UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

NÁVRH SYSTÉMU DECENTRALIZOVANÉHO ŘÍZENÍ MANIPULÁTORU ANTROPOMORFNÍHO TYPU POMOCÍ REGULÁTORŮ TYPU PID

Bc. Jiří Tvrdík

Diplomová práce
2016

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: **2015/2016**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Bc. Jiří Tvrdík**
Osobní číslo:	**I14218**
Studijní program:	**N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Řízení procesů**
Název tématu:	**Návrh systému decentralizovaného řízení manipulátoru antropomorfního typu pomocí regulátorů typu PID**
Zadávající katedra:	**Katedra řízení procesů**

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je návrh systému decentralizovaného řízení manipulátoru antropomorfního typu pomocí regulátorů typu PID, kdy prostor kinematických veličin je automaticky rozdělen na více oblastí, kterým přísluší různá nastavení regulátorů. Nastavení regulátorů v jednotlivých segmentech bude určeno na základě lineárních modelů získaných metodou nejmenších čtverců, popř. jinou metodou odhadu, z matematického modelu manipulátoru. Chování bude ověřeno simulací.
Teoretická část bude obsahovat uvedení do problematiky, výklad základních principů identifikace a řízení robotických manipulátorů.
Praktická část bude obsahovat:
1) popis kroků návrhu a využitých algoritmů
2) software vytvořený v prostředí MATLAB, popř. jiném programovacím jazyce
3) zprávu o experimentálně ověřených vlastnostech realizovaného systému řízení, včetně grafických ilustrací.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

SICILIANO, B.; SCIAVICCO, L.; VILLANI, L.; ORIOLO, G. Robotics. Modelling, Planning and Control. Springer-Verlag, 2009.
KUBÍK, S.; KOTEK, Z.; STREJC, V.; ŠTECHA, J. Teorie automatického řízení I. Praha: SNTL, 1982.
CVEJN, J. Průmyslové roboty [online]. Univerzita Pardubice, FEI, 2012-. Elektronický studijní materiál k předmětu Průmyslové roboty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jan Cvejn, Ph.D.**
Katedra řízení procesů

Datum zadání diplomové práce: **30. října 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2016**

Univerzita Pardubice Česká republika

L.S.

prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan

Ing. Daniel Honc, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 14. listopadu 2015

Prohlášení

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 27. 5. 2016

Bc. Jiří Tvrdík

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu práce doc. Ing. Janu Cvejnovi, Ph.D., za odborné vedení a cenné rady, které mi pomohly tuto práci zkompletovat. Velké poděkování náleží celé mé rodině za podporu, trpělivost a povzbuzování po celou dobu mého studia.

V Pardubicích dne 27. 5. 2016

Bc. Jiří Tvrdík

ANOTACE

Cílem práce je návrh systému decentralizovaného řízení manipulátoru antropomorfního typu pomocí regulátorů typu PID, kdy prostor kinematických veličin je automaticky rozdělen na více oblastí, kterým přísluší různá nastavení regulátorů. Nastavení regulátorů v jednotlivých segmentech je určeno na základě lineárních modelů získaných metodou nejmenších čtverců. Chování je ověřeno simulací.

KLÍČOVÁ SLOVA

robot, PID, lineární model

TITLE

CONCEPT OF DECENTRALIZED CONTROL OF AN ANTHROPOMORPHIC MANIPULATORS USING PID REGULATORS

ANNOTATION

The aim of the thesis is a concept of a decentralized system for controlling an anthropomorphic manipulator using PID regulators where a sphere of kinematic variables is automatically divided into several areas of which each has differenet setting of regulators. The Regulators settings in each segments are based on linear models acquired by least squares method. The acquired behaviour is verified by simulation.

KEYWORDS

Robot, PID, Linear model

Obsah

Seznam obrázků 9
Seznam tabulek 11
Seznam zkratek 12
Seznam symbolů proměnných 13
ÚVOD 14
1 TEORETICKÁ ČÁST 15
1.1 ROBOTIKA 15
1.2 ŘÍDICÍ SYSTÉM ROBOTA 16
1.2.1 Mechanický systém a pohybový aparát 16
1.2.2 Hnací aparát 21
1.2.3 Matematický model pohonu 23
1.2.4 Podsystém vnímání 27
1.2.5 Řídicí systém 29
1.3 ZÍSKÁNÍ MATEMATICKÉHO MODELU ROBOTA 31
1.3.1 Matematický model 32
1.3.2 Lagrangeovy pohybové rovnice II. druhu 32
1.3.3 Metoda nejmenších čtverců a její využití pro odhad parametrů soustavy 35
1.3.4 Průběžná metoda nejmenších čtverců 36
1.4 ZÁKLADNÍ PRINCIPY ZPĚTNOVAZEBNÍHO ŘÍZENÍ ROBOTICKÝCH MANIPULÁTORŮ 37
1.4.1 Decentralizované řízení 38
1.4.2 Centralizované řízení 41
1.5 PID REGULÁTOR 41
1.5.1 Optimalizace regulačního pochodu 43
2 PRAKTICKÁ ČÁST PRÁCE 51
2.1 VYTVOŘENÍ MATEMATICKÉHO MODELU 51
2.2 ODHAD PARAMETRŮ MODELU ROBOTA V JEDNOTLIVÝCH SEGMENTECH STROJOVÉHO PROSTORU 57
2.2.1 Využití metody nejmenších čtverců pro odhad parametrů lineárního modelu 57
2.2.2 Segmentace strojového prostoru 60
2.3 POUŽITÉ METODY NASTAVENÍ PID REGULÁTORŮ 61
2.3.1 Změna parametrů regulátoru 64
3 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY 66
3.1 POSTUP NÁVRHU DECENTRALIZOVANÉHO ŘÍZENÍ 66
3.2 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ 69
3.2.1 Porovnání modelů robota 70

3.2.2 Porovnání návrhů řízení 72
3.2.3 Vliv počtu segmentů na kvalitu regulačního pochodu 73
3.2.4 Porovnání metod nastavení parametrů PID regulátorů 74
ZÁVĚR 75
LITERATURA 76
Seznam příloh 78

Seznam obrázků

Obr. 1.1 – Obal knihy R.U.R. 15
Obr. 1.2 – Symbolická prezentace robota antropomorfního typu....16
Obr. 1.3 – Otevřený a uzavřený řetězec....18
Obr. 1.4 – Kartézský robot....19
Obr. 1.5 – Cylindrický robot....19
Obr. 1.6 – Sférický robot 20
Obr. 1.7 – SCARA robot 20
Obr. 1.8 – Antropomorfní robot....20
Obr. 1.9 – Blokové schéma pohonu robota 21
Obr. 1.10 – Stejnosměrný motor s permanentními magnety 22
Obr. 1.11 – Bezkartáčový motor....22
Obr. 1.12 – Krokový motor 23
Obr. 1.13 – Matematický model stejnosměrného motoru 23
Obr. 1.14 – Motor jako generátor momentu 25
Obr. 1.15 – Planetová převodovka....26
Obr. 1.16 – Harmonická převodovka....27
Obr. 1.17 – Princip inkrementálního snímače 28
Obr. 1.18 – Laserové měření vzdálenosti - princip triangulace....28
Obr. 1.19 – Rychlostní profil s lineárním náběhem a poklesem....30
Obr. 1.20 – Řízení robota jako generátoru rychlosti....38
Obr. 1.21 – Porovnání regulace při odstranění poruchy na vstupu....40
Obr. 1.22 – Regulační schéma se strukturou PID regulátoru 41
Obr. 1.23 – Porovnání regulačních pochodů 44
Obr. 1.24 – Kvalita regulačního pochodu....45
Obr. 1.25 – Zjištění kritických hodnot....47
Obr. 1.26 – Přechodová charakteristika soustavy s integračním charakterem 48
Obr. 1.27 – Oblast stability regulačního systému....49
Obr. 2.1 – Robot od firmy ABB 51
Obr. 2.2 – Model robota s vyobrazenými hmotnými body....53
Obr. 2.3 – Sférické souřadnice....53
Obr. 2.4 – Sférické souřadnice II....54
Obr. 2.5 – Model jedné osy robota 55

Obr. 2.6 – Model robota v prostředí Simulink....56
Obr. 2.7 – URO modelu robota....56
Obr. 2.8 – Dělení strojového prostoru na 2 segmenty....60
Obr. 2.9 - Dělení strojového prostoru na 3 segmenty....60
Obr. 2.10 – Dělení strojového prostoru na 4 segmenty....60
Obr. 2.11 – Dělení strojového prostoru na 7 segmentů....60
Obr. 2.12 – Význam konstant ξ_0 a T_0....63
Obr. 2.13 – Vypočtení koeficientů....65
Obr. 2.14 – PID regulátor se změnou parametrů....65
Obr. 3.1 – URO (řízení modelu robota)....66
Obr. 3.2 – PID regulátor....66
Obr. 3.3 – Návrh identifikace č. 1....67
Obr. 3.4 – Návrh identifikace č. 2....67
Obr. 3.5 – Blok kompenzace poruchy a úprava modelu pro kompenzaci poruchy....68
Obr. 3.6 – Úprava parametrů PID regulátoru....68
Obr. 3.7 – Vliv velikosti matice převodových poměrů na regulační pochod....70
Obr. 3.8 – Vliv velikosti matice tlumení na regulační pochod....71
Obr. 3.9 – Porovnání návrhů řízení....72
Obr. 3.10 – Vliv počtu segmentů na kvalitu regulačního pochodu....73
Obr. 3.11 – Porovnání metod nastavení parametrů PID regulátoru....74

Seznam tabulek

Tab. 1.1 – Příklady kinematických dvojic 17
Tab. 1.2 – Odchylka v ustáleném stavu 40
Tab. 1.3 – Jednoduché regulátory 42
Tab. 1.4 – Přechodové charakteristiky regulátorů 43
Tab. 1.5 – Integrální kritériastr 46
Tab. 1.6 – Nastavení parametrů regulátoru metodou Ziegler-Nichols 46
Tab. 2.1 – Rozsah motorů 60
Tab. 3.1 – Výchozí nastavení 69
Tab. 3.2 – Porovnání modelů robota 69

Seznam zkratek

DOF	Degree of freedom (počet stupňů volnosti)
SCARA	Selective Compliance Assembly (Articulated) Robot Arm (libovolně polohovatelná ramena)
DC motor	stejnosměrný motor
PID	Proporcionálně Integračně Derivační
URO	uzavřený regulační obvod

Seznam symbolů proměnných

q	strojová souřadnice
$\dot{q}$	derivace strojové souřadnice
t	čas
v	rychlost
a	zrychlení
M	krouticí moment
ω	úhlová rychlost
L	Lagrangián
K	kinetická energie
P	potenciální energie
F	zobecněná síla
m	hmotnost
g	gravitační konstanta
$\boldsymbol{B}$	matice setrvačnosti
U	elektrické napětí
i	elektrický proud
R	elektrický odpor
$\tilde{\boldsymbol{F}}_{\mathrm{V}}$	matice tlumení
$\boldsymbol{K}_{\mathrm{r}}$	matice převodových poměrů
K	zesílení soustavy
T	časová konstanta soustavy

ÚVOD

Model antropomorfního robota je nelineární a tedy obtížně řiditelný v celém rozsahu kinematických veličin. Proto se prostor kinematických veličin rozdělí na více oblastí, kde se pomocí metody nejmenších čtverců určí lineární modely v jednotlivých segmentech. Pro tyto modely se vypočítají příslušná nastavení PID regulátorů. Výsledkem by mělo být přesnější řízení v těchto segmentech oproti řízení modelu jedním nastavením regulátoru v celém rozsahu robota.

Teoretická část se zabývá úvodem do problematiky robotů. V první části je popsána historie vzniku představy člověka o robotech a historie vzniku slova robot. Druhá část se zabývá řídicím systémem robota. Kapitola je rozdělena na popis mechanického systému a pohybového aparátu, na popis hnacího aparátu, na popis podsystému vnímání a na popis řídicího systému. Ve třetí části je popsán postup získání matematického modelu robota z Lagrangeových rovnic. Je zde popsána metoda nejmenších čtverců a její využití pro odhad parametrů soustavy. Čtvrtá část se věnuje základním principům zpětnovazebního řízení. V páté části jsou popsány metody nastavení PID regulátorů a optimalizace regulačního pochodu.

V praktické části jsou uvedeny jednotlivé kroky získání matematického modelu, odhad parametrů robota pomocí metody nejmenších čtverců v jednotlivých segmentech a popis použité metody pro nastavení PID regulátorů.

V kapitole dosažených výsledků jsou porovnány průběhy zpětnovazebního řízení pomocí různých modelů robota, modelů řízení a metod nastavení parametrů PID regulátorů.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 ROBOTIKA

První zmínku o robotech lze datovat do druhé poloviny šestého století před naším letopočtem. Ve starém Egyptě se v povídce objevuje hliněná postava, která je oživena, aby plnila uložené úkoly (Vachala, 2009). Od té doby se ve světové literatuře objevuje postava, nejčastěji hliněná, jménem Golem.

Obr. 1.1 – Obal knihy R.U.R. (Čapek, 2013)

Slovo robot poprvé použil Karel Čapek v roce 1920 ve svém vědeckofantastickém dramatu R.U.R. (Rossumovi univerzální roboti). Roboti v této hře jsou živé bytosti, které nerostou nebo se nerodí, ale sestavují se.

Issac Asimov v roce 1950 v knize Já, robot (I, robot) definuje tři základní zákony robotiky:

- Robot nesmí ublížit člověku nebo svou nečinností dopustit, aby člověku bylo ublíženo.
- Robot musí uposlechnout příkazů člověka, kromě případů, kdy tyto příkazy jsou v rozporu s prvním zákonem.
- Robot musí chránit sám sebe před zničením, kromě případů, kdy tato ochrana je v rozporu s prvním nebo druhým zákonem.

1.2 ŘÍDICÍ SYSTÉM ROBOTA

Robot je komplexní systém, složen z mnoha podsystémů, který pracuje s určitou mírou samostatnosti a vykonává úkoly předepsaným způsobem. Věda, která se zabývá studiem robotů, se nazývá robotika. Tato věda studuje inteligentní propojení mezi vnímáním robota a jeho činností. Robotika je interdisciplinární obor využívající obory konstrukce, mechaniky, elektroniky, kybernetiky, umělé inteligence a mnoha dalších.

Základní dělení konstrukce robotů je na robotické manipulátory a mobilní roboty. Robotický manipulátor je robot, který má pevnou základnu. V dnešní době lze tyto manipulátory aplikovat do většiny výrobních procesů.

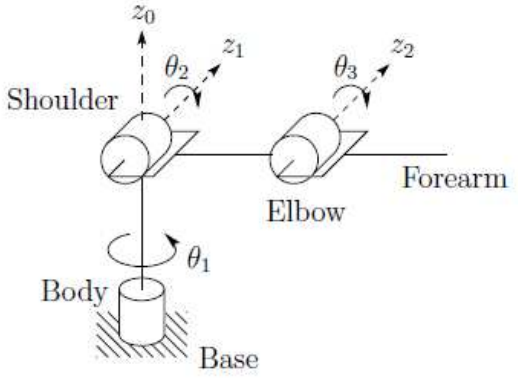
Mobilní robot se pohybuje díky podvozku. Pro pohyb na pevné zemi se nejčastěji používají kolové roboty. Kolo má proti ostatním způsobům pohybu nejlepší účinnost. Kolové roboty lze dále dělit podle uspořádání kol a jejich os. Pro náročnější terén se dá využít pásových robotů. Kráčející roboti napodobují přírodu a snaží se pohybovat podobně jako hmyz a savci. Mobilní roboti mohou být autonomní (pracují a pohybují se samostatně, nejsou řízeny člověkem, ale počítačem) a dálkově ovládané (Cvejn, 2015). Tato práce se věnuje robotickým manipulátorům.

1.2.1 Mechanický systém a pohybový aparát

Základním podsystémem je mechanický systém a pohybový aparát. Pod tímto podsystémem si můžeme představit mechanické paže, ruce a kola.

Mechanická struktura manipulátoru

Aby se mohl robot pohybovat, je složen z několika částí, které jsou spojeny klouby. Základní manipulátor se skládá z 3 částí.

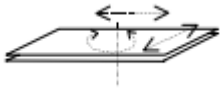
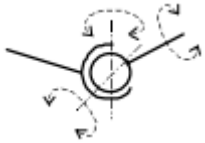
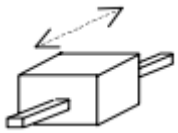
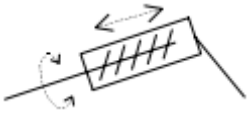


Obr. 1.2 – Symbolická prezentace robota antropomorfního typu (Spong, 2006)

K otočné základně pomocí trupového kloubu (Body) je připevněno rameno robota. K ramennímu kloubu (Shloulder) je připojena paže, která pohybuje pomocí loketního kloubu (Elbow) zápěstím (Forearm) do požadované polohy. Úkolem zápěstí je zajistit požadovanou orientaci koncového efektoru. Na koncovém efektoru je připevněn nástroj, který vykonává zadanou činnost, např. sváření, obrábění, lakování, manipulace s předměty, atd.

Pohyb robota zajišťují tzv. kinematické dvojice. Kinematická dvojice jsou dva mechanické prvky, které vymezují vzájemný pohyb dvou členů. Tento pohyb může být otočný (rotační) nebo posuvný (translační). Posuvné kinematické dvojice jsou suportové (po delším vedení se posouvá kratší těleso), smykadlové (v kratším vedení se posouvá delší těleso) a výsuvné (teleskopické). Rotační kinematické dvojice jsou otočné a kyvné. Kombinací těchto kinematických dvojic lze sestavovat libovolné kinematické řetězce. Kinetický řetězec je posloupnost dvou sousedních segmentů (segment + kloub + segment).

Tab. 1.1 – Příklady kinematických dvojic (Kauler, 2016)

Název kinematické dvojice	Schéma	Počet stupňů volnosti
Rovinná		3 (2 posuvy a 1 rotace)
Sférická		3 (rotace)
Posuvná		1 (posuv)
Rotační		1 (rotace)
Šroubová		1 (posuv nebo rotace)
Nepohyblivé spojení		0

Počet stupňů volnosti (DOF) je maximální počet nezávislých souřadnic, které popisují polohu řetězce. Každá kinematická dvojice přidává 1 stupeň volnosti do kinematického řetězce. Poloha libovolného bodu v prostoru je zadána třemi souřadnicemi, což znamená, že řetězec musí mít 3 kinematické dvojice. Poloha tělesa v prostoru je popsána šesti souřadnicemi (poloha + orientace v prostoru), manipulátor musí mít minimálně 6 DOF.

Kinematické struktury lze rozdělit na sériové a paralelní. V sériové kinematické struktuře jsou kinematické dvojice řazeny sériově. Této struktuře se také říká otevřený řetězec. Toto konstrukční provedení je použito asi u 90 % robotů a manipulátorů (Mráz, 2008). Počet kloubů odpovídá počtu stupňů volnosti. Nevýhodou těchto struktur je nízká tuhost a nižší přesnost polohování. Celková chyba koncového efektoru je součtem všech chyb jednotlivých kinematických dvojic. Tuto nevýhodu odstraňuje paralelní kinematická struktura. Kinematické dvojice jsou tu řazeny paralelně. Tato struktura má vyšší tuhost, přesnost. Nevýhodou této struktury jsou vyšší nároky na řídicí systém. Tato struktura se též nazývá uzavřený řetězec. Počet stupňů volnosti je zde menší, než je počet kinematických dvojic.

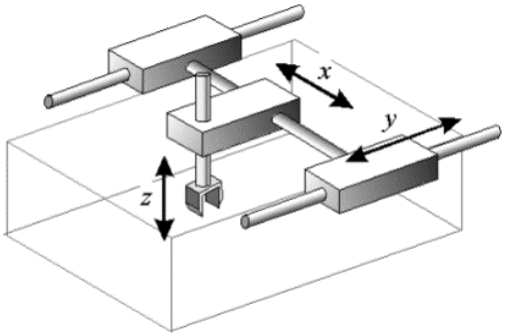
Obr. 1.3 – Otevřený a uzavřený řetězec (Švéda, 2009)

Rozdělení robotů podle typu paží

Pracovní prostor robota je tvořen souvislou nebo omezenou množinou bodů v prostoru, kterých dosáhne koncový efektor. Tento prostor je závislý na struktuře manipulátoru. Rozlišuje se pracovní prostor dosažitelný a prostor obratnosti. Dosažitelný prostor je taková množina bodů, kterou lze dosáhnout alespoň s jednou orientací efektoru. Prostor obratnosti je taková množina bodů, kterou lze dosáhnout s libovolnou orientací efektoru. Z toho vyplývá, že prostor dosažitelný je větší, než prostor obratnosti. Používají se tyto typy paží:

a) Provedení TTT – kartézský robot

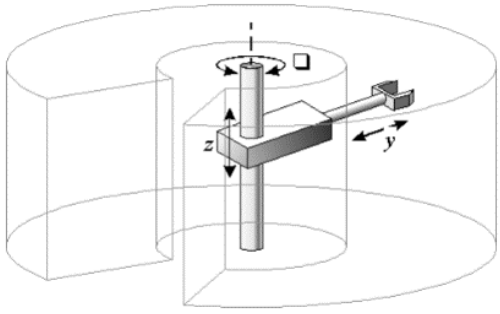
Kinematická struktura obsahuje tři translační dvojice. Pracovní prostor tvoří kvádr. Systém je velmi stabilní a má jednoduché řízení. Nevýhodou je prostorová náročnost. Nejčastěji se používají jako podavače nebo obsluha výrobních strojů (Vaughn, 2013).



Obr. 1.4 – Kartézský robot (Tyson, 2013)

b) Provedení RTT – cylindrický robot

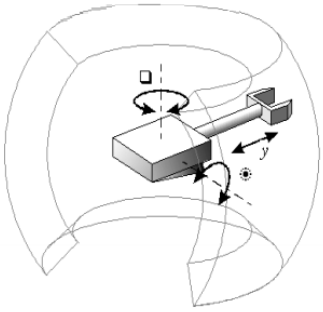
Kinematická struktura obsahuje 1 rotační a 2 posuvné kinematické dvojice. Pracovním prostorem je válcový prstenec. Při pohybu dochází ke změně orientace objektu. K manévrování je potřeba velký operační prostor. Používá se jako obsluha vstřikovacích strojů nebo strojů na tlakové lití. Modifikací tohoto typu robota je montážní SCARA robot.



