

**Moderní řízení
pohybových stavů
mechanické soustavy
průmyslového robota
prostřednictvím
elektromechanických
akčních členů**

Ing. Jiří Zátopek, Ph.D.

Teze disertační práce



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

Teze dizertační práce

Moderní řízení pohybových stavů mechanické soustavy průmyslového robota prostřednictvím elektromechanických akčních členů

Modern motion control methods of an industrial robot
mechanical system through electromechanical actuators

Autor: **Ing. Jiří Zátopek, Ph.D.**

Studijní program: Inženýrská informatika / P3902

Studijní obor: Automatické řízení a informatika / 3902V037

Školitel: doc. RNDr. Ing. Zdeněk Úředníček, CSc.

Oponenti: prof. Ing. Radim Farana, CSc., FEng.

prof. Dr. Ing. Petr Novák

doc. Ing. Pavol Makyš, Ph.D.

Zlín, Prosinec 2022

© Ing. Jiří Zátopek, Ph.D.

Vydala **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně** v edici **Doctoral Thesis Summary** v roce 2022.

Klíčová slova: *kulička na nakloněné rovině, řízení pohybu, kinematika, dynamika, sériový průmyslový robot, zpracování obrazu, PID, výpočet momentů*

Key words: *ball and plate, motion control, kinematics, dynamics, serial industrial robot, image processing, PID, computed torque*

Plná verze dizertační práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

ISBN 978-80-7678-140-5

ABSTRAKT

Tato dizertační práce se primárně zabývá porovnáním moderních neautonomních metod řízení pohybu, se standardní, léty prověřenou autonomní regulační strukturou, a to na reálném mechatronickém/robotickém systému s dynamickými projevy odpovídajícími chování sériového průmyslového robota antropomorfního typu. V první části práce jsou rozebírány možné typové struktury systému, je vytvořen kompletní konstrukční CAD model a vybráno elektrotechnické vybavení. Dále je popisována výroba první verze prototypu a představeno finální řešení, které zahrnuje vlastní výrobu, sestavení a zprovoznění celého systému. Následující pasáž je věnována softwarové aplikaci, která obsahuje ukázkou její struktury s popisem tříd, funkcí, způsobem vzájemné komunikace mezi řídicí a výkonovou částí zařízení a grafickým uživatelským rozhraním. Nezanedbatelná část práce je věnována zpracování obrazu z kamery, kde je detailně popsán celý postup vyhodnocení snímku včetně ukázek zdrojového kódu. Konečná fáze kamerového vyhodnocení využívá komplexní kinematické transformace, kterým je věnována další kapitola. Tyto transformace používají k odvození obecné matice homogenní transformace mimo jiného i CAD model, jehož části jsou využívány v podstatě v celé práci, a výsledky jsou aplikované jak na obrazové vyhodnocení, tak při návrhu zákona řízení. Před samotným odvozením regulátorů je sestaven matematický a fyzikální model, z nichž první zmiňovaný slouží k návrhu řízení a pro základní analýzu chování, druhý uvedený zase k simulacím reálného chování systému, ověření správnosti odvození matematického modelu, ladění regulátoru, ale i např. k výběru akčních členů. Oba modely jsou součástí největší kapitoly, zabývající se řízením pohybu. Tato kapitola popisuje regulaci nakloněné roviny a kuličky, od nastavení proudové smyčky, přes návrh kaskádní P(I)(D) regulace, až po odvození a implementaci jedné z moderních metod řízení pohybu - výpočtu točivých momentů. Všechny naměřené regulační pochody jsou statisticky vyhodnoceny a průběhy vykresleny v přehledných grafech. V poslední části práce je stanoveno celkem 5 kritérií posuzujících kvalitu regulace, na jejichž základě jsou porovnány oba přístupy k řízení pohybu. Zvláštní důraz je po celou dobu řešení kladen na ověření všech dílčích cílů na reálném robotickém systému.

ABSTRACT

This doctoral thesis primarily focuses on comparing modern non-autonomous motion control methods with a standard, years-proven autonomous control structure on a real-build mechatronic/robotic system with dynamics appropriate to the industrial serial robot behaviour of an anthropomorphic type. In the first part of the work, the possible kinematic structures of the system are analyzed, a complete structural CAD model is created, and the electrical equipment is selected. Next, the prototype fabrication is introduced, and the final solution is presented, which includes the construction, assembly and commissioning of the entire system. The following section is devoted to the software application, which includes a presentation of its structure with a description of classes and functions, the method of mutual communication between the control and power parts of the device, and a graphical user interface. A comprehensive part of the work contains camera image processing, where the entire image evaluation process is described in detail, including source code samples. Camera evaluation uses complex kinematic transformations covered in the next chapter. These transformations use, among others, a CAD model to derive the general transformation matrix, parts of which are used essentially throughout the work, and the results are applied both to image evaluation and to the design of the control law. Before the controllers' derivation, a mathematical and physical model was created. The first mentioned is for the design of the controllers and the fundamental demeanour analysis. The second is for behaviour simulations of the existing system, the mathematical model correctness verification, tuning of the controller, and, for example, the selection of actuators. Both models are part of the most significant chapter dealing with motion control. This chapter describes the inclined plane and ball position regulation, from the current loop setup, through the P(I)(D) cascade regulation design, to the derivation and implementation of one of the modern motion control methods - the computed torques. All measured control processes are statistically evaluated and presented in clear graphs. In the last part of the thesis, five criteria assessing the quality of regulation are established, based on which both motion control approaches are compared. Particular attention is placed on verifying all sub-goals on a real-build robotic system.

OBSAH

1	ÚVOD	7
2	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	8
2.1	Řízení pohybu	8
2.2	Snímání stavových veličin	8
2.3	Simulace vs realita	9
2.4	Sériový prům. robot vs Kulička na nakloněné rovině	10
3	CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE	11
4	ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ	12
4.1	Návrh typové struktury a CAD model	12
4.2	Prototyp	14
4.3	Softwarová aplikace	16
4.4	Zpracování obrazu	18
4.5	Kinematické transformace	19
4.6	Řízení pohybu	21
4.6.1	<i>Matematický model</i>	21
4.6.2	<i>Fyzikální model</i>	23
4.6.3	<i>Kaskádní $P(I)(D)$ regulace nakloněné roviny</i>	25
4.6.4	<i>Regulace polohy/rychlosti kuličky</i>	28
4.6.5	<i>Metoda výpočtu točivých momentů (computed torque)</i>	29
4.6.6	<i>Porovnání regulátorů náklonu roviny</i>	32
4.6.7	<i>Porovnání regulátorů při regulaci kuličky</i>	34
4.7	Závěrečné vyhodnocení	35
4.7.1	<i>Porovnání z pohledu regulační odchylky</i>	35
4.7.2	<i>Porovnání z pohledu rychlosti/doby regulace</i>	36
4.7.3	<i>Porovnání z pohledu nároků na elektrickou energii</i>	36
4.7.4	<i>Porovnání chování reálného a fyzikálního modelu</i>	37
4.7.5	<i>Porovnání mechanického zatížení systému</i>	38
4.7.6	<i>Shrnutí</i>	39

5	HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE	40
5.1	Reálně sestavená robotická struktura	40
5.2	CAD model	40
5.3	Matematický model	41
5.4	Fyzikální model	41
5.5	Řídicí aplikace s GUI	41
5.6	Strojové vidění	42
5.7	Regulace roviny kaskádou P(I)(D) regulátorů	42
5.8	Regulace roviny výpočtem točivých momentů	42
5.9	Regulace kuličky	43
5.10	Závěrečné vyhodnocení a porovnání	43
6	PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI	44
7	ZÁVĚR	45
8	ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA	47
	POUŽITÁ LITERATURA A ZDROJE	50
	PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA	58
	SEZNAM OBRÁZKŮ	60
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	61

1 ÚVOD

Řízení pohybu tuhých těles vázaných mezi sebou je ve své podstatě vždy nelineární záležitostí - ať už kvůli tzv. tvrdým nelinearitám (tření, vůle, saturace), nebo kvůli odstředivé/dostředivé a Coriolisově síle apod. U složitějších struktur, zejména rychle se měnících ve stavovém prostoru, není vždy možné provést linearizaci, která by umožnila určit stabilitu a požadovanou efektivitu regulace. Řešení spočívá v získání co možná nejpřesnějšího nelineárního modelu. S tímto modelem je možné pomocí různých účinných nástrojů dále pracovat a pro návrh nelineárního zákona řízení je nutné jej znát.

Samotné řízení bude probíhat na navržené a reálně sestavené sériové robotické struktuře se čtyřmi zobecněnými stupni volnosti, z nichž dva jsou přímo říditelné. Popisovaný model sestává z nakloněné roviny řízené dvěma sériově uloženými elektromotory, objektem zájmu je kulička, která se po této rovině odvaluje (ne vždy ideálně) a rozšiřuje model o další dva nepřímo řízené zobecněné stupně volnosti. Uspořádání modelu bude navrženo s důrazem na nezanedbatelný vliv kuličky, „měkkých“ nelinearit a vzájemné působení jednotlivých aktuátorů v celkovém chování systému při dynamických pohybech.

Obvyklý a nejjednodušší způsob řízení pohybu je použití kaskádních PID regulátorů na autonomní řízení momentu, rychlosti a polohy jednotlivých kloubů. Při návrhu tohoto způsobu regulace jsou zanedbávány změny koeficientů matice setrvačnosti vlivem pohybu soustavy, a vzájemné silové působení mezi jednotlivými částmi systému. Ty potom musí autonomní regulátory kompenzovat svou robustností a takto navržený systém nezvládá při větších rychlostech pohybu přesné sledování trajektorií. To je neefektivní, vede k výkonovému naddimenzování akčních členů a pro kvalitní řízení pohybu s rychle se měnícími trajektoriemi vede i k předimenzování mechanických konstrukcí.

Jedním z řešení uvedeného problému jsou metody regulace založené na znalosti nelineárního dynamického modelu řízených soustav - metody pro řízení systémů s více vstupy a více výstupy. Také jsou k dispozici pokročilé metody linearizace, které se zcela liší od lineární aproximace dynamiky ve stacionárním (pracovním) bodě.

Přínosem této práce je tedy možnost využití odlišného způsobu řízení, což by mohlo vést k optimalizovanému návrhu robotických struktur.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Se stále rostoucím výpočetním výkonem počítačů a jejich klesající cenou, je možné použít pro řízení pohybu v reálném čase metody, které byly dříve aplikovatelné pouze teoreticky, simulačně, nebo s nutností offline výpočtu alespoň části regulátoru. V současné době je s využitím hardwarových prostředků v řádech tisícikorun reálně implementovat v jednom minipočítači velmi výpočetně složitý algoritmus řízení, komunikační rozhraní, zpracování obrazu z kamery, grafickou uživatelskou aplikaci s online parametrizací celého systému, a to vše vykonávat rádoby současně a s opakovací frekvencí regulace nad 1 kHz. Tato práce si klade za cíl vytvořit spojující článek mezi teoretickým návrhem, podpořeným simulačními experimenty, a praktickou realizací, použitelnou v reálných podmínkách.

2.1 Řízení pohybu

Metod řízení pohybu je nepřehledné množství, a speciálně pro řešený systém „Ball & Plate“ - Kulička na nakloněné rovině, jsou mnohé z nich publikovány. Mezi nejznámější a na tomto systému ověřené patří např. PID a fuzzy regulace [35, 25, 12, 31], sliding-mode (regulace v klouzavém režimu) [35, 23, 40, 25, 8, 31, 36], computed-torque (výpočet momentů) [42], LQR (lineární kvadratický regulátor) [25], adaptivní a prediktivní metody regulace [49, 23, 37], zpětnovazební linearizace [9], neuronové sítě [45, 38] a mnoho dalších. Většina publikací také zahrnuje vzájemné porovnání různých řídicích strategií [13, 34, 42, 1], z kterých je možné vyvodit vhodnost jejich použití pro danou mechanickou strukturu. Jako aktuátory se pro běžné testovací aplikace využívají stejnosměrné a krokové motory, pro precizní řízení PMSM, ale i různé speciální polohovací mechanismy v magnetickém závěsu [27].

2.2 Snímání stavových veličin

Snímání stavových veličin aktuátorů je řešeno ve všech případech senzory úhlu natočení, které jsou většinou již součástí samotného pohonu. Ke zjištění polohy objektu bez přímé kinematické vazby se systémem (pozice kuličky na nakloněné rovině) je však nutné využít zcela jiných metod. Dostupné zdroje představují

zpravidla 3 možné způsoby, kterými řeší tento problém.

Mezi první a ve své podstatě nejprimitivnější metodu patří kontaktní snímání pomocí odporové/kapacitní dotykové vrstvy [25, 15, 8, 1, 31]. Tento způsob má mnohá omezení a úskalí, ale dosahuje vysokých vzorkovacích frekvencí. Celá dotyková podložka včetně elektroniky s vyhodnocením lze pořídit jako hotové řešení, čehož je také v drtivé většině případů využíváno.

Druhou a v současnosti nejperspektivnější metodou je optická detekce řízeného objektu pomocí kamery se softwarem vyhodnocujícím obrazovou informaci. Ve většině případů je kamera umístěna stacionárně a nepohybuje se spolu s náklonem roviny [50, 40, 48, 10, 19, 12, 34, 21]. Zde je však problém s přesnou rekonstrukcí polohy kuličky v závislosti na uložení kamery a náklonu roviny (není zanedbatelné - [A.5]), a všechny publikace ji ignorují. Tento problém částečně řeší umístění kamery do závěsu spojeného s nakloněnou rovinou [35, 53], čímž se ale výrazně zvětšuje setrvačnost celé pohyblivé části systému. Co se týče popisu metod zpracování obrazu pro detekci a následné sledování kuličky, zabývají se jimi pouze některé publikace a jen okrajově [53, 38, 21].

Poslední metodou zjištění polohy kuličky na nakloněné rovině je její rekonstrukce pomocí lineárního/nelineárního pozorovatele stavu [33]. Zde je možné na základě přesné znalosti dynamického modelu rekonstruovat polohu řízeného objektu, ovšem pouze za předpokladu, že má změna jeho pozice významný vliv na dynamické chování celé sestavy.

2.3 Simulace vs realita

Výsledné vyhodnocení řešeného problému je pro použití v reálných podmínkách nutné ověřit na reálně postaveném systému. Ověření na matematickém/fyzikálním modelu není dostačující a lze jej považovat pouze za jakýsi signál, že má smysl přistoupit ke skutečným testům. Věrohodnost matematického/fyzikálního popisu skutečnosti závisí totiž pouze na autorech práce a nelze implicitně předpokládat, že jsou modely dostatečně podobné fyzikální realitě, a že autoři zohlednili při návrhu všechny důležité aspekty. Ve studovaných publikacích probíhá vyhodnocení jak na simulačních modelech [56, 24, 32, 23, 50, 37, 36], tak na reálném systému [25, 10, 15, 19, 12, 8, 34, 1, 31, 21]. U reálných experimentů je však v mnoha případech využíváno již hotového zakoupeného řešení včetně řídicí aplikace [40, 12, 34, 33, 45, 16]. Takovéto se-

stavy mají vždy omezené možnosti při snaze implementovat vyřešené zadání do reálných podmínek, hardwarově/softwareově rozšířit model, nebo vyměnit některé jeho díly. Část uvedených reálně postavených modelů obsahuje vlastní návrh, většina ale využívá pro zjištění pozice kuličky primitivní metodu s odporovou dotykovou podložkou a mikropočítač, takže mají velmi úzký rozsah použití.

2.4 Sériový prům. robot vs Kulička na nakloněné rovině

Doposud odkazované publikace byly zpravidla navázány na systém „Ball & Plate“ - Kulička na nakloněné rovině. K této struktuře je publikováno velké množství ověřených strategií řízení pohybu, ale paralelní kinematická konfigurace, kterou obsahují bez výjimky všechny odkazované systémy, nemá s chováním sériového průmyslového robotu mnoho společného. Pro možnost využití dosavadních výsledků takovéto standardní topologie k testům použitelnosti na řízení robotu, byl uvažován systém, který se principem funkce podobá standardnímu modelu kuličky na nakloněné rovině, ale svými dynamickými projevy se blíží chování sériového průmyslového robotu.

Mezi ověřené algoritmy regulace na průmyslovém robotu se sériovou kinematickou strukturou patří, mimo standardní kaskádní regulace složené z kombinace $P(I)(D)$ regulátorů, např. sliding-mode (regulace v klouzavém režimu) [6, 44], computed-torque (výpočet momentů) [41, 29, 20, 11, 3, 52, 44], neuronové sítě [51, 52], speciální kombinace různých přístupů [20, 18] a mnoho dalších.

Publikace, zabývající se návrhem a vyhodnocením regulátorů přímo na průmyslovém robotu, obsahují z velké části pouze simulační ověření [51, 29, 3, 52, 18, 41, 44, 20], nebo testy na školních výukových modelech. Ty jsou buď zakoupeny jako hotová řešení [11, 28], nebo jsou navrženy a postaveny přímo autory práce [6, 2]. Z daleka však nedosahují typové dynamiky pohybu průmyslového robotu. Zařízení, které se dají považovat po všech stránkách za ekvivalent průmyslových robotů, a umožňující libovolný zásah uživatele do řídicího systému, jsou většinou výsledkem několikaletého vývoje celých týmů zabývajících se robotikou, konstrukcí, elektrotechnikou, programováním aj. Není tedy v možnostech autora této práce postavit podobnou robotickou strukturu, a proto bylo k řešení přistoupeno vlastní cestou.

3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Hlavním cílem této dizertační práce je navrhnout soustavu se sériovou kinematickou strukturou a dynamickým chováním podobným průmyslovému robotu, na základě aktuálně dostupných a používaných technologií a principů, za účelem implementace a porovnání moderních algoritmů řízení pohybu. Celý systém musí být otevřený, modulární a připravený na další rozšíření či inovaci dílčích komponent. Záměrem tedy není vytvořit pouze model simulující dynamické chování průmyslového robotu, ale především reálně postavit systém, umožňující skutečné ověření různých přístupů souvisejících s řízením pohybu.

Na základě těchto výsledků bude poté zkoumáno, zda-li není možné dosáhnout v současné době výkonných výpočetních prostředků stejné, či lepší kvality/robustnosti regulace využitím moderních přístupů k řešené problematice, s cílem minimalizovat výkonové/materiálové/cenové požadavky. K dosažení hlavního cíle bude nutné splnit následující body zadání:

- Navrhnout typovou strukturu reálného modelu - požadavek na kinematiku i dynamiku podobnou sériovým průmyslovým robotům.
- Sestrojit konstrukční a fyzikální model navržené robotické struktury.
- Vyrobit model s využitím aktuálních technologií - 3D tisk.
- Vybrat vhodné technické vybavení, vše sestavit a zprovoznit.
- Odvodit matematický model systému a upravit fyzikální model do podoby vhodné pro testování navržených řídicích algoritmů.
- Provést identifikaci použitého servozesilovače a navrhnout aproximaci zachované proudové smyčky.
- Vyvinout řídicí aplikaci s grafickým rozhraním v jazyce C++, komunikující se servozesilovačem.
- S použitím kamerového systému vybrat a implementovat vhodné algoritmy zpracování obrazu.
- Použít odvozený matematický model k návrhu různých metod řízení nelineárních systémů a ty otestovat nejprve na fyzikálním modelu, poté na reálném systému.
- Vzájemně porovnat navržené regulátory a zhodnotit jejich použití v reálném prostředí na skutečném systému.

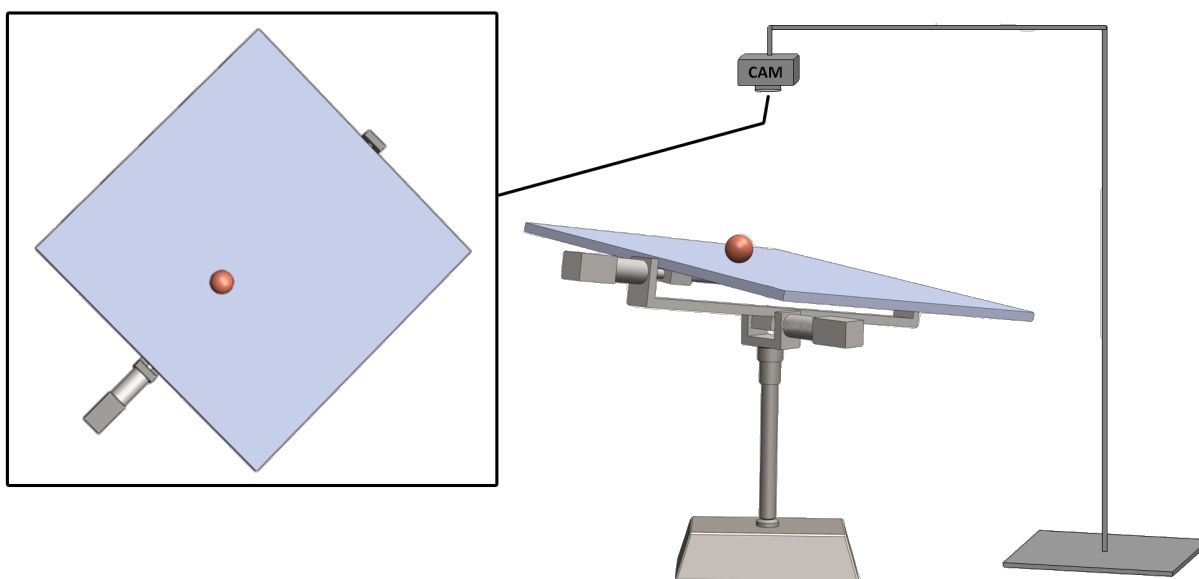
4 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

V této kapitole budou postupně popsány jednotlivé kroky při sestavení kompletního mechatronického systému, od samotného návrhu typové struktury, až po konečné řízení celé sestavy. Jsou požity současné přístupy k řešení podobně komplexních problémů, jako je např. 3D CAD modelování, prototypování s využitím 3D tisku, uplatnění fyzikálního modelu nejen při simulacích, strojové vidění s využitím kamerového systému, distribuované řízení, multiprocesorové zpracování dat, aplikace kinematických transformací pro rekonstrukci polohy v reálném čase a mnoho dalších.

