislé regulátory, regulátor s feedforwardem z předchozího motoru.
<code>regLMTriD.slx</code> <code>regLMTriDFFhorVer.slx,</code>	Regulátor pro 3D laboratorní soustavu—dva nezávislé regulátory, regulátor s feedforwardem mezi hor. a ver. motorem.
<code>BivojFFdalsimUzlum.slx</code> <code>BivojFFzPredMot.slx</code> <code>regLMTriDFFhorVer.slx,</code>	Regulátor pro kaskádu uzlů—dva nezávislé regulátory pro každý uzel, regulátor s feedforwardem z před. motoru pro každý uzel, regulátor s feedforwardem z před. uzlu.