Obr. 1.5 – Cylindrický robot (Tyson, 2013)

c) Provedení RRT – sférický robot

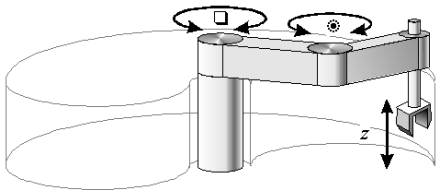
Kinematicky je uspořádán ze dvou rotačních a jedné translační kinematické dvojice. Pracovní prostor je kulového tvaru. Robot má menší pracovní prostor a složitější řízení.



Obr. 1.6 – Sférický robot (Tyson, 2013)

d) Provedení RRT – SCARA robot – Selective Comlpiance Assembly (Articulated) Robot Arm (libovolně polohovatelná ramena)

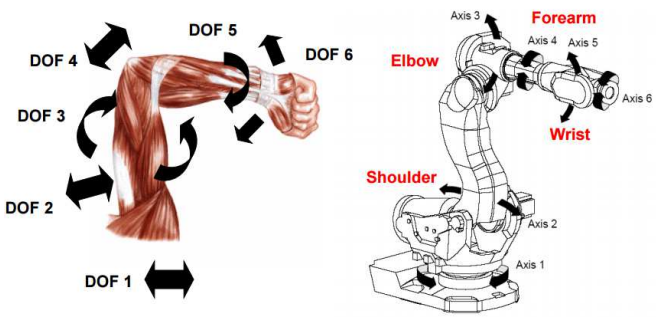
Kinematické uspořádání je dvě rotační a jedna posuvná kinematická dvojice. Tyto roboty byly původně konstruovány pro operace „vezmi a polož“, „sestav“ a „zabal“. Jejich uplatnění je v konstrukčních linkách mikročipů, hodinek a různé elektroniky (Vaughn, 2013).



Obr. 1.7 – SCARA robot (Tyson, 2013)

e) Provedení RRR – antropomorfní robot

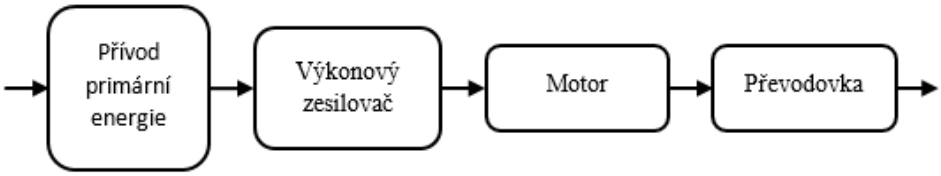
Robot má tři rotační klouby. Tato konfigurace nejvíce připomíná lidskou ruku, odtud název antropomorfní robot (Vaughn, 2013).



Obr. 1.8 – Antropomorfní robot (Tyson, 2013)

1.2.2 Hnací aparát

Dalším podsystémem je hnací aparát, který slouží k pohonu mechanických částí. Funkcí pohonu manipulátoru je přeměna vstupní (primární) energie na mechanický pohyb. Pohon je tvořen přívodem primární energie, výkonovým zesilovačem, motorem a převodovkou.



Obr. 1.9 – Blokové schéma pohonu robota

Přívod primární energie a výkonový zesilovač

Úkolem výkonového zesilovače je převést řídící signál na veličinu, která pohání motor. Typ veličiny závisí na typu motoru. Tato veličina může být mechanická, elektrická, hydraulická nebo pneumatická.

Motor

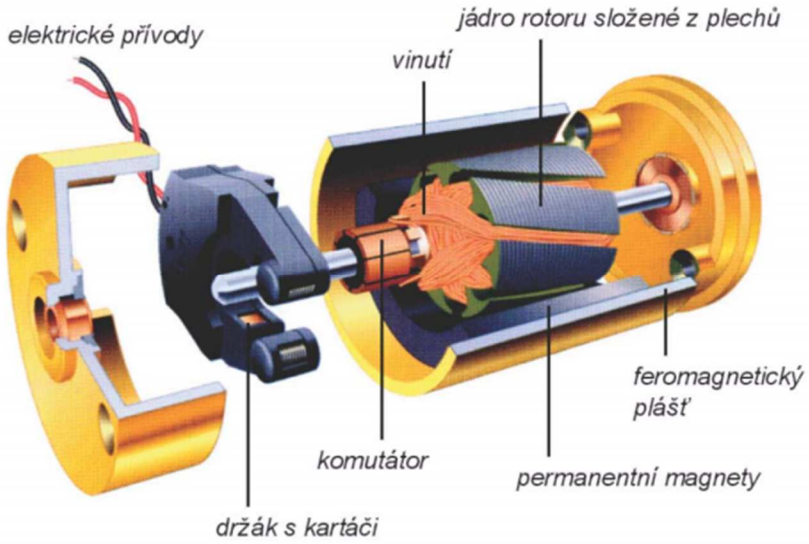
Požadavky na motory robotů jsou plynulý rozběh a brždění, které zvyšují bezpečnost přenášení objektu a vyloučení kmitání efektoru kolem koncové polohy. Dalším požadavkem na motory je vysoká přesnost polohování, která je závislá na kinematické struktuře a její tuhosti. Dostatečná polohová tuhost je schopnost pohonu udržet dosaženou polohu, která je také vyžadována pro správné řízení. Minimální hmotnost a rozměry jsou také důležité, protože hmotnost ovlivňuje dynamické chování robota a minimální rozměry ovlivňují pracovní prostor manipulátoru.

Motory se dělí podle typu vstupní veličiny (elektrické, hydraulické, pneumatické) nebo podle typu pohybu (rotační, přímočaré, kyvné).

Elektrické motory transformují elektrickou energii na mechanickou práci. V robotice se používají stejnosměrné motory s permanentními magnety, bezkartáčové stejnosměrné motory a krokové motory.

a) Stejnosměrný motor s permanentními magnety

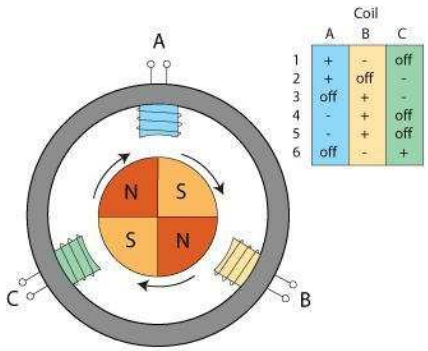
Stator motoru je tvořen permanentními magnety nebo dynamoplechy, rotor je tvořen cívkami, do nichž je přiváděn elektrický proud. V cívkách se vytvoří rotorové magnetické pole. Vzájemným působením statorového a rotorového magnetického pole dojde k pohybu rotoru. Komutátor je umístěn na rotoru a slouží jako rotační usměrňovač. Přepíná směr proudu v rotorových cívkách tak, aby byla vždy napájena cívka pod aktivním pólem. Rychlost otáčení motoru se změní při změně elektrického napětí v rotoru (FEI-KE, 2016; Černohorský, 2012).



Obr. 1.10 – Stejnosměrný motor s permanentními magnety (FEI-KE, 2016)

b) Bezkartáčový stejnosměrný motor

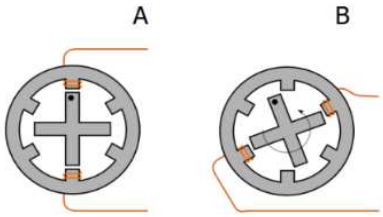
Bezkartáčový motor má rotor z permanentního magnetu a stator obsahuje vinutí, které je připojené k napájení. Navíc oproti stejnosměrným motorům s permanentními magnety obsahuje snímače polohy rotoru. Snímač polohy nahrazuje mechanický komutátor. Komutace je elektronická, tedy bezkontaktní. Z toho vyplývá, že motor se stejným rozměrem má vyšší výkon a nižší hmotnost, než motor s permanentními magnety (Titus, 2009; Černohorský, 2012).



Obr. 1.11 – Bezkartáčový motor (Titus, 2009)

c) Krokový motor

Krokový motor je synchronní motor (rotor se točí stejnou rychlostí jako točivé magnetické pole ve statoru). Točivé magnetické pole není vytvářeno střídavým proudem, ale postupným zapínáním jednotlivých cívek statoru (Doleček, 2012; Černohorský, 2012).



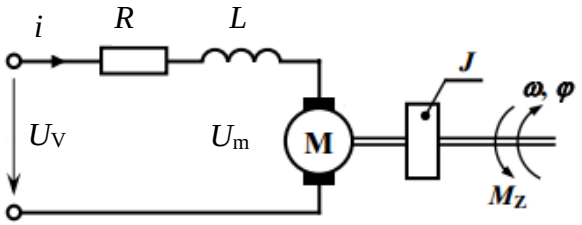
Obr. 1.12 – Krokový motor (Doleček, 2012)

Hydraulické motory transformují hydraulickou energii na mechanickou práci. Tato energie je ve formě stlačeného média v zásobníku. Výhodou hydraulických motorů je vysoký poměr síla/rychlost. Nevýhodou těchto motorů je vysoká cena a nutnost speciálního vybavení.

Pneumatické motory, které transformují pneumatickou energii na mechanickou, se používají především pro uchopovací prvky. Výhodou těchto motorů je nižší cena (Cvejn, 2015; Černohorský, 2012).

1.2.3 Matematický model pohonu

Z hlediska modelu jsou DC motory s permanentními magnety a bezkartáčové motory totožné. Elektrická bilance DC motoru je popsána těmito rovnicemi



Obr. 1.13 – Matematický model stejnosměrného motoru

$$U_{\mathrm{V}} = R \cdot i + L \cdot \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + U_{\mathrm{m}} \tag{1.1}$$

$$U_{\mathrm{m}} = k_{\mathrm{V}} \cdot \omega, \tag{1.2}$$

kde U_{V} – napětí rotoru,

i – proud rotoru,

R – odpor,

L – indukčnost vinutí,

U_{m} – indukované napětí, které je úměrné otáčkám.

Pro moment na hřídeli platí

$$M = k_{\mathrm{t}} \cdot i\,, \tag{1.3}$$

kde M – moment na hřídeli,

k_{t} – konstanta.

V nezatíženém stavu platí

$$M = b \cdot \omega\,, \tag{1.4}$$

kde b – součinitel tření v ložisku hřídele.

Potom lze tyto rovnice upravit do tvaru

$$R \cdot i = R \cdot \frac{b\omega}{k_{\mathrm{t}}}\,. \tag{1.5}$$

Dále jsou motory konstruovány tak, že

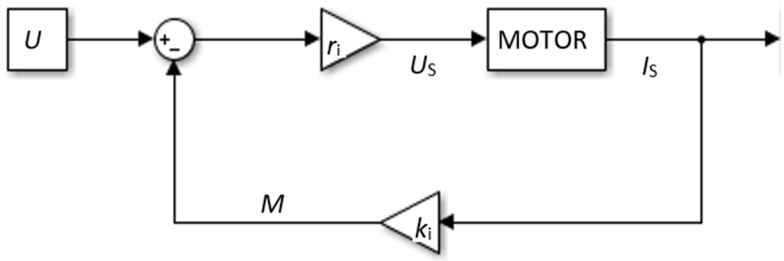
$$\frac{R \cdot b}{k_{\mathrm{t}}} << k_{\mathrm{V}}\,, \tag{1.6}$$

tedy v případě zanedbání vlivu indukčnosti platí

$$U_{\mathrm{V}} = \tilde{k}_{\mathrm{V}} \cdot \varpi\,, \quad \tilde{k}_{\mathrm{V}} \approx k_{\mathrm{V}}\,. \tag{1.7}$$

Pohon pracuje jako generátor rychlosti. Toto uspořádání se využívá při decentralizovaném řízení jednotlivých os bez uvažování dynamiky. Na základě odchylky trajektorie se nastavuje rychlost pohonů.

Je možné zavést proudovou zpětnou vazbu mezi proudem vinutí a napětím zesilovače. Výhodou proudové zpětné vazby je, že chrání motor proti momentálnímu přetížení.



Obr. 1.14 – Motor jako generátor momentu

Konstanta k_i je zesílení zpětné vazby a r_i je zesílení proudového regulátoru. Pro jednoduchost uvažujeme $k_\mathrm{i} = k_\mathrm{t}$, potom

$$U_\mathrm{S} = R_\mathrm{S} \cdot \frac{M}{k_\mathrm{t}} + k_\mathrm{v} \cdot \omega = r_\mathrm{i} \cdot (U - M). \tag{1.8}$$

Úpravou této rovnice dostáváme tvar

$$M \cdot \left(r_\mathrm{i} + \frac{R_\mathrm{S}}{k_\mathrm{t}} \right) = r_i \cdot U - k_\mathrm{v} \cdot \omega, \tag{1.9}$$

$$M = \frac{r_\mathrm{i}}{r_\mathrm{i} + \frac{R_\mathrm{S}}{k_\mathrm{t}}} \cdot U - \frac{k_\mathrm{v}}{r_\mathrm{i} + \frac{R_\mathrm{S}}{k_\mathrm{t}}} \cdot \omega = K_\mathrm{U} U - K_\mathrm{V} \omega. \tag{1.10}$$

Pro dostatečně velké proudové zesílení r_i, odpovídá moment *M* přibližně referenčnímu napětí U. Pohon v tomto zapojení pracuje jako generátor momentu. Toto zapojení se využívá při centralizovaném řízení. Člen $K_\mathrm{V}\omega$, který vzniká vlivem indukovaného napětí elektromagnetického pole, má podobný efekt jako viskózní tření v ložiskách a převodech. Tento člen se nazývá elektromagnetické tření (Cvejn, 2015; Spong, 2006).

Převodovka

Převodovka je zařízení, které mění rotační pohyb hnací hřídele na rotační pohyb hnané hřídele s jinou úhlovou rychlostí (v tomto případě s menší) a jiným točivým momentem (v tomto případě zvyšuje točivý moment na hnané hřídeli). Převodovka také může převádět rotační pohyb na lineární. Použití převodovky přináší problémy. Prvním problémem je pružnost převodových částí a dále vůle, která vzniká například mezi zuby ozubených kol. Těmito nevýhodami jsou zhoršeny mechanické vlastnosti. Dále dochází ke ztrátě výkonu díky tření

v převodech. Výhodou použití převodů je, že z hlediska řízení do značné míry potlačují nelinearity dynamiky robota (Černohorský, 2012).

V robotech se používají převodovky s dostatečně vysokým převodovým poměrem (např. od 1:10 až 1:100). V ideálním případě platí, že

$$M_1 \cdot \omega_1 = M_2 \cdot \omega_2, \tag{1.11}$$

kde M_1 – krouticí moment hnací hřídele, Nm,

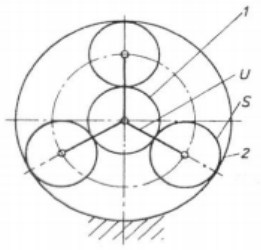
M_2 – krouticí moment hnané hřídele, Nm,

ω_1 – úhlová rychlost hnací hřídele, $\mathrm{rad \cdot s^{-1}}$,

ω_2 – úhlová rychlost hnané hřídele, $\mathrm{rad \cdot s^{-1}}$.

První skupinou převodovek jsou ozubené převodovky. Snahou těchto převodovek je dosáhnout co nejmenší velikosti a zároveň zachovat velký převodový poměr. Nejčastěji se používají planetové a harmonické převodovky.

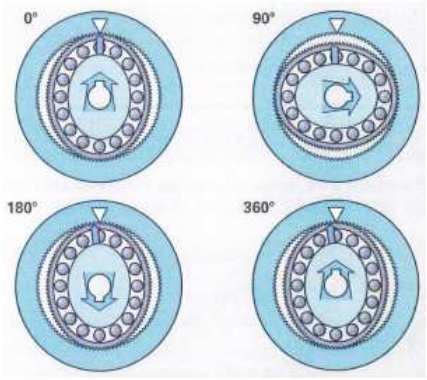
Planetová převodovka je ozubený převod, kde některá kola (satelity) konají současně dva rotační pohyby – kolem vlastní osy a s unášečem okolo hlavní osy. Planetové převodovky se skládají z centrálního kola, korunového kola a satelitů na unášeči. Korunové kolo má vnitřní ozubení. Výhodou jsou velké převodové poměry, tichý chod, vysoká účinnost, malé rozměry a hmotnost. Nevýhodou je složitá konstrukce, výroba a montáž. Na obrázku je znázorněn princip planetové převodovky.



1 – centrální kolo
2 – korunové kolo s vnitřním ozubením
S – satelity uložené na čepech unášeče
U – unášeč

Obr. 1.15 – Planetová převodovka (Dočkal, 2013)

Harmonická převodovka je převodovka do pomala. Skládá se z pružného ocelového pouzdra s jemným ozubením, které v místech roztažení zapadá do vnitřního ozubení pevného vnějšího prstence. V pouzdru je vnitřní eliptický hnací disk, který tvaruje pružné pouzdro. Výhodou harmonických převodovek jsou vysoké převodové poměry, bezúdržbový provoz, vysoká účinnost. Nevýhodou převodovek je vysoká cena, protože jsou kladeny vysoké nároky na přesnost provedení.



Obr. 1.16 – Harmonická převodovka (Dočkal, 2013)

Dalšími typy převodovek jsou vodicí šrouby (převádí rotační pohyb na lineární), ozubené řemeny (jejich největší nevýhodou je pružnost řemenů) a převod pomocí řetězů (nevýhodou je vůle řetězu při změně směru otáčení).

1.2.4 Podsystém vnímání

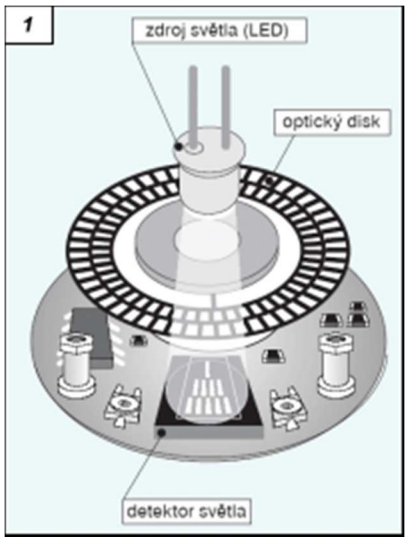
Robot získává informace o svém okolí pomocí podsystému vnímání. Vnímání robota zajišťují senzory, které poskytují informace o vnitřním stavu robota (proprioceptivní senzory) a informace o stavu okolí robota (exteroceptivní senzory).

Senzory průmyslových robotů jsou nezbytnou součástí každého robotického systému. Monitorují interakce s okolím, měří změny v prostředí, které by mohly ovlivnit úlohu robota a zároveň kontrolují výsledky jeho akce. Senzory průmyslových robotů rozdělujeme na interní a externí.

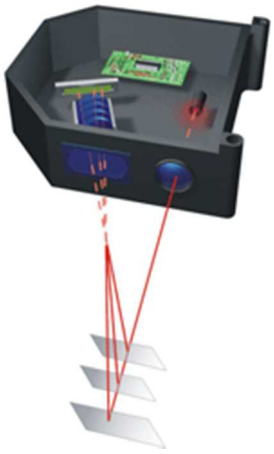
Interní (proprioceptivní) senzory poskytují informaci o vnitřním stavu robota. Tímto stavem může být poloha kloubu, rychlost kloubu nebo hnací momenty. Tyto senzory jsou nutné pro pohyb mechanické struktury robota. Snímače polohy a rychlosti mohou být rotační nebo lineární. Lineárním snímačem polohy je např. potenciometr, LVDT (lineární diferenciální transformátor) a nebo induktosyn. Rotačními snímači jsou enkodéry a resolvery. Častěji se používají rotační snímače. Příkladem rotačního snímače polohy může být inkrementální snímač polohy. Tento snímač má v sobě otočný optický disk, který je spojen s hřídelí rotačního členu. Infračervené světlo svítí skrz optický disk, světlo prochází prázdnými okénky, které detekují pootočení hřídele.

Externí (exteroceptivní) senzory poskytují informaci o stavu okolí robota. Používají se senzory působící síly, senzory dotyku, senzory detekce překážek a vzdálenosti k překážkám a senzory vidění (kamery).

Základem většiny snímačů síly jsou odporové tenzometry, které převádí měření síly na měření odporu. Senzory detekce překážek a vzdálenosti k překážkám jsou sonary a lasery. Nevýhodou sonarů je nemožnost měřit vzdálenosti od hladkých povrchů. Výhodou těchto snímačů je nízká cena. Měření vzdálenosti pomocí laserů využívá dvou principů, měření doby letu paprsku a principu triangulace (Cvejn, 2015; Černohorský, 2012).



Obr. 1.17 – Princip inkrementálního snímače (Falc, 2005)



Obr. 1.18 – Laserové měření vzdálenosti - princip triangulace (Vojáček, 2015)

1.2.5 Řídicí systém

Řídicí systém zpracovává informace a zajišťuje propojení mezi snímači a pohony. Řídicí systém vykonává příkazy na základě zadaných cílů a omezení vytvořeným robotem a okolím. Při řízení se využívá zpětné vazby, která umožňuje přizpůsobit chování robota svému okolí. Pro návrh algoritmů řízení se používá matematické modelování částí robota.

Způsoby programování a učení

Kinematika robota se zabývá vzájemnou závislostí kinematických veličin (poloha, rychlost, zrychlení) částí mechanického systému. U robotů se vyšetřují závislosti polohy, resp. rychlosti pohybu kloubů robota na poloze koncového efektoru (přímá kinematika) a naopak (nepřímá kinematika).

Při řešení úlohy přímé kinematiky známe souřadnice koncového členu v kloubových souřadnicích, tudíž určení souřadnic v kartézském prostoru není složité. Při řešení úlohy nepřímé kinematiky známe souřadnice v kartézském prostoru a potřebujeme určit kloubové souřadnice. Úloha inverzní kinematiky je mnohem složitější než úloha přímé kinematiky. Inverzní úloha může mít více řešení, dokonce může mít i nekonečně mnoho řešení.