4.1 Návrh typové struktury a CAD model

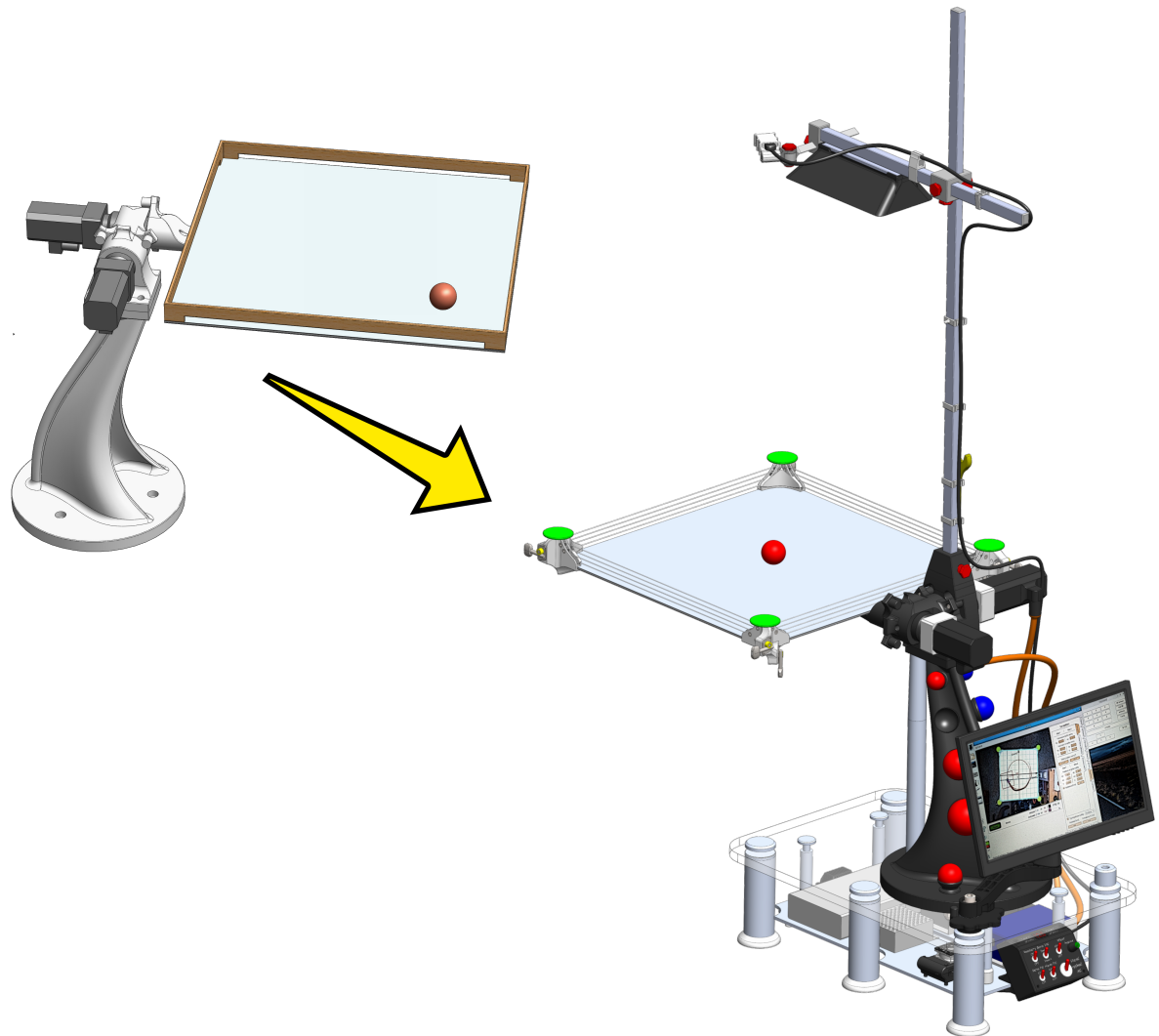
Využití 3D CAD modelu má nespočet výhod nejen při konstrukční fázi, ale také při samotném návrhu zákona řízení. CAD model obsahuje kromě přesných geometrických rozměrů také materiálové vlastnosti, a v případě sestav i vazby mezi jednotlivými díly. To umožňuje poměrně jednoduché získání důležitých parametrů ne pouze pro návrh zákona řízení.

CAD model je využíván od počáteční fáze konstrukčního návrhu, až po konečnou fázi samotného řízení celého systému. Z tohoto důvodu by měl být nedílnou součástí každého komplexního projektu, i v případech, kdy není nutné systém reálně stavit.



Obr. 4.1 CAD model systému - typová struktura, prvotní fáze návrhu

Nejprve byla navržena typová struktura pro ověření základního chování modelu a docílení požadovaných parametrů - zda-li systém dosahuje dostatečných rychlostí, aby se projeví nelinearity a vzájemné interakce mezi aktuátory. a jestli je kinematika i dynamika podobná aktuálně používaným typům průmyslových robotů - Obr. 4.1. Ověření chování se realizovalo v prostředí MATLAB/SIMULINK (viz kapitola 4.6.2), pomocí inverzní dynamické úlohy, která je zde implementovaná.



Obr. 4.2 CAD model systému - základní a konečný konstrukční návrh

Dalším krokem je překreslení sestavy do konstrukční podoby, aby bylo možné vše vyrobit. Zde přišly na řadu výrazné úpravy modelu, především v uložení a napojení akčních členů. Již při návrhu byla kladena zřetel na možnost výroby celého modelu pomocí 3D tiskárny, proto bylo nutné dodržet odpovídající podmínky. Výsledkem je model na Obr. 4.2 vlevo. Systém je známý pod názvem

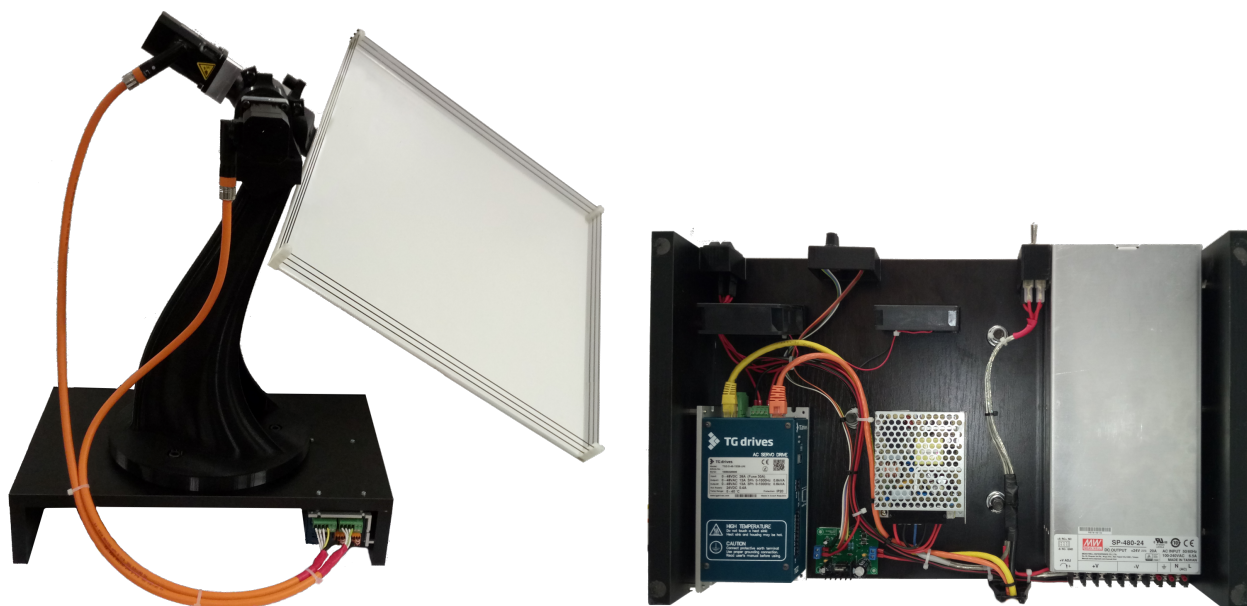
„Ball & Plate“ - Kulička na nakloněné rovině. Jeho konstrukční řešení je však zcela odlišné od běžně prezentovaných modelů řešící úlohu regulace kuličky - [17, 5, 21, 47, 1, 7, 26, 53, 55, 48, 8, 30, 42, 45, 19, 40, 54, 33, 25, 15, 16, 13, 12, 37, 36, 50, 9, 38, 49, 27, 34, 10, 23, 32, 24, 56, 35]. Tyto systémy mají ve všech případech paralelní kinematickou strukturu, a tedy rozdílnou dynamiku pohybu nakloněné roviny. Z valné části jsou hmoty pohyblivých částí vůči hmotě kuličky zanedbávány a snímání její polohy je často řešeno pomocí primitivní metody s využitím odporové dotykové podložky.

Konečná verze CAD modelu je zobrazena na Obr. 4.2 vpravo. Ve většině případů byly prvky vymodelovány kvůli jejich výrobě (zpravidla 3D tisku), ale také např. z důvodu vizuální představy o jejich rozmístění a následného upevnění, dostupnosti ovládacích prvků, omezení/dorazů pohyblivých částí apod.

4.2 Prototyp

Aktuálně nejpožívanějšími a relativně levnými metodami prototypování jsou různé varianty 3D tisku. CAD model je k dispozici z konstrukčního návrhu (kapitola 4.1) a už je navržený s ohledem na požadavky 3D tisku (vůle, přesahy, přechody atd.).

První verze

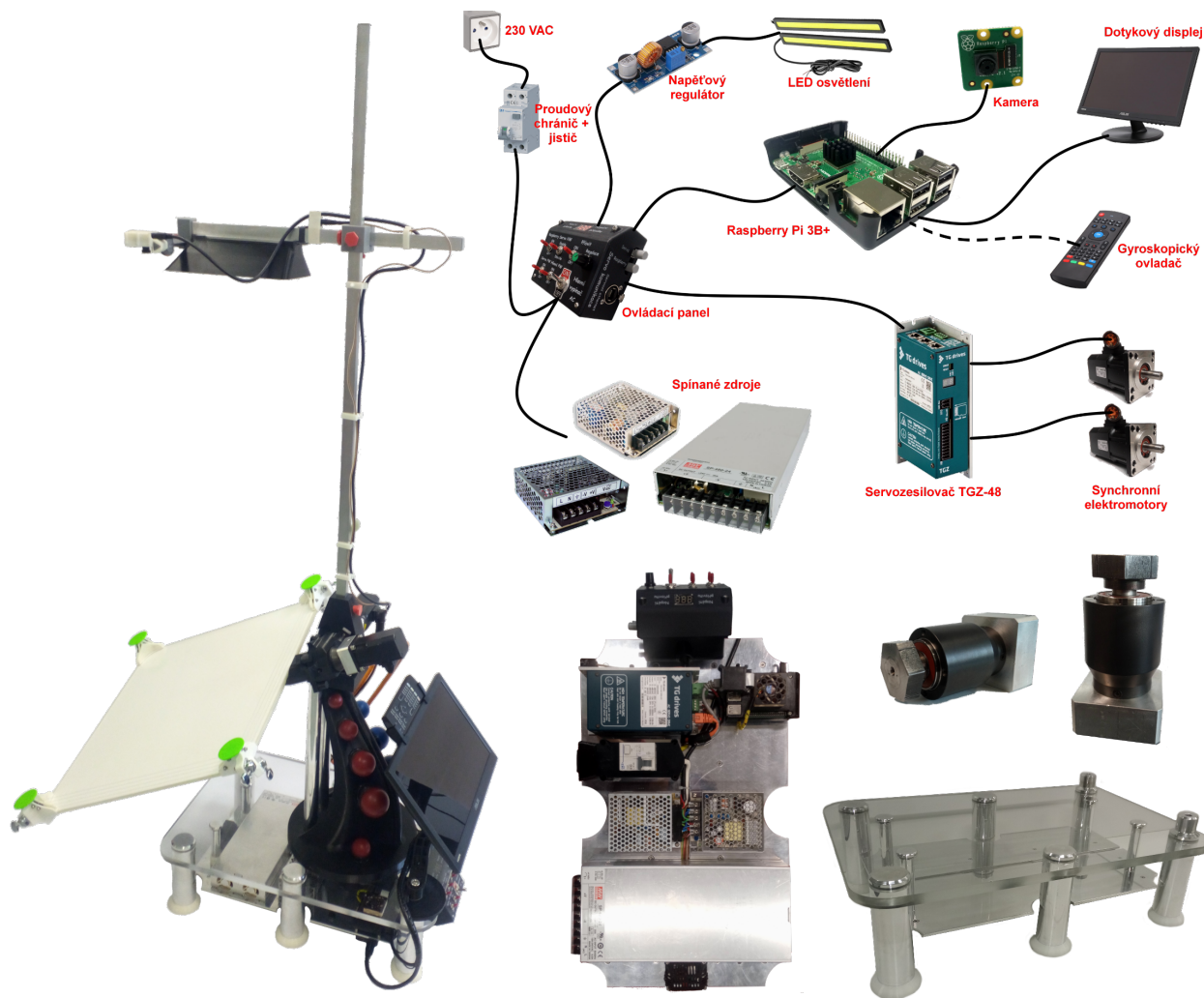


Obr. 4.3 První reálná verze modelu Kulička na nakloněné rovině

První verze modelu (Obr. 4.3) sloužila ke zprovoznění základních pohybů na-

kloněné roviny bez řízení polohy kuličky, pro výběr vhodného technického vybavení a testy reálného chování. Nebyl zde žádný nadřazený řídicí systém, pouze servozesilovač, chybí uživatelské rozhraní, lešení s kamerovým systémem a přísvitkem, proudové jištění/ochrana, pasivní chlazení, ovládací panel a mnoho dalšího.

Současná verze



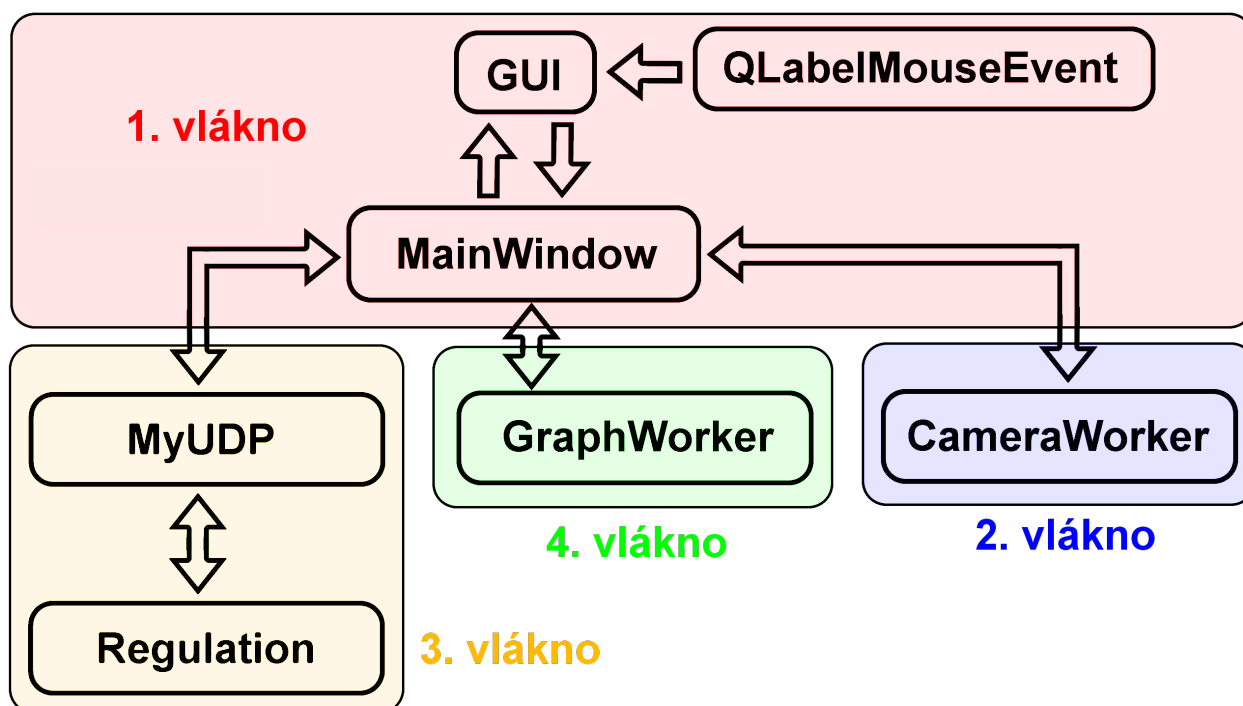
Obr. 4.4 Současná reálná verze systému Kulička na nakloněné rovině

Současná verze reálného systému na Obr. 4.4 plně odpovídá konečnému 3D CAD modelu - Obr. 4.2 vpravo. Návrh všech součástí, jejich výroba a mechanická kompletace je autorova práce a spolu s odladěním a zprovozněním celého zařízení zaujímá značnou a nezanedbatelnou část této práce.

4.3 Softwarová aplikace

Z GUI aplikace provádí koncový uživatel parametrizaci systému, diagnostiku, vidí aktuální informace o dění a má k dispozici vše, co je potřebné k ovládání celého modelu. Aplikace je programována v C++, což je nativní jazyk Qt i IDE Qt Creatoru, které byly použity. Bude muset zvládat plynulé ovládání grafického prostředí, zároveň zpracovávat obraz z kamery s maximální možnou vzorkovací frekvencí, komunikovat se servozsilovačem a jeho sensorickým systémem na frekvencích nad 1 kHz, přepočítávat regulátory v reálném čase, zvládat překreslovat regulační pochody a geometrické parametry, související s přepočtem pomocí kinematických transformačních matic a mnoho dalšího.

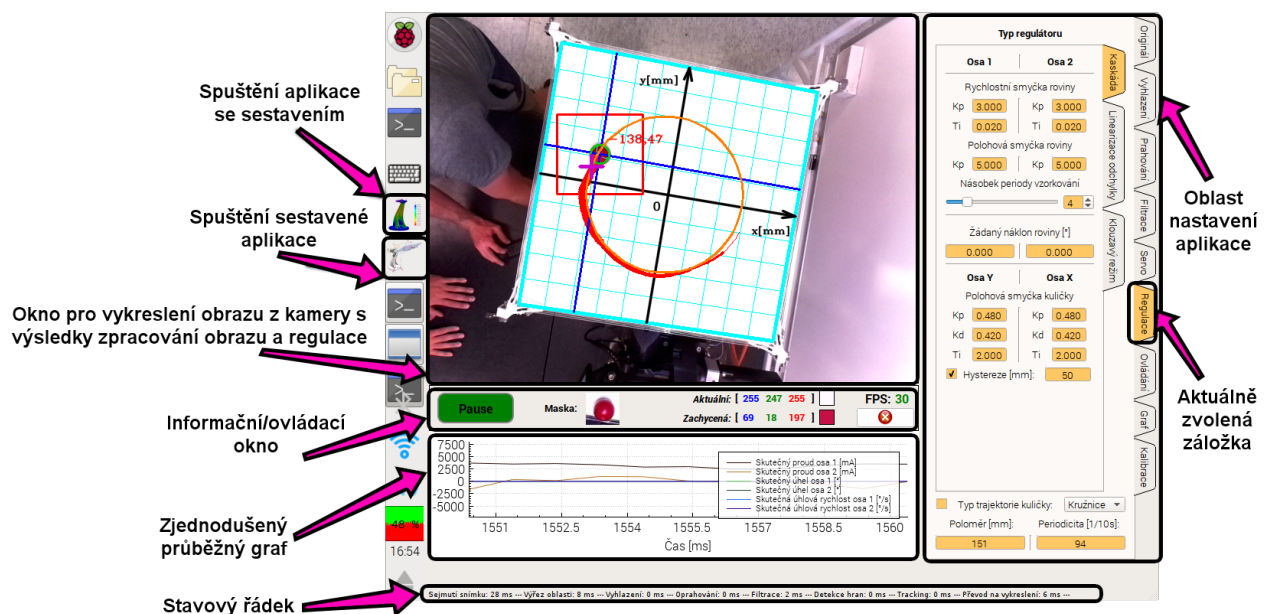
Cílem však nebylo vybrat výkonný počítač se systémem reálného času a grafickým čipem, který by hravě zvládal obsloužit vše potřebné i bez odladění, ale zvolit atraktivní, ekonomicky dostupnou variantu a na ní ukázat, že optimalizace kódu a rozdělení dílčích úkonů do paralelních větví dokáže razantně zredukovat očekávané výkonové požadavky na řídicí systém.