Programování robota se dělí na přímé a nepřímé programování a na přímé plánování.

a) Přímé programování

Přímé programování se dále dělí na programování učením (teach-in), kdy obsluha vede rameno a zápěstí robota po požadované dráze požadovanou rychlostí. Obsluha přímo drží pracovní nástroj a do paměti robota jsou ukládány údaje o robotu. Nevýhodou tohoto programování je nutnost dokonalého pohybu operátora, protože robot opakuje jeho pohyb i s jeho případnými chybami.

Druhou možností přímého programování je ovládání robota z ovládacího panelu. Operátor pomocí tlačítek na operátorském panelu zadává požadované údaje o pohybu robota. Operátor také musí zadat časové údaje o pohybu robota. Výhodou tohoto způsobu učení je zadávání přesných údajů o pohybu.

b) Nepřímé programování

Při nepřímém (offline) programování je trajektorie zadávána pomocí křivek v prostoru. Offline je řešena úloha inverzní kinematiky a požadované údaje jsou použity pro řízení robota.

c) Přímé plánování

Přímé plánování (online) je podobné offline programování s tím rozdílem, že se úloha inverzní kinematiky řeší v reálném čase. Tento způsob programování se používá v případech, kdy robot upravuje svoji trajektorii na základě údajů od senzorů.

Plánování trajektorie může být v operačním a strojovém prostoru. Operační prostor je zadán pomocí souřadnic *x*, *y*, *z* v kartézském prostoru. Strojový prostor je prostor kloubových souřadnic. Souřadnice udávají jednotlivá natočení motorů (Spong, 2006; Cvejn, 2015; Churý, 2006; Mráz, 2008).

Plánování pohybu ve strojovém prostoru

Pozice ramene bývá zadána dvěma způsoby buď pomocí spojité trasy (continous path) nebo zadáním počátečního a koncového bodu (point-to-point).

Point-to-point plánování pohybu robota vychází ze zadání trajektorie polynomem třetího řádu, při kterém je vynaložená energie od počátečního do koncového bodu minimální.

$$q(t) = a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \,, \tag{1.12}$$

kde $q(0)$ – počáteční poloha,

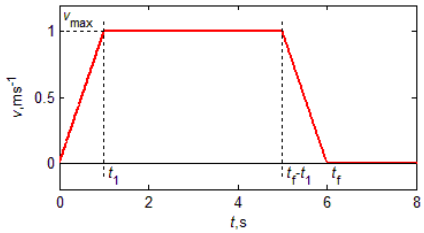
$q(t_\mathrm{f})$ – koncová poloha,

$\dot{q}(0)$ – počáteční rychlost,

$\dot{q}(t_\mathrm{f})$ – koncová rychlost.

Konstanty a_i jsou konstanty odpovídající okrajovým podmínkám. Pro výpočet těchto konstant je nutné znát počáteční polohu, koncovou polohu, počáteční rychlost a koncovou rychlost. Při zadání těchto hodnot lze dopočítat konstanty a_i.

Dále je možné navrhnout trajektorii tak, aby se dodržel rychlostní profil. Rychlostní profil většinou požaduje lineární náběh a pokles rychlosti a konstantní rychlost pohybu.



Obr. 1.19 – Rychlostní profil s lineárním náběhem a poklesem

Doba t_1 se vypočítá z předem zadaného zrychlení:

$$t_1 = \frac{v_{\max}}{a} \tag{1.13}$$

Pro lepší specifikaci dráhy se zadává posloupnost bodů, které charakterizují požadovanou trajektorii. Předchozí zadání trasy se vylepší tím, že se přidají vnitřní body pohybu. Při zadání počátečního, koncového a dvou vnitřních bodů bude potřeba polynomu pátého řádu.

$$q(t_i) = a_5 t_i^{\,5} + a_4 t_i^{\,4} + a_3 t_i^{\,3} + a_2 t_i^{\,2} + a_1 t_i + a_0, \tag{1.14}$$

kde $t_i = 0, t_1, t_2, t_\mathrm{f}$ a

$$\dot{q}(t_j) = 5a_5 t_j^{\,4} + 4a_4 t_j^{\,3} + 3a_3 t_j^{\,2} + 2a_2 t_j + a_1, \tag{1.15}$$

kde $t_j = 0, t_\mathrm{f}$.

Při zvyšování počtu vnitřních bodů se zvyšuje řád polynomu. Tento způsob se tedy používá jen pro malý počet bodů. Proto se častěji používá tzv. spline interpolace. Při tomto způsobu zadávání se trajektorie rozdělí na určitý počet úseků. V těchto úsecích se použije interpolace polynomem nižšího řádu. Musí být splněny podmínky spojitosti kinematických veličin v uzlových bodech mezi jednotlivými úseky (Spong, 2006; Cvejn, 2015; Churý, 2006; Mráz, 2008).

Plánování pohybu v operačním prostoru

Při plánování pohybu v operačním prostoru existují dvě varianty zadávání. První možností je zadání trajektorie, která je popsána posloupností bodů. V tomto případě se musí využít inverzní kinematiky pro zjištění kloubových souřadnic. Nevýhodou této metody je nemožnost přesného definování trajektorie mezi zadanými body. Tuto nevýhodu lze částečně odstranit tím, že se přidají body mezi stávající body a tím dojde ke zpřesnění trajektorie. Při velkém počtu přidaných bodů se z této metody stává metoda druhá.

V této metodě se trajektorie zadává pomocí geometrických primitiv. Výhodou této metody je přesné definování polohy bodů (Spong, 2006; Cvejn, 2015; Churý, 2006; Mráz, 2008).

1.3 ZÍSKÁNÍ MATEMATICKÉHO MODELU ROBOTA

Nutnou podmínkou úspěšného návrhu řízení reálného objektu je představa o jeho statických i dynamických vlastnostech. Jednou z možností získání představy o vlastnostech, je měření statických a dynamických charakteristik na reálném objektu. Toto měření je často nerealizovatelné. Jedním z důvodů, proč není možné získat charakteristiky je nemožnost

provést měření na reálném objektu – experiment by vedl k havárii (např. atomová elektrárna). Dalšími důvody může být absence vhodných měřících nástrojů, znehodnocení výrobního procesu nebo snížení produkce.

1.3.1 Matematický model

Pro identifikaci systému, na kterém není možné provést měření statických a dynamických charakteristik je nutné mít k dispozici kopii identifikovaného systému. Kopie bude mít stejné vlastnosti jako originál. Na této kopii je možné provést měření vlastností systému. Tato kopie se nazývá model daného reálného objektu. Model reálného objektu může být fyzikální (reálný) nebo abstraktní (matematický).

Fyzikální model

Fyzikálním modelem bývá zmenšená kopie původního objektu. Příkladem fyzikálního modelu může být laboratorní model. Model pracuje na stejném fyzikálním principu – využívá teorie podobnosti nebo může být založen na jiném fyzikálním principu, ale řídí se podobnými zákony (potrubní síť/ elektrický obvod – první Kirchhoffův zákon).

Abstraktní model

Matematický model je matematická struktura odpovídající reálným fyzikálním veličinám modelovaného systému. K popisu se většinou používají diferenciální, diferenční nebo algebraické rovnice.

1.3.2 Lagrangeovy pohybové rovnice II. druhu

Dynamika je obor mechaniky, který se zabývá příčinami změn pohybového stavu těles. Pro sestavení dynamického modelu robota je možno použít Lagrangeův přístup. Poloha systému je definována vektorem tzv. zobecněných souřadnic $q_i, i = 1,...,n$. Lagrangián systému je definován jako rozdíl mezi kinetickou a potenciální energií (Cvejn, 2015)

$$L = K - P, \tag{1.16}$$

kde L – Lagrangián,

K – kinetická energie,

P – potenciální energie.

Pohybové rovnice robota jsou získány dosazením do tzv. Lagrangeových rovnic

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}-\frac{\partial L}{\partial q_i}=F_i,\quad i=1,...,n, \tag{1.17}$$

kde F_i – zobecněná síla (v tomto případě moment působící ve směru souřadnice q_i).

Rovnice (1.17) má ve vektorovém zápisu tento tvar

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\frac{\partial L}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}}-\frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{q}}=\boldsymbol{F}, \tag{1.18}$$

tuto rovnici lze upravit následovně

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}}-\frac{\partial P}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}}\right)-\left(\frac{\partial K}{\partial \boldsymbol{q}}-\frac{\partial P}{\partial \boldsymbol{q}}\right)=\boldsymbol{F}, \tag{1.19}$$

člen $\frac{\partial K}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}}$ závisí na $\boldsymbol{q}$ a na $\dot{\boldsymbol{q}}$. P nezávisí na $\dot{\boldsymbol{q}}$, potom je tedy možné psát

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\frac{\partial K}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}}=\left(\frac{\partial^2 K}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}^2}\right)\frac{d\dot{\boldsymbol{q}}}{dt}+\left(\frac{\partial^2 K}{\partial \boldsymbol{q}\partial \dot{\boldsymbol{q}}}\right)\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{q}}{\mathrm{d}t}. \tag{1.20}$$

Rovnice (1.18 – 1.20) lze upravit do následujícího tvaru

$$\frac{\partial^2 K}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}^2}\ddot{\boldsymbol{q}}+\frac{\partial^2 K}{\partial \boldsymbol{q}\partial \dot{\boldsymbol{q}}}\dot{\boldsymbol{q}}-\frac{\partial K}{\partial \boldsymbol{q}}+\frac{\partial P}{\partial \boldsymbol{q}}=\boldsymbol{F}. \tag{1.21}$$

Kinetickou energii robota lze vyjádřit ve tvaru

$$K=\frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{q}}^T\boldsymbol{B}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}, \tag{1.22}$$

kde $\boldsymbol{B}$ – matice setrvačnosti (obecně závislá na $\boldsymbol{q}$). Lze tedy napsat, že

$$\frac{\partial^2 K}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}^2}=\boldsymbol{B}(\boldsymbol{q}). \tag{1.23}$$

Člen $\frac{\partial \boldsymbol{P}}{\partial \boldsymbol{q}}=\boldsymbol{g}(\boldsymbol{q})$ má význam momentů působících na jednotlivé osy vlivem gravitační síly. Zbývající členy odpovídají účinkům odstředivých a Coriolisových sil. Zapisují se ve tvaru $\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\boldsymbol{q}$.

$\boldsymbol{F}$ je vektor výsledných sil působících ve směru souřadnic q_i.

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F}_{\mathrm{U}} - \boldsymbol{F}_{\mathrm{S}}\mathrm{sign}(\dot{\boldsymbol{q}}) - \boldsymbol{F}_{\mathrm{V}}\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{\eta}\,, \tag{1.24}$$

kde $\boldsymbol{F}_{\mathrm{U}}$ – hnací síla (moment),

$\boldsymbol{F}_{\mathrm{S}}$ – diagonální matice odpovídající účinkům suchého (Coulombova) tření,

$\boldsymbol{F}_{\mathrm{V}}$ – diagonální matice koeficientů viskózního tření,

$\boldsymbol{\eta}$ – vektor průmětů výslednice síly.

Obecně jsou tedy pohybové rovnice robota ve tvaru

$$\boldsymbol{B}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) = \boldsymbol{F}\,, \tag{1.25}$$

jedná se tedy o soustavu diferenciálních rovnic druhého řádu. Důležitou vlastností matematického modelu je linearita vzhledem k jeho geometrickým parametrům (Cvejn, 2015).

Získání kinetické a potenciální energie

Pro získání matematického modelu robota pomocí Lagrangeových rovnic je třeba znát vztah pro kinetickou a potenciální energii. Kinetická energie je druh mechanické energie, kterou má pohybující se těleso. Velikost kinetické energie tělesa závisí na jeho hmotnosti a rychlosti. Pro přímočarý pohyb tělesa platí

$$K = \frac{1}{2} m|v|^2\,, \tag{1.26}$$

kde m – hmotnost tělesa, kg,

v – rychlost tělesa, $\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$.

Pro rotační pohyb tělesa platí

$$K = \frac{1}{2} J\omega^2\,, \tag{1.27}$$

kde J – moment setrvačnosti, $\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^2$,

ω – úhlová rychlost, $\mathrm{rad}\cdot\mathrm{s}^{-1}$.

Při současném posuvném a rotačním pohybu platí

$$K = \frac{1}{2} m|v_{\mathrm{T}}|^2 + \frac{1}{2} J_{\mathrm{T}}\omega^2\,, \tag{1.28}$$

kde v_{T} – rychlost pohybu těžiště,

J_{T} – moment setrvačnosti těžiště.

Potenciální energii má těleso, nachází-li se v potenciálovém poli určité síly. Podle síly, které působí na dané těleso, se rozlišuje více typů potenciální energie – gravitační potenciální energie, potenciální energie pružnosti, tlaková potenciální energie, atd.

V nejběžnějším případě je uvažován pouze tíhový potenciál tělesa.

$$P = m \cdot \mathrm{g} \cdot z\,, \tag{1.29}$$

kde m – hmotnost tělesa,

g – gravitační konstanta,

z – výška těžiště nad nulovou úrovní potenciální energie.

Pro zjednodušení výpočtů je možné pevné těleso nahradit hmotnými body, jejichž kinetická a potenciální energie odpovídá kinetické a potenciální energii celého tělesa.

1.3.3 Metoda nejmenších čtverců a její využití pro odhad parametrů soustavy

Metody identifikace odhadem parametrů umožňují stanovit parametry modelu zvolené struktury ze změřených posloupností vstupů a výstupů. Pro výpočet jednotlivých parametrů je použita metoda nejmenších čtverců. Tato metoda se používá pro nalezení vektoru parametrů $\boldsymbol{p}$ soustavy $\boldsymbol{X} \cdot \boldsymbol{p} = \boldsymbol{y}$, kdy přesné řešení soustavy neexistuje. Kvalita řešení je definována jako součet čtverců vzdálenosti mezi vektory $\boldsymbol{X} \cdot \boldsymbol{p}$ a $\boldsymbol{y}$.

Lineární model je ve tvaru

$$\boldsymbol{X}_k \cdot \boldsymbol{p} = y_k + \varepsilon_k \tag{1.30}$$

kde $k = 1,2,...m$, m je počet řádků matice, $\dim(\boldsymbol{p}) = n, \quad m \geq n$.

Maticově tedy

$$\boldsymbol{X} \cdot \boldsymbol{p} = \boldsymbol{y} + \boldsymbol{\varepsilon}\,. \tag{1.31}$$

kde ε – vektor odchylek.

Vektor $\boldsymbol{p}$ se získá minimalizací vektoru ε. Rovnice se upraví do tohoto tvaru

$$\boldsymbol{X} \cdot \boldsymbol{p} - \boldsymbol{y} = \boldsymbol{\varepsilon}\,. \tag{1.32}$$

Kriteriální funkce má tvar

$$\mathrm{F}(\boldsymbol{p}) = \left\| \boldsymbol{X} \cdot \boldsymbol{p} - \boldsymbol{y} \right\|^2 = \boldsymbol{p}^T \boldsymbol{X}^T \boldsymbol{X}\boldsymbol{p} - 2\boldsymbol{y}^T \boldsymbol{X}\boldsymbol{p} + \boldsymbol{y}^T \boldsymbol{y}\,. \tag{1.33}$$

Protože je matice $\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{X}$ pozitivně definitní (matice $\boldsymbol{X}$ má nezávislé sloupce), stačí pro nalezení minima funkce $\mathrm{F}(\boldsymbol{p})$ tuto funkci derivovat podle $\boldsymbol{p}$ a výsledek porovnat s nulou.

$$\frac{\partial \mathrm{F}(\boldsymbol{p})}{\partial \boldsymbol{p}} = 2\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{X}\boldsymbol{p} - 2\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{y}, \tag{1.34}$$

$$2\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{X}\boldsymbol{p} - 2\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{y} = 0, \tag{1.35}$$

$$\boldsymbol{p} = \left(\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{X}\right)^{-1}\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{y}. \tag{1.36}$$

Nevýhodou této metody je, že v každém kroku narůstá matice $\boldsymbol{X}$. Toto narůstání zvyšuje paměťovou náročnost a proto je využita průběžná metoda nejmenších čtverců.

1.3.4 Průběžná metoda nejmenších čtverců

Model je ve tvaru

$$\boldsymbol{X}\cdot\boldsymbol{p} = \boldsymbol{y} + \boldsymbol{\varepsilon}. \tag{1.37}$$

Řešením této rovnice je rovnice (1.36). Průběžná (online) metoda využívá rekurzivního odhadu parametrů, při kterém není třeba uchovávat matici dat. Výsledek se v každém kroku zpřesňuje. Předpoklad pro tuto metodu je znalost výchozího odhadu parametrů (Cvejn, 2016).

Vektor $\boldsymbol{p}$ se vypočítá takto

$$\boldsymbol{p} = \left(\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{X}\right)^{-1}\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{y} = \boldsymbol{C}\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{y}, \tag{1.38}$$

kde $\boldsymbol{C} = \left(\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{X}\right)^{-1}$, $\boldsymbol{C}$ je čtvercová matice o velikosti $n\times n$.

Při rozšíření matice $\boldsymbol{X}$ a vektoru $\boldsymbol{y}$ o nový řádek

$$\tilde{\boldsymbol{X}} = \begin{bmatrix}\boldsymbol{X}\\ \boldsymbol{z}^T\end{bmatrix} \tag{1.39}$$

$$\tilde{\boldsymbol{y}} = \begin{bmatrix}\boldsymbol{y}\\ r\end{bmatrix} \tag{1.40}$$

vzniká vektor odhadu parametrů

$$\hat{\boldsymbol{p}} = \left(\begin{bmatrix}\boldsymbol{X}\\ \boldsymbol{z}^T\end{bmatrix}^T\cdot\begin{bmatrix}\boldsymbol{X}\\ \boldsymbol{z}^T\end{bmatrix}\right)^{-1}\begin{bmatrix}\boldsymbol{X}\\ \boldsymbol{z}^T\end{bmatrix}^T\cdot\begin{bmatrix}\boldsymbol{y}\\ r\end{bmatrix} = \left(\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{X} + \boldsymbol{z}\boldsymbol{z}^T\right)^{-1}\cdot\left(\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{y} + \boldsymbol{z}r\right). \tag{1.41}$$

Snahou této metody je určit nový odhad $\hat{\boldsymbol{p}}$ pouze v závislosti na předchozím odhadu $\boldsymbol{p}$ a aktuálních datech ($\boldsymbol{z}$, r).

$$\begin{aligned}\hat{\boldsymbol{C}} &= \left(\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{X} + \boldsymbol{z}\boldsymbol{z}^T\right)^{-1} = \\ &= \left(\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{X}\right)^{-1} - \left(\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{X}\right)^{-1}\cdot\boldsymbol{z}\cdot\left(1+\boldsymbol{z}^T\left(\left(\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{X}\right)^{-1}\right)\boldsymbol{z}\right)^{-1}\cdot\boldsymbol{z}^T\cdot\left(\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{X}\right)^{-1} = \\ &= \left(\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{X}\right)^{-1} - \frac{\left(\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{X}\right)^{-1}\boldsymbol{z}\boldsymbol{z}^T\left(\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{X}\right)^{-1}}{1+\boldsymbol{z}^T\left(\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{X}\right)^{-1}\boldsymbol{z}} = \boldsymbol{C} - \frac{\boldsymbol{C}\boldsymbol{z}\boldsymbol{z}^T\boldsymbol{C}}{1+\boldsymbol{z}^T\boldsymbol{C}\boldsymbol{z}}\end{aligned} \tag{1.42}$$

dále pro odhad $\hat{\boldsymbol{p}}$ platí

$$\begin{aligned}\hat{\boldsymbol{p}} &= \hat{\boldsymbol{C}}\left(\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{y} + \boldsymbol{z}r\right) = \left(\boldsymbol{C} - \frac{\boldsymbol{C}\boldsymbol{z}\boldsymbol{z}^T\boldsymbol{C}}{1+\boldsymbol{z}^T\boldsymbol{C}\boldsymbol{z}}\right)\cdot\left(\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{y} + \boldsymbol{z}r\right) = \\ &= \left(\boldsymbol{I} - \frac{\boldsymbol{C}\boldsymbol{z}\boldsymbol{z}^T}{1+\boldsymbol{z}^T\boldsymbol{C}\boldsymbol{z}}\right)\cdot\left(\boldsymbol{p} + \boldsymbol{C}\boldsymbol{z}r\right) = \\ &= \left(\boldsymbol{I} - \frac{\boldsymbol{C}\boldsymbol{z}\boldsymbol{z}^T}{1+\boldsymbol{z}^T\boldsymbol{C}\boldsymbol{z}}\right)\cdot\boldsymbol{p} + r\hat{\boldsymbol{C}}\boldsymbol{z}\end{aligned} \tag{1.43}$$

Z této rovnice lze napsat algoritmus pro průběžný výpočet odhadu

$$\boldsymbol{C}_{k+1} = \boldsymbol{C}_k - \frac{\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{z}_{k+1}\boldsymbol{z}_{k+1}^T\boldsymbol{C}_k}{1+\boldsymbol{z}_{k+1}^T\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{z}_{k+1}}, \tag{1.44}$$

$$\boldsymbol{p}_{k+1} = \left(\boldsymbol{I} - \frac{\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{z}_{k+1}\boldsymbol{z}_{k+1}^T}{1+\boldsymbol{z}_{k+1}^T\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{z}_{k+1}}\right)\boldsymbol{p}_k + r_{k+1}\boldsymbol{C}_{k+1}\boldsymbol{z}_{k+1}, \tag{1.45}$$

kde $\left[\boldsymbol{z}_{k+1}^T, r_{k+1}\right]$ je řádek aktuálních dat.

1.4 ZÁKLADNÍ PRINCIPY ZPĚTNOVAZEBNÍHO ŘÍZENÍ ROBOTICKÝCH MANIPULÁTORŮ

Nižší vrstva řídicího systému zajišťuje řízení robota podle požadované trajektorie. Řízení pohybu (Motion control) se odlišuje od řízení interakce s okolím (Force control) tím, že zanedbává vliv okolí na robotický manipulátor. K řízení robotického manipulátoru lze přistupovat dvěma způsoby, buď lze řídit pomocí decentralizovaného řízení (každá osa robota je řízena samostatně, nezávisle na ostatních), nebo lze řídit manipulátor jako celek (centralizované řízení). Centralizované řízení má tu výhodu, že bere v úvahu dynamické účinky

mezi osami. Dále se centralizované řízení uvažuje buď ve strojovém, nebo operačním prostoru. Dále je uvažováno řízení pouze ve strojovém prostoru.

Matematický model robotického manipulátoru je uvažován ve tvaru

$$\boldsymbol{B}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + \tilde{\boldsymbol{F}}_{\mathrm{V}}\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) = \boldsymbol{K}_{\mathrm{r}}\boldsymbol{u}\,, \tag{1.46}$$

kde $\tilde{\boldsymbol{F}}_{\mathrm{V}}$ – výsledná matice tlumení,

$\boldsymbol{K}_{\mathrm{r}}$ – diagonální matice převodových poměrů.

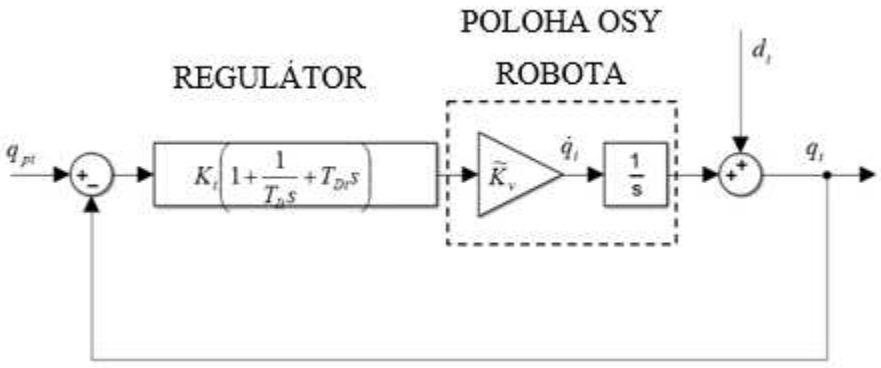
Výsledná matice tlumení v sobě zahrnuje působící síly popsané v rovnici (1.24). Matice poměrů reprezentuje převodový poměr v převodovce motoru. Rovnice (1.46) předpokládá, že motor robota pracuje jako generátor momentu (1.10).

Cílem řízení robotických manipulátorů je generovat průběh $\boldsymbol{u}(t)$ tak, aby se požadované pozice kloubových souřadnic ($\boldsymbol{q}_{\mathrm{p}}(t)$) blížily co nejvíce skutečným hodnotám kloubových souřadnic ($\boldsymbol{q}(t)$).

1.4.1 Decentralizované řízení

Řízení jednotlivých os je na sobě nezávislé (decentralizované řízení). Vzájemné působení jednotlivých os se uvažuje jako porucha.

Nejjednodušším principem řízení je využít pohon jako generátor rychlosti. Dynamika robotického manipulátoru se v tomto řízení neuvažuje a dynamické účinky a vnější síly se z hlediska řízení stávají poruchou. Tohoto principu je možné využít jen při pomalém pohybu kloubových souřadnic a vysokých převodových poměrech. Pro řízení každé osy se používají vhodně zvolené regulátory, např. PID.



Obr. 1.20 – Řízení robota jako generátoru rychlosti

Kvalitnější způsob řízení pracuje částečně s dynamikou robota. Pohony se používají jako generátory momentu. Matici $\boldsymbol{B}(\boldsymbol{q})$ je možné rozložit

$$\boldsymbol{B}(\boldsymbol{q}) = \overline{\boldsymbol{B}} + \Delta\boldsymbol{B}(\boldsymbol{q}), \tag{1.47}$$

kde $\overline{\boldsymbol{B}}$ - diagonální matice reprezentující průměrný moment setrvačnosti v jednotlivých osách.

Model pro řízení se pak zapisuje ve tvaru

$$\overline{\boldsymbol{B}}\ddot{\boldsymbol{q}} + \tilde{\boldsymbol{F}}_{\mathrm{V}}\dot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{K}_{\boldsymbol{r}}\boldsymbol{u} - \boldsymbol{d}\ , \tag{1.48}$$

kde $\boldsymbol{d}$ – porucha.

Porucha ve tvaru $\boldsymbol{d} = \Delta\boldsymbol{B}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q})$ odpovídá odchylce modelu od skutečné hodnoty. Rovnici (1.48) odpovídá přenos každé osy ve tvaru

$$F_i(s) = \frac{K_i}{(T_i s + 1)s}\,. \tag{1.49}$$

Pro dosažení nulové regulační odchylky v ustáleném stavu je nutné použít pro řízení každé osy regulátor s integrační složkou, tedy PI nebo PID regulátor. Regulační odchylka v čase $t = \infty$ se vypočítá

$$e(\infty) = \lim_{t\to\infty} e(t). \tag{1.50}$$

S využitím věty o konečné hodnotě z vlastností Laplaceovy transformace (Modrlák, 2002) se dostane vztah

$$e(\infty) = \lim_{t\to\infty} e(t) = \lim_{s\to 0} s \cdot E(s). \tag{1.51}$$

Obraz regulační odchylky $E(s)$ se získá z přenosu regulační odchylky $G_E(s)$

$$G_{\mathrm{E}}(s) = \frac{E(s)}{W(s)} = \frac{1}{1 + G_{\mathrm{R}}(s)\cdot G_{\mathrm{S}}(s)}, \tag{1.52}$$

kde $G_{\mathrm{R}}(s)$ – přenos regulátoru,

$G_{\mathrm{S}}(s)$ – přenos soustavy.

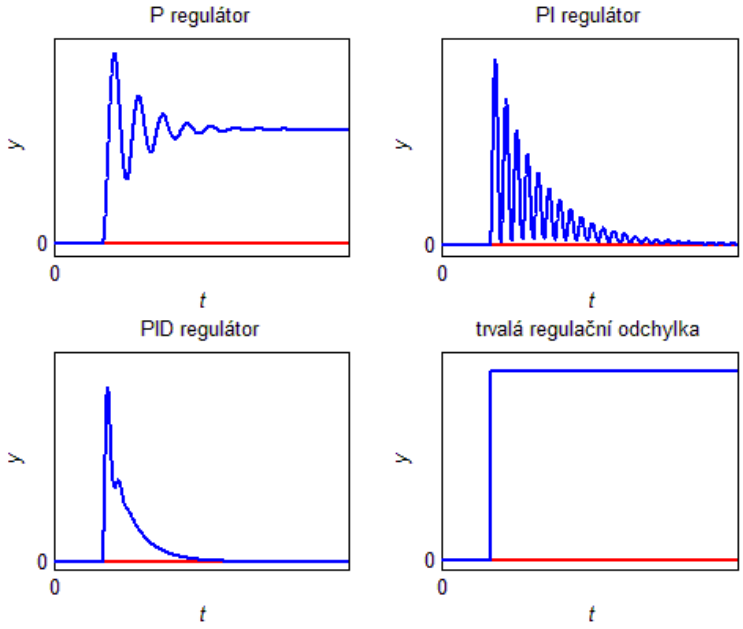
Pak lze dosadit z této rovnice $E(s)$ a získat rovnici pro hodnotu trvalé regulační odchylky

$$e(\infty)=\lim_{t\to\infty}e(t)=\lim_{s\to 0}s\cdot E(s)=\lim_{s\to 0}s\cdot\frac{1}{1+G_{\mathrm{R}}(s)\cdot G_{\mathrm{S}}(s)}\cdot W(s). \tag{1.53}$$

Tab. 1.2 – Odchylka v ustáleném stavu

$W(s)=\frac{1}{s}$ $G_{\mathrm{S}}(s)=\frac{K}{Ts^2+s}$	Přenos regulátoru $G_{\mathrm{R}}(s)$	Odchylka v ustáleném stavu $e(\infty)$
P-regulátor	$G_{\mathrm{R}}(s)=P$	$e(\infty)=\frac{Ts^2+s}{Ts^2+s+P\cdot K}\neq 0$
PI-regulátor	$G_{\mathrm{R}}(s)=P+I\cdot\frac{1}{s}$	$e(\infty)=0$
PID-regulátor	$G_{\mathrm{R}}(s)=P+I\cdot\frac{1}{s}+D\cdot s$	$e(\infty)=0$

Z následujícího obrázku a Tab. 1.2 je vidět, že k odstranění regulační odchylky je nutné použít regulátor s integrační složkou.



Obr. 1.21 – Porovnání regulace při odstranění poruchy na vstupu

Jestliže je znám matematický model robota, lze vylepšit řízení např. kompenzací poruchy. I částečná kompenzace přináší vylepšení.

1.4.2 Centralizované řízení

Při vysokých rychlostech nebo pohonů bez převodovky je decentralizované řízení méně účinné, protože dynamické vazby mezi osami jsou významné. Proto se volí centralizované řízení robota. Centralizované řízení robota pracuje přímo s nelineárním modelem robota.

Existuje několik přístupů k návrhu centralizovaného řízení. Jednou z možností je řízení s využitím inverze dynamiky. Rovnice (1.46) se upraví následovně

$$\boldsymbol{B}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{v} = \boldsymbol{K}_{\mathrm{r}}\boldsymbol{u} - \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} - \tilde{\boldsymbol{F}}_{\mathrm{v}}\dot{\boldsymbol{q}} - \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}), \tag{1.54}$$

potom lze psát

$$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{K}_{\mathrm{r}}^{-1}\left[\boldsymbol{B}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{v} - \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} - \tilde{\boldsymbol{F}}_{\mathrm{v}}\dot{\boldsymbol{q}} - \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q})\right], \tag{1.55}$$

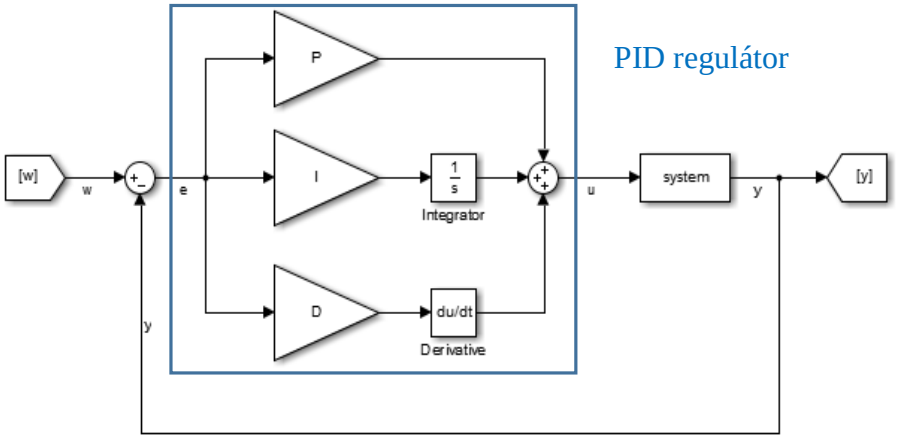
kde $\ddot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{v}$.

Tímto se vytvoří vnitřní zpětná vazba, která dynamiku robota linearizuje a odstraňuje dynamické závislosti mezi osami. Pak je možné navrhnout standardní regulátor tak, aby výsledný systém měl požadované vlastnosti.

Hlavní nevýhodou tohoto přístupu řízení jsou nepřesnosti modelu robota. Tyto nepřesnosti způsobí změnu chování oproti předpokládanému chování.

1.5 PID REGULÁTOR

PID regulátor je spojitý regulátor složený z proporcionální, integrační a derivační části. Ve zpětnovazebním řízení se řadí před řízenou soustavu. Do regulátoru vstupuje regulační odchylka $e(t)$ a vystupuje regulační zásah $u(t)$.



Obr. 1.22 – Regulační schéma se strukturou PID regulátoru

a) proporcionální složka

P regulátor je zesilovač. Akční veličina je přímo úměrná regulační odchylce. Nevýhodou P regulátoru je, že neodstraňuje trvalou regulační odchylku.

b) integrační složka

U I regulátoru je akční veličina přímo úměrná integrálu z regulační odchylky. Výhodou regulátorů s I složkou je, že dokáže odstranit trvalou regulační odchylku. Oproti řízení soustavy s P regulátorem může dojít při řízení s I regulátorem ke zhoršování stability systému.

c) derivační složka

Akční veličina na výstupu D regulátoru je přímo úměrná derivaci regulační odchylky. Derivační regulátor se používá pro zrychlení regulačního děje. D složka zesiluje i šum, což může vést v některých případech k jeho praktické nepoužitelnosti. Samostatně se D regulátor nevyskytuje, vždy je součástí složených regulátorů (PD, PID).

Tab. 1.3 – Jednoduché regulátory

regulátor	diferenciální rovnice	obrazový přenos
P	$u(t) = P \cdot e(t)$	$G_{\mathrm{R}}(s) = P$
I	$u(t) = I \cdot \int_0^t e(\tau)\mathrm{d}\tau + e(0)$	$G_{\mathrm{R}}(s) = I \cdot \frac{1}{s}$
D	$u(t) = P \cdot \frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}$	$G_{\mathrm{R}}(s) = D \cdot s$

Složené regulátory

Složené regulátory jsou tvořeny vhodnou kombinací jednoduchých typů regulátorů. Složené regulátory umožňují dosáhnout vyšší kvality regulace.

- PI regulátor

PI regulátor odstraňuje trvalou regulační odchylku. Na začátku regulace převládá vliv proporcionální složky, s narůstajícím časem převládá vliv integrační složky.

- PD regulátor

PD regulátor pracuje s trvalou regulační odchylkou. Nejprve převládá vliv derivační složky, později převládá složka proporcionální.

- PID regulátor

Na počátku regulace převládá vliv derivační složky, s postupem času převládá složka integrační. Odstraňuje regulační odchylku a rychle kompenzuje časté poruchy. Akční zásah PID regulátoru se vypočítá podle rovnice

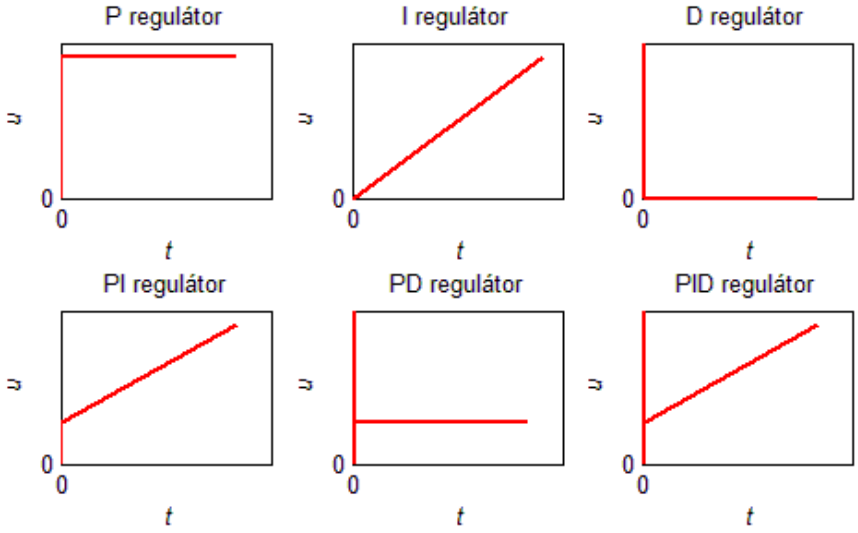
$$u(t) = P \cdot e(t) + I \cdot \int_0^t e(\tau)\mathrm{d}\tau + D \cdot \frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t} + e(0). \tag{1.56}$$

Odpovídající přenos PID regulátoru je ve tvaru

$$\mathrm{F_R}(s) = P + I \cdot \frac{1}{s} + D \cdot s\,. \tag{1.57}$$

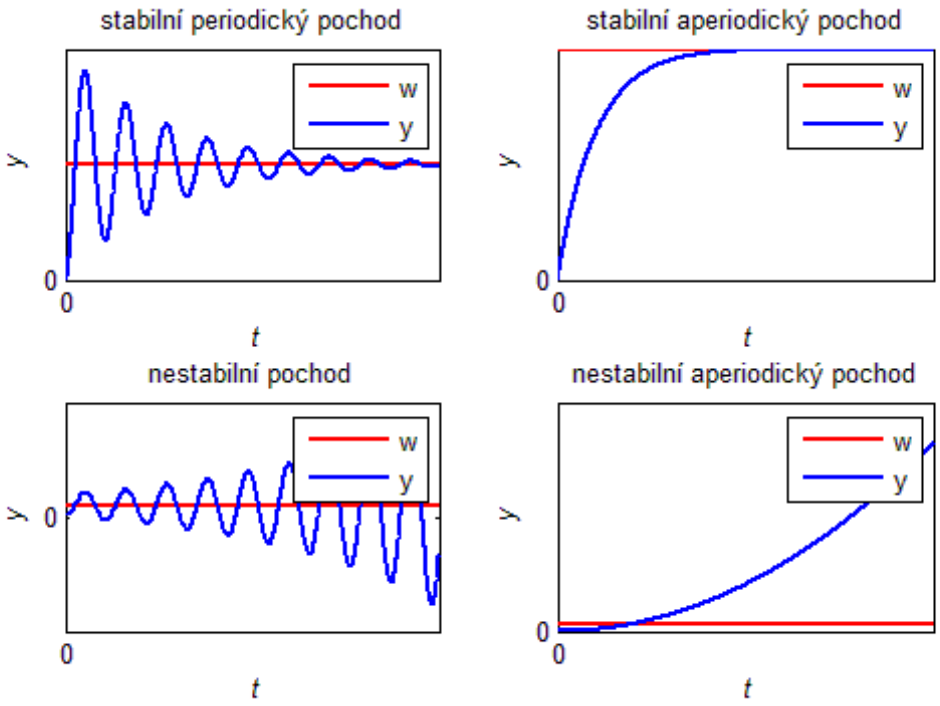
V následující tabulce jsou zobrazeny průběhy přechodových charakteristik regulátorů. Tyto průběhy jsou ideální, průběhy v praxi se trochu liší (nelze realizovat ideální derivátor).

Tab. 1.4 – Přechodové charakteristiky regulátorů



1.5.1 Optimalizace regulačního pochodu

Podmínka stability regulačního systému je nutnou podmínkou, ne však postačující pro jeho optimální činnost při regulačním pochodu. Obvykle se hodnotí regulační pochod podle časového průběhu regulované veličiny při jednotkovém skoku řídící veličiny. Pochod může být stabilní nebo nestabilní. Stabilní regulační pochod může být periodický nebo aperiodický (Burý, 2007; Prokop, 2006, Dušek, 2014).



Obr. 1.23 – Porovnání regulačních pochodů

Kvalita periodického regulačního pochodu se hodnotí např. podle těchto parametrů:

a) doba regulace t_{REG}, pro kterou platí: $\left|y(t_{\mathrm{REG}} - y(\infty)\right| < 0{,}05 \cdot y(\infty)$;

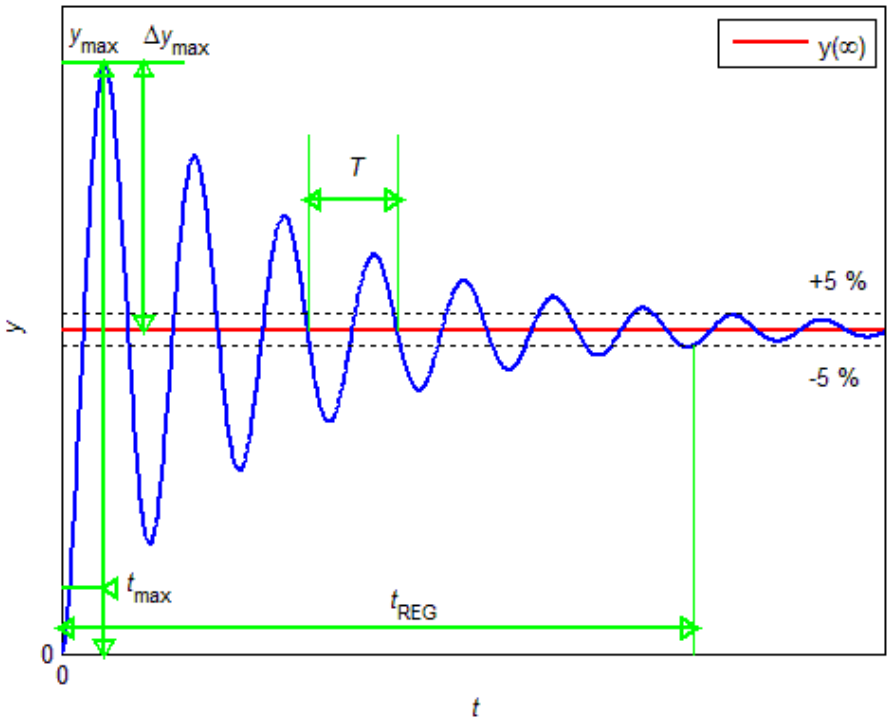
b) maximální hodnota překmitu $y_{\max}$ vyjádřená nejčastěji v procentech ustálené veličiny podle

$$y_{\max_\mathrm{proc}} = \frac{y_{\max}(t) - y(\infty)}{y(\infty)} \cdot 100, \tag{1.58}$$

kde $y_{\max_\mathrm{proc}}$ – vyjádření maximální odchylky, %.

c) charakteristický je i čas, za který dojde k tomuto maximu $t_{\max}$;

d) periodou tlumených kmitů *T*.



Obr. 1.24 – Kvalita regulačního pochodu

Požadavky na regulační pochod mohou být navzájem protichůdné. Např. požadavek na krátkou dobu přechodového děje (doba regulace t_{REG}) je v rozporu s požadavkem na malý překmit regulované veličiny $y_{\max}$, případně i s požadavkem na aperiodický průběh regulace. Z tohoto důvodu se požadavek na dobu regulace a velikost regulační odchylky převádí na společné měřítko. Tímto společným měřítkem je plocha, kterou uzavírá křivka znázorňující průběh regulované veličiny a hodnota žádané veličiny. Tato plocha se nazývá regulační plocha a její minimum určuje optimální poměr mezi dobou regulace a velikosti její odchylky (Dušek, 2014). Je-li regulační pochod aperiodický, pak pro hodnocení kvality regulačního pochodu stačí integrální kritérium (integrální kritérium lineární regulační plochy, I_{IE})

$$I_{\mathrm{IE}} = \int_0^t \left(w(\tau) - y(\tau)\right)\mathrm{d}\tau = \int_0^t e(\tau)\mathrm{d}\tau \rightarrow \min . \tag{1.59}$$

Pro periodický průběh je toto kritérium nevhodné. Proto se pro hodnocení periodického regulačního pochodu používají následující kritéria kvality regulačního pochodu.