Obr. 4.5 Struktura řídicí aplikace reálného systému

Aplikace obsahuje 6 tříd rozdělených do 4 vláken. Rodičovská třída *MainWindow* je napojená na formulář označený v Obr. 4.5 jako *GUI* a prostřednictvím událostí vyvolaných v tomto grafickém rozhraní předává pomocí signálů požá-

davky dále. Ve výchozím vlákně označeným číslem 1 zůstává rodičovská třída *MainWindow* spolu s grafickým rozhraním a třídou zahrnující odchyťování událostí z myši *QLabelMouseEvent* nad objektem *QLabel*. Ostatní třídy jsou přesunuty do zbylých 3 vláken podle toho, jaké úkony je výhodné od sebe oddělit. Vlákno s číslem 2 náleží veškerým operacím s obrazem z kamery (třída *CameraWorker*), vlákno číslo 3 obstarává komunikaci se servozesilovačem a výpočet regulátorů (třídy *MyUDP* a *Regulation*) a poslední volné vlákno číslo 4 je vyhrazeno pro grafickou vizualizaci snímaných veličin, regulačních pochodů a pro následný export dat k pozdější analýze (třída *GraphWorker*).



Obr. 4.6 Popis částí grafického rozhraní aplikace

Na Obr. 4.6 je ve vykreslovacím okně zobrazena část s automatickou regulací kuličky po požadované dráze. Tyrkysovou barvou je označena hranice nakloněné roviny s šachovnicí o velikosti 5 cm - vše je průběžně přepočítáváno v závislosti na náklonu roviny, umístění a orientaci kamery a dalších geometrických parametrech. Modrým záměrným křížem je zaznamenávána skutečná poloha kuličky, fialovým křížkem zase aktuální žádaná poloha kuličky. Oranžový průběh (v tomto případě kružnice) je žádaná trajektorie pohybu kuličky, červený rámeček zobrazuje vybranou oblast zájmu, v které probíhá zpracování obrazu a ztenčující-se čára stejné barvy zaznamenává skutečnou dráhu kuličky v minulosti.

4.4 Zpracování obrazu

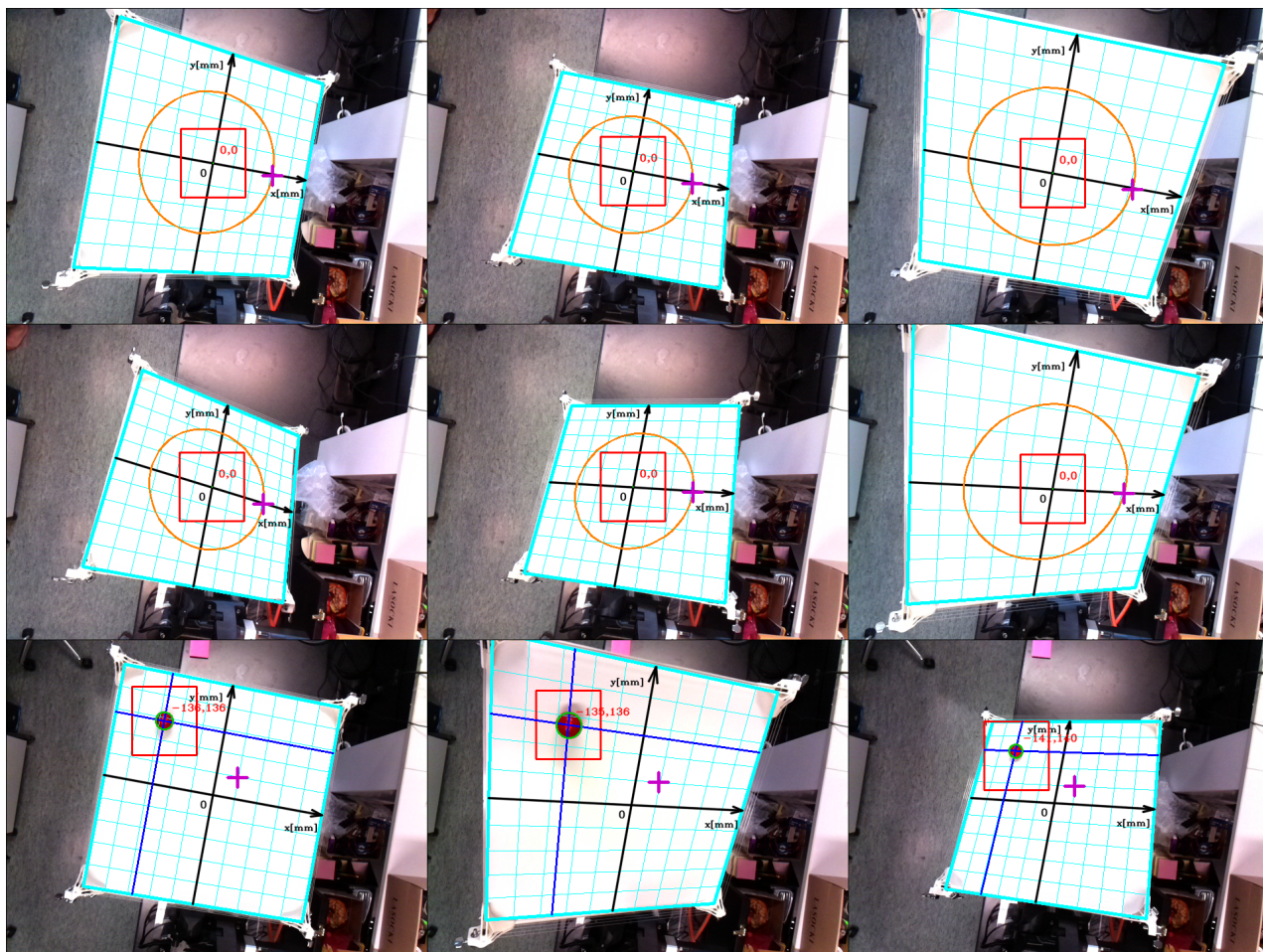
Úkolem zpracování obrazu je v tomto případě vybrat jeden objekt zájmu a určit jeho 2D pozici na nakloněné rovině. K zajištění detekce a následného sledování jednoho řízeného objektu zájmu byla implementována níže popsaná posloupnost obrazových operací:

- **Sejmutí snímku a výběr oblasti zájmu** - po získání snímku z kamery se myší označí oblast zájmu. Mimo označenou obdélníkovou zónu není snímek vůbec zpracováván, což je klíčový krok pro optimalizaci výpočetního výkonu.
- **Označení barvy sledovaného objektu** - žádaný barevný odstín vybírá uživatel myší přímo z vykreslovaného snímku.
- **Vyhlazení ořezaného snímku** - v programu je použito celkem 9 parametrizovatelných filtrů. Za nejlepší kompromis je v tomto případě považováno *Gausiánské rozmazání*.
- **Prahování vyhlazeného snímku** - výsledkem prahování je černobílý snímek, ve kterém bílá část reprezentuje ponechané objekty a černá prázdné pozadí, který bylo prahováním odstraněno.
- **Filtrace oprahovaného snímku** - základem této operace jsou morfologické funkce *Otevření* a *Uzavření*, skládající se ze dvou základních morfologických operátorů - eroze a dilatace.
- **Detekce hran vyfiltrovaných objektů** - nalezne všechny osamocené objekty, vybere největší z nich a jeho pozici uloží.
- **Sledování jednoho vybraného objektu zájmu** - přenastavováním pozice oblasti zájmu do středu sledovaného objektu je zajištěno, že se bude zpracovávaná oblast posouvat se změnou pozice kuličky a bude tedy vždy v ideálním případě v jejím středu. Dále je zajištěno, aby oblast zájmu nesahala za ohraničení; roviny.
- **Záznam dráhy sledovaného objektu** - pro rychlou vizuální kontrolu kvality regulace byl přidán grafický záznam skutečné pozice kuličky v podobě křivky, která se v reálném čase vykresluje přímo do obrazu.

4.5 Kinematické transformace

Kinematické transformace jsou nutné pro přepočítání mezi 2D prostorem kamery a 3D prostorem modelu. Bez tohoto přepočtu je velice komplikované (ne-li nemožné), odvodit jak obecný matematický zápis rovnic popisujících chování systému, tak dále využít získané informace z obrazu.

Kamerové vidění → reálné prostředí

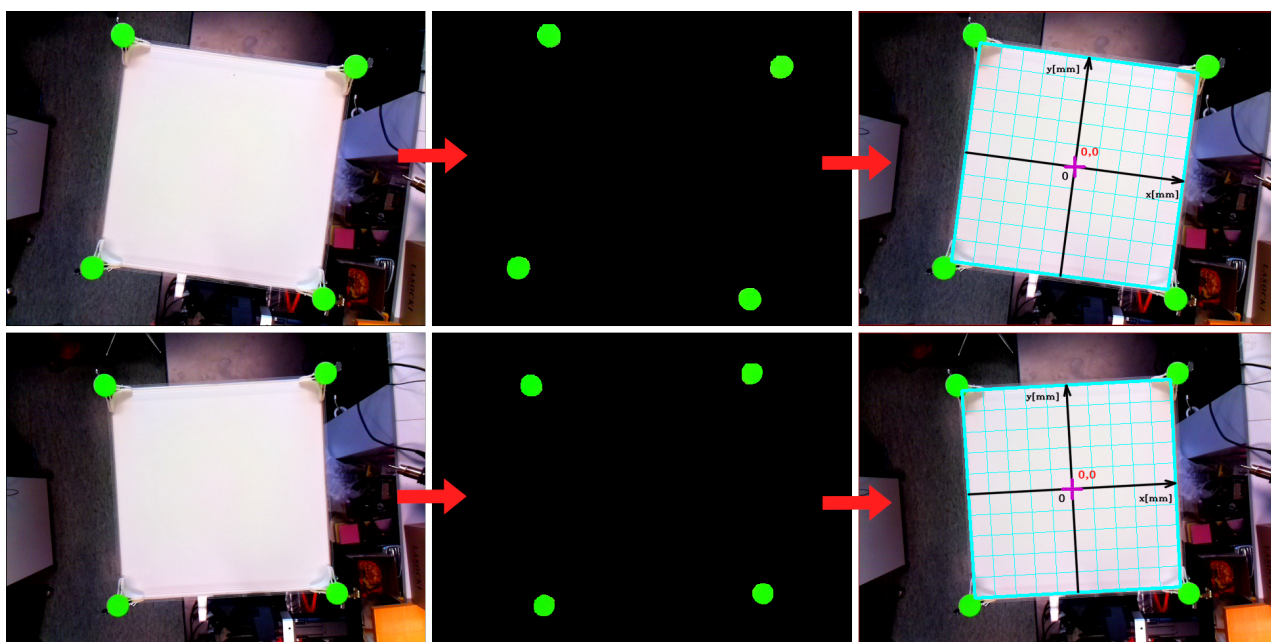


Obr. 4.7 Reálné snímky z kamery znázorňující zkreslení obrazu a úspěšnou rekonstrukci tvaru s využitím kinemat. transformací

Sejmutý obraz z kamery zpravidla nikdy přesně neodpovídá reálné scéně a nikdy nebude existovat univerzální strategie, která by vedla k obecným 2D → 3D přepočtům. Tato nepříjemná skutečnost je dána kombinací rušivých elementů, vyplývajících jak z hardwarových vlastností použité kamery, tak z fyzikální reality. Na Obr. 4.7 jsou zobrazeny reálné snímky po aplikaci navržené procedury. Vše se po transformacích jeví jako promítnuté na nakloněnou rovinu.

Kalibrace rohů/ohraničení nakloněné roviny

Prvním a zásadním krokem je kalibrace rohů nakloněné roviny, která je klíčová pro zjištění základních parametrů pozice a orientace kamery vůči nakloněné rovině - Obr. 4.8. Používají se kruhové kalibrační obrazce umístěné v rozích roviny a je využita metoda zpracování obrazu popsaná v kapitole 4.4. Zjištěné parametry jsou používané snad ve všech přepočtových vztazích, což vychází ze zvoleného postupu, který pro kinematické přepočty využívá matici homogenní transformace. Při změně orientace kamery je nutné kalibraci opakovat.



Obr. 4.8 Kalibrace nakloněné roviny

Odvození kinematických transformačních matic

Pomocí matice homogenní transformace je možné, mimo jiného, určit pozici bodu v globální souřadné soustavě (dále GSS) při známé změně stavových parametrů modelu. Aby byla transformační matice pokud možno co nejvíce univerzální, tedy aby nebylo nutné pro každý bod provádět nové odvození, byla umístěna výchozí GSS do středu nakloněné roviny v její výchozí pozici a zarovnána s kamerou.

Pro určení matice homogenní transformace byla zvolena Denavit-Hartenbergova metoda rozmístění souřadných soustav (dále D-H notace), pomocí které byla odvozena matice popisující vztah mezi polohovým vektorem poslední LSS a polohovým vektorem GSS, na základě změny stavových parametrů modelu.

4.6 Řízení pohybu

V této podkapitole budou popsány použité metody řízení robotických struktur, jakožto hlavních představitelů nelineárních dynamických systémů s přesným řízením pohybu. Cílem je směřovat práci na metody nelineárního řízení, resp. řízení nelineárních objektů, jejichž nelinearita je uvažována už při návrhu regulátoru, příp. je rovnou zakomponována do zákona řízení [4, 46].

4.6.1 Matematický model

Matematický popis řízeného systému je nezbytný pro návrh strategie řízení. Měl by být co nejjednodušší, avšak musí stále s dostatečnou přesností vystihovat dynamiku řízeného systému. To znamená vždy kompromis mezi přesností a složitostí matematického modelu.

Pro odvození matematického popisu dynamiky řízeného systému budou použity Lagrangeovy pohybové rovnice 2. druhu v maticové formě. K tomu lze s výhodou využít kinematických transformačních matic a CAD modelu, bez kterých by byl přesný matematický popis takto komplexního systému v podstatě vyloučený.

Zjednodušený model - náhrada hmotnými body - postup 1

První postup k nalezení pohybových rovnic je založen na určení energií systému a využívá zjednodušení v podobě náhrady vzájemně se nepohybujících částí hmotnými body.

Výsledkem jsou 4 pohybové rovnice se 4-DOF, protože rotace kuličky není pro náhradu hmotným bodem uvažována. Po přepisu do maticové formy pohybových rovnic vznikne obecně zapsaná rovnice probíraného systému 4.1, kde Q_α a Q_β jsou točivé momenty motorů pro první a druhý DOF.

$$D(\bar{\mathbf{q}}) \cdot \ddot{\bar{\mathbf{q}}} + \bar{\mathbf{H}}(\bar{\mathbf{q}}, \dot{\bar{\mathbf{q}}}) + \bar{\mathbf{G}}(\bar{\mathbf{q}}) = \bar{\mathbf{Q}}$$

$$D(\alpha, \beta, x, y) \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\alpha} \\ \ddot{\beta} \\ \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} + \bar{H}(\alpha, \dot{\alpha}, \beta, \dot{\beta}, x, \dot{x}, y, \dot{y}) + \bar{G}(\alpha, \beta, x, y) = \begin{bmatrix} Q_\alpha \\ Q_\beta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Přesný model - kvalifikované zjednodušení - postup 2

Pro odvození přesného matematického modelu se již počítá s maticemi setrvačnosti a je uvažován i vliv rotace kuličky. Výsledné rovnice jsou dále upravovány do takové míry, aby se dynamické chování původního a zjednodušeného systému co nejméně lišilo (průběžná kontrola dynamiky průběhů) a zároveň byly rovnice co nejjednodušší. Výsledkem je vždy kompromis, ale pro použití matematického modelu k návrhu zákona řízení je zjednodušení nutné.

Původní pohybová rovnice byla výrazně zredukována na výsledný tvar v rovnici 4.2. Toto zjednodušení má stále zachovanou původní dynamiku přechodového děje a oproti originálu se liší minimálně - viz Obr. 4.9.

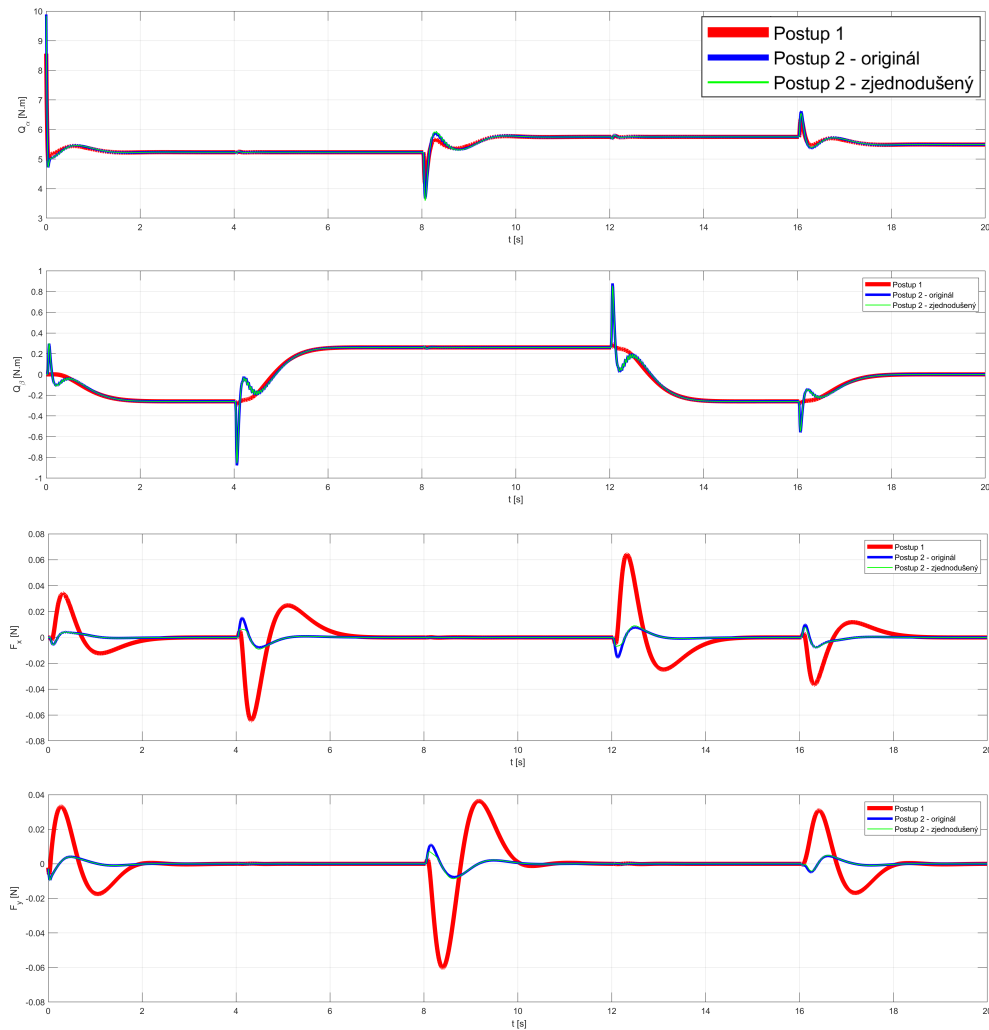
$$D = \begin{bmatrix} 0.2716 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.05051 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{7}{5} \cdot bR \cdot m_3 & \frac{7}{5} \cdot m_3 & 0 \\ -\frac{7}{5} \cdot bR \cdot m_3 & 0 & 0 & \frac{7}{5} \cdot m_3 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$H = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0.3345 \cdot m_3 \cdot \dot{\alpha}^2 \end{bmatrix}; \quad G = \begin{bmatrix} (0.4712 + 0.3345 \cdot m_3 + m_3 \cdot y) \cdot g \cdot \cos(\alpha) \\ g \cdot m_3 \cdot x \cdot \cos(\beta) \\ g \cdot m_3 \cdot \sin(\beta) \\ g \cdot m_3 \cdot \sin(\alpha) \end{bmatrix}$$

Jak je z rovnice 4.2 patrné, hlavní prvky ovlivňující dynamiku systému jsou vázané na setrvačné hmoty modelu (matice D) a gravitační sílu (matice G). Odstředivé/dostředivé síly obsažené v matici H se objevují ve zjednodušené formě pohybových rovnic pouze u 4. DOF, Coriolisovy síly nejsou přítomny vůbec.

Na Obr. 4.9 jsou zobrazeny grafické průběhy točivých momentů obou motorů (Q_α a Q_β) a silových účinků kuličky v ose x a y (F_x a F_y), při typové trajektorii s maximální dynamikou pohybu, která bude po systému vyžadována. Jsou zde vykresleny celkem 3 trajektorie:

- Průběh s **červenou** barvou odpovídá náhradě hmotnými body.
- Průběh s **modrou** barvou náleží přesnému modelu bez zjednodušení.
- Průběh se **zelenou** barvou odpovídá zjednodušenému tvaru přesného matematického modelu - rovnice 4.2.

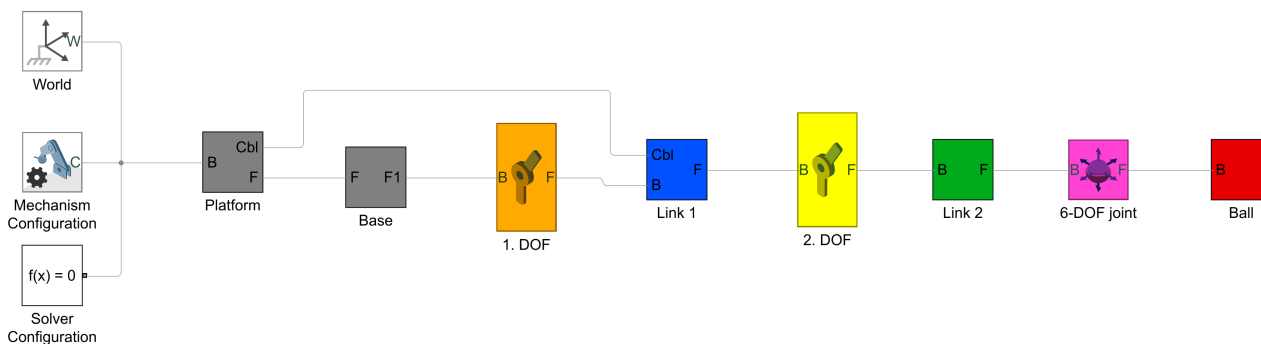


Obr. 4.9 Porovnání grafických průběhů pro typovou trajektorii kuličky ve tvaru čtverce

4.6.2 Fyzikální model

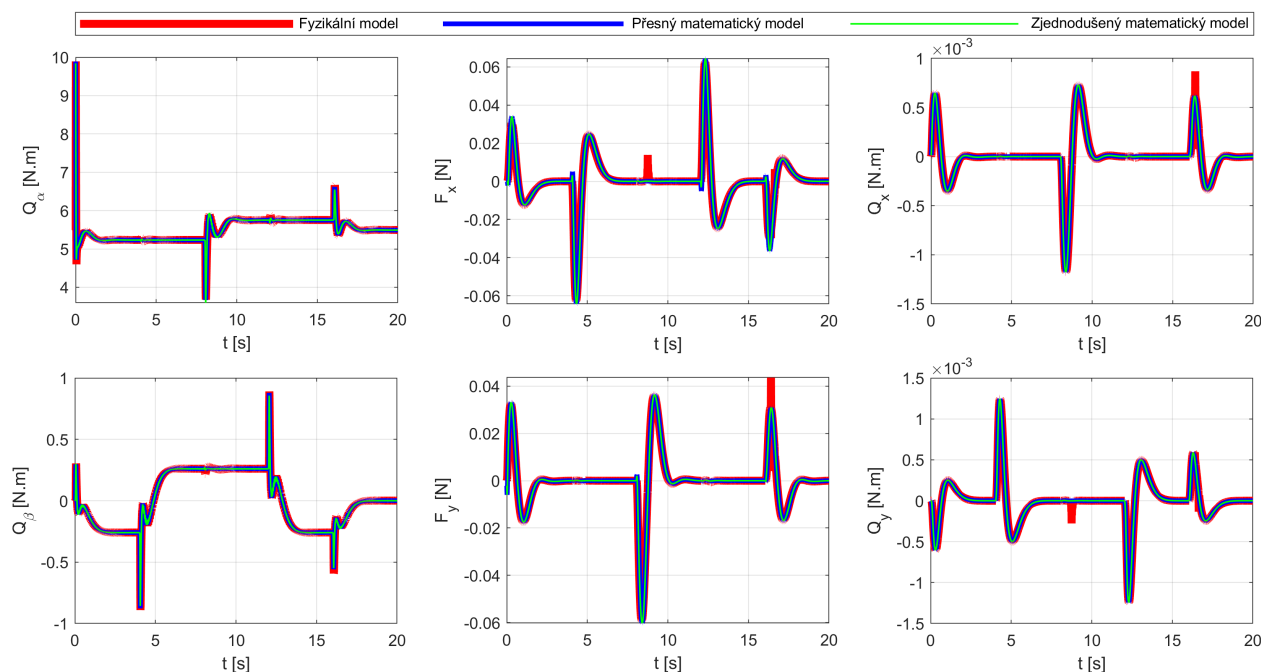
Testy kvality výsledné regulace se neprovádějí na matematickém modelu, ale na modelu fyzikálním, který je považován za nejlepší možnou náhradu reálného systému. Jeho přesnost (podobnost s reálným systémem) se odvíjí od CAD modelu, na kterém je založený - především na správné volbě rozměrů, materiálů a kinematických vazeb.

Fyzikální model neobsahuje žádné cílevědomé zjednodušení, má plných 8-DOF a obsahuje navíc i nastavitelné tření v kloubech, silové dorazy, pružnost vazeb, vůle apod. Základní importovaný Simscape model je uvedený na Obr. 4.10. Model je na první pohled velice jednoduchý, ale obsahuje celkově přes 270 dílů, tedy *.step* modelů, které jsou uzavřeny v jednotlivých subsystémech, jako je *Platform*, *Base*, *Link 1*, *Link 2* a *Ball*.



Obr. 4.10 Základní importovaný fyzikální model v Simscape Multibody

Do fyzikálního modelu na Obr. 4.10 bylo pro jeho základní funkčnost nutné přidat omezení 6-DOF vazby kuličky, silové dorazy, všechny známé limity, celou nadřazenou regulační strukturu atd.



Obr. 4.11 Porovnání průběhů matematického a fyzikálního modelu pro typovou trajektorii kuličky ve tvaru čtverce

Grafické porovnání zjednodušeného matematického modelu s modelem fyzikálním je zobrazeno na grafu v Obr. 4.11. Průběhy odpovídají točivým momentům obou motorů (Q_α a Q_β), silovým účinkům kuličky v ose x a y (F_x a F_y) a točivým momentům kuličky okolo osy x a y (Q_x a Q_y).

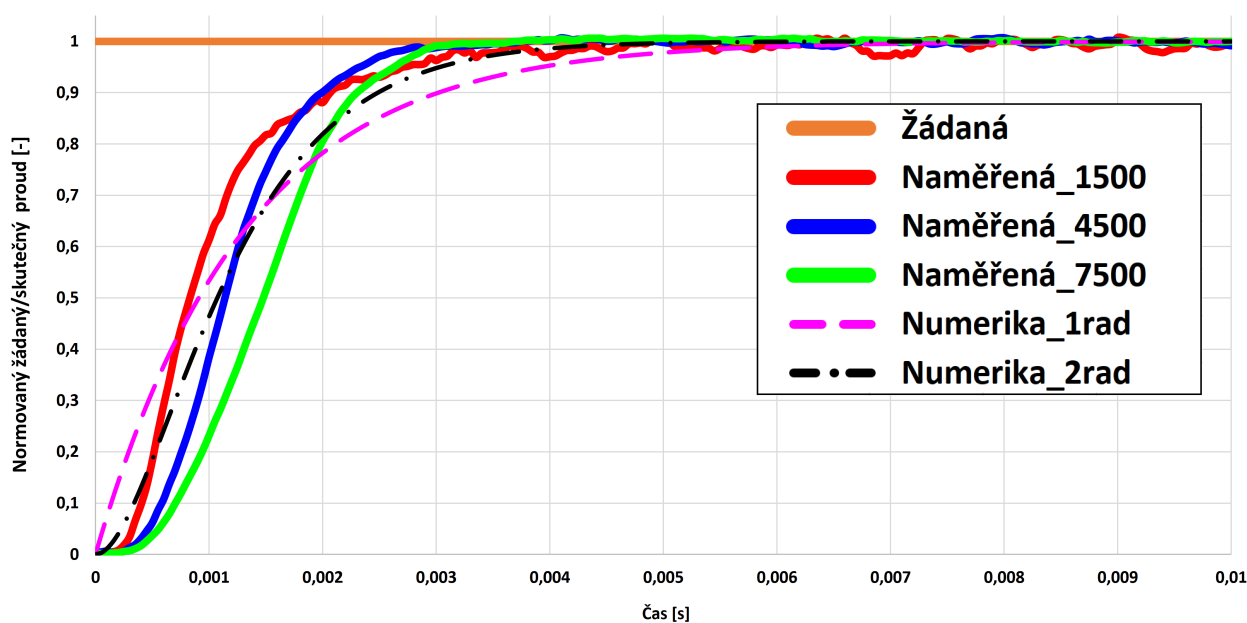
Z grafu je patrné, že byl matematický model odvozený správně, protože dynamické průběhy se až na pár silových/momentových impulzů překrývají. Tyto špičky, jsou způsobené zejména redukcí počtu DOF u matematického modelu a absencí kombinovaného tření o podložku.

4.6.3 Kaskádní P(I)(D) regulace nakloněné roviny

Kaskádní regulace je stále nejrozšířenějším a dá se říci nejjednodušším typem regulace používané v průmyslových aplikacích řízení pohybu. Používá regulátory typu PID, se dvěma vnořenými smyčkami pro řízení rychlosti, a třemi vnořenými smyčkami pro řízení polohy. Parametry regulátorů se nastavují postupně od proudové smyčky, přes rychlostní, po polohovou. Optimální návrh je často složitý, při odvozování se běžně volí požadovaná doba ustálení přechodového děje a poté se simulačně ověřuje kvalita a robustnost navrženého způsobu řízení.

Proudová smyčka

Nastavování proudové smyčky probíhalo na zabrzděném motoru a byla použita experimentální Ziegler-Nicholsova metoda pro uzavřený regulační obvod.



Obr. 4.12 Konečné nastavení proudového regulátoru motoru v 1. DOF

$$G(s) = \frac{1}{0.00131 \cdot s + 1} \quad G(s) = \frac{1}{(0.00064 \cdot s + 1)^2} \quad (4.3)$$

Odezva nastaveného proudového regulátoru je zobrazena na Obr. 4.12 a aproximované přenosy jsou v rovnici 4.3. Časová konstanta přechodového děje odpovídá zhruba 1,3 ms.

Rychlostní smyčka

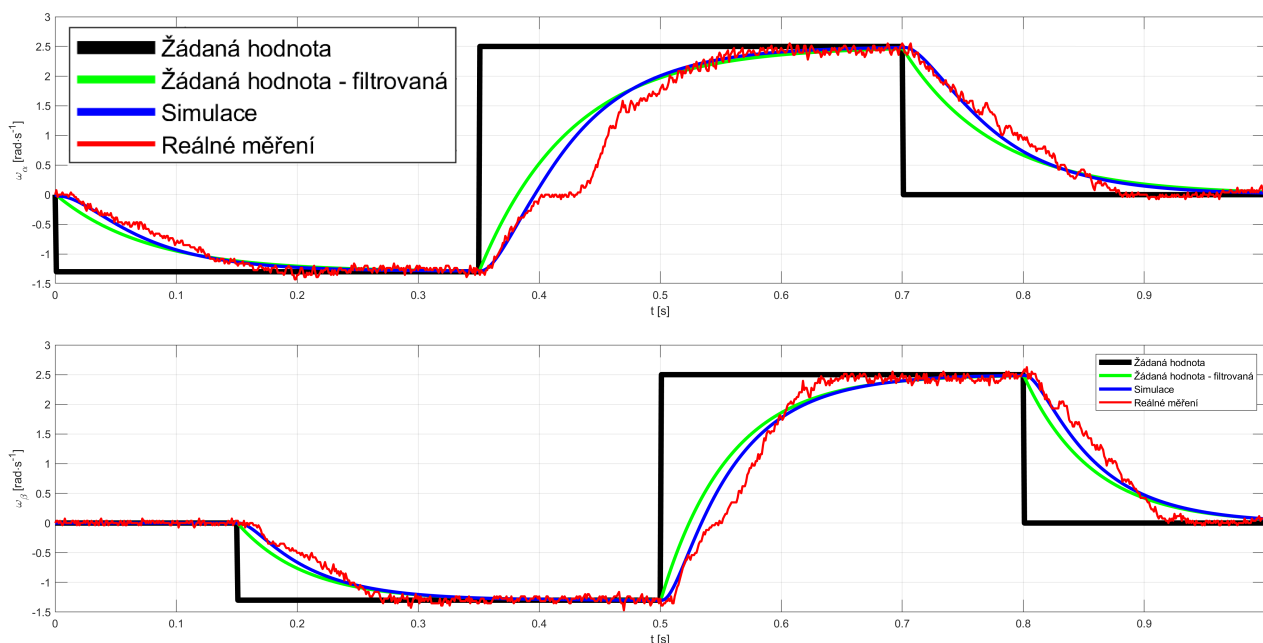
Bylo ověřeno, že časové konstanty rychlostní i polohové smyčky jsou řádově vyšší, než je odezva proudové smyčky, a proto je její dynamika zanedbána - jednotkový náhradní přenos. Tím se sníží řád přenosu regulačního obvodu a celá rychlostní smyčka bude odpovídat rovnicím 4.4 a 4.5.

Pro zjištění momentu setrvačnosti je využitý matematický model, konkrétně matice D v rovnici 4.2. Její zjednodušená forma už obsahuje pouze momenty setrvačnosti jednotlivých DOF.

$$G_{\omega}(s) = \frac{\frac{Km \cdot i}{Ti_{\omega} \cdot J}}{s^2 + \frac{Kp_{\omega} \cdot Km \cdot i}{J} \cdot s + \frac{Km \cdot i}{Ti_{\omega} \cdot J}} \quad (4.4)$$

$$Ti_{\omega} = \frac{Km \cdot i}{\alpha^2 \cdot J} \quad Kp_{\omega} = \frac{2 \cdot \alpha \cdot J}{Km \cdot i} \quad \alpha = 1.5 \cdot (n + 1) \cdot \frac{1}{T_{ust}} \quad (4.5)$$

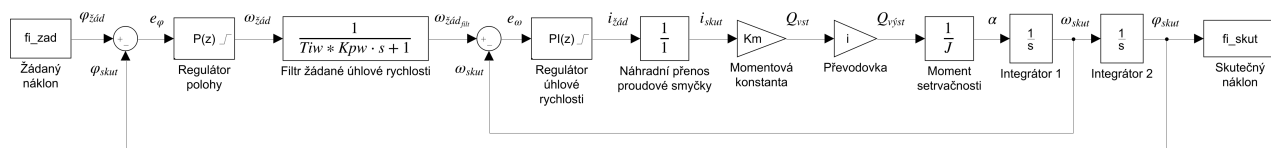
Zvolená doba ustálení je $T_{ust} = 0.1$ s a odpovídá průběhům na Obr. 4.13. Důraz byl kladen na co nejrychlejší dosažení žádané hodnoty (pokud možno bez překmitu), a s co nejmenším kmitáním okolo ní.



Obr. 4.13 Porovnání simulovaných a reálných přechodových charakteristik rychlostní smyčky - konečné experimentální doladění

Polohová smyčka

Přenos polohové smyčky vyplývající z blokového schématu na Obr. 4.14 je uveden v rovnici 4.6 a parametry regulátorů v rovnici 4.7.

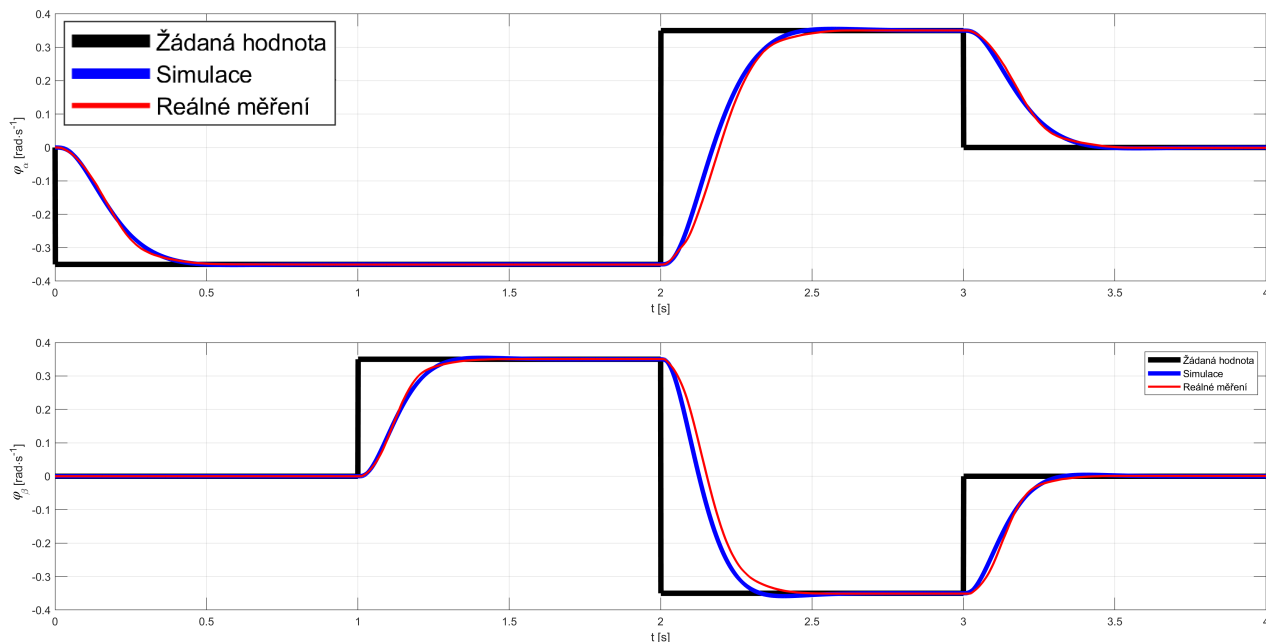


Obr. 4.14 Blokové schéma kaskádní regulace polohové smyčky

$$G_{\varphi}(s) = \frac{Kp_{\varphi} \cdot Km \cdot i}{s^3 + \frac{Kp_{\omega} \cdot Km \cdot i}{J} \cdot s^2 + \frac{Km \cdot i}{Ti_{\omega} \cdot J} \cdot s + \frac{Kp_{\varphi} \cdot Km \cdot i}{Ti_{\omega} \cdot J}} \quad (4.6)$$

$$Kp_{\varphi} = \frac{\alpha^3 \cdot Ti_{\omega} \cdot J}{Km \cdot i} \quad Ti_{\omega} = \frac{Km \cdot i}{3 \cdot \alpha^2 \cdot J} \quad Kp_{\omega} = \frac{3 \cdot \alpha \cdot J}{Km \cdot i} \quad (4.7)$$

Doba ustálení byla zvolena $T_{ust} = 0.3 \text{ s}$. Po experimentálním doladění parametrů rychlostního PI regulátoru a polohového P regulátoru bylo dosaženo přechodového děje zobrazeného na Obr. 4.15.



Obr. 4.15 Porovnání simulovaných a reálných přechodových charakteristik polohové smyčky - konečné experimentální doladění

4.6.4 Regulace polohy/rychlosti kuličky

Celá kapitola 4.4 o zpracování obrazu, velká část kapitoly 4.5 o kinematických transformacích a v podstatě celá grafická aplikace a struktura navrženého systému včetně zapojení, směřuje k reálnému použití moderních metod strojového vidění. Objektem zájmu je právě řízení pozice/rychlosti kuličky na nakloněné rovině, přičemž nejde ani tak o princip tohoto řízení, jak o projevy komplexního chování celého systému. Jako výchozí testovací regulační struktura byla vybrána PD(I) regulace (konkrétně doporučeně diferenční regulátor s automaticky připínatelnou integrační složkou).

Podobně jako u kaskádní regulace náklonu roviny, i zde bude využit matematický model - 3. a 4. DOF v rovnici 4.2. Co se týče zjednodušení, je nutné zanedbat vliv úhlového zrychlení roviny i vliv odstředivé síly, protože by parametry regulátoru nemohly být konstantní. Rovnice popisující zrychlení kuličky v obou osách mají po zjednodušení a linearizaci v okolí horizontální polohy roviny (úhly α a β jsou rovny nule) tvar:

$$\ddot{x} = -\frac{5}{7} \cdot g \cdot \beta \qquad \ddot{y} = -\frac{5}{7} \cdot g \cdot \alpha \qquad (4.8)$$

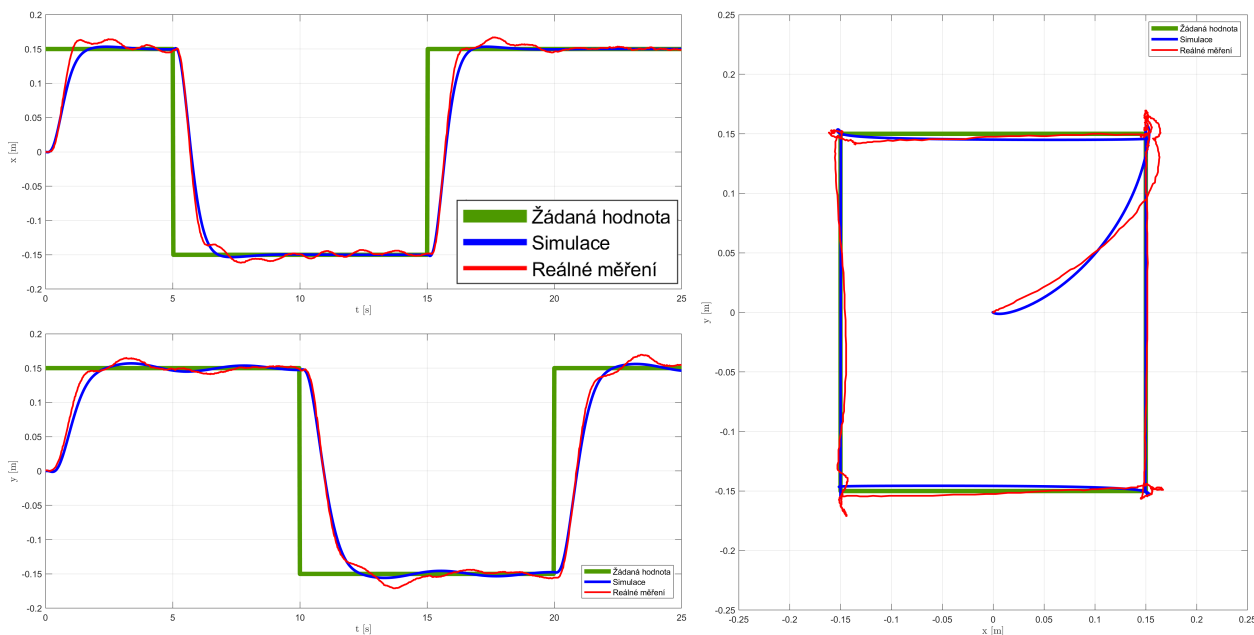
Výsledný přenos řízení bude 2. řádu s nastavitelnou dobou ustálení přechodového děje a koeficientem poměrného tlumení, kterým se bude omezovat vliv derivační složky regulátoru.

$$G_{xB}(s) = \frac{a \cdot (Kp_x + Kd_x \cdot s)}{s^2 + a \cdot Kd_x \cdot s + a \cdot Kp_x} \qquad (4.9)$$

$$a = -\frac{5}{7} \cdot g \qquad Kd_x = \frac{2 \cdot \alpha \cdot \xi}{a} \qquad Kp_x = \frac{\alpha^2}{a} \qquad (4.10)$$

Rovnice 4.9 a 4.10 jsou odvozeny pro polohovou smyčku kuličky v ose x , pro osu y je tvar výsledného přenosu totožný, liší se pouze nastavené parametry regulace. Doba ustálení přechodového děje byla zvolena pro obě osy odlišně, aby nebyla rychlejší smyčka (pro úhel β) omezena pomalejší dynamikou smyčky pro úhel α . Konkrétně se jedná o hodnoty $Tx_{ust} = 2.2$ s a $Ty_{ust} = 3$ s. Regulační pochody byly simulačně i experimentálně ověřeny pro 4 typové trajektorie,

kterými jsou bod, čtverec, kruh a asteroida. Ukázka grafického vyhodnocení reálně naměřených dat a ze simulace je uvedena na grafu 4.16.