Tab. 1.5 – Integrální kritéria (Dušek, 2014)

Integrální kritérium	rovnice
absolutní regulační plocha (I_{IAE})	$I_{\mathrm{IAE}} = \int_0^t \lvert w(\tau) - y(\tau) \rvert \mathrm{d}\tau = \int_0^t \lvert e(\tau) \rvert \mathrm{d}\tau \rightarrow \min$
kvadratická regulační plocha (I_{ISE})	$I_{\mathrm{ISE}} = \int_0^t [w(\tau) - y(\tau)]^2 \mathrm{d}\tau = \int_0^t [e(\tau)]^2 \mathrm{d}\tau \rightarrow \min$
kritérium (I_{ITAE})	$I_{\mathrm{ITAE}} = \int_0^t t \lvert w(\tau) - y(\tau) \rvert \mathrm{d}\tau = \int_0^t t \lvert e(\tau) \rvert \mathrm{d}\tau \rightarrow \min$

Ke zjištění parametrů PID regulátoru se využívají analytické a experimentální metody. Analytické metody vychází z výpočtu integrálního kritéria (Tab. 1.5), mezi experimentální metody patří Ziegler-Nicholtzova metoda.

- Experimentální metody

a) Ziegler-Nicholtzova metoda

Někdy se této metodě říká nastavení z kritického zesílení. Postup nastavení parametrů regulátoru je následující:

- použije se proporcionální regulátor ve zpětné vazbě URO;
- zvyšuje se zesílení P regulátoru tak, aby byl obvod na mezi stability (netlumené kmity na výstupu systému);
- odečte se kritické zesílení (zesílení P regulátoru, $r_{0\mathrm{k}}$) a perioda těchto netlumených kmitů (T_{k}).

Z tabulky se určí nastavení parametrů jednotlivých typů regulátorů,

Tab. 1.6 – Nastavení parametrů regulátoru metodou Ziegler-Nichols (Kuo, 2015)

Regulátor \ Parametr	*P*	*I*	*D*
P	$0{,}5 \cdot r_{0\mathrm{k}}$		
PI	$0{,}45 \cdot r_{0\mathrm{k}}$	$\frac{1{,}2 \cdot r_{0\mathrm{k}}}{T_{\mathrm{k}}}$	
PD	$0{,}8 \cdot r_{0\mathrm{k}}$		$\frac{r_{0\mathrm{k}} \cdot T_{\mathrm{k}}}{0{,}1}$
PID	$0{,}6 \cdot r_{0\mathrm{k}}$	$\frac{2 \cdot r_{0\mathrm{k}}}{T_{\mathrm{k}}}$	$\frac{r_{0\mathrm{k}} \cdot T_{\mathrm{k}}}{0{,}075}$

kde $G_{\mathrm{R}}(s) = P + I \cdot \frac{1}{s} + D \cdot s$.

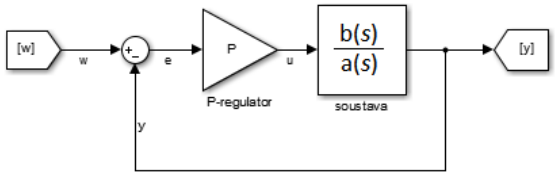
Výhodou této metody je, že není nutné znát parametry regulované soustavy. Nevýhodou je, že nelze použít pro soustavy prvního a druhého řádu, které nelze rozkmitat a dostat tak na mez stability. Největší nevýhodou metody však je, že pro mnoho technologických postupů je režim na hranici stability nepřijatelný. Proto byla vyvinuta modifikace zjištění parametrů z přechodové charakteristiky. Přestože tato metoda je původně čistě experimentální, při znalosti parametrů regulované soustavy je možné kritické hodnoty vypočítat také analyticky a to pomocí kritéria stability (Prokop, 2006).

- Analytické metody

  a) Analytická Ziegler-Nicholsova metoda

  Zjištění parametrů regulátoru předpokládá znalost přenosu řízeného systému a jeho parametrů. Kritické hodnoty uzavřeného regulačního obvodu (r_{0k} a T_k) lze zjistit výpočtem ze známého přenosu soustavy

$$G_S(s)=\frac{b(s)}{a(s)}=\frac{b_m s^m+\ldots+b_1 s+b_0}{s^n+a_{n-1}s^{n-1}+\ldots+a_1 s+a_0}. \tag{1.60}$$



Obr. 1.25 – Zjištění kritických hodnot

Je-li uzavřený regulační obvod (URO) na mezi stability, pak je jmenovatel přenosu roven 0. Použije se P-regulátor ve zpětné vazbě, určí se frekvenční přenos URO a z této rovnice se vypočtou kritické hodnoty regulátoru

$$G(s)=\frac{G_S(s)\cdot G_R(s)}{1+G_S(s)\cdot G_R(s)}=\frac{\frac{b(s)}{a(s)}\cdot P}{1+\frac{b(s)}{a(s)}\cdot P}=\frac{P\cdot b(s)}{a(s)+P\cdot b(s)}. \tag{1.61}$$

Ze jmenovatele přenosu se určí kritické hodnoty

$$a(s)+P\cdot b(s)=0, \tag{1.62}$$

ze spojitého přenosu se získá frekvenční přenos substitucí $s=j\omega$,

$$a(j\omega)+P\cdot b(j\omega)=\mathrm{Re}(r_0,\omega)+j\,\mathrm{Im}(r_0,\omega). \tag{1.63}$$

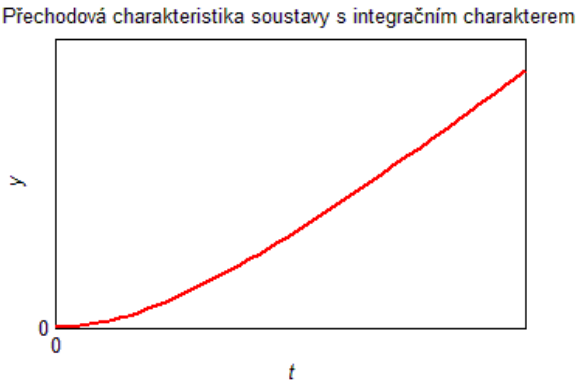
Je třeba vypočítat dvě proměnné, proto je nutná soustava dvou rovnic o dvou neznámých v následujícím tvaru

$$\begin{aligned} \mathrm{Re}(r_{0\mathrm{k}}, \omega_{\mathrm{k}}) &= 0 \\ \mathrm{Im}(r_{0\mathrm{k}}, \omega_{\mathrm{k}}) &= 0. \end{aligned} \tag{1.64}$$

Periodu netlumených kmitů vypočteme takto

$$T_{\mathrm{k}} = \frac{2\pi}{\omega_{\mathrm{k}}}. \tag{1.65}$$

Ziegler-Nicholsovo a analytické zjištění kritických hodnot a následné zjištění parametrů PID regulátorů pro soustavu s integračním charakterem není možné. Tyto soustavy nemají ustálenou hodnotu výstupní veličiny, soustavy s integračním charakterem nejde dostat pomocí P-regulátoru na mez stability. Soustava s přenosem ve tvaru $F(s) = \frac{K}{(Ts+1)s}$ má tuto přechodovou charakteristiku.



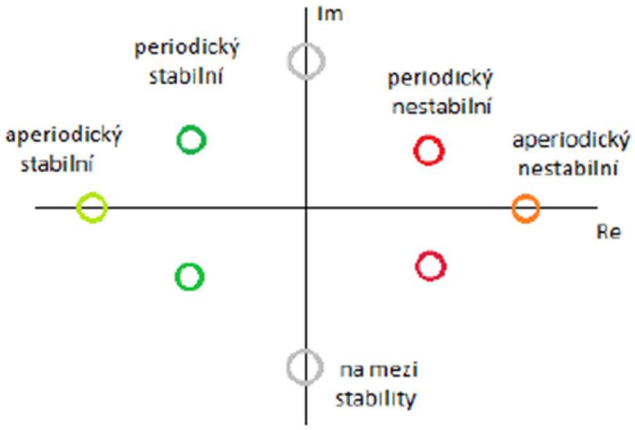
Obr. 1.26 – Přechodová charakteristika soustavy s integračním charakterem

b) Metoda umístění pólů

Metoda umístění pólů je jednou ze základních metod návrhu regulátorů pro lineární systémy. Požadavek na umístění pólů je často nahrazován požadavkem na dosažení určitého charakteristického polynomu. Tyto dva požadavky jsou rovnocenné za předpokladu znalosti přesného matematického modelu. Návrh příslušného regulátoru obvykle vychází z přenosového popisu soustavy a vede k řešení polynomiální rovnice. Z charakteristické rovnice vypočtením kořenů polynomu lze usuzovat o stabilitě uzavřeného regulačního obvodu. Nutnou a postačující podmínkou stability pro spojité systémy je: „Regulační systém je stabilní,

jestliže leží všechny kořeny charakteristického polynomu v záporné polorovině komplexní roviny“ (Burý, 2007).

Čím jsou stabilní póly dále od imaginární osy, tím je přechodový děj více tlumen. Jsou-li póly komplexní, znamená to, že přechodový děj bude mít kmitavou složku. Jsou-li nuly blíže imaginární osy než póly, bude převládat derivační složka. Póly v pravé polovině znamenají vždy nestabilní pochod. Póly v počátku vyjadřují integrační charakter, nuly v počátku pak zase derivační charakter (Švarc, 2003).



Obr. 1.27 – Oblast stability regulačního systému

Na základě této podmínky lze napsat zjednodušující předpoklady o stabilitě systémů (Švarc, 2003):

- regulační systém je nestabilní, jestliže má charakteristická rovnice členy s různými znaménky, nebo chybí-li některý z členů;
- je-li charakteristická rovnice nejvýše druhého řádu a všechny koeficienty jsou kladné a žádný z nich nechybí, potom je regulační systém stabilní vždy, bez ohledu na velikost konstant;
- je-li charakteristická rovnice nejvýše třetího řádu a obsahuje všechny koeficienty, které jsou kladné, pak stabilita systému záleží na jejich velikosti. V tomto případě je nutné dopočítat kořeny charakteristické rovnice nebo aplikovat některé kritérium stability (např. Hurwitzovo kritérium stability).

c) Autotuning

Matlab nabízí autotuning pomocí funkce `pidtune`. Tato funkce automaticky nastaví regulátor zvoleného typu pro danou soustavu. Výstupem funkce je objekt regulátor, ze kterého lze uložit parametry jednotlivých částí PID regulátoru. Více informací na (MathWorks, 2010)

```
regulator = pidtune(soustava,typ_regulatoru)
```

Příklad:

Jaké jsou parametr PID regulátoru pro soustavu $F(s)=\frac{K}{(Ts+1)s}$, kde K = 5 a T = 3?

```
soustava = tf(5,[3 1 0])
regulator = pidtune(soustava,'pidf')
regulator =

                1            s
  Kp + Ki * --- + Kd * --------
                s          Tf*s+1

  with Kp = 0.136, Ki = 0.000699, Kd = 0.282, Tf = 0.979
```

kde `Kp` – proporcionální složka,

`Ki` – integrační složka,

`Kd` – derivační složka,

`Tf` – filtrační koeficient derivační složky.

d) kompenzace časové konstanty

Metodu kompenzačního seřízení lze použít pro regulátory, jejichž čitatel přenosu lze vyjádřit pomocí kořenových činitelů. Tyto kořenové činitele se alespoň z části shodují s kořenovými činiteli ve jmenovateli přenosu soustavy (Šulc, 2006).

2 PRAKTICKÁ ČÁST PRÁCE

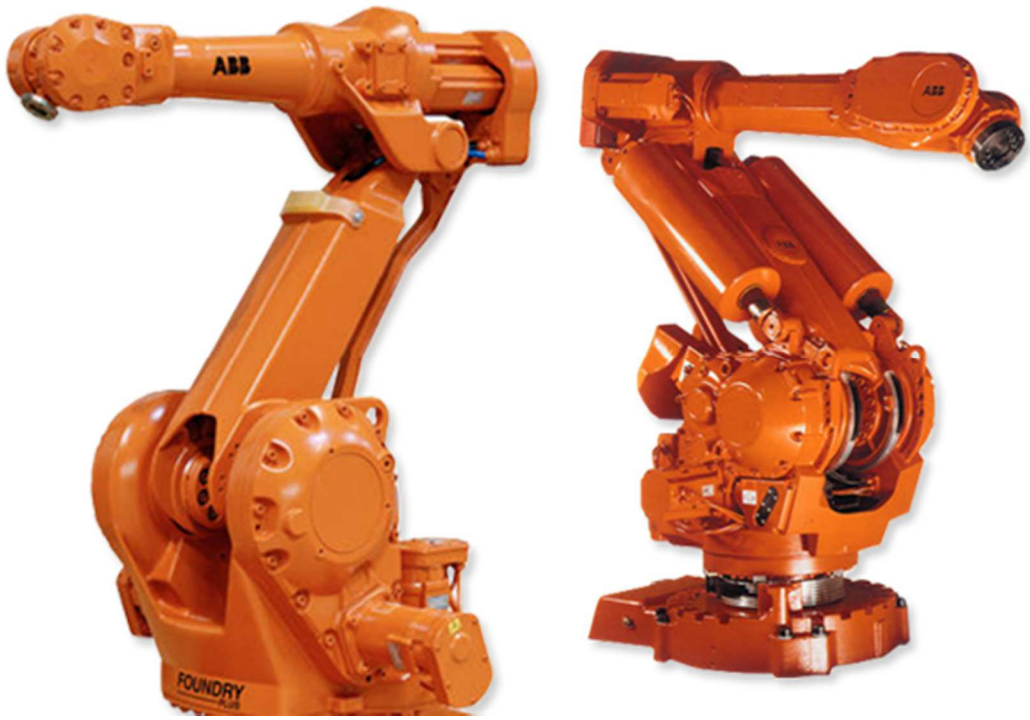
Cílem práce bylo navrhnout decentralizované řízení manipulátoru antropomorfního typu pomocí PID regulátorů. Prostor kinematických veličin (strojových souřadnic) se rozdělil na několik menších segmentů. V těchto segmentech byla provedena identifikace systému metodou nejmenších čtverců.

Nastavení regulátorů je pomocí metody umístění pólů, která zaručuje (správným nastavením pólů) stabilitu uzavřeného regulačního obvodu pomocí metody kompenzace časové konstanty, online nastavení parametrů a s využitím funkce Matlabu – pidtune. Kromě těchto porovnání nastavení parametrů PID regulátorů jsou vytvořeny 2 různé modely (bez kompenzace poruchy na vstupu a s kompenzací poruchy na vstupu).

Výsledkem práce by mělo být přesnější řízení v jednotlivých segmentech. Toto chování je ověřeno simulací a zobrazeno na grafech.

2.1 VYTVOŘENÍ MATEMATICKÉHO MODELU

Tato práce se zabývá modelováním a řízením antropomorfního typu robota pomocí PID regulátorů. Tento typ robota má tři rotační klouby. Předlohou se stal robot od firmy ABB.



Obr. 2.1 – Robot od firmy ABB (ABB, 2016)

Vytvoření matematického modelu robota se skládá z několika dílčích kroků. Prvním krokem je nahrazení robota hmotnými body, které budou reprezentovat setrvačné účinky robota. Tyto hmotné body se zavádějí pro zjednodušení výpočtů. Hmotné body jsou umístěny na spojnici kloubů. Náhrada hmotnými body předpokládá, že těleso nebude rotovat kolem osy *y* (nulový moment setrvačnosti) a také předpokládá, že jsou přibližně stejné momenty setrvačnosti vůči osám *x* a *z*.

Druhým krokem je vypočtení kinetické a potenciální energie v těchto bodech. Kinetická energie se vypočítá podle vztahu (1.28), který se upraví na

$$\boldsymbol{K} = \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{K}_i \,, \tag{2.1}$$

$$\boldsymbol{K}_i = \frac{1}{2} m_i \left| \boldsymbol{v}_{Ti} \right|^2 + \frac{1}{2} J_{Ti} \boldsymbol{\omega}_i^{\,2} \,, \tag{2.2}$$

kde $\boldsymbol{K}$ – kinetická energie celého tělesa,

$\boldsymbol{K}_i$ – kinetická energie i-tého hmotného bodu,

Potenciální energie se obdobně vypočte úpravou rovnice (1.29)

$$\boldsymbol{P} = \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{P}_i \,, \tag{2.3}$$

$$\boldsymbol{P}_i = m_i \cdot \mathrm{g} \cdot \boldsymbol{z}_i \,, \tag{2.4}$$

kde $\boldsymbol{P}$ – potenciální energie celého tělesa,

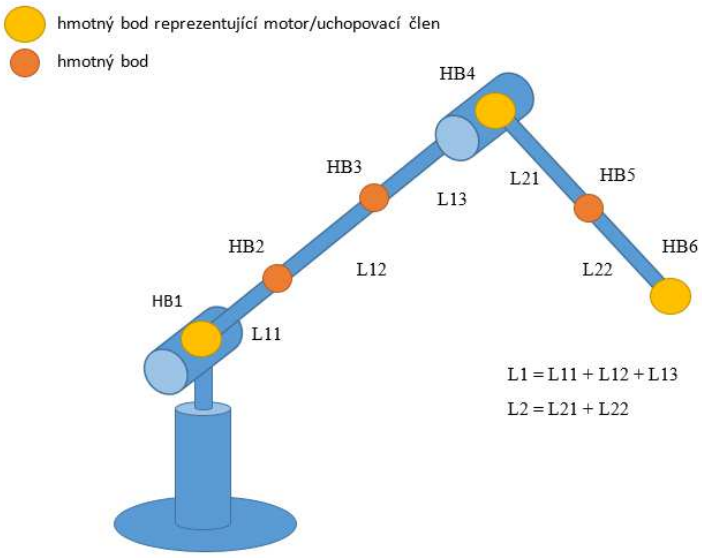
$\boldsymbol{P}_i$ – potenciální energie i-tého hmotného bodu,

$\boldsymbol{z}_i$ – výška i-tého hmotného bodu.

Příklad:

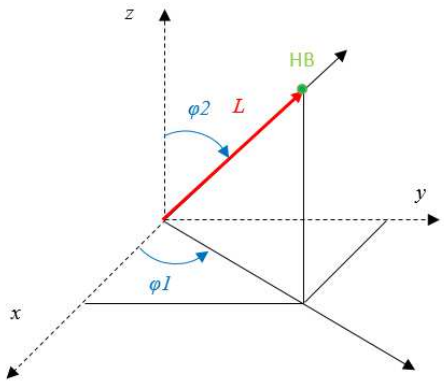
Jaká je kinetická a potenciální energie robota? Je uvažováno zjednodušení hmotnými body. Hmotné body vykonávají sférický pohyb. To znamená, že pro popis systému lze použít sférické souřadnice.

Nejdříve se provede náhrada těles hmotnými body.



Obr. 2.2 – Model robota s vyobrazenými hmotnými body

Dále se poloha hmotných bodů převede z kartézského do sférického popisu souřadnic.



Obr. 2.3 – Sférické souřadnice

$$\begin{aligned} x_1 &= l_1 \cdot \sin(\varphi_2(t)) \cdot \cos(\varphi_1(t)) \\ y_1 &= l_1 \cdot \sin(\varphi_2(t)) \cdot \sin(\varphi_1(t)) \\ z_1 &= l_1 \cdot \cos(\varphi_2(t)) \end{aligned} \tag{2.5}$$

Tyto souřadnice jsou závislé na čase. Derivace těchto souřadnic podle času je

$$\frac{\mathrm{d}x_1}{\mathrm{d}t} = l_1 \cdot \cos(\varphi_2(t)) \cdot \frac{\mathrm{d}\varphi_2(t)}{\mathrm{d}t} \cdot \cos(\varphi_1(t)) - l_1 \cdot \sin(\varphi_2(t)) \cdot \sin(\varphi_1(t)) \cdot \frac{\mathrm{d}\varphi_1(t)}{\mathrm{d}t},$$
$$\frac{\mathrm{d}y_1}{\mathrm{d}t} = l_1 \cdot \cos(\varphi_2(t)) \cdot \frac{\mathrm{d}\varphi_2(t)}{\mathrm{d}t} \cdot \sin(\varphi_1(t)) + l_1 \cdot \sin(\varphi_2(t)) \cdot \cos(\varphi_1(t)) \cdot \frac{\mathrm{d}\varphi_1(t)}{\mathrm{d}t}, \quad (2.6)$$
$$\frac{\mathrm{d}z_1}{\mathrm{d}t} = -l_1 \cdot \sin(\varphi_2(t)) \cdot \frac{\mathrm{d}\varphi_2(t)}{\mathrm{d}t}.$$

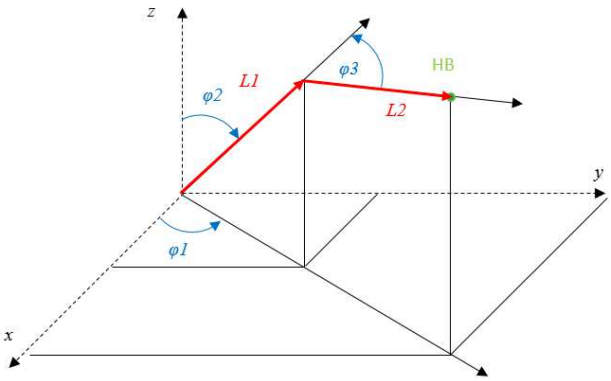
Nyní se může vypočítat kinetická a potenciální energie hmotného bodu podle (Glenn, 2015).

$$K_{1i} = \frac{1}{2} m_i \cdot \left[\left(\frac{\mathrm{d}x_{1i}}{\mathrm{d}t} \right)^2 + \left(\frac{\mathrm{d}y_{1i}}{\mathrm{d}t} \right)^2 + \left(\frac{\mathrm{d}z_{1i}}{\mathrm{d}t} \right)^2 \right], \quad (2.7)$$

$$P_{1i} = m_i \cdot g \cdot z_{1i}, \quad (2.8)$$

kde $i = 1,2,...n$, kde n je počet hmotných bodů prvního ramene.