Obr. 4.16 Regulace kuličky - trajektorie typu Čtverec - PD(I) regulátor

4.6.5 Metoda výpočtu točivých momentů (computed torque)

Při dobré znalosti matematického popisu řízeného objektu je možné použít pro získání soustavy lineárních diferenciálních rovnic chyby řízení metodu výpočtu momentů (v anglické literatuře uvedenou jako *computed torque*), a na tu poté aplikovat techniky návrhu lineárních regulátorů. Tento typ regulace je založen na kombinovaném řízení v otevřené i uzavřené smyčce. Pro řídicí zobecněné síly je použit následující obecný zápis zákona řízení.

$$\underbrace{\mathbf{D}(\bar{q}) \cdot \ddot{\bar{q}}_z + \bar{H}(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) + \bar{G}(\bar{q})}_{\bar{Q}_{ff}(t)} + \underbrace{\mathbf{D}(\bar{q}) [K_D \dot{\bar{e}}(t) + K_P \bar{e}(t)]}_{\bar{Q}_{fb}(t)} = \bar{Q}(t) \quad (4.11)$$

Matice K_D a K_P jsou diagonální matice konstantních zesílení typu $n \times n$, K_D má význam vlastních frekvencí, K_P má význam tlumení. Výsledný zákon řízení momentů má dvě složky. Složka $\bar{Q}_{ff}(t)$ představuje přímé řízení (feedforward) - výpočet zobecněných sil (akčního zásahu) ze známého matematického modelu a žádané hodnoty, složka $\bar{Q}_{fb}(t)$ představuje řízení ve zpětné vazbě (feedback) - výpočet korekčních zobecněných sil minimalizující regulační odchylku.

Rozvaha nad konkrétním zadáním

Pro tento konkrétní případ bude regulátor typu MIMO, protože jsou pohybové rovnice mezi sebou provázané stavovými proměnnými. Nejdříve bude uvažován originální přesný matematický model, poté jeho zjednodušená verze a ověří se, jestli má ono zjednodušení významný vliv na kvalitu regulačních pochodů. Pro implementaci této metody je však nutné vyřešit několik stěžejních částí, bez kterých by byla prakticky nepoužitelná. Jedná se o:

- Zajištění 2x derivovatelného řízeného vstupu - použití tzv. **průmyslové/filtrované derivace**.
- Zamezení proudové rezonance - nastavitelný **filtr žádaných hodnot**.
- Rekonstrukce skutečné rychlosti - **průmyslová/filtrovaná derivace**.
- Eliminace vlečné chyby v ustáleném stavu - zavedení **automaticky připínané integrační složky**.
- Vliv šumu na regulační pochod - umělé **zavedení změřeného šumu** do simulačního modelu.
- Fyzikální limity reálného systému - **začlenění všech známých limitů** do fyzikálního modelu.

Regulátor s výpočtem momentů

Po přepsání obecné rovnice 4.11 do tvaru pro tento konkrétní systém s 2 řízenými DOF a zajištění schopnosti trackingu, bude vypadat zápis následovně:

$$\mathbf{D}(\alpha, \beta, x, y) \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} + \bar{H}(\alpha, \dot{\alpha}, \beta, \dot{\beta}, x, \dot{x}, y, \dot{y}) + \bar{G}(\alpha, \beta, x, y) = \begin{bmatrix} Q_\alpha \\ Q_\beta \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

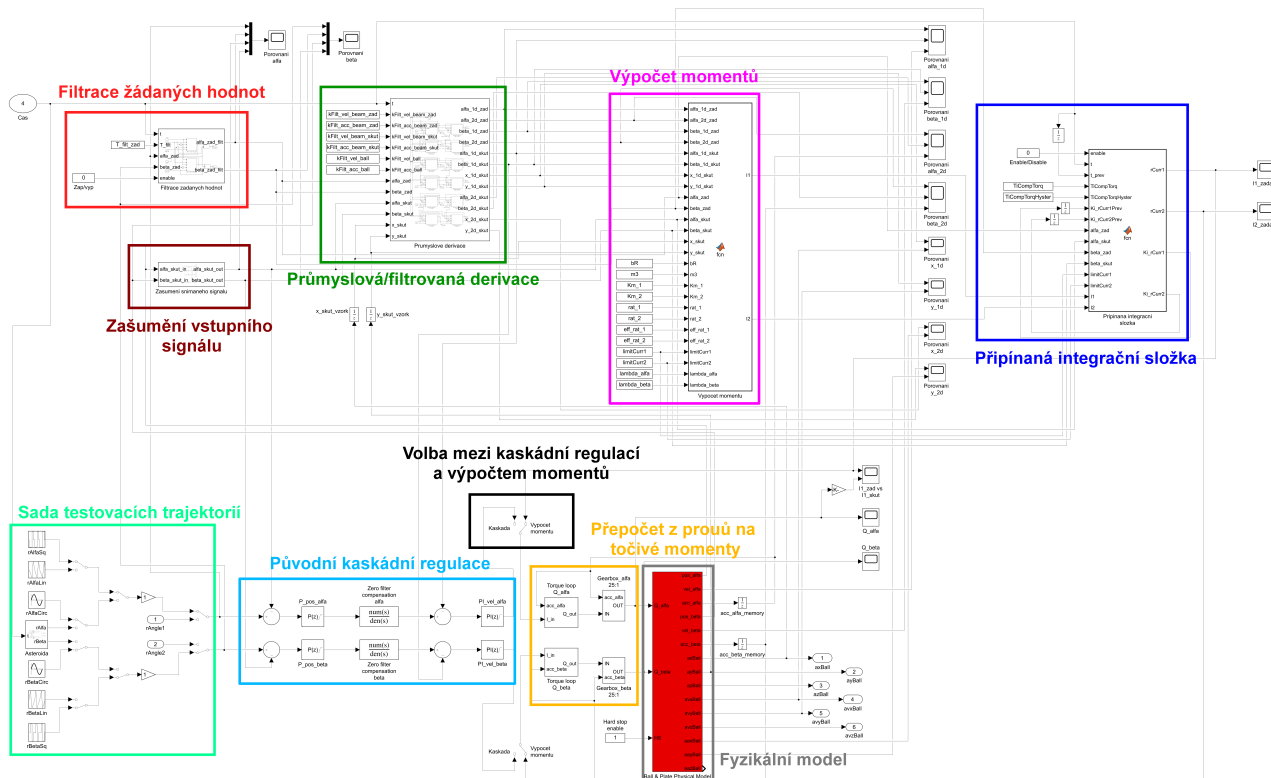
Pro ekvivalentní vstup $v = [v_1; v_2]^T$ platí:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{\alpha}_{zad} \\ \ddot{\beta}_{zad} \end{bmatrix} + 2 \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\alpha}_{zad} - \dot{\alpha}_{skut} \\ \dot{\beta}_{zad} - \dot{\beta}_{skut} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_1^2 \\ \lambda_2^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_{zad} - \alpha_{skut} \\ \beta_{zad} - \beta_{skut} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

kde $[\lambda_1; \lambda_2]^T > 0$ a její převrácená hodnota reprezentuje časovou konstantu konvergence regulační odchylky k nule. Bylo zjištěno, že pro požadovanou dynamiku a pracovní rozsah pohybu není žádný pozorovatelný rozdíl, mezi vyu-

žitím přesného a zjednodušeného matematického modelu. S důvodu výpočetní složitosti a přehlednosti bude tedy dále uvažován zjednodušený matematický model, uvedený v rovnici 4.2.

Blokové schéma celé regulační struktury s výpočtem momentů je uvedeno na Obr. 4.17, včetně vyznačení probíraných částí předzpracování signálu a původní kaskádní regulace, která bude sloužit pro porovnání a vyhodnocení dat.



Obr. 4.17 Kompletní simulační model regulátoru s výpočtem momentů

Pro naladění regulátoru a závěrečné testy kvality regulace byly vytvořeno 5 typových křivek, které svým charakterem a dynamikou pohybu pokrývají širokou škálu možných požadavků na řízení a jsou plně parametrizovatelné. Jedná se o trajektorie typu statická, skoková, lineární, kružnice a asteroida.

Nastavení regulátoru s výpočtem momentů

Metod pro nastavení tohoto typu regulátoru je mnoho, od čistě experimentální [39], přes využití Ziegler-Nicholsovy metody [43], až po samočinné nastavení neuronovou sítí [22]. Ve všech případech ale pobíhá ladění pouze zpětnovazebných zesílení PD regulátoru. V tomto případě je ale stěžejní částí nastavení časových konstant průmyslových/filtrovaných derivací všech potřebných signálů,

filtru žádaných hodnot, integračního času automaticky připínaného integrátoru, a to vše s ohledem na reálně dosažitelnou dynamiku systému, omezenou periodu vzorkování regulátoru, proudového/momentového limitu, možný vznik proudové rezonance atd. Paralelně se musí porovnávat výsledky simulace s reálným systémem, což vylučuje většinu možných přístupů a metoda pokus-omyl také selhává. Proto je potřeba navrhnout systematický přístup, který využívá znalosti řízeného systému a postupně konfiguruje celý regulační proces.

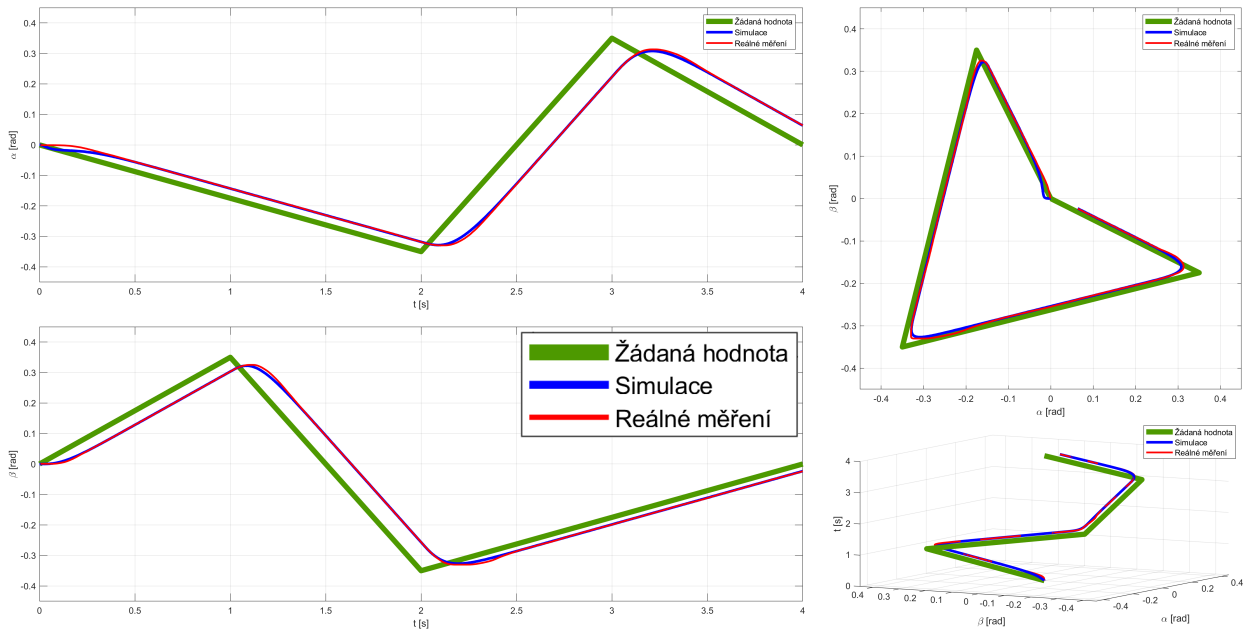
S ohledem na výše uvedené okolnosti byla navržena metoda, která se skládá z několika bodů s pevně danou posloupností. Ve zkratce se jedná o tyto kroky:

- Vynulování zesílení λ_α a λ_β .
- Vyřazení šumu, filtrace žádaných hodnot i připínání integrační složky.
- Nastavení časové konstanty průmyslové/filtrované derivace žádaných hodnot tak, aby jejich přechodový děj pokud možno kopíroval průběhy odpovídajících skutečných hodnot.
- Nastavení časové konstanty průmyslové/filtrované derivace skutečných hodnot tak, aby se rekonstruovaná úhlová rychlost co nejméně zpožďovala za snímanou rychlostí a zároveň byly eliminovány šумы.
- Zařazení zpětnovazební části regulátoru - nastavení λ_α a λ_β .
- Zavedení možnosti filtrace žádané hodnoty.
- Povolení automatického připínání integrační složky.

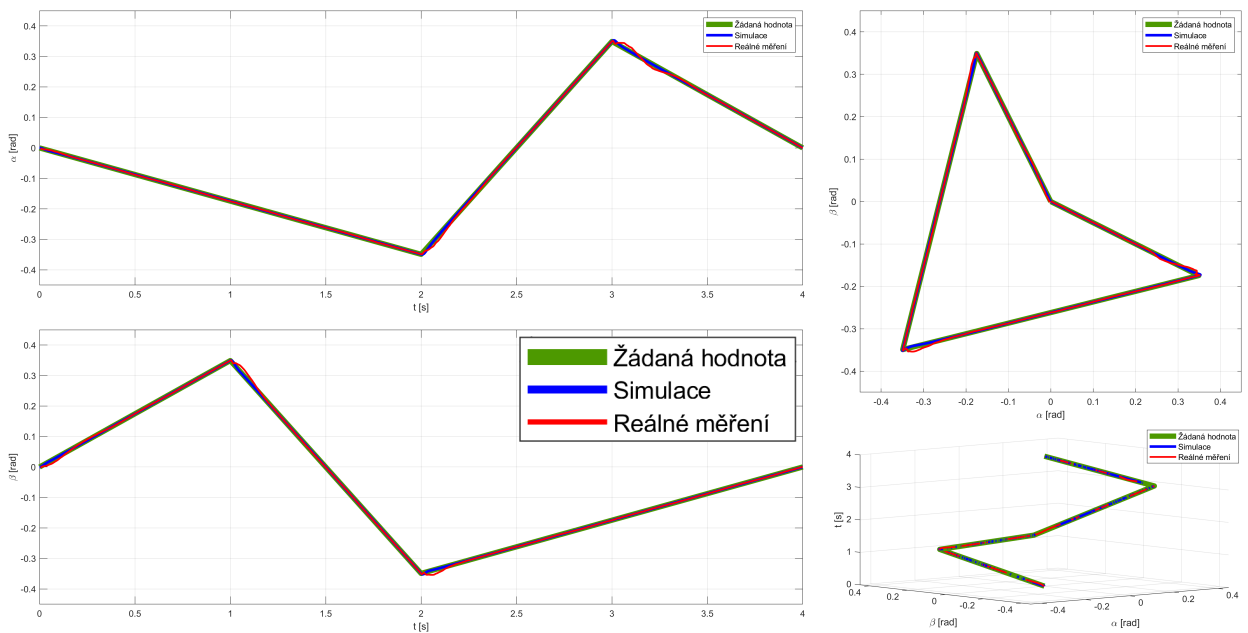
4.6.6 Porovnání regulátorů náklonu roviny

Jako představitel nejrozšířenější a běžně používané metody řízení pohybu byla vybrána **kaskádní regulace** (dále KR), za moderní metodu řízení pohybových stavů mechanické soustavy byla zvolena metoda regulace pomocí **výpočtů momentů** (dále RVM). Tyto dva přístupy byly porovnány na vybraných typových trajektoriích a důraz byl kladen zejména na sledování žádané hodnoty (schopnost trackingu), což je u robotických soustav stěžejní požadavek. Každá charakteristika zobrazující chování reálného systému je výsledkem statistického vyhodnocení z 10 nezávislých měření.

Pro ukázkou je uvedena testovací křivka ve tvaru lineární změny žádané hodnoty. V tomto případě (a i u dalších typů trajektorií kromě skokové změny)



Obr. 4.18 Kaskáda - lineární - $T = 4$ s



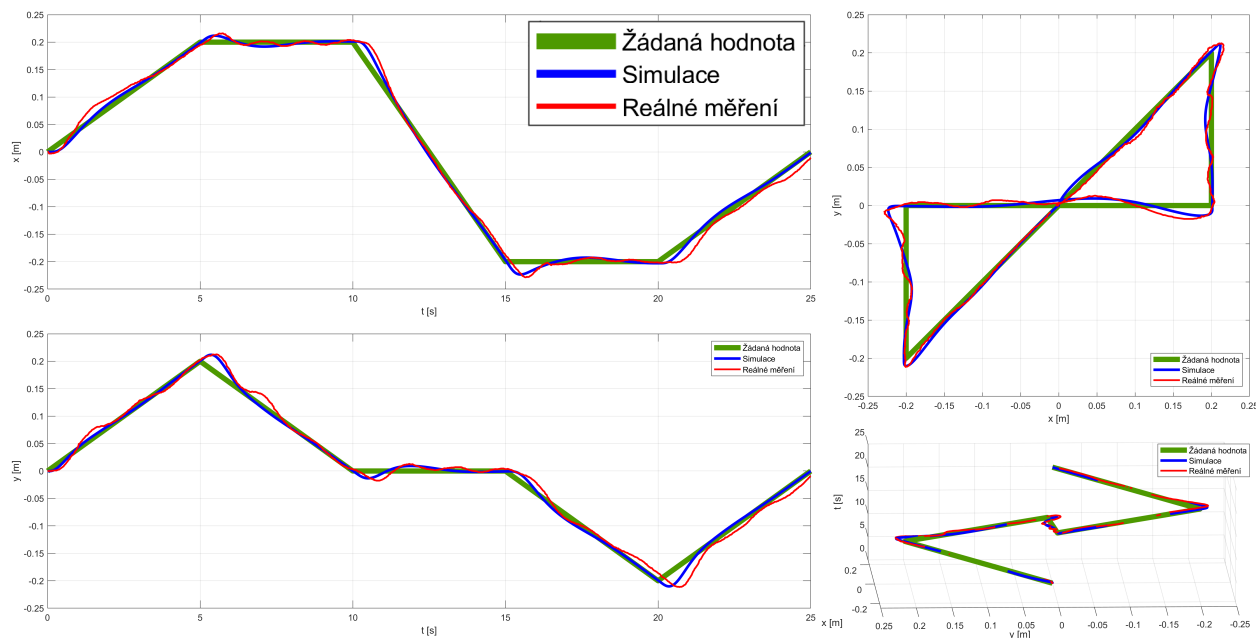
Obr. 4.19 Výpočet momentů - lineární - $T = 4$ s

lze jednoznačně tvrdit, že RVM dosahuje lepších výsledků, než RK. Na Obr. 4.18 je zobrazena regulační pochod pro lineární průběh žádané hodnoty RK, na Obr. 4.19 zase odezva RVM na stejný požadavek.

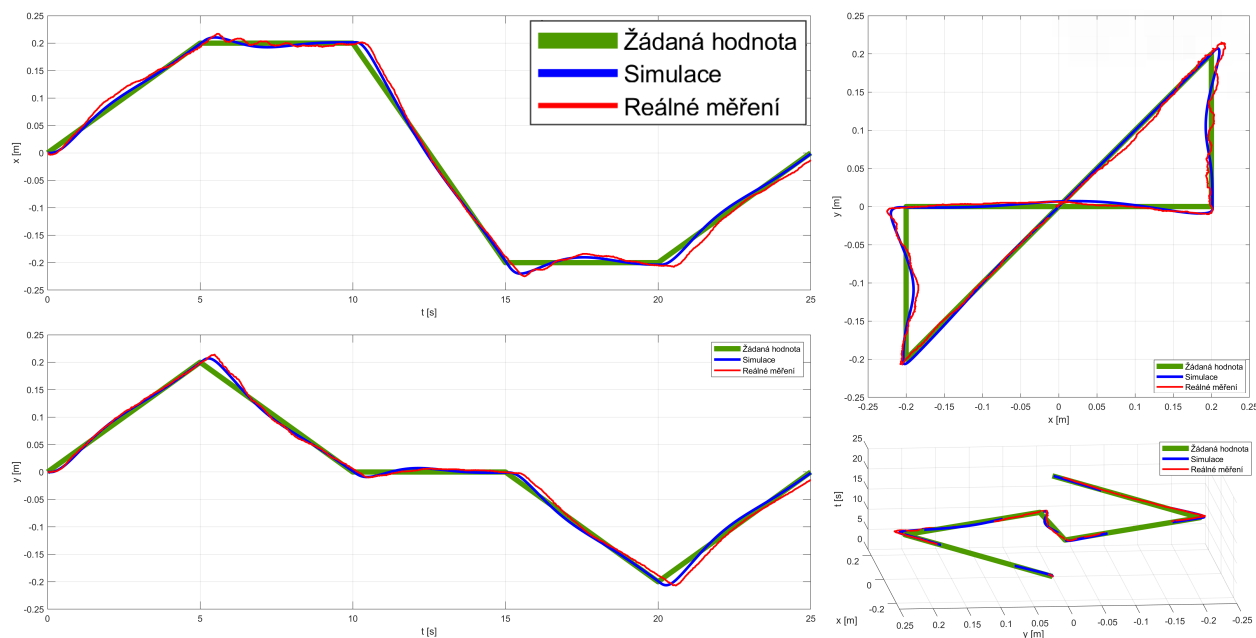
Všechny testovací trajektorie byly rovněž testovány při trvalé poruše systému v podobě zavěšeného závaží o hmotnosti 1 kg. Upevnění nebylo v reálných podmínkách pevné, proto navíc generuje do měřených dat chybu od volného zavěšení - oscilace závaží. Závěry měření hovoří opět ve prospěch RVM.

4.6.7 Porovnání regulátorů při regulaci kuličky

Při použití RK a RVM na řízení polohy kuličky na nakloněné rovině nejde ani tak o porovnání regulátorů samotných, jako o porovnání, jak tyto regulátory fungují s využitím výstupní hodnoty nadřazeného PD(I) regulátoru kuličky.



Obr. 4.20 Regulace kuličky s RK - lineární - $T = 25$ s



Obr. 4.21 Regulace kuličky s RVM - lineární - $T = 25$ s

Rozdíly mezi RK a RVM (Obr. 4.20 a 4.21) jsou už v tomto případě minimální.

4.7 Závěrečné vyhodnocení

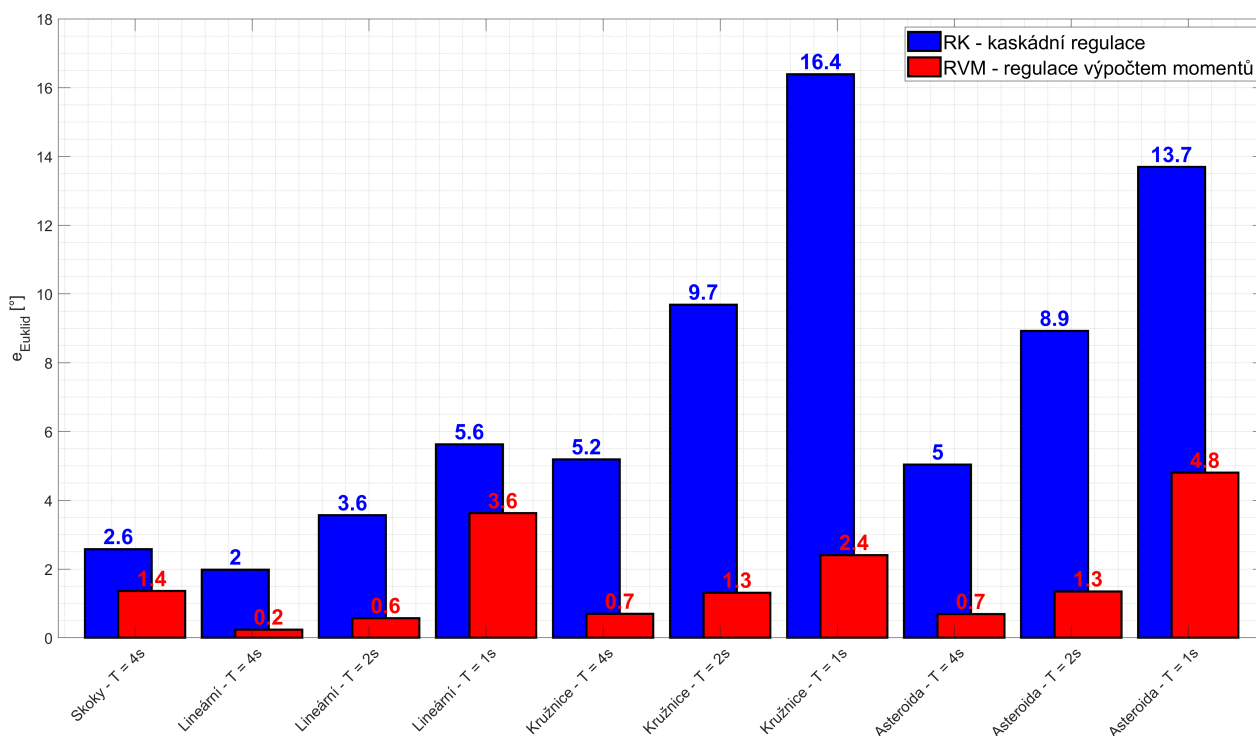
Závěrečné vyhodnocení probraných přístupů k řízení pohybu (potažmo kvalita regulace) bude posuzována z více úhlů pohledů, kterými jsou konkrétně:

- Regulační odchylka (průměrná Euklidovská odchylka).
- Rychlost/doba regulace (čas dosažení 95% žádané hodnoty).
- Nároky na elektrickou energii (procentuální porovnání).
- Podobnost chování reálného systému vs fyzikálního modelu při regulaci.
- Mechanické zatížení systému.

Porovnání je navázáno přímo na RK a RVM, tedy na regulaci náklonu roviny. Regulace pozice kuličky bude uvedena jen okrajově.

4.7.1 Porovnání z pohledu regulační odchylky

Při porovnání kvality regulace z pohledu regulační odchylky je patrné, že RVM dosahuje ve všech měřených případech lepších výsledků, než RK - viz Obr. 4.22.

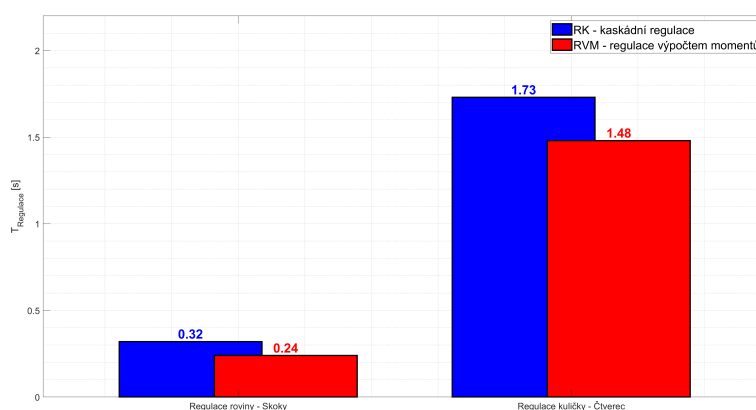


Obr. 4.22 Porovnání RK s RVM podle Euklidovské regulační odchylky

Euklidovská regulační odchylka u RK se pohybovala v rozmezí 1,5 až 10 násobku RVM, s průměrnou hodnotou cca $4,3^\circ$.

4.7.2 Porovnání z pohledu rychlosti/doby regulace

Vzhledem k charakteru testovacích trajektorií a fázovému posuvu RK při trackingu, byla jako referenční trajektorie vybrána skoková změna žádané hodnoty. V opačném případě by pro většinu průběhu u RK nebylo 95% žádané hodnoty ani dosaženo a porovnání by bylo značně zkreslené. Z odpovídajících průběhů se určila průměrná doba regulace z celého rozsahu a výsledné porovnání je uvedeno na Obr. 4.23.



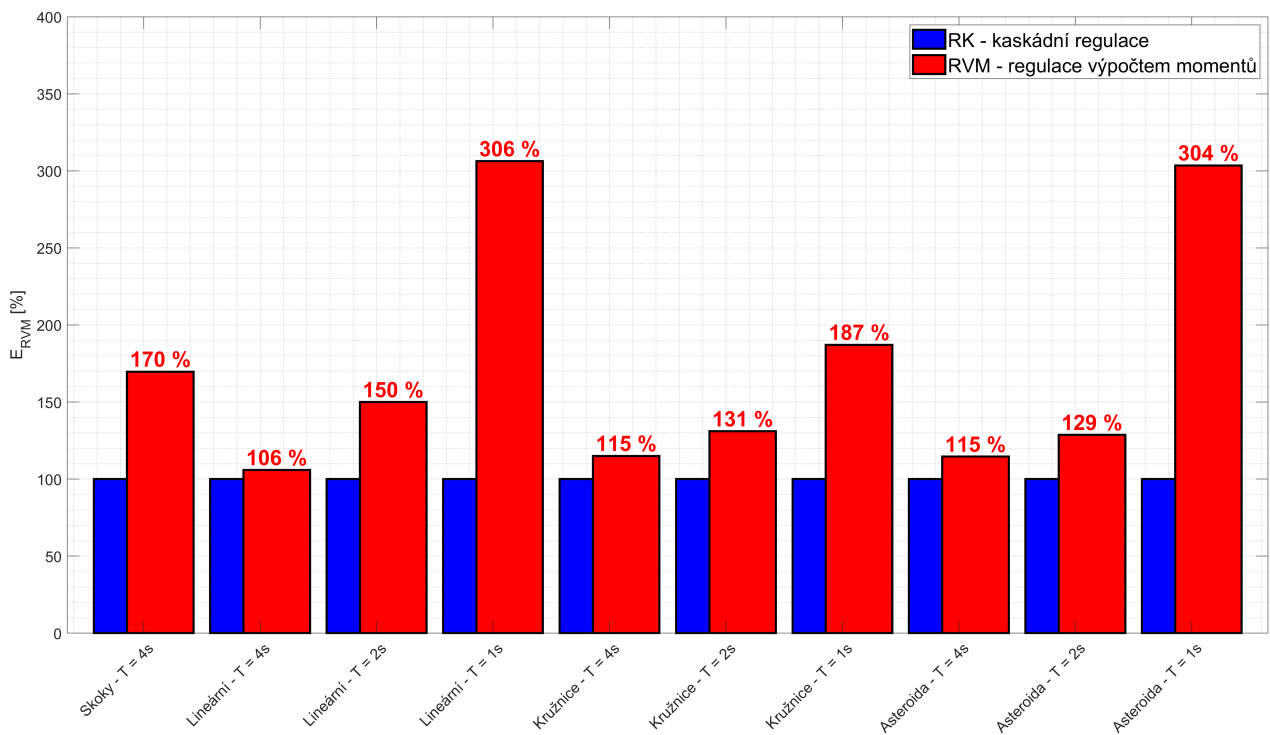
Obr. 4.23 Porovnání RK a RVM z pohledu času regulace

Při regulaci náklonu roviny je vidět, že RVM je zhruba o 1/4 rychlejší, než RK. Při regulaci kuličky už není mezi RK a RVM takový rozdíl, protože hlavní vliv na čas regulace má nadřazený PD(I) regulátor. RK je však stále o cca 15% pomalejší, než RVM.

4.7.3 Porovnání z pohledu nároků na elektrickou energii

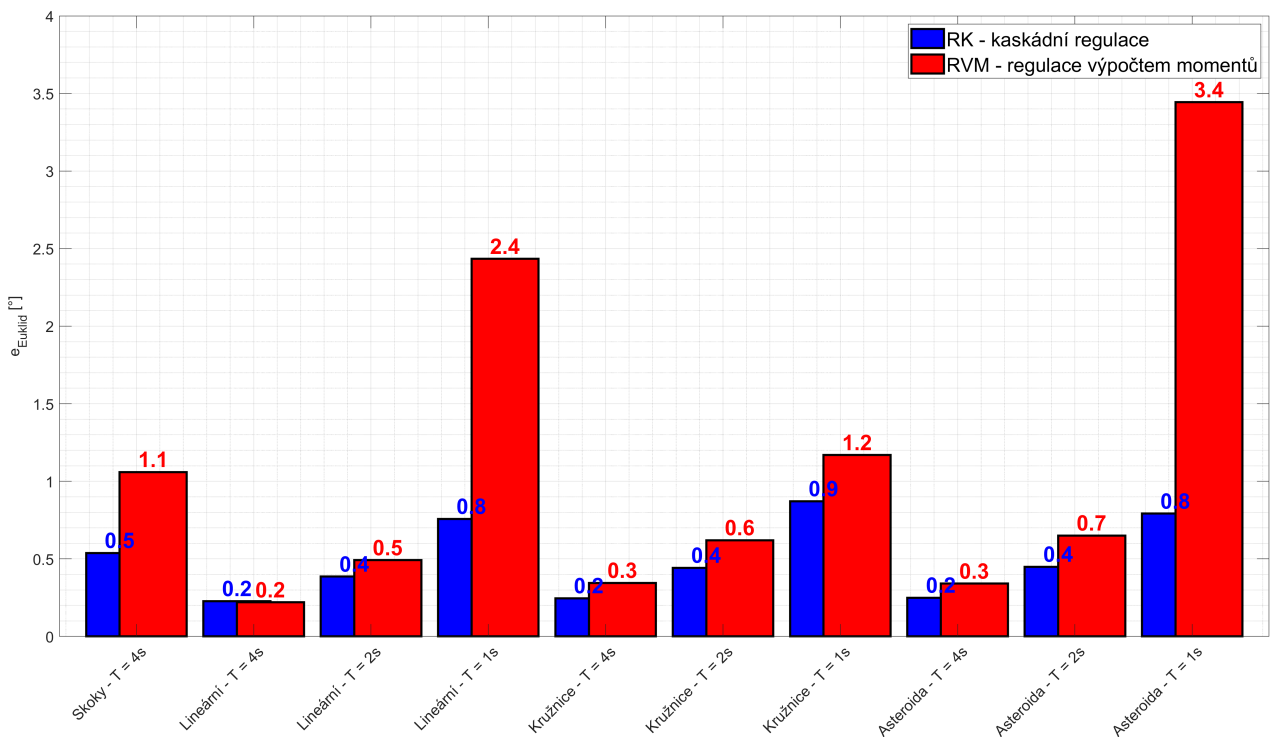
Mezi další metody vyhodnocení bylo zařazeno porovnání z pohledu energetické náročnosti probíraných typů regulátorů - poměrové porovnání mezi jednotlivými RK a RVM.

Na Obr. 4.24 jsou vykresleny procentuální energetické nároky RVM oproti normovaným nárokům RK. Je vidět, že ve všech případech je RVM energeticky náročnější, pro nejdynamičtější lineární a cykloidní průběh dokonce více než 3-násobně. Vše však záleží na nastavení regulátorů, uvedený příklad platí pouze pro zde probíranou konfiguraci.



Obr. 4.24 Porovnání RK a RVM z pohledu energetických nároků

4.7.4 Porovnání chování reálného a fyzikálního modelu

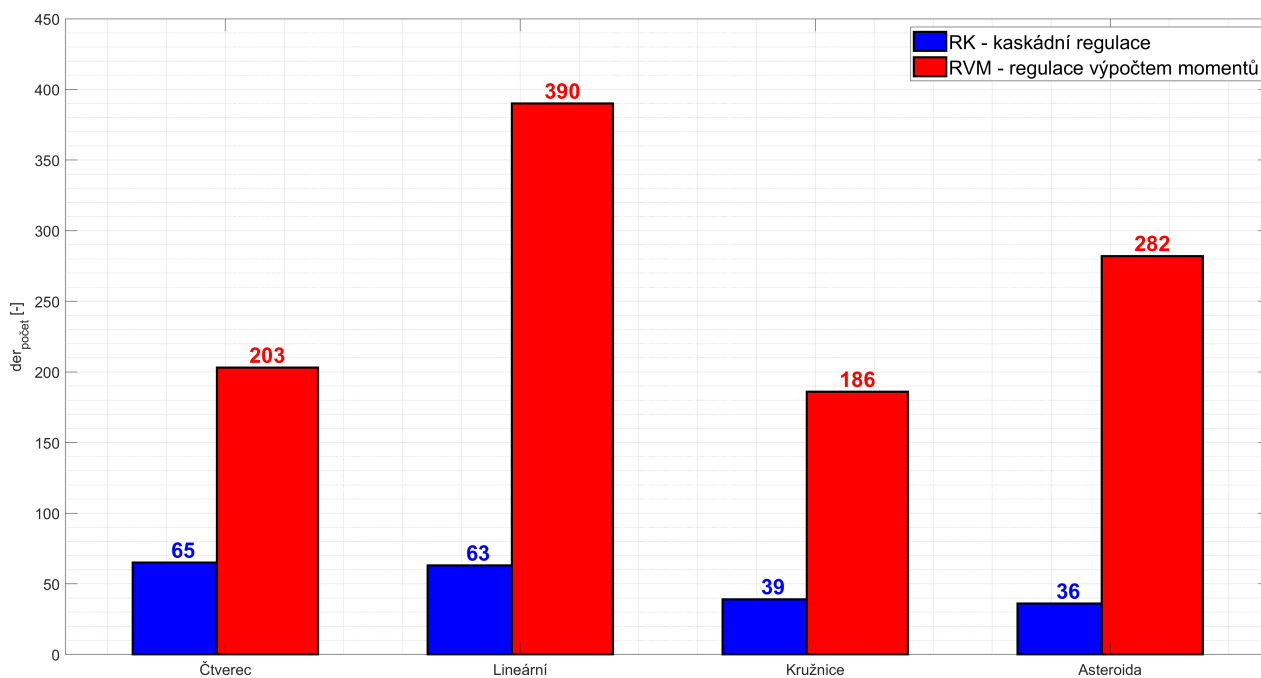


Obr. 4.25 Porovnání RK a RVM z pohledu podobnosti simulačního a reálného chování systému při regulaci roviny

Tato metoda vyhodnocuje podobnost chování fyzikálního a reálného modelu při regulaci pomocí RK a RVM. Tím lze určit míru důvěryhodnosti nastaveného regulátoru v simulaci, tedy míru pravděpodobnosti, že bude nastavený regulátor v simulaci fungovat i na reálném systému. Na Obr. 4.25 jsou zobrazeny průměrné Euklidovské odchylky pro jednotlivé testovací trajektorie při regulaci pomocí RK a RVM.

4.7.5 Porovnání mechanického zatížení systému

Poslední porovnávací metodou je vyhodnocení mechanického zatížení systému při regulaci. Uvažované mechanické zatížení testované soustavy vychází zejména z kmitání nakloněné roviny. Posuzovacím kritériem je tedy změna směru rychlosti náklonu roviny (počet změn znaménka derivace), protože se při této změně projevují vůle systému, dochází k opotřebení ozubených soukolí a ve výsledku ke stále se zvětšující hysterezní smyčce.



Obr. 4.26 Porovnání RK a RVM z pohledu mechanického zatížení systému při regulaci kuličky

Na grafu v Obr. 4.26 je vidět, že metoda RVM dosahuje cca 3 až 8 krát vyššího mechanického zatížení, a to podle typu žádané trajektorie. Je nutné podotknout, že graf je výsledkem vyhodnocení náklonů roviny při regulaci kuličky, tedy při rychle se měnících skokových změnách žádané hodnoty RK a RVM.

4.7.6 Shrnutí

Po vyhodnocení všech metod porovnání lze tvrdit, že:

- Z pohledu **Euklidovské regulační odchylky** při regulaci roviny je RVM jednoznačně vhodnější, RK ztrácelo zejména kvůli trvalé regulační odchylce při trackingu. Při řízení kuličky byla RK i RVM v podstatě rovnocenná, mírně lepších výsledků dosahovala RK.
- Při porovnání **rychlosti regulace** se obě metody lišily průměrně o 20% ve prospěch RVM.
- Co se týče **energetických nároků**, je ve všech případech RVM náročnější. Při nízkých dynamikách pohybu převyšuje RVM energetickou náročnost RK pouze v desítkách procent, u průběhů s vysokou dynamikou se vyšplhá až na trojnásobek.
- U vyhodnocení **podobnosti chování simulace a reálného systému** dosahuje RK menších odchylek a je tedy větší pravděpodobnost, že nastavený regulátor v simulaci bude fungovat velice podobně i v reálných podmínkách. U RVM jsou větší odchylky zejména při vysoké dynamice pohybu, při nízkých rychlostech se RK a RVM liší pouze v desítkách procent.
- Z pohledu **mechanického zatížení** je zřejmé, že dosahuje vyšších hodnot RVM. Významný rozdíl je viditelný hlavně při použití regulátoru s regulací kuličky, u řízení samotné roviny není rozdíl tak znatelný.

Po vyhodnocení a srovnání obou regulátorů nelze jednoznačně říci, jaký typ je lepší, nebo horší. Každý má zkrátka svoje pozitiva i negativa a je nutné volit vždy podle způsobu použití na konkrétním systému a s konkrétními požadavky na průběh regulace.

5 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

Tato dizertační práce se zaměřuje na vyhodnocení a porovnání moderních metod řízení pohybových stavů mechanické soustavy, jejíž dynamické projevy odpovídají chování sériového průmyslového robotu. Protože ověření na dostupném reálném průmyslovém robotu není v současnosti možné (nutný přístup alespoň na proudovou smyčku robotu, což žádný výrobce nedovoluje), bylo nutné postavit vlastní robotickou strukturu, která má k dispozici detailní matematický a fyzikální model pro analýzu a syntézu, prvky moderních přístupů k řízení pohybu a je plně otevřená pro další vývoj. Právě tato výsledná komplexní mechatronická struktura se všemi rozšířeními je hlavním výsledkem práce, spolu s dvěma navrženými, otestovanými, porovnanými a v samotné podstatě řízení se lišícími metodami regulace. Níže jsou do podkapitol rozděleny dílčí výsledky, které již byly detailněji popsány v kapitole 4.