Obdobně se vypočítá kinetická a potenciální energie hmotných bodů druhého ramene. Při tomto výpočtu se musí již počítat s předchozím ramenem.



Obr. 2.4 – Sférické souřadnice II

$$x_2 = x_1 + l_2 \cdot \sin(\varphi_2(t) + \varphi_3(t)) \cdot \cos(\varphi_1(t))$$
$$y_2 = y_1 + l_2 \cdot \sin(\varphi_2(t) + \varphi_3(t)) \cdot \sin(\varphi_1(t)) \quad (2.9)$$
$$z_2 = z_1 + l_2 \cdot \cos(\varphi_2(t))$$

Nyní lze vypočítat kinetickou a potenciální energii hmotných bodů reprezentující druhé rameno

$$K_{2i} = \frac{1}{2} m_i \cdot \left[\left(\frac{\mathrm{d}x_{2i}}{\mathrm{d}t} \right)^2 + \left(\frac{\mathrm{d}y_{2i}}{\mathrm{d}t} \right)^2 + \left(\frac{\mathrm{d}z_{2i}}{\mathrm{d}t} \right)^2 \right], \quad (2.10)$$

$$P_{2i} = m_i \cdot g \cdot z_{2i}. \quad (2.11)$$

Celková kinetická a potenciální energie je dána součtem dílčích energií, viz rovnice (2.1 a 2.3)

Dalším krokem při vytváření matematického modelu je výpočet jednotlivých matic matematického modelu. Tyto matice vychází z rovnic (1.25, 1.46, 1.48). Porovnáním rovnic se dostane vztah pro výpočet jednotlivých matic

$$\underbrace{\frac{\partial^2 K}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}^2}}_{\boldsymbol{B}(\boldsymbol{q})}\ddot{\boldsymbol{q}} + \underbrace{\frac{\partial^2 K}{\partial \boldsymbol{q}\partial \dot{\boldsymbol{q}}}\dot{\boldsymbol{q}} - \frac{\partial K}{\partial \boldsymbol{q}}}_{\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})} + \underbrace{\frac{\partial P}{\partial \boldsymbol{q}}}_{\boldsymbol{g}(\boldsymbol{q})} = \boldsymbol{F}\ , \tag{2.12}$$

$$\frac{\partial^2 K}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}^2} = \boldsymbol{B}(\boldsymbol{q}) \qquad \frac{\partial^2 K}{\partial \boldsymbol{q}\partial \dot{\boldsymbol{q}}}\dot{\boldsymbol{q}} - \frac{\partial K}{\partial \boldsymbol{q}} = \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) \qquad \frac{\partial P}{\partial \boldsymbol{q}} = \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q})\,. \tag{2.13}$$

Matice $\overline{\mathbf{B}}$ se vypočte jako průměrný moment setrvačnosti v jednotlivých osách. Matici $\tilde{\boldsymbol{F}}_{\boldsymbol{V}}$ zadává uživatel a vychází z předpokladu znalosti tlumení (kromě viskózního tření v převodech a ložiscích je také zahrnut i vliv elektromagnetického tření v motorech). Matice $\boldsymbol{K}_{\boldsymbol{r}}$ se taktéž zadává a vychází ze znalosti převodových poměrů. Po vypočtení těchto matic se vypočte přenos každé osy. Model pro řízení vychází z rovnice (1.49). Úpravou této rovnice (Laplaceovou transformací) se dostane vztah pro výpočet přenosu v maticovém tvaru

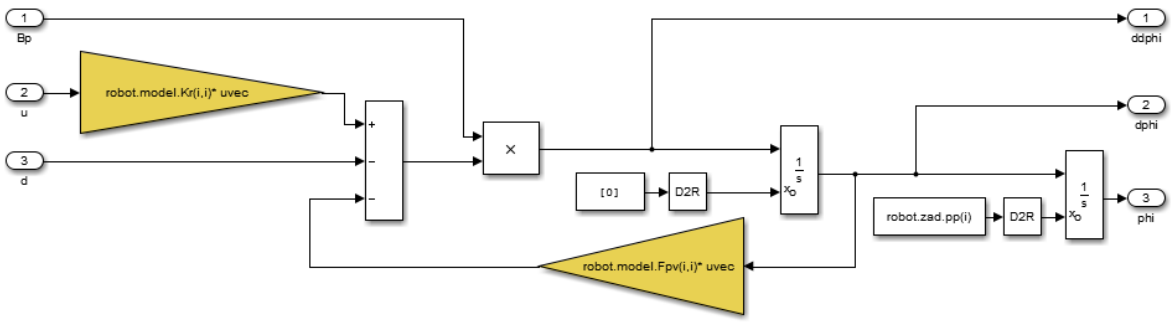
$$\frac{\boldsymbol{K}_r}{\overline{\boldsymbol{B}}s^2 + \tilde{\boldsymbol{F}}_v s}, \tag{2.14}$$

tedy přenos i-té osy je tvaru

$$\frac{K_{r_i}}{\overline{B}_i s^2 + \tilde{F}_{v_i} s}\,. \tag{2.15}$$

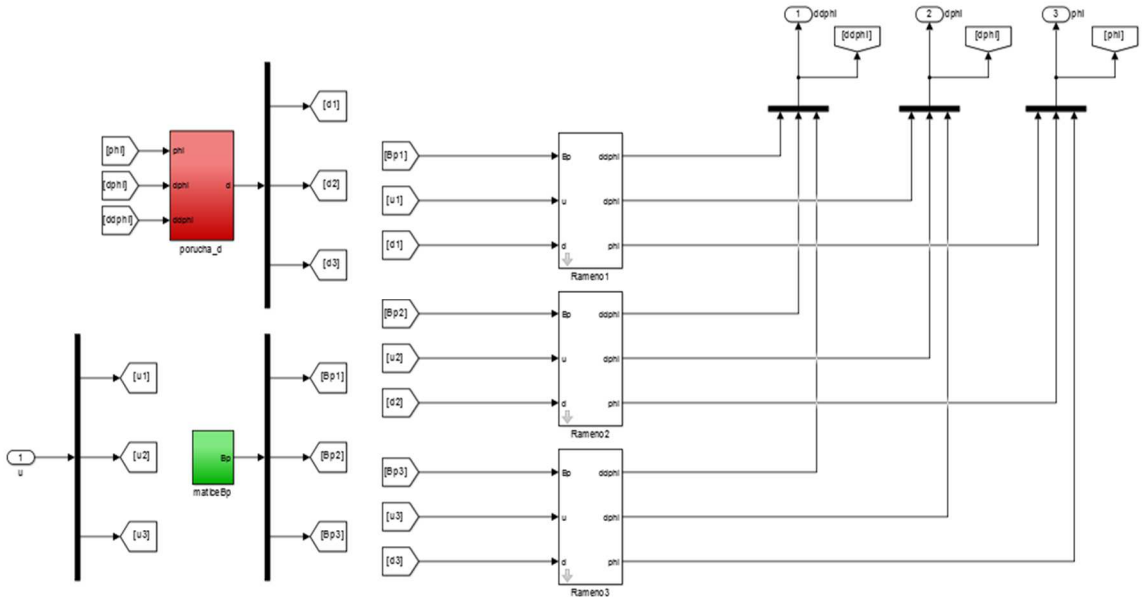
Z rovnic (1.46 a 1.48) dále vyplývá porucha, tedy odchylka modelu od skutečné hodnoty. Tato odchylka je ve tvaru

$$\boldsymbol{d} = \Delta\boldsymbol{B}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q})\,. \tag{2.16}$$



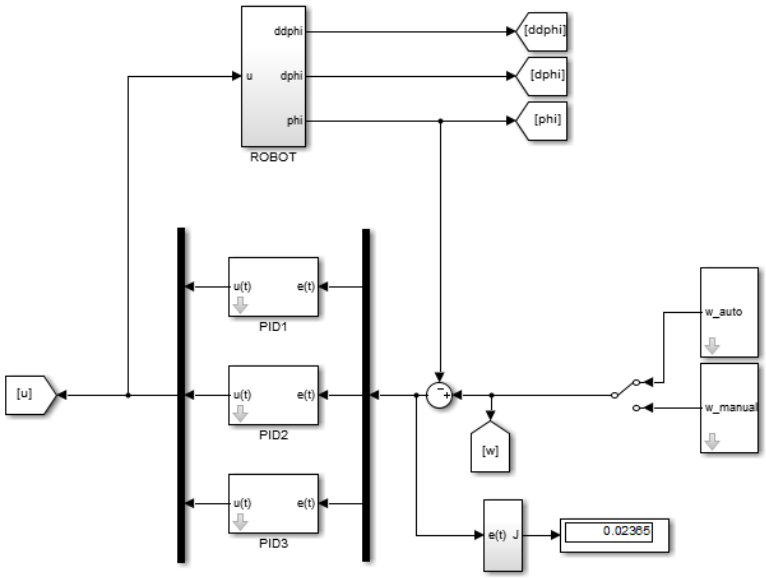
Obr. 2.5 – Model jedné osy robota

Ze znalostí těchto rovnic lze v Matlabu v prostředí Simulink vytvořit model robota.



Obr. 2.6 – Model robota v prostředí Simulink

Uzavřený regulační obvod celého modelu je realizován následovně



Obr. 2.7 – URO modelu robota

Na Obr. 2.6 je vidět, že model robota je rozdělen na bloky. Tři bloky reprezentují osy robota, jeden blok je matice $\overline{\boldsymbol{B}}$ (maticeBp) a v jednom bloku se vypočítává porucha $\boldsymbol{d}$ (porucha_d). Model osy odpovídá rovnici (1.49 a 2.15). Úpravou této rovnice se získá rovnice, kterou lze pomocí bloků zapsat v Simulinku (viz. Obr. 2.5).

$$\overline{\boldsymbol{B}}\ddot{\boldsymbol{q}} + \tilde{\boldsymbol{F}}_{\mathrm{V}}\dot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{K}_{\mathrm{r}}\boldsymbol{u} - \boldsymbol{d} \quad \Rightarrow \quad \ddot{\boldsymbol{q}} = \frac{1}{\overline{\boldsymbol{B}}} \cdot \left(\boldsymbol{K}_{\mathrm{r}}\boldsymbol{u} - \tilde{\boldsymbol{F}}_{\mathrm{V}}\dot{\boldsymbol{q}} - \boldsymbol{d}\right). \tag{2.17}$$

2.2 ODHAD PARAMETRŮ MODELU ROBOTA V JEDNOTLIVÝCH SEGMENTECH STROJOVÉHO PROSTORU

Z modelu robota lze získat vektory jednotlivých úhlů, jejich rychlost a zrychlení a akční zásah. Data se ukládají s předem zadaným časovým intervalem, tedy s určitou vzorkovací frekvencí.

2.2.1 Využití metody nejmenších čtverců pro odhad parametrů lineárního modelu

Lineární spojitý systém s jednou vstupní a jednou výstupní veličinou má obecnou závislost mezi vstupem a výstupem popsanou diferenciální rovnicí ve tvaru

$$a_n \frac{\mathrm{d}^n y(t)}{\mathrm{d}t^n} + a_{n-1} \frac{\mathrm{d}^{n-1} y(t)}{\mathrm{d}t^{n-1}} + \ldots + a_2 \frac{\mathrm{d}^2 y(t)}{\mathrm{d}t^2} + a_1 \frac{\mathrm{d}y(t)}{\mathrm{d}t} + a_0 y(t) = b_m \frac{\mathrm{d}^m u(t)}{\mathrm{d}t^m} + b_{m-1} \frac{\mathrm{d}^{m-1} u(t)}{\mathrm{d}t^{m-1}} + \ldots + b_2 \frac{\mathrm{d}^2 u(t)}{\mathrm{d}t^2} + b_1 \frac{\mathrm{d}u(t)}{\mathrm{d}t} + b_0 u(t) \tag{2.18}$$

kde $m \leq n$,

y – výstupní veličina,

u – vstupní veličina,

a, b – koeficienty levé a pravé strany diferenciální rovnice.

Odhadnout parametry takto zvoleného popisu soustavy lze pouze v případě znalosti všech potřebných diferencí vstupního a výstupního signálu.

Příklad:

Soustava je popsána přenosem $F(s) = \frac{K}{(Ts+1)s}$. K dispozici jsou vektor vstupního signálu, vektor výstupního signálu, vektor derivací výstupního signálu a vektor druhých derivací výstupního signálu. Jaké jsou hodnoty *K* a *T*?

1) Úprava Laplaceova přenosu na diferenciální popis

$$\frac{K}{(Ts+1)s} = \frac{K}{Ts^2 + s} \approx T \frac{\mathrm{d}^2 y(t)}{\mathrm{d}t^2} + \frac{\mathrm{d}y(t)}{\mathrm{d}t} = K \frac{\mathrm{d}u(t)}{\mathrm{d}t}, \tag{2.19}$$

2) dosazení vektorů

3) atd…

V praxi většinou nejsou známy jednotlivé derivace, ale pouze diskrétní hodnoty vstupu a výstupu. Pro odhad parametrů modelu se musí nejprve pomocí Z-transformace provést převod spojitého popisu systému na diskrétní popis.

Příklad:

Soustava je popsána přenosem $F(s)=\frac{K}{(Ts+1)s}$. K dispozici jsou vektor vstupního signálu, vektor výstupního signálu a vzorkovací frekvence. Jaké jsou hodnoty *K* a *T*?

Nejprve se provede Z-transformace spojité soustavy, protože se ukládá vektor hodnot v diskrétním čase.

$$F(z)=\mathcal{Z}\left\{\frac{1-e^{-sT_{vz}}}{s}F(s)\right\}=\mathcal{Z}\left\{\frac{1-e^{-sT_{vz}}}{s}\frac{K}{Ts^2+s}\right\}=\left[\frac{K}{Ts^2+s}=\frac{K_0}{s^2+T_0 s}\quad\begin{matrix}K_0=\frac{K}{T}\\ T_0=\frac{1}{T}\end{matrix}\right]=$$

$$=\mathcal{Z}\left\{\frac{1-e^{-sT_{vz}}}{s}\frac{K_0}{s^2+T_0 s}\right\}=\left[\left(1-e^{-sT_{vz}}\right)\frac{K_0}{s^3+T_0 s^2}=\left(1-e^{-sT_{vz}}\right)\cdot\left[\frac{A}{s}+\frac{B}{s^2}+\frac{C}{s+T_0}\right]\right] \tag{2.20}$$

Výpočet konstant A, B, C je následovný

$$K_0 = A\cdot s\cdot(s+T_0)+B\cdot(s+T_0)+C\cdot s^2, \tag{2.21}$$

$$K_0 = As^2+AT_0 s+Bs+BT_0+Cs^2, \tag{2.22}$$

$$K_0 = s^2\cdot(A+C)+s^1\cdot(AT_0+B)+s^0\cdot BT_0. \tag{2.23}$$

Porovnáním mocnin na levé a pravé straně rovnice se vypočtou konstanty A, B, C

$$s^0:\quad K_0=BT_0\quad\Rightarrow\quad B=\frac{K_0}{T_0}, \tag{2.24}$$

$$s^1:\quad 0=AT_0+B\quad\Rightarrow\quad A=-\frac{B}{T_0}=-\frac{K_0}{T_0}\cdot\frac{1}{T_0}=-\frac{K_0}{T_0^2}, \tag{2.25}$$

$$s^2:\quad 0=A+C\quad\Rightarrow\quad C=-A=\frac{K_0}{T_0^2}. \tag{2.26}$$

Dosazením konstant A, B, C do rovnice (2.20) se vypočte odpovídající Z-přenos

$$\mathcal{Z}\left\{\left(1-e^{-sT_{vz}}\right)\cdot\left[-\frac{K_0}{T_0^2}\cdot\frac{1}{s}+\frac{K_0}{T_0}\cdot\frac{1}{s^2}+\frac{K_0}{T_0^2}\cdot\frac{1}{s+T_0}\right]\right\}. \tag{2.27}$$

Podle slovníku L- a Z- transformací (Vítečková, 2006) lze rovnici (2.27) převést na

$$\left(\frac{z-1}{z}\right)\cdot\left[-\frac{K_0}{{T_0}^2}\cdot\frac{z}{z-1}+\frac{K_0}{T_0}\cdot\frac{T_{vz}\cdot z}{(z-1)^2}+\frac{K_0}{{T_0}^2}\cdot\frac{z}{z-e^{-T_0\cdot Tvz}}\right], \tag{2.28}$$

úpravou této rovnice se vypočítá diferenční rovnice přenosu v tomto tvaru

$$\frac{z^1\cdot\left(-\frac{K_0}{{T_0}^2}+\frac{K_0}{{T_0}^2}\cdot e^{-T_0\cdot Tvz}+\frac{K_0}{T_0}\cdot T_{vz}\right)+z^0\cdot\left(\frac{K_0}{{T_0}^2}-\frac{K_0}{{T_0}^2}\cdot e^{-T_0\cdot Tvz}-\frac{K_0}{T_0}\cdot T_{vz}\cdot e^{-T_0\cdot Tvz}\right)}{z^2+z^1\cdot\left(-1-e^{-T_0\cdot Tvz}\right)+z^0\cdot\left(e^{-T_0\cdot Tvz}\right)}. \tag{2.29}$$

Obecný tvar Z-přenosu pro L-přenos ze zadání je

$$\frac{b_1\cdot u(k+1)+b_0\cdot u(k)}{a_2\cdot y(k+2)+a_1\cdot y(k+1)+a_0\cdot y(k)}. \tag{2.30}$$

Porovnáním jednotlivých koeficientů se vypočítá K_0 a T_0

$$b_1=-\frac{K_0}{{T_0}^2}+\frac{K_0}{{T_0}^2}\cdot e^{-T_0\cdot Tvz}+\frac{K_0}{T_0}\cdot T_{vz}\quad\Rightarrow\quad K_0=\frac{b_1{T_0}^2}{-1+e^{T_0\cdot T_{vz}}+T_0\cdot T_{vz}}, \tag{2.31}$$

$$a_1=-1-e^{-T_0\cdot Tvz}\quad\Rightarrow\quad T_0=-\frac{\ln(-a_1-1)}{Tvz}. \tag{2.32}$$

Pro výpočet parametrů *K* a *T* se dosadí K_0 a T_0 do substituční rovnice uvedené v (2.20)

$$T=\frac{1}{T_0}, \tag{2.33}$$

$$K=K_0\cdot T. \tag{2.34}$$

Úpravou rovnice (2.30) se dostane jeden řádek soustavy $\boldsymbol{X}\cdot\boldsymbol{p}=\boldsymbol{y}$,

$$y(k+2)=-a_1\cdot y(k+1)-a_0\cdot y(k)+b_1\cdot u(k+1)+b_0\cdot u(k)+e(k+2). \tag{2.35}$$

V maticovém zápisu se rovnice (2.35) převede na následující tvar

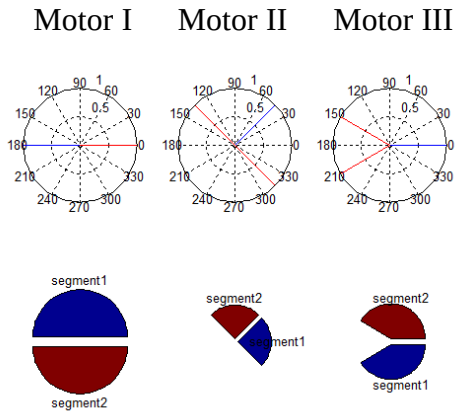
$$\underbrace{\begin{bmatrix}-y(k+1) & -y(k) & u(k+1) & u(k)\end{bmatrix}}_{\boldsymbol{X}_k}\cdot\underbrace{\begin{bmatrix}a_1\\a_0\\b_1\\b_0\end{bmatrix}}_{\boldsymbol{p}}=\underbrace{y(k+2)}_{y_k}+\underbrace{e(k+2)}_{\varepsilon_k}, \tag{2.36}$$

2.2.2 Segmentace strojového prostoru

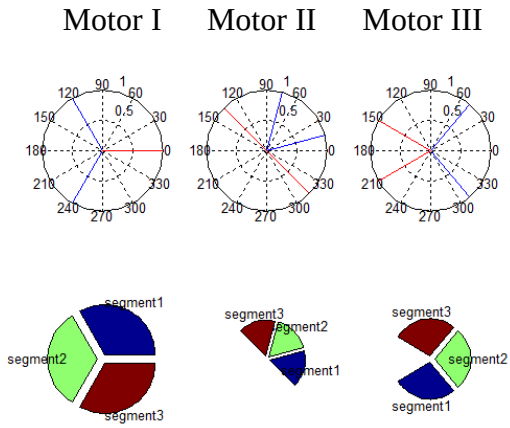
Řízení modelu robota v celém rozsahu strojového prostoru při použití jednoho nastavení PID regulátoru nemusí být vhodné. Proto se strojový prostor rozdělí na několik menších segmentů, ve kterých se ze změřených dat vytvoří model robota pro daný segment a provede se nastavení PID regulátoru. Dělení strojového prostoru se dělá z důvodu nelineárního modelu robota. Rozdělením strojového prostoru se v segmentech naleznou lineární modely, jejichž řízení by mělo být kvalitnější než řízení celého modelu robota. Prostor se rozdělí podle polohy.

Tab. 2.1 – Rozsah motorů

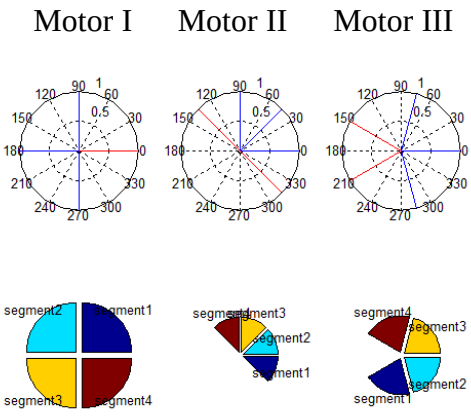
Rozsah motoru I	0 – 360 °
Rozsah motoru II	-45 – 135 °
Rozsah motoru III	-150 – 150 °



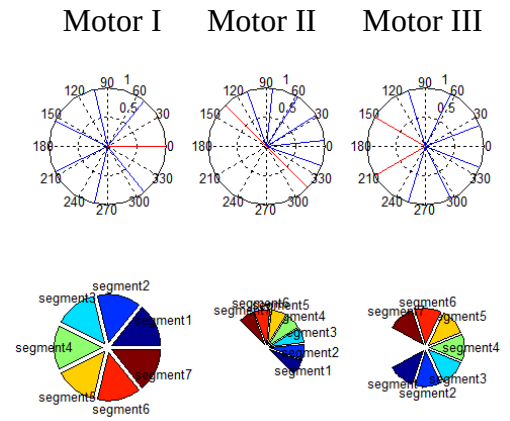
Obr. 2.8 – Dělení strojového prostoru na 2 segmenty



Obr. 2.9 - Dělení strojového prostoru na 3 segmenty



Obr. 2.10 – Dělení strojového prostoru na 4 segmenty



Obr. 2.11 – Dělení strojového prostoru na 7 segmentů

2.3 POUŽITÉ METODY NASTAVENÍ PID REGULÁTORŮ

V práci jsou použity metody umístění pólů, kompenzace dominantní časové konstanty a funkce autotuning. Ziegler-Nicholsova metoda nejde na soustavu druhého řádu použít (nelze ji dostat na mez stability).

- Metoda umístění pólů

Princip metody umístění pólů je tvarování jmenovatele uzavřeného regulačního obvodu. Návrh zajistí, že jmenovatel přenosu bude mít zadaný tvar. Přenos soustavy a přenos regulátoru bude mít následující tvar

$$G_{\mathrm{S}}(s)=\frac{K}{Ts^2+s}, \tag{2.37}$$

$$G_{\mathrm{R}}(s)=P+I\cdot\frac{1}{s}+D\cdot s, \tag{2.38}$$

pak přenos URO bude ve tvaru

$$G(s)=\frac{G_{\mathrm{S}}(s)\cdot G_{\mathrm{R}}(s)}{1+G_{\mathrm{S}}(s)\cdot G_{\mathrm{R}}(s)}=\frac{\frac{K}{Ts^2+s}\cdot\left(P+I\cdot\frac{1}{s}+D\cdot s\right)}{1+\frac{K}{Ts^2+s}\cdot\left(P+I\cdot\frac{1}{s}+D\cdot s\right)}. \tag{2.39}$$

Úpravou rovnice (2.39) se dostane charakteristický polynom. Charakteristický polynom je jmenovatel přenosu.

$$\begin{aligned}G(s)&=\frac{\frac{K}{Ts^2+s}\cdot\left(P+I\cdot\frac{1}{s}+D\cdot s\right)}{1+\frac{K}{Ts^2+s}\cdot\left(P+I\cdot\frac{1}{s}+D\cdot s\right)}=\frac{K\cdot\left(P+I\cdot\frac{1}{s}+D\cdot s\right)}{Ts^2+s+K\cdot\left(P+I\cdot\frac{1}{s}+D\cdot s\right)}=\left\lfloor\begin{matrix}K_{\mathrm{P}}=K\cdot P\\K_{\mathrm{I}}=K\cdot I\\K_{\mathrm{D}}=K\cdot D\end{matrix}\right\rfloor\\&=\frac{K_{\mathrm{P}}+K_{\mathrm{I}}\cdot\frac{1}{s}+K_{\mathrm{D}}\cdot s}{Ts^2+s+K_{\mathrm{P}}+K_{\mathrm{I}}\cdot\frac{1}{s}+K_{\mathrm{D}}\cdot s}=\frac{K_{\mathrm{P}}\cdot s+K_{\mathrm{I}}+K_{\mathrm{D}}\cdot s^2}{Ts^3+s^2+K_{\mathrm{P}}\cdot s+K_{\mathrm{I}}+K_{\mathrm{D}}\cdot s^2}=\\&=\frac{K_{\mathrm{D}}\cdot s^2+K_{\mathrm{P}}\cdot s+K_{\mathrm{I}}}{Ts^3+s^2\cdot(1+K_{\mathrm{D}})+K_{\mathrm{P}}\cdot s+K_{\mathrm{I}}}\end{aligned} \tag{2.40}$$

Charakteristická rovnice vznikne, když se charakteristický polynom rovná nule. V charakteristické rovnici jsou 3 proměnné, 3 parametry PID regulátoru, jejichž změnou můžeme měnit polohu pólů přenosu. Póly přenosu jsou kořeny charakteristického polynomu.

$$Ts^3 + s^2 \cdot (1 + K_D) + K_P \cdot s + K_I = 0 \tag{2.41}$$

$$Ts^3 + s^2 \cdot (1 + K \cdot D) + K \cdot P \cdot s + K \cdot I = 0 \tag{2.42}$$

Obecný tvar polynomu 3. řádu je ve tvaru

$$a_3 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0 = 0\,, \tag{2.43}$$

kde a_i – koeficient polynomu.

Při výpočtech parametrů PID regulátoru je zvolen trojnásobný pól $-p$. Tento předpoklad zaručuje stabilitu systému (pól umístěn v levé polorovině komplexní roviny). Pro trojnásobný pól se charakteristický polynom vypočítá

$$(s + p)^3 = 0\,, \tag{2.44}$$

$$s^3 + 3ps^2 + 3p^2 s + p^3 = 0\,. \tag{2.45}$$

Rovnice (2.42) a (2.45) nemají stejný tvar, koeficient a_3 je u těchto polynomů jiný. U rovnice (2.42) je parametr $a_3 = T$ a u rovnice (2.45) je parametr $a_3 = 1$. Proto je nutné rovnici (2.45) vynásobit *T*.

$$Ts^3 + 3Tps^2 + 3Tp^2 s + Tp^3 = 0\,, \tag{2.46}$$

z této rovnice lze již dopočítat parametry PID regulátoru porovnáním jednotlivých koeficientů polynomu.

$$\begin{aligned} a_2\text{:}&\quad 3 \cdot T \cdot p = 1 + K \cdot D \quad \rightarrow \quad D = \frac{3 \cdot T \cdot p - 1}{K} \\ a_1\text{:}&\quad 3 \cdot T \cdot p^2 = K \cdot P \quad \rightarrow \quad P = \frac{3 \cdot T \cdot p}{K} \\ a_0\text{:}&\quad T \cdot p^3 = K \cdot I \quad \rightarrow \quad I = \frac{T \cdot p^3}{K} \end{aligned} \tag{2.47}$$

Vhodnou volbou pólu $-p$ lze ovlivnit regulační pochodu URO.

- Autotuning pomocí funkce `pidtune`

Postup nastavení parametrů PID regulátoru pomocí funkce `pidtune` je popsán v teoretické části. (str. 50)

- Kompenzace dominantní časové konstanty

Metoda kompenzace dominantní časové konstanty předpokládá znalost přenosu soustavy. Tento přenos lze rozložit na kořenové činitele.

Přenos soustavy a regulátoru je v následujícím tvaru

$$G_S(s)=\frac{K}{s\cdot(Ts+1)}, \tag{2.48}$$

$$G_R(s)=r\frac{(Ts+1)\cdot(\tau s+1)}{s\cdot K}=\underbrace{\frac{r\cdot(T+\tau)}{K}}_{P}+\underbrace{\frac{r}{K}}_{I}\cdot\frac{1}{s}+\underbrace{\frac{r\cdot T\cdot\tau}{K}}_{D}\cdot s\,. \tag{2.49}$$

Přenos URO pak bude ve tvaru

$$G(s)=\frac{G_S(s)\cdot G_R(s)}{1+G_S(s)\cdot G_R(s)}=\frac{\frac{K}{s\cdot(Ts+1)}\cdot r\frac{(Ts+1)\cdot(\tau s+1)}{s\cdot K}}{1+\frac{K}{s\cdot(Ts+1)}\cdot r\frac{(Ts+1)\cdot(\tau s+1)}{s\cdot K}}= \tag{2.50}$$

$$=\frac{\frac{r\cdot(\tau s+1)}{s^2}}{1+\frac{r\cdot(\tau s+1)}{s^2}}=\frac{r\cdot(\tau s+1)}{s^2+r\cdot(\tau s+1)}= \tag{2.51}$$

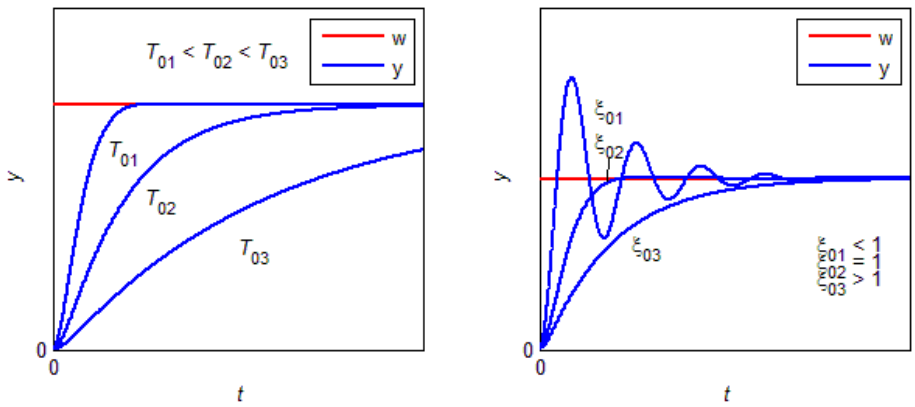
$$=\frac{r\cdot\tau\cdot s+r}{s^2+r\cdot\tau\cdot s+r}=\frac{\tau\cdot s}{\frac{1}{r}s^2+\tau\cdot s+1}\,. \tag{2.52}$$

Čitatel přenosu URO lze přepsat do tvaru obecného přenosu soustavy druhého řádu.

$$\frac{1}{r}s^2+\tau\cdot s+1=T_0{}^2s^2+2\xi_0T_0\cdot s+1, \tag{2.53}$$

kde T_0 – vlastní perioda kmitů,

ξ_0 – koeficient poměrného tlumení.



Obr. 2.12 – Význam konstant ξ_0 a T_0

Změnou těchto dvou parametrů lze ovlivnit průběh regulačního pochodu. Změnou periody kmitů lze ovlivnit rychlost přechodového děje, koeficientem poměrného tlumení lze ovlivnit kmitání děje (Kohout, 2008).

Z rovnic (2.53 a 2.49) lze dopočítat parametry PID regulátoru, podle zadaných parametrů T_0 a ξ_0.

$$r = \frac{1}{T_0^{\,2}} \tag{2.54}$$

$$\tau = 2\xi_0 T_0 \tag{2.55}$$

Volbou $\xi_0 > 1$ se dostane aperiodický systém, volbou $\xi_0 = 1$ je děj na mezi aperiodicity a zvolením $0 < \xi_0 < 1$ se dosáhne kmitavého systému. Parametr T_0 ovlivňuje rychlost doby trvání přechodového děje.

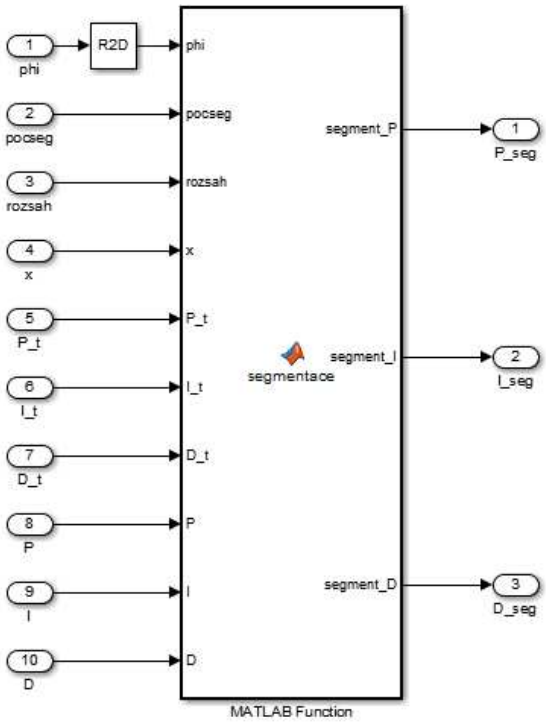
2.3.1 Změna parametrů regulátoru

Průchodem robota jednotlivými segmenty strojového prostoru souřadnic mění regulátor své parametry. Parametry PID regulátoru se mění v závislosti na odhadnutých parametrech modelu v jednotlivých částech prostoru. Při identifikaci modelu se vypočetly parametry i pro celý strojový prostor. Pomocí těchto celkových parametrů se vypočtou výchozí parametry regulátoru. Úpravou těchto výchozích parametrů regulátoru se dostanou parametry vypočtené pro příslušný segment. Z celkového parametru a parametru v příslušném segmentu se vypočte koeficient, kterým se parametr PID regulátoru vynásobí.

$$k = \frac{parametr\ \ v\ segmentu}{výchozí\ \ parametr}, \tag{2.56}$$

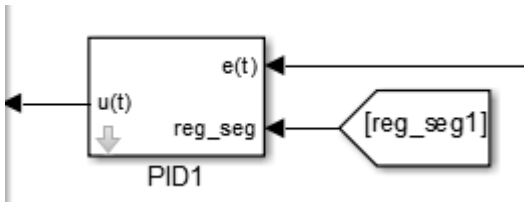
$$parametr\ \ v\ segmentu\ \ = výchozí\ \ parametr\ \cdot k\,. \tag{2.57}$$

Výpočet parametru *k* probíhá neustále při běhu programu. Tento výpočet se provádí v Simulinku pomocí funkce MatlabFunction.



Obr. 2.13 – Vypočtení koeficientů

Na následujícím obrázku je blok PID regulátoru. Vstupem do bloku je regulační odchylka $(e(t))$ a reg_seg. Tento vstup jsou vypočtené koeficienty, které upravují jednotlivé parametry regulátoru.

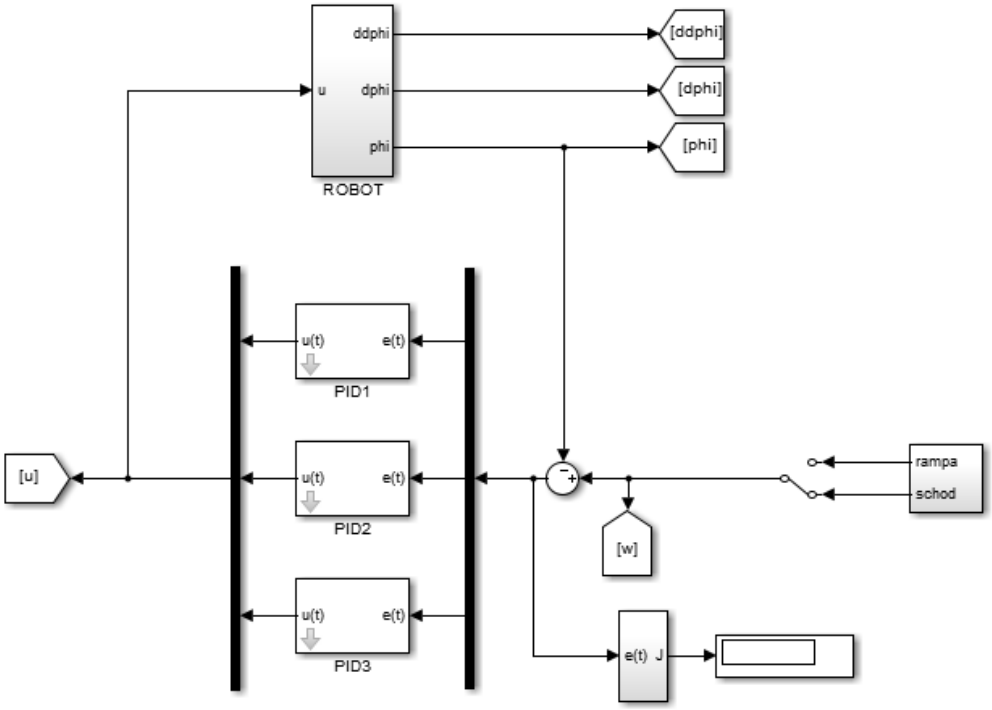


Obr. 2.14 – PID regulátor se změnou parametrů

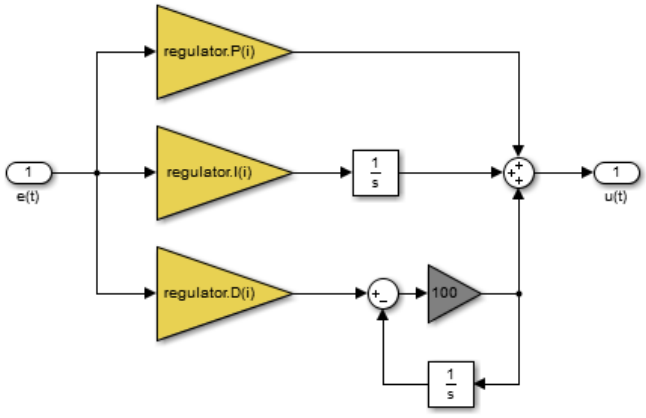
3 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

3.1 POSTUP NÁVRHU DECENTRALIZOVANÉHO ŘÍZENÍ

Prvním krokem návrhu decentralizovaného řízení je vytvoření modelu robota antropomorfního typu z Lagrangeových pohybových rovnic (kapitola 2.1 Vytvoření matematického modelu). Podle rovnic (2.47 nebo 2.49) lze vypočítat parametry PID regulátorů. Dále se vytvoří uzavřený regulační obvod s modelem robota (Obr. 2.5 – 2.7) s PID regulátory a s generováním žádané hodnoty (žádaná hodnota je úhel natočení motoru robota).



Obr. 3.1 – URO (řízení modelu robota)



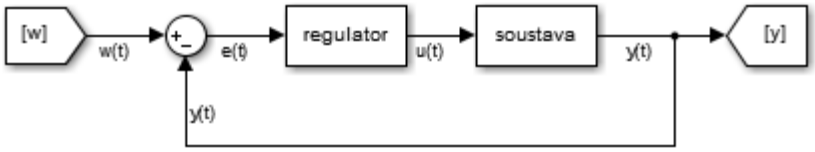
Obr. 3.2 – PID regulátor

Z tohoto výchozího modelu se ukládají data pro následnou identifikaci. Ukládají se tato data s požadovanou vzorkovací frekvencí: natočení jednotlivých úhlů ($phi(k)$) a akční zásah regulátoru ($u(k)$). Po získání dostatečného množství dat se v jednotlivých segmentech provede identifikace modelu a následné nastavení parametrů PID regulátorů.

Pro návrh řízení jsou použity tyto modely a nastavení parametrů regulátoru:

- Návrh č. 1:

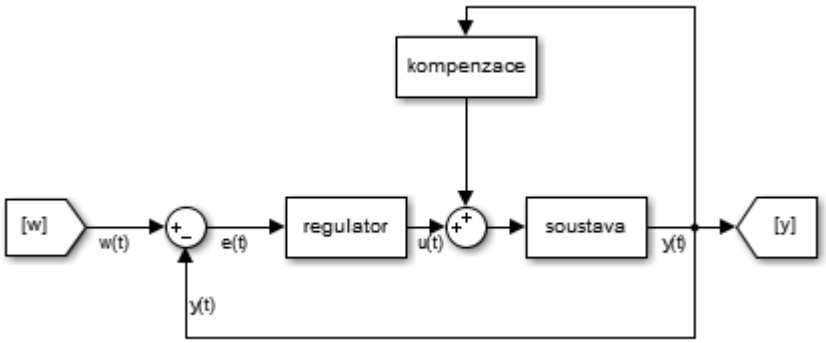
Identifikace v jednotlivých segmentech a nastavení parametrů PID regulátoru příslušnou metodou. Vychází se z URO v tomto tvaru.



Obr. 3.3 – Návrh identifikace č. 1

- Návrh č. 2:

Vylepšení předchozího modelu o kompenzaci poruchy. V tomto modelu se uvažuje kompenzace poruchy, která působí na vstupu do systému.



Obr. 3.4 – Návrh identifikace č. 2

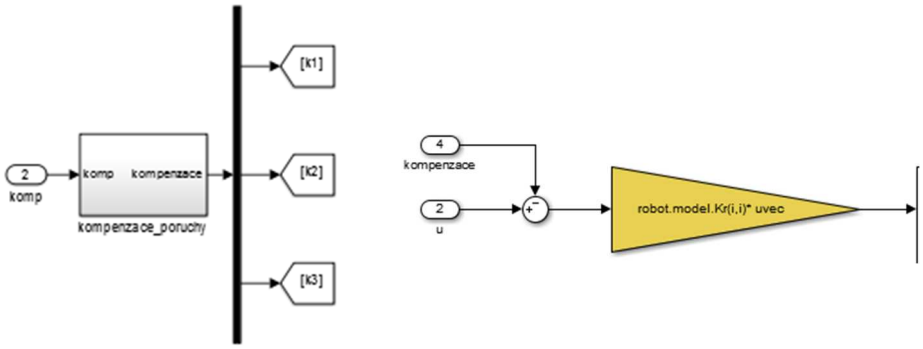
- Návrh č. 3:

Online nastavení parametrů regulátoru. Tato metoda vychází z prvního návrhu. Při identifikaci systému je nutné ukládat obrovské množství dat, proto je využito průběžné metody nejmenších čtverců. Při této metodě se uchovává matice 3×3 a aktualizují se její parametry (Cvejn, 2016).

- Návrh č. 4:

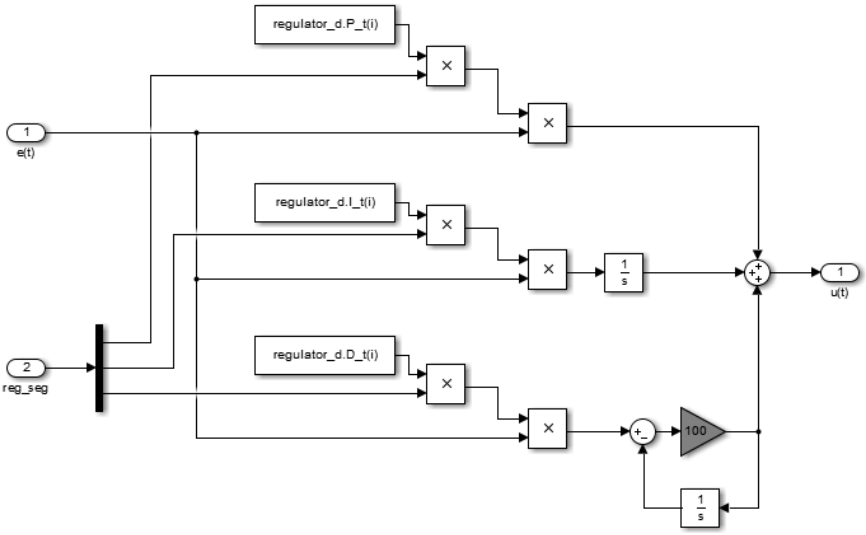
Nastavení parametrů regulátoru pomocí funkce `pidtune`. Model vychází z prvního návrhu.