5.1 Reálně sestavená robotická struktura

Reálný systém, sloužící pro testování teoreticky funkčních strategií řízení pohybu, je pokládán za stěžejní část této práce. Bez možnosti prakticky ověřit použitelnost navržených regulátorů, by se všechna tvrzení zakládala pouze na porovnání s matematickým, v lepším případě fyzikálním, modelem. Fyzikální limity a různé zanedbané omezení, které jsou na první pohled nepodstatné, se v synergickém efektu mohou promítnout jako nezanedbatelný problém, který je nutný nějakým způsobem vyřešit. Představovaná robotická struktura (Obr. 4.4) je výsledkem takového řešení a postupně procházela různými úpravami (Obr. 4.3). Většina dílů je vyrobená technologií 3D tisku z materiálu ABS a PETG, ostatní prvky jsou opracovány soustružením, frézováním, svařováním, vrtáním, broušením, leštěním apod. Sestavení celého reálného systému je popisováno v kapitolách 4.1 až 4.2.

5.2 CAD model

Všechny díly mají svůj CAD model a jsou tedy modifikovatelné ve vztahu ke zbytku celé sestavy. Dílům, které nebyly přímo vyrobené (napájecí zdroje, servosilovač, motory, převodovky atd.), byly vytvořeny zjednodušené modely s přesnými rozměry a fyzikálními vlastnostmi, pro potřeby fyzikální/matematické

analýzy a syntézy. Kompletní CAD model (Obr. 4.2) prošel stejně jako reálný systém mnoha úpravami (Obr. 4.1 a 4.2) a ve své aktuální podobě obsahuje přes 270 dílů. CAD model je nedílnou součástí celé práce a je využíván od samotného návrhu typového uspořádání, až po konečný návrh zákona řízení. Bez možnosti jeho využití by bylo vyřešení některých částí práce velmi komplikované, pokud by byly vůbec řešitelné (např. kapitola 4.1, 4.5, 4.6.1, 4.6.2, 4.6.5 atd.).

5.3 Matematický model

S pomocí CAD modelu a odvozených kinematických transformačních matic v kapitole 4.5 byl sestavený matematické model (kapitola 4.6.1), který se následně využíval pro obě metody regulace roviny (kapitola 4.6.3 a 4.6.5). Jeho výsledného tvaru bylo dosaženo dvěma postupy, a na dynamických charakteristikách je dokázáno, že kvalifikovaným zjednodušením je možné výrazně zredukovat složitost matematického zápisu. Zjednodušený popis se využíval pro další analýzu a syntézu, přičemž se stále kontrolovalo, jestli nedosahuje přesný původní tvar lepších výsledků.

5.4 Fyzikální model

Opět s využitím CAD modelu, v tomto případě jako základem pro kompletní fyzikální popis všech hmotných dílů systému, byl sestavený fyzikální model, popsáný v kapitole 4.6.2. Sloužil pro kontrolu správnosti odvození matematického modelu, k výběru vhodných akčních členů, představě o chování reálného systému a především jako simulační model pro nastavení a odladění všech regulátorů, kontrolu správnosti jejich přepisu do jazyka C++ a průběžné ověřování dílčích částí regulačních pochodů.

5.5 Řídicí aplikace s GUI

Pro jednoduchou parametrizaci celého systému, vizuální zpětnou vazbu a přívětivé uživatelské ovládání byla vytvořena multiplatformní grafická aplikace v jazyce C++, běžící na minipočítači Raspberry Pi. Program je plně otevřený a připravený na mnohá rozšíření, které mohou na tuto práci navazovat jak

v Ph.D. úrovni, tak v Ing. i Bc. obtížnosti, což dokazují úspěšně obhájené studentské práce [57, 14], které řešily zde neprezentované dílčí části.

5.6 Strojové vidění

System využívá moderní a masivně se rozšiřující metodu strojového vidění vyhodnocením optické informace z kamery. Stejně jako u řídicího počítače byl zde kladen důraz na levné a otevřené řešení, a je čistě na implementátorovi, jakou cestou zpracování obrazu se bude ubírat. Vyhodnocení obrazové informace využívá pouze základních funkcí a knihovny OpenCV, nejsou použity žádné hotové řešení, vše je složeno z dílčích operací s obrazem a vzhledem k výpočetnímu výkonu použitého řídicího počítače je kladen důraz na maximální optimalizaci výpočtů pro práci v reálném čase. Popis strojového vidění je rozebírán v kapitolách 4.4 a 4.5.

5.7 Regulace roviny kaskádou P(I)(D) regulátorů

Jako etalon pro porovnávání různých metod řízení pohybu byla zvolena kaskáda složená z P(I)(D) regulátorů. Její nastavení a ladění probíhalo po celou dobu řešení práce od chvíle, kdy byl reálný model postavený a schopný řízení v uzavřené smyčce. Rychlostní a polohová smyčka má standardní strukturu a postup odvození a nastavení je popisován v kapitole 4.6.3. K výpočtu parametrů regulátorů bylo využito matematického modelu (pouze moment setrvačnosti) a simulace chování probíhala nejdříve na fyzikálním modelu, až poté na reálném systému.

5.8 Regulace roviny výpočtem točivých momentů

Jako jeden z moderních přístupů k řízení pohybu byla vybrána metoda výpočtu točivých momentů. Jedná se o zcela odlišnou koncepci oproti kaskádě P(I)(D) regulátorů a celé odvození, nastavení a ověření funkčnosti je popisováno v kapitole 4.6.5. Pro reálné použití této metody bylo nutné udělat rozvahu nad možným přístupem, nastavení regulátoru probíhalo nejdříve v simulaci s využitím typových testovacích trajektorií, a celý postup byl krok po kroku popsán a zdůvodněn.

5.9 Regulace kuličky

Regulace kuličky je doplňující možností celého systému, protože neslouží k hlavní části práce, kterou je porovnání standardního a moderního přístupu k řízení pohybu. Je však nezanedbatelnou součástí, s kterou je již od začátku počítáno a která výrazně rozšiřuje použitelnost celého systému, jehož podoba se přizpůsobovala právě této možnosti. Úkoly související s regulací kuličky zabírají minimálně čtvrtinu veškeré probírané problematiky a dávají systému potenciál pro budoucí rozšíření v oblasti pokročilých metod zpracování obrazu s využitím adaptivních přístupů, neuronových sítí, pro testování související se zpracováním obrazu na reálných datech, s aplikací výsledků přímo pro účely řízení pohybu apod. Pro samotnou regulaci kuličky byla zvolena základní metoda řízení v podobě PD regulátoru, a má pouze demonstrovat, že systém jako celek funguje a je schopný využít podřízených smyček pro řízení polohy kuličky na nakloněné rovině.

5.10 Závěrečné vyhodnocení a porovnání

Před souhrnným srovnáním byly porovnány regulační pochody RVM a RK na testovacích trajektoriích typu skokové změny, lineární změny, harmonické změny ve tvaru kružnice a neharmonické změny ve tvaru asteroidy. Porovnání probíhalo jak při běžné situaci, tak při trvalé poruše v podobě přidaného závaží, a pro několik stupňů žádané dynamiky pohybu - vše je popisováno v kapitole 4.6.6. Zde jednoznačně dominuje RVM, protože to co je na první pohled vidět, je regulační odchylka. Jako doplňující část bylo uvedeno taktéž porovnání regulátorů při regulaci kuličky a je rozebíráno v kapitole 4.6.7.

K závěrečnému vyhodnocení obou regulátorů bylo stanoveno celkem 5 kritérií, které zahrnují široké spektrum různých pohledů na kvalitu regulace. Patří mezi ně kritérium Euklidovské regulační odchylky, rychlost regulace, energetické nároky, podobnost chování v simulaci a na reálném zařízení a rozdíly v mechanickém zatížení systému. Porovnání je znázorněno na přehledných sloupcových grafech s popisem a vysvětlením v kapitole 4.7. Všechny hodnotící kritéria jsou na závěr shrnuty.

6 PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

Vědecký přínos práce je jak v teoretické části, která obsahuje množství nestandardních přístupů k řešení zadaných technických problémů, tak především v části praktické, v podobě reálně postaveného systému, který je plně otevřený a využitelný i pro testy jiných, teoreticky funkčních návrhů, které je potřebné ověřit i z praktického hlediska. Systém má jak možnost testování různých přístupů k řízení pohybu, tak schopnost implementace a ověření knihovnic, nebo vlastních funkcí zpracování obrazu. Výsledky kamerového vyhodnocení mohou, ale nemusí, být využity přímo na řízení pohybu v reálném čase. Toto přímé a zcela vývojářsky otevřené propojení programátorské a automatizérské části na jednom řídicím počítači, kterým může být v podstatě jakýkoliv připojený počítač s operačním systémem, je z vědecko-akademického pohledu velmi přínosné a pohodlné. To platí zejména v okamžiku, kdy je teoreticky ověřený a funkční návrh nutné aplikovat do praxe.

Praktickým přínosem je tedy propojení vědeckého/akademického řešení s praxí - možnost dokázání, že je navrhovaný přístup reálně použitelný i na skutečném mechatronickém systému. Vědecky zpracovaná část má většinou dobře zvládnutou teoretickou stránku věci, výsledky má ověřené simulačně a předpokládá, že simulační model je dostatečně přesný na to, aby vše fungovalo uspokojivě i na reálném systému. To však nemusí nutně platit, a proto se přistupuje k výrobě prototypů, na kterých se ověřuje aplikovatelnost navrhovaného přístupu alespoň na typových úlohách, než se přistoupí k vývoji finálního produktu. Návrh, výroba, zprovoznění, obsluha a kvalifikované vyhodnocení výsledků funkčnosti takového prototypu je však zdlouhavé a mnohdy časově nejnáročnější částí celé práce, což bylo i v tomto případě nejméně ověřeno. Sestavené reálné zařízení by tedy mohlo sloužit jako odladěný testovací systém, s částí připravenou pro implementaci vlastního řešení.

Navržená soustava byla po celou dobu vývoje stavěná tak, aby byla použitelná také při výuce studentů automatizace/robotiky/informatiky, protože na trhu není k dispozici žádný podobný koncept, který by byl takto otevřený pro implementaci vlastních řešení a skýtal by srovnatelné možnosti využití. Důkazem, že je struktura použitelná i pro řešení jednoduchých problémů, jsou již dříve zmiňované bakalářské práce. Další nápady pro rozšíření systémů by vystačily na desítky bakalářských/diplomových a několik dizertačních prací.

7 ZÁVĚR

Původním záměrem práce bylo otestovat různé moderní metody řízení pohybu na reálném průmyslovém robotu, který je k dispozici na FAI UTB. Od toho bylo však postupem času nutné upustit, protože v současnosti není k dispozici žádný průmyslový robot, u kterého by výrobce umožnil přístup do řídicí jednotky robota s úpravou struktury řízení. Začal se tedy od základu budovat vlastní robotický/mechatronický systém, který skýtá více možností než průmyslový robot, je plně otevřený vývojáři, jsou známé veškeré jeho vlastnosti, parametry a technické vybavení a jeho dynamické projevy odpovídají chování sériového průmyslového robota antropomorfního typu.

Byla zvolena struktura s 2 přímo řízenými DOF, rozšířená o další 2 zobecněné nepřímě řízené DOF, která je v literatuře známá pod názvem „Ball & Plate“ - Kulička na nakloněné rovině. Ve všech případech je však publikovaná jako paralelní struktura, která zcela postrádá vlivy vzájemného silového působení, tak charakteristického pro sériovou kinematickou strukturu. Probíraný systém je tedy zcela odlišný od zmiňovaných paralelních uspořádání, kterých jsou v literatuře stovky, a jeho finální podoba prošla mnoha změnami a úpravami.

Paralelně se sestavováním prvního funkčního prototypu probíhal výběr technického vybavení. Za aktuátory byly zvoleny PMSM s řídicí jednotkou (servosilovačem), výběr jejich výkonů byl volen podle výsledků dynamické simulace požadovaného typového průběhu v SIMULINKu. Převodovky byly z finančních důvodů vybrány planetové v ekonomické variantě. Dalším důležitým technickým vybavením byla optická kamera a řídicí počítač, který musí zároveň sloužit jak pro řízení, tak pro zpracování obrazu z kamery. Zde byl vybrán nejlevnější dostupný minipočítač bez systému reálného času, sloužícího primárně pro výuku a hobby účely, a kamery s podobnými parametry. Cena uvedeného řešení odpovídala zhruba 1 500 Kč za celek a cílem bylo dokázat, že i pro řízení takto komplexního systému s kamerovým viděním není potřeba hardware s vysokým výpočetním výkonem.

Již při samotném návrhu typového uspořádání byl vytvářen CAD model, který je využíván při řešení téměř každé části této práce, a v některých případech je zcela nezbytný. Na základě CAD modelu byl odvozený matematický a fyzikální model. Matematický model sloužil pro účely návrhu zákona řízení,

fyzikální model byl využíván především pro simulaci chování reálného systému. Celé zařízení je ovládáno aplikací s grafickým rozhraním naprogramovanou v jazyce C++, která je multiplatformní, a pokud bude spuštěna na libovolném počítači připojeném k řízenému systému, může tento počítač sloužit jako řídicí.

Řízení systému je zajištěno dvěma typy regulátorů, výchozí je kaskádní P(I)(D) regulace, z moderních pokročilých metod řízení pohybu byla vybrána metoda výpočtu momentů. Tyto regulátory řídí náklon roviny, regulaci kuličky obstarává PD(I) regulátor. Nastavení a odladění regulátorů probíhalo nejdříve na simulačním modelu, až poté na reálném systému. K odvození parametrů regulátoru byl využitý matematický model. Pro implementaci metody regulace výpočtem točivých momentů do reálného systému muselo navíc proběhnout předzpracování žádaných hodnot. K rekonstrukci rychlosti byla využita tzv. průmyslová/filtrovaná derivace a simulační model byl rozšířen o další detaily, které vedly ke zpřesnění jeho chování a tím možnosti dokonalejšího nastavení regulátoru přímo v simulaci.

Kvalita regulace byla vyhodnocena pomocí 5 navržených metod na 4 typech testovacích trajektoriích se 3 stupni dynamiky pohybu. Pro každou trajektorii se na reálném systému provedlo 10 měření, z nichž byl vybrán na základě statistického vyhodnocení vždy jeden dominantní průběh. Tyto průběhy byly poté vzájemně porovnány jak mezi metodami regulace, tak s výsledky simulace na fyzikálním modelu. Mezi kritéria kvality regulace bylo zařazeno porovnání pomocí Euklidovské regulační odchylky, rychlosti regulace, energetické náročnosti, podobnosti chování simulačního modelu a reálného zařízení a mechanického zatížení systému. K vyhodnocení regulačních pochodů bylo provedeno přes 1000 dílčích měření, které jsou prezentovány na více než 150 grafech.

Závěrem lze říci, že každá metoda regulace má svoje pozitiva i negativa a nelze jednoznačně tvrdit, že RVM je lepší než RK, i když dosahovala ve většině testovacích kritérií lepších výsledků. Je otázkou priorit, jaká metoda řízení bude pro ten či onen systém vhodnější, a konečná volba bude vždy jakýmsi kompromisem mezi rychlostí a přesností regulace vs robustností a plynulostí regulačního pochodu. Celý řízený i řídicí systém je připraven na další rozšíření a vývoj jak metod řízení pohybu, tak principů strojového vidění. Nad touto prací strávil autor více než 10 000 hodin svého času, a proto věří, že budou alespoň její dílčí části využity k akademickým, vědeckým i praktickým účelům.

8 ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA

Osobní údaje



👤 Jiří Zátpek, nar. 19. 01. 1991

🏠 Kozlovice 308, 739 47 Kozlovice, ČR

@ zatopek@utb.cz

📞 +420 723 747 888

Vzdělání

- 2015 - dosud:** **Ph.D.**
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, obor Automatické řízení a informatika, Zlín
- 2013 - 2015:** **Ing.**
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, obor Automatické řízení a informatika, Zlín
- 2010 - 2013:** **Bc.**
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, obor Informační a řídicí technologie, Zlín
- 2006 - 2010:** **Maturita**
Střední průmyslová škola elektrotechniky a informatiky, obor Elektro-počítačové systémy, Frenštát pod Radhoštěm

Studijní stáže

- 05/2018 - 10/2018:** **5 měsíční studijní stáž - Erasmus+**
Žilinská univerzita v Žilině, Elektrotechnická fakulta, Katedra mechatroniky a elektroniky, Slovensko
- 05/2017 - 08/2017:** **3 měsíční studijní stáž - Erasmus+**
Universidade do Minho, School of Engineering, Mechanical Engineering Department, Portugalsko

Pracovní zkušenosti

- 2019 - dosud:** **Akademický pracovník - asistent**
UTB ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, ÚAŘT
- 2017 - 2019:** **Výzkumný pracovník**
Regionální výzkumné centrum CEBIA-Tech, Zlín
- 2014 - 2016:** **PC/PLC programátor**
Dudr Tools, s.r.o., Zlín
- 2012 - 2014:** **C/C++ programátor**
UNIS, a.s., Brno
- 2008 - 2012:** **Elektrotechnik**
ZÁVODNÝ ELEKTRO s.r.o., Lhotka

Akademická činnost

- Publikace - ocenění:** XLI. Seminári ASŘ 2016 – Laureate Award
5th DAAAM International Doctoral School – Festo Price
28th DAAAM - Best Poster Presentation
- Projekty:** IGA 2016, 2017, 2018, 2019, 2020
CEBIA-Tech – (NPU I) č. MSMT – 7778/2014
OP PIK Aplikace, CZ.01.1.02/0.0/0.0/19_262/0020292
OP VVV, CZ.02.2.69/0.0/0.0/16_015/0002204
OP PIK Aplikace, CZ.01.1.02/0.0/0.0/20_321/0023805
MoVI-FAI, CZ.02.2.67/0.0/0.0/16_016/0002325
OP PIK Aplikace, CZ.01.1.02/0.0/19_262/0020111
TA ČR - TREND FW01010381
OP PIK PROZAX, CZ.01.1.02/0.0/0.0/20_321/0023675
- Výuka - předměty:** Mechatronické systémy
Konstrukce robotů a manipulátorů
Programování mikropočítačů
Kinematika a dynamika mechatronických systémů
Řízení pohybu
Akční členy v mechatronických systémech

Programování
Embedded systémy s mikropočítači
Programování a aplikace průmyslových robotů
Robotická laboratoř
Robotická pracoviště

Jazykové znalosti

Český jazyk: Mateřský jazyk
Anglický jazyk: B2 - středně pokročilý

Řidičský průkaz

Skupiny:  A  B

Osobní dovednosti

- Zkušenosti s použitím různých softwarových prostředků pro řešení zadaného technického problému.
- Schopnost propojení znalostí z matematiky, fyziky, elektrotechniky, mechatroniky, programování a následné využití pro automatizaci/robotizaci.
- Manuální zručnost, technické myšlení, kreativita, zodpovědnost, spolehlivost.

Software: Matlab, Simulink/Simscape Multibody, SolidWorks, Qt Creator/OpenCV, VS Code, TIA Portal, PrusaSlicer, Inkscape, TEXstudio, Stäubli Robotics Suite, ABB RobotStudio, MS Windows, MS Office

Jazyky: C, C++, Matlab, LaTeX, VAL-3, Rapid, SQL, ST, LD, LBD

LITERATURA

- [1] ALI, H. I., JASSIM, H. M. and HASAN, A. F. Optimal Nonlinear Model Reference Controller Design for Ball and Plate System. *Arabian journal for science and engineering (2011)*. Nov 07, 2018, 44, 8, pp. 6757–6768. doi: 10.1007/s13369-018-3616-1. Dostupné z: <link.springer.com/article/10.1007/s13369-018-3616-1>.
- [2] ALVAREZ-RODRÍGUEZ, S. and LECONA, F. G. P. n-th Order Sensor Output to Control k-DoF Serial Robot Arms. *Journal of Sensors*. Jan 11, 2021, 2021, pp. 1–14. doi: 10.1155/2021/8884282. Dostupné z: <dx.doi.org/10.1155/2021/8884282>.
- [3] ASHI, M. M. A., ELAYDI, H. and HADROUS, I. A. Modelica Based Object-Oriented Modeling and PD-Computed Torque Control of a 2-DOF Robotic Arm. pp. 13, Piscataway, Jan 1, 2018. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (IEEE). Dostupné z: <search.proquest.com/docview/2132078467>.
- [4] ATHERTON, D. P. *Nonlinear Control Engineering*. Van Nostrand Reinhold Company, 1 edition, 1975.
- [5] AWTAR, S., BERNARD, C., BOKLUND, N., MASTER, A., UEDA, D. and CRAIG, K. Mechatronic design of a ball-on-plate balancing system. *Mechatronics*. 2002, 12, 2, pp. 217–228. doi: 10.1016/S0957-4158(01)00062-9.
- [6] BA, D. X. and BAE, J. A Nonlinear Sliding Mode Controller of Serial Robot Manipulators With Two-Level Gain-Learning Ability. *IEEE access*. 2020, 8, pp. 189224–189235. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3032449. Dostupné z: <ieeexplore.ieee.org/document/9233324>.
- [7] BANG, H. and LEE, Y. S. Embedded Model Predictive Control for Enhancing Tracking Performance of a Ball-and-Plate System. *IEEE Access*. 2019, 7, pp. 39652–39659. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2907111.
- [8] BANG, H. and LEE, Y. S. Implementation of a Ball and Plate Control System Using Sliding Mode Control. *IEEE access*. 2018, 6,

- pp. 32401–32408. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2838544. Dostupné z: <ieeexplore.ieee.org/document/8361429>.
- [9] BARTH, A., WEISE, C. and REGER, J. Application of Higher-Order Sliding-Modes to a Ball and Plate System. pp. 192–197. IEEE, Jul 2018. doi: 10.1109/VSS.2018.8460469. Dostupné z: <ieeexplore.ieee.org/document/8460469>.
- [10] BDOOR, S. R., ISMAIL, O., ROMAN, M. R. and HENDAWI, Y. Design and implementation of a vision-based control for a ball and plate system. pp. 1–4. IEEE, 2016. doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7910965. Dostupné z: <ieeexplore.ieee.org/document/7910965>.
- [11] BENABDALLAH, I., BOUTERAA, Y., BOUCETTA, R. and REKIK, C. Kinect-based Computed Torque Control for lynxmotion robotic arm. pp. 1–6. University of Al Qayrawan, Tunisia, Dec 2015. doi: 10.1109/ICMIC.2015.7409416. Dostupné z: <ieeexplore.ieee.org/document/7409416>.
- [12] BETANCOURT, F. I. R., ALARCON, S. M. B. and VELASQUEZ, L. F. A. Fuzzy and PID controllers applied to ball and plate system. pp. 1–6. IEEE, Oct 2019. doi: 10.1109/CCAC.2019.8921113. Dostupné z: <ieeexplore.ieee.org/document/8921113>.
- [13] BORAH, M., ROY, P. and ROY, B. K. Enhanced Performance in Trajectory Tracking of a Ball and Plate System using Fractional Order Controller. *Journal of the Institution of Electronics and Telecommunication Engineers*. Jan 02, 2018, 64, 1, pp. 76–86. doi: 10.1080/03772063.2017.1343157.
- [14] BRABOREC, P. Integrace bezdrátového gyroskopického ovladače do reálného systému řízení pohybu s grafickou vizualizací snímaných veličin, 2020. Dostupné z: <hdl.handle.net/10563/47961>.
- [15] DOBRIBORSKI, D., MARGUN, A. and KOLYUBIN, S. Discrete Robust Controller for Ball and Plate System. pp. 1–9. IEEE, Jun 2018. doi: 10.1109/MED.2018.8442461. Dostupné z: <ieeexplore.ieee.org/document/8442461>.

- [16] FABREGAS, E., DORMIDO-CANTO, S. and DORMIDO, S. Virtual and Remote Laboratory with the Ball and Plate System. *IFAC-PapersOnLine*. Jul 2017, 50, 1, pp. 9132–9137. doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1716.
- [17] FAN, X., ZHANG, N. and TENG, S. Trajectory planning and tracking of ball and plate system using hierarchical fuzzy control scheme. *Fuzzy Sets and Systems*. 2004, 144, 2, pp. 297–312. doi: 10.1016/S0165-0114(03)00135-0.
- [18] FINTA, B. and KISS, B. Two-Degree s-of-Freedom Controller Synthesis to Robustify the Computed Torque Method. pp. 1–6. IEEE, Oct 15, 2020. doi: 10.1109/ISMCR51255.2020.9263772. Dostupné z: <ieeexplore.ieee.org/document/9263772>.
- [19] GALVAN-COLMENARES, S., MORENO-ARMENDÁRIZ, M. A., JESÚS RUBIO, J., ORTÍZ-RODRIGUEZ, F., YU, W. and AGUILAR-IBÁÑEZ, C. F. Dual PD Control Regulation with Nonlinear Compensation for a Ball and Plate System. *Mathematical Problems in Engineering*. Apr 16, 2014, 2014, pp. 1–10. doi: 10.1155/2014/894209. Dostupné z: <dx.doi.org/10.1155/2014/894209>.
- [20] HAN, S., WANG, H. and TIAN, Y. Integral backstepping based computed torque control for a 6 DOF arm robot. pp. 4055, Piscataway, Jan 1, 2017. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (IEEE). Dostupné z: <search.proquest.com/docview/1919645067>.
- [21] HO, M.-T., RIZAL, Y. and CHU, L.-M. Visual Servoing Tracking Control of a Ball and Plate System: Design, Implementation and Experimental Validation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. Jul 09, 2013, 10, 7, pp. 287. doi: 10.5772/56525. Dostupné z: <journals.sagepub.com/doi/full/10.5772/56525>.
- [22] HUANG, D.-S., BEVILACQUA, V., FIGUEROA, J. C. and GAN, Y. Advanced Intelligent Computing. In *7th International Conference, ICIC 2011, Zhengzhou, China*, pp. 538–543, Berlin, August 11-14, 2011 November 7, 2011. Heidelberg Springer Berlin Heidelberg 2012.

- [23] JEON, J.-H. and HYUN, C.-H. Adaptive sliding mode control of ball and plate systems for its practical application. pp. 119–123. IEEE, Apr 2017. doi: 10.1109/ICCRE.2017.7935054. Dostupné z: <ieeexplore.ieee.org/document/7935054>.
- [24] KAN, D., XING, B., XIE, W. and ZHU, L. A minimum phase output based tracking control of ball and plate systems. *International journal of dynamics and control*. Jun 06, 2021, 10, 2, pp. 462–472. doi: 10.1007/s40435-021-00824-1. Dostupné z: <link.springer.com/article/10.1007/s40435-021-00824-1>.
- [25] KASSEM, A., HADDAD, H. and ALBITAR, C. Comparison Between Different Methods of Control of Ball and Plate System with 6DOF Stewart Platform. *IFAC-PapersOnLine*. 2015, 48, 11, pp. 47–52. doi: 10.1016/j.ifacol.2015.09.158.
- [26] KASTNER, A., INGA, J., BLAUTH, T., KOPF, F., FLAD, M. and HOHMANN, S. Model-Based Control of a Large-Scale Ball-on-Plate System With Experimental Validation. 1, pp. 257, Piscataway, Jan 1, 2019. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (IEEE). doi: 10.1109/ICMECH.2019.8722850.
- [27] KER, C. C., LIN, C. E. and WANG, R. T. Tracking and balance control of ball and plate system. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*. Apr 01, 2007, 30, 3, pp. 459–470. doi: 10.1080/02533839.2007.9671274. Dostupné z: <www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02533839.2007.9671274>.
- [28] KERN, J., URREA, C., MENDEZ, R. and GONZALEZ, G. Development of an embedded control system by means of dsPIC applied in a 4 DOF robot. *Revista IEEE América Latina*. May 2016, 14, 5, pp. 2099–2106. doi: 10.1109/TLA.2016.7530401. Dostupné z: <ieeexplore.ieee.org/document/7530401>.
- [29] KHAN, M. U. and IQBAL, N. Control of Robot Arm PA-10 using Camera Vision. pp. 97–103. IEEE, Jan 2007. doi: 10.1109/IBCAST.2007.4379916.

Dostupné z: <ieeexplore.ieee.org/document/4379916>. ISBN 2151-1403.

- [30] KOSE, E. Controller design by using non-linear control methods for satellite chaotic system. *Electrical engineering*. Oct 12, 2016, 99, 2, pp. 763–773. doi: 10.1007/s00202-016-0450-x. Dostupné z: <link.springer.com/article/10.1007/s00202-016-0450-x>.
- [31] KOSE, F., KAPLAN, K. and ERTUNC, H. M. Real Time Position and Trajectory Control of Ball and Plate System Using Different Control Techniques. pp. 1–7. IEEE, Oct 2018. doi: 10.1109/CEIT.2018.8751946. Dostupné z: <ieeexplore.ieee.org/document/8751946>.
- [32] LI, K., PING, Z., HUANG, Y. and LU, J.-G. A robust output regulation approach for trajectory tracking control of ball and plate system. pp. 617–622, Piscataway, Jul 26, 2021. Technical Committee on Control Theory, Chinese Association of Automation. doi: 10.23919/CCC52363.2021.9550278. Dostupné z: <ieeexplore.ieee.org/document/9550278>.
- [33] MA, J., TAO, H. and HUANG, J. Observer integrated backstepping control for a ball and plate system. *International journal of dynamics and control*. Apr 12, 2020, 9, 1, pp. 141–148. doi: 10.1007/s40435-020-00629-8. Dostupné z: <link.springer.com/article/10.1007/s40435-020-00629-8>.
- [34] MOCHIZUKI, S. and ICHIHARA, H. I-PD controller design based on generalized KYP lemma for ball and plate system. pp. 2855–2860. EUCA, Jul 2013. doi: 10.23919/ECC.2013.6669269. Dostupné z: <ieeexplore.ieee.org/document/6669269>.
- [35] MORALES, L., GORDON, M., CAMACHO, O., ROSALES, A. and POZO, D. A Comparative Analysis among Different Controllers Applied to the Experimental Ball and Plate System. pp. 108–114. IEEE, Nov 2017. doi: 10.1109/INCISCOS.2017.27. Dostupné z: <ieeexplore.ieee.org/document/8328093>.
- [36] MORALES, L., CAMACHO, O., LEICA, P. and CHAVEZ, D. Sliding-Mode Control Based on a Model Reference Applied to a Non-

- linear Ball and Plate System with Time Delay. pp. 1–6. IEEE, Oct 2017. doi: 10.1109/CCAC.2017.8276425. Dostupné z: <ieeexplore.ieee.org/document/8276425>.
- [37] ORAVEC, M. and JADLOVSKA, A. Model Predictive Control of a Ball and Plate laboratory model. pp. 165–170. IEEE, Jan 2015. doi: 10.1109/SAMI.2015.7061869. Dostupné z: <ieeexplore.ieee.org/document/7061869>.
- [38] PARANDIAN, Y., ARABSHAHI, H. Z., NASR, A. and MOOSAVIAN, S. A. A. Time optimized digital image processing of ball and plate system using artificial neural network. pp. 146–151. IEEE, Oct 2015. doi: 10.1109/ICRoM.2015.7367775. Dostupné z: <ieeexplore.ieee.org/document/7367775>.
- [39] PILTAN, F., RAHMDEL, S., MEHRARA, S. and BAYAT, R. Sliding Mode Methodology Vs. Computed Torque Methodology Using MATLAB/SIMULINK and Their Integration into Graduate Nonlinear Control Courses. *International Journal of Engineering*. 2012, 6, 3, pp. 142–177. Dostupné z: <www.researchgate.net/publication/264084551>.
- [40] ROY, P., DAS, A. and ROY, B. K. Cascaded fractional order sliding mode control for trajectory control of a ball and plate system. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. Feb 2018, 40, 3, pp. 701–711. doi: 10.1177/0142331216663826. Dostupné z: <journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0142331216663826>.
- [41] SABET, S. and POURSIINA, M. Computed torque control of fully-actuated nondeterministic multibody systems. *Multibody system dynamics*. May 29, 2017, 41, 4, pp. 347–365. doi: 10.1007/s11044-017-9577-4. Dostupné z: <link.springer.com/article/10.1007/s11044-017-9577-4>.
- [42] SANCAK, K. V. and BAYRAKTAROGLU, Z. Y. Nonlinear Computed Torque Control of 6-Dof Parallel Manipulators. *International journal of control, automation, and systems*. Jun 09, 2022, 20,

- 7, pp. 2297–2311. doi: 10.1007/s12555-021-0198-6. Dostupné z: <link.springer.com/article/10.1007/s12555-021-0198-6>.
- [43] SHARKAWY, A.-N. and KOUSTOUMPARDIS, P. Dynamics and Computed-Torque Control of a 2-DOF manipulator: Mathematical Analysis. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2019, 28, 12, pp. 201–212. Dostupné z: <hal.archives-ouvertes.fr/hal-03598924/document>.
- [44] SHI, J., LIU, H. and BAJCINCA, N. Robust Control of Robotic Manipulators Based on Integral Sliding Mode, -10 2008.
- [45] SINGH, R. and BHUSHAN, B. Real-time control of ball balancer using neural integrated fuzzy controller. *The Artificial intelligence review*. Sep 03, 2018, 53, 1, pp. 351–368. doi: 10.1007/s10462-018-9658-7. Dostupné z: <link.springer.com/article/10.1007/s10462-018-9658-7>.
- [46] SLOTINE, J. J. E. *Applied nonlinear control*. 1 edition, 1991. ISBN 0130408905.
- [47] SUMEGA, M. Riadenie platformy s dvomi stupňami voľnosti, 2017, Žilinská univerzita v Žiline.
- [48] TUDIĆ, V., KRALJ, D., HOSTER, J. and TROPČIĆ, T. Design and Implementation of a Ball-Plate Control System and Python Script for Educational Purposes in STEM Technologies. *Sensors (Basel, Switzerland)*. Feb 27, 2022, 22, 5, pp. 1875. doi: 10.3390/s22051875. Dostupné z: <www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/35271021>.
- [49] WANG, A., LI, X., HE, S., CAO, X., JING, Y. and CHEN, M. Command-Filtering-Based Adaptive Finite-Time Tracking Control for Ball and Plate System. *IFAC PapersOnLine*. 2020, 53, 2, pp. 6165–6170. doi: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1700. Dostupné z: <dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1700>.
- [50] WANG, A., LI, X. and CAO, X. Backstepping-based Robust H-inf Tracking Controller Design for Ball and Plate System. pp. 523–528.

- Technical Committee on Control Theory, Chinese Association of Automation, Jul 2019. doi: 10.23919/ChiCC.2019.8866332. Dostupné z: <ieeexplore.ieee.org/document/8866332>.
- [51] WANG, L., ZHOU, X. and HU, T. A New Computed Torque Control System with an Uncertain RBF Neural Network Controller for a 7-DOF Robot. *Tehnički vjesnik*. Oct 01, 2020, 27, 5, pp. 1492–1500. doi: 10.17559/TV-20190906094136. Dostupné z: <search.proquest.com/docview/2461031281>.
- [52] WANG, L. and GUAN, S. Research on Trajectory Tracking Control for SCARA Manipulator of Tea Picking Robot. pp. 2621–2625. Technical Committee on Control Theory, Chinese Association of Automation, Jul 2020. doi: 10.23919/CCC50068.2020.9189044. Dostupné z: <ieeexplore.ieee.org/document/9189044>.
- [53] ZHENG, L. and HU, R. Robust and fast visual tracking for a ball and plate control system: design, implementation and experimental verification. *Multimedia Tools and Applications*. May 30, 2019, 78, 10, pp. 13279–13295. doi: 10.1007/s11042-018-6430-6.
- [54] ZHENG, L. and HU, R. Robust and fast visual tracking for a ball and plate control system: design, implementation and experimental verification. *Multimedia tools and applications*. Aug 17, 2018, 78, 10, pp. 13279–13295. doi: 10.1007/s11042-018-6430-6. Dostupné z: <link.springer.com/article/10.1007/s11042-018-6430-6>.
- [55] SPAČEK and VOJTĚŠEK, J. Ball & Plate Model on ABB YuMi Robot. pp. 283–291. Springer Verlag, 2019. Dostupné z: <publikace.k.utb.cz/handle/10563/1008747>.
- [56] ŞEN, B. and TÜRKER, T. A Comparative Study of Medieval Begging Monks and Wandering Dervishes. *FSM Scholarly Journal of Humanities and Social Sciences*, 2022-06-27. doi: 10.16947/fsmia.1136427. ISBN 978-1-5386-4325-9.
- [57] ŠUSTEK, M. Pokročilé algoritmy zpracování obrazu v reálném systému řízení pohybu, 2021. Dostupné z: <hdl.handle.net/10563/46209>.

PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA

- [A.1] ZÁTOPEK, J., ÚŘEDNÍČEK, Z., MACHADO, J. and SOUSA, J. Dynamic simulation of the CAD model in SimMechanics with multiple uses, In *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. vol. 26(3), 1278-1290, Turkey, 2018. DOI: 10.3906/elk-1712-217.
- [A.2] ÚŘEDNÍČEK, Z., ZÁTOPEK, J. and VÍTEK, R. Mechanical educational system for automatic area observation and firing control techniques, In *3rd Conference on Innovation, Engineering and Entrepreneurship, Regional HELIX 2018*. Lecture Notes in Electrical Engineering, Portugal, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-91334-6_150.
- [A.3] SPAČEK, L., VOJTĚŠEK, J. and ZÁTOPEK, J. Collaborative Robot YuMi in ball and plate control application: Pilot study, In *7th Computer Science On-line Conference, CSOC 2018*. Advances in Intelligent Systems and Computing, Zlín, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-91192-2_18.
- [A.4] ZÁTOPEK, J. and ÚŘEDNÍČEK, Z. Dynamic Behaviour Comparison of Three Different Mathematical Model Complexities, In *28th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*. Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium, Croatia, 2017. DOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.096.
- [A.5] ZÁTOPEK, J. Using the Transformation Matrices not Only to Derive the Motion Equations, In *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*. vol. 11, 245-252, Greece, 2016. E-ISSN: 2224-3429.
- [A.6] ZÁTOPEK, J. Various Support Software Tools Using In Simulation and Identification of a Non-linear Unstable System of Motion, In *WSEAS Transactions on Systems*. vol. 15, 321-328, Greece, 2016. E-ISSN: 2224-2678.
- [A.7] ZÁTOPEK, J. Simulation and Visualisation of a Laboratory Model by Supported Software Tools Connection, In *27th International DAAAM Symposium on Intelligent Manufacturing and Auto-*

mation 2016. Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium, Bosnia and Herzegovina, 2016. DOI: 10.2507/27th.daaam.proceedings.108.

- [A.8] ZÁTOPEK, J. The coordinate system transformation of a serial kinematic structures and use in the derivation of systems motion equations, In *20th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC)*. MATEC Web of Conferences, Corfu Island, 2016. DOI: 10.1051/mateconf/20167602017.
- [A.9] ZÁTOPEK, J. The simulation of a non-linear unstable system of motion, utilising the SolidWorks and Matlab/Simulink extended libraries/toolboxes, In *20th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC)*. MATEC Web of Conferences, Corfu Island, 2016. DOI: 10.1051/mateconf/20167602016.
- [A.10] ZÁTOPEK, J. Motion States of Nonlinear Unstable System Simulation, Connections between SolidWorks-Matlab/SimulinkSimMechanics-3D Animation, In *XLI. Seminář ASŘ 2016*. XLI. Seminar ASR '2016 "Instruments and Control", Ostrava, 2016. ISBN: 978-80-248-3910-3.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 4.1	CAD model systému - typová struktura, prvotní fáze návrhu	12
Obr. 4.2	CAD model systému - základní a konečný konstrukční návrh	13
Obr. 4.3	První reálná verze modelu <i>Kulička na nakloněné rovině</i>	14
Obr. 4.4	Současná reálná verze systému <i>Kulička na nakloněné rovině</i>	15
Obr. 4.5	Struktura řídicí aplikace reálného systému	16
Obr. 4.6	Popis částí grafického rozhraní aplikace	17
Obr. 4.7	Reálné snímky z kamery znázorňující zkreslení obrazu a úspěšnou rekonstrukci tvaru s využitím kinemat. transformací	19
Obr. 4.8	Kalibrace nakloněné roviny	20
Obr. 4.9	Porovnání grafických průběhů pro typovou trajektorii kuličky ve tvaru čtverce	23
Obr. 4.10	Základní importovaný fyzikální model v Simscape Multibody	24
Obr. 4.11	Porovnání průběhů matematického a fyzikálního modelu pro typovou trajektorii kuličky ve tvaru čtverce	24
Obr. 4.12	Konečné nastavení proudového regulátoru motoru v 1. DOF	25
Obr. 4.13	Porovnání simulovaných a reálných přechodových charakteristik rychlostní smyčky - konečné experimentální doladění	26
Obr. 4.14	Blokové schéma kaskádní regulace polohové smyčky	27
Obr. 4.15	Porovnání simulovaných a reálných přechodových charakteristik polohové smyčky - konečné experimentální doladění	27
Obr. 4.16	Regulace kuličky - trajektorie typu Čtverec - PD(I) regulátor	29
Obr. 4.17	Kompletní simulační model regulátoru s výpočtem momentů	31
Obr. 4.18	Kaskáda - lineární - $T = 4$ s	33
Obr. 4.19	Výpočet momentů - lineární - $T = 4$ s	33
Obr. 4.20	Regulace kuličky s RK - lineární - $T = 25$ s	34
Obr. 4.21	Regulace kuličky s RVM - lineární - $T = 25$ s	34
Obr. 4.22	Porovnání RK s RVM podle Euklidovské regulační odchylky	35
Obr. 4.23	Porovnání RK a RVM z pohledu času regulace	36
Obr. 4.24	Porovnání RK a RVM z pohledu energetických nároků	37
Obr. 4.25	Porovnání RK a RVM z pohledu podobnosti simulačního a reálného chování systému při regulaci roviny	37
Obr. 4.26	Porovnání RK a RVM z pohledu mechanického zatížení systému při regulaci kuličky	38

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

CAD	Computer Aided Design
MATLAB	MATrix LABoratory
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor
OpenCV	Open Source Computer Vision Library
GUI	Graphical User Interface
IDE	Integrated Development Environment
DOF	Degree Of Freedom
UDP	User Datagram Protocol
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
ABS	Akrylonitril-Butadien-Styren
PETG	Glykolem modifikovaný Polyethylene Terephthalate
SS	Souřadný Systém / Souřadná Soustava
GSS	Globální Souřadný Systém
LSS	Lokální Souřadný Systém
D-H	Denavit-Hartenberg
MIMO	Multi Input MultiOutput
RK	Regulace Kaskádní
RVM	Regulace Výpočtem Momentů

Ing. Jiří Zátopek, Ph.D.

**Moderní řízení pohybových stavů mechanické soustavy
průmyslového robota prostřednictvím
elektromechanických akčních členů**

Modern motion control methods of an industrial robot mechanical system
through electromechanical actuators

Teze dizertační práce

Vydala Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
nám. T. G. Masaryka 5555, 760 01 Zlín, the Czech Republic

Náklad: vyšlo elektronicky

Sazba: Ing. Jiří Zátopek, Ph.D.

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

Rok vydání: 2022

První vydání

ISBN 978-80-7678-140-5