Dalším krokem návrhu řízení je vytvoření jednotlivých modelů řízení. Model robota zůstává v těchto návrzích stejný. Do návrhu je přidán blok na změnu parametrů PID regulátoru a u návrhu č. 2 je blok na kompenzaci poruchy.



Obr. 3.5 – Blok kompenzace poruchy a úprava modelu pro kompenzaci poruchy

Změna parametrů PID regulátoru je popsána v kapitole (2.3.1 Změna parametrů PID regulátoru).



Obr. 3.6 – Úprava parametrů PID regulátoru

Vstupem do tohoto bloku je regulační odchylka a vstup reg_seg. V tomto vstupu je vektor parametrů *k* z rovnice (2.56). Tento parametr násobí jednotlivé složky PID regulátoru vypočtené pro celý rozsah pohybu a tím vzniká požadovaná hodnota složky regulátoru pro daný segment.

3.2 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

Při testování se vychází z parametrů manipulátoru, které jsou uvedeny v Tab. 3.1.

Tab. 3.1 – Výchozí nastavení

I. rameno	Délka ramene	0,3 m
	Hmotnost ramene	0,5 kg
	Hmotnost motoru na konci ramene	0,2 kg
II. rameno	Délka ramene	0,2 m
	Hmotnost ramene	0,3 kg
	Hmotnost efektoru na konci ramene	0,2 kg
Rozsah motorů	I. motor	0 – 360 °
	II. motor	-45 – 135 °
	III. motor	-150 – 150 °

Porovnat lze čtyři návrhy řízení mezi sebou a také různá nastavení parametrů modelu. V modelech lze měnit matice $\boldsymbol{K}_\mathrm{r}$ a $\tilde{\boldsymbol{F}}_\mathrm{v}$. Matice $\boldsymbol{K}_\mathrm{r}$ reprezentuje matici převodových poměrů (mění se převodový poměr v motorech) a matice $\tilde{\boldsymbol{F}}_\mathrm{v}$ představuje matici tlumení. Matice $\overline{\boldsymbol{B}}$ je pro všechny modely stejná a vychází z rovnice (1.47). Matice má tvar

$$\overline{\boldsymbol{B}} = \begin{bmatrix} \dfrac{42139}{28800} & 0 & 0 \\ 0 & \dfrac{42139}{28800} & 0 \\ 0 & 0 & \dfrac{16}{1125} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0{,}1463 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}1463 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}0142 \end{bmatrix}. \tag{3.1}$$

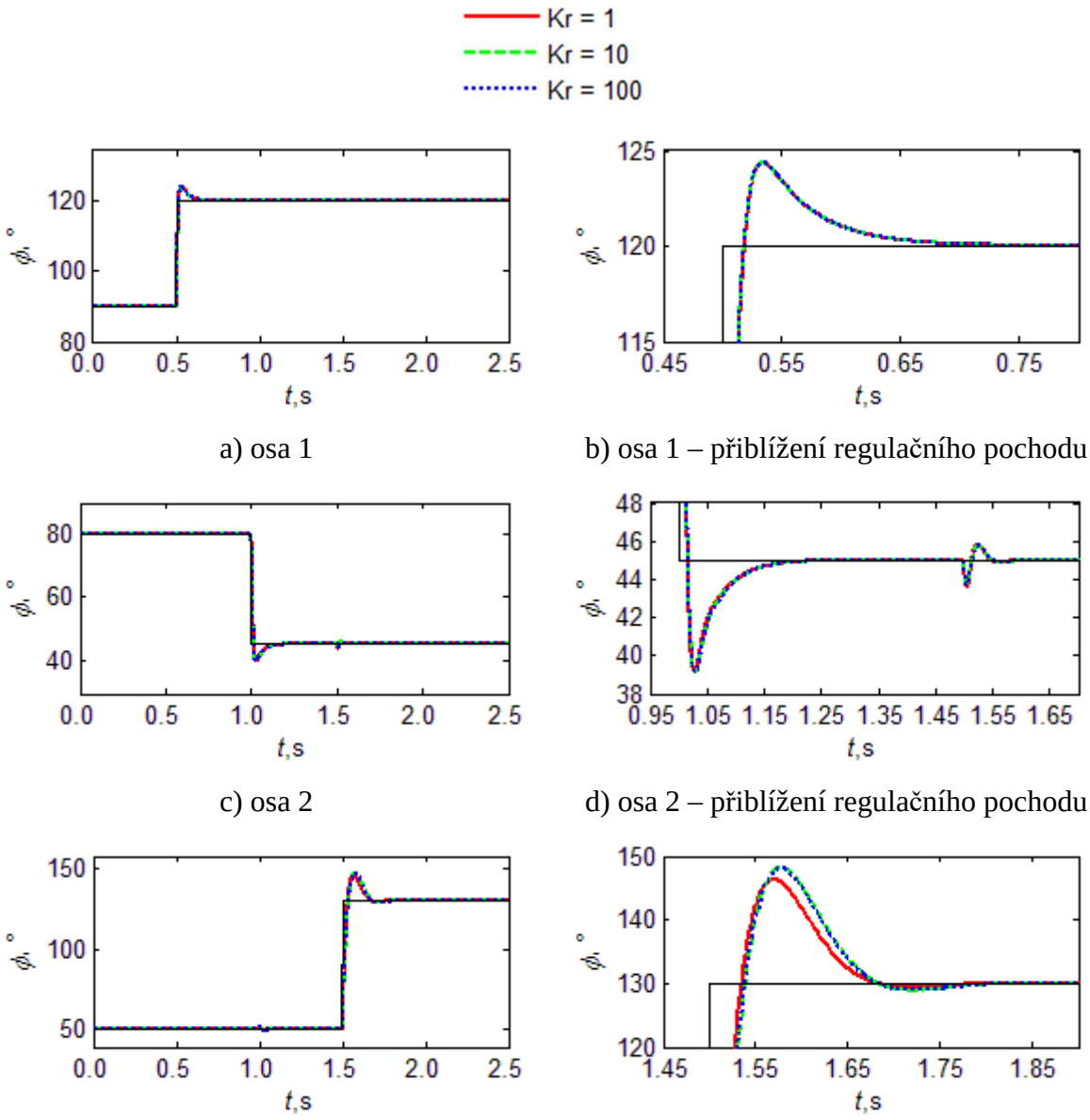
Matice $\boldsymbol{K}_\mathrm{r}$ a $\tilde{\boldsymbol{F}}_\mathrm{v}$ jsou čtvercové matice o rozměrech 3×3 a jsou v tomto tvaru

Tab. 3.2 – Porovnání modelů robota

Matice / Model	Matice převodových poměrů $\boldsymbol{K}_\mathrm{r}$			Matice tlumení $\tilde{\boldsymbol{F}}_\mathrm{v}$		
	$\boldsymbol{K}_\mathrm{r}(1,1)$	$\boldsymbol{K}_\mathrm{r}(2,2)$	$\boldsymbol{K}_\mathrm{r}(3,3)$	$\tilde{\boldsymbol{F}}_\mathrm{v}(1,1)$	$\tilde{\boldsymbol{F}}_\mathrm{v}(2,2)$	$\tilde{\boldsymbol{F}}_\mathrm{v}(3,3)$
Model 1	1	1	1	50	40	30
Model 2	10	10	10	50	40	30
Model 3	100	100	100	50	40	30
Model 4	1	1	1	150	140	130
Model 5	1	1	1	500	400	300

3.2.1 Porovnání modelů robota

Z tabulky je vidět, že první modely se liší pouze v matici převodových poměrů. Rozdíl v řízení manipulátorů s takto zvolenými maticemi je ukázán a porovnán na následujících obrázcích. Na obrázcích je zobrazeno řízení bez uvažování segmentace, tedy řízení manipulátoru se stálými parametry PID regulátoru v celém rozsahu pohybu.



a) osa 1 b) osa 1 – přiblížení regulačního pochodu

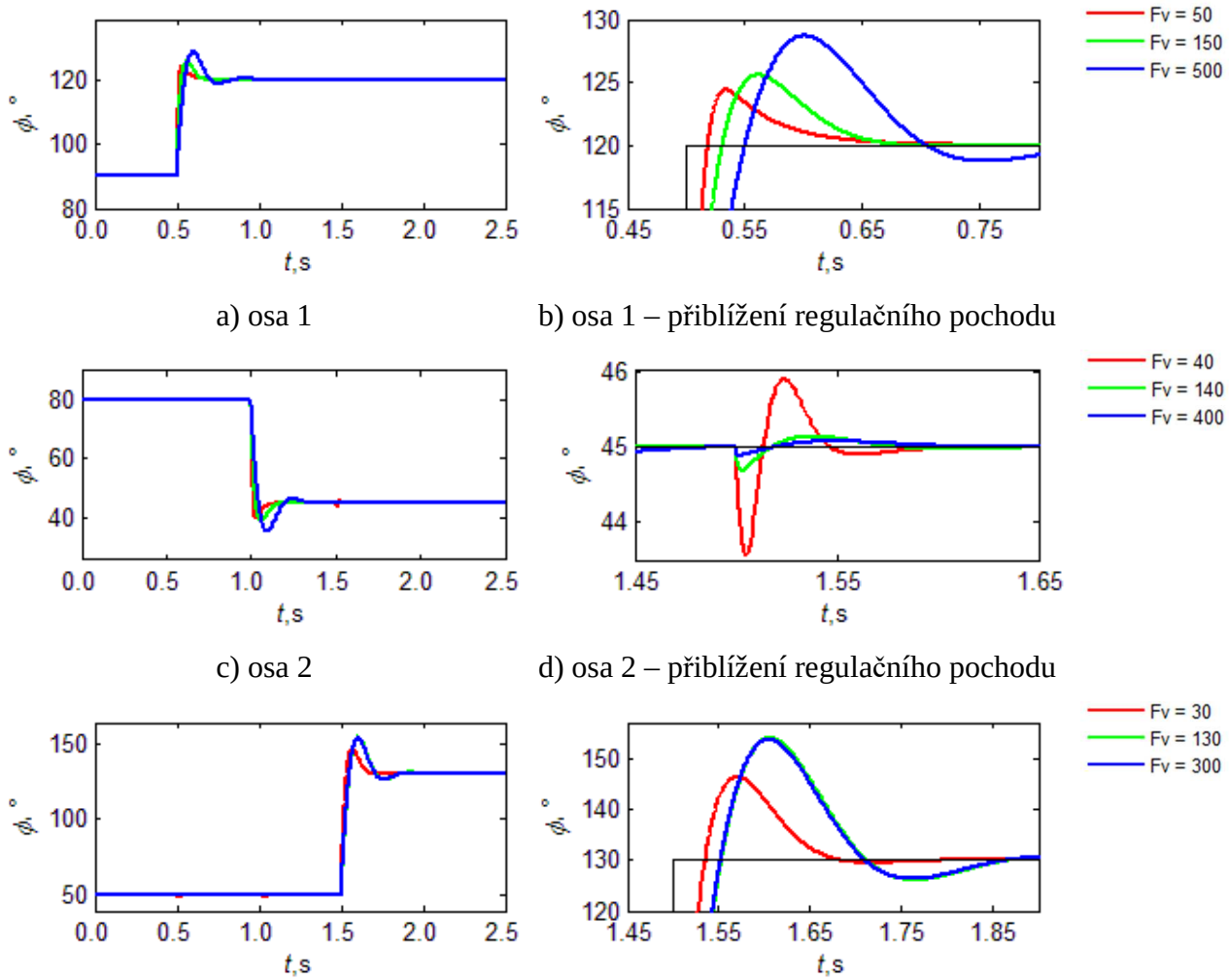
c) osa 2 d) osa 2 – přiblížení regulačního pochodu

e) osa 3 f) osa 3 – přiblížení regulačního pochodu

Obr. 3.7 – Vliv velikosti matice převodových poměrů na regulační pochod

Z obrázků je vidět, že se pro různá nastavení matic převodových poměrů neliší regulační pochod. Dále je vidět, že velikost prvků matice převodových poměrů nemá na dynamiku modelu žádný vliv.

Modely 1, 4 a 5 se liší pouze v matici tlumení. Jejich porovnáním se dostanou tyto průběhy.



a) osa 1 b) osa 1 – přiblížení regulačního pochodu

c) osa 2 d) osa 2 – přiblížení regulačního pochodu

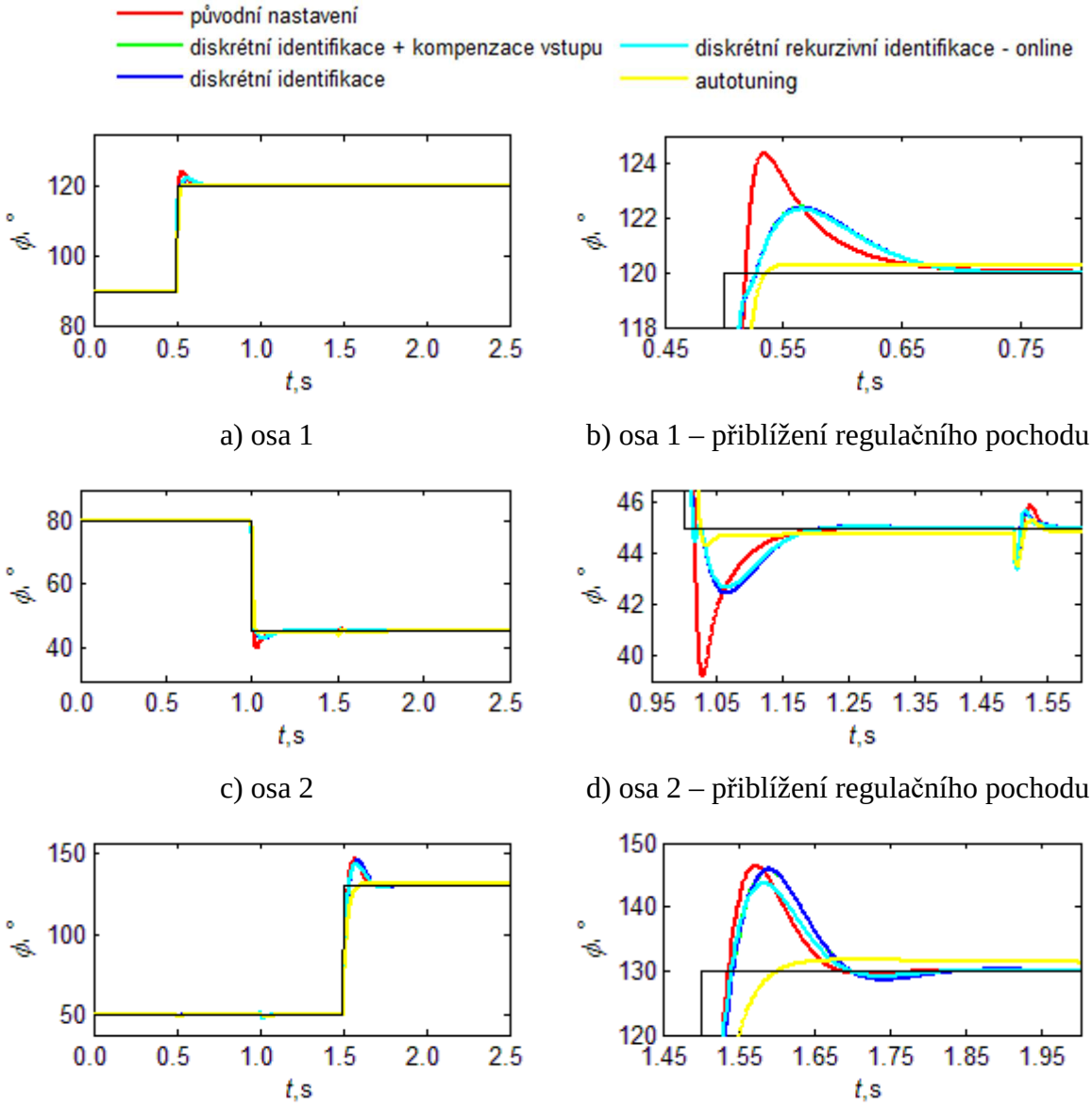
e) osa 3 f) osa 3 – přiblížení regulačního pochodu

Obr. 3.8 – Vliv velikosti matice tlumení na regulační pochod

Z porovnání je vidět, že pro různá nastavení matic tlumení se robot chová podobně. Výjimku tvoří reakce na poruchu, kde je vliv matice tlumení značný. Porucha s rostoucí maticí tlumení má menší vliv na systém (Obr 3.8 d)).

3.2.2 Porovnání návrhů řízení

Dále se mohou porovnat čtyři návrhy řízení. Zobrazeny jsou průběhy pro model 1 uvedený v Tab. 3.2.



a) osa 1

b) osa 1 – přiblížení regulačního pochodu

c) osa 2

d) osa 2 – přiblížení regulačního pochodu

e) osa 3

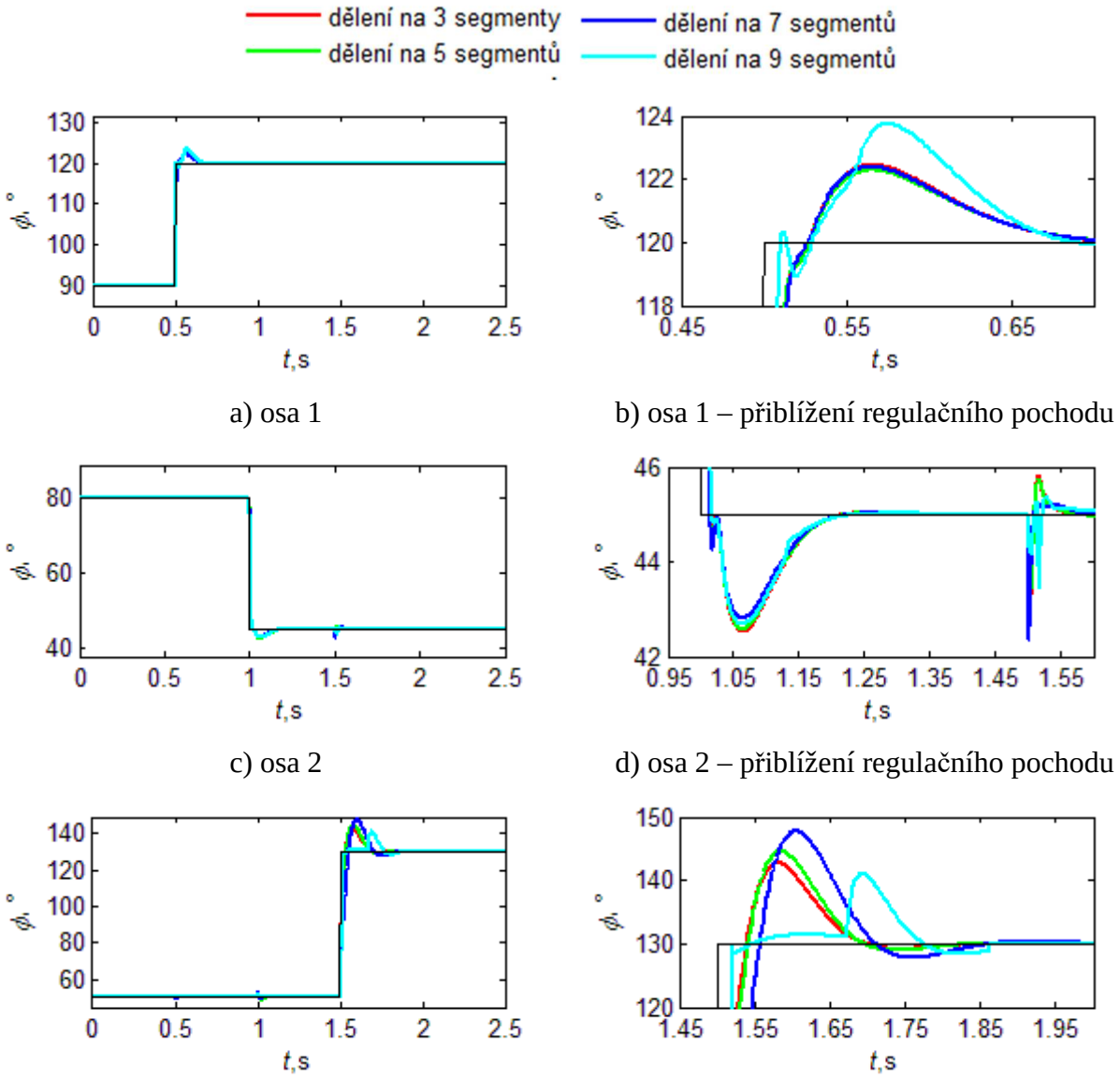
f) osa 3 – přiblížení regulačního pochodu

Obr. 3.9 – Porovnání návrhů řízení

Vliv segmentace a následného nastavení parametrů PID regulátorů podle modelu robota v jednotlivých segmentech má vliv na kvalitu řízení. Částečně se podařilo vylepšit řízení modelu robota. Největšího zlepšení je vidět na ose 1, kde má porucha nejmenší vliv na řízení. Na obrázcích je v legendě pět průběhů, ale na některých obrázcích jsou vidět jen čtyři. To je způsobeno tím, že se některé průběhy překrývají a z tohoto přiblížení nejsou průběhy dostatečně vidět.

3.2.3 Vliv počtu segmentů na kvalitu regulačního pochodu

Návrh řízení dovoluje upravit počet segmentů, na který se dělí prostor kinematických veličin.



a) osa 1 b) osa 1 – přiblížení regulačního pochodu

c) osa 2 d) osa 2 – přiblížení regulačního pochodu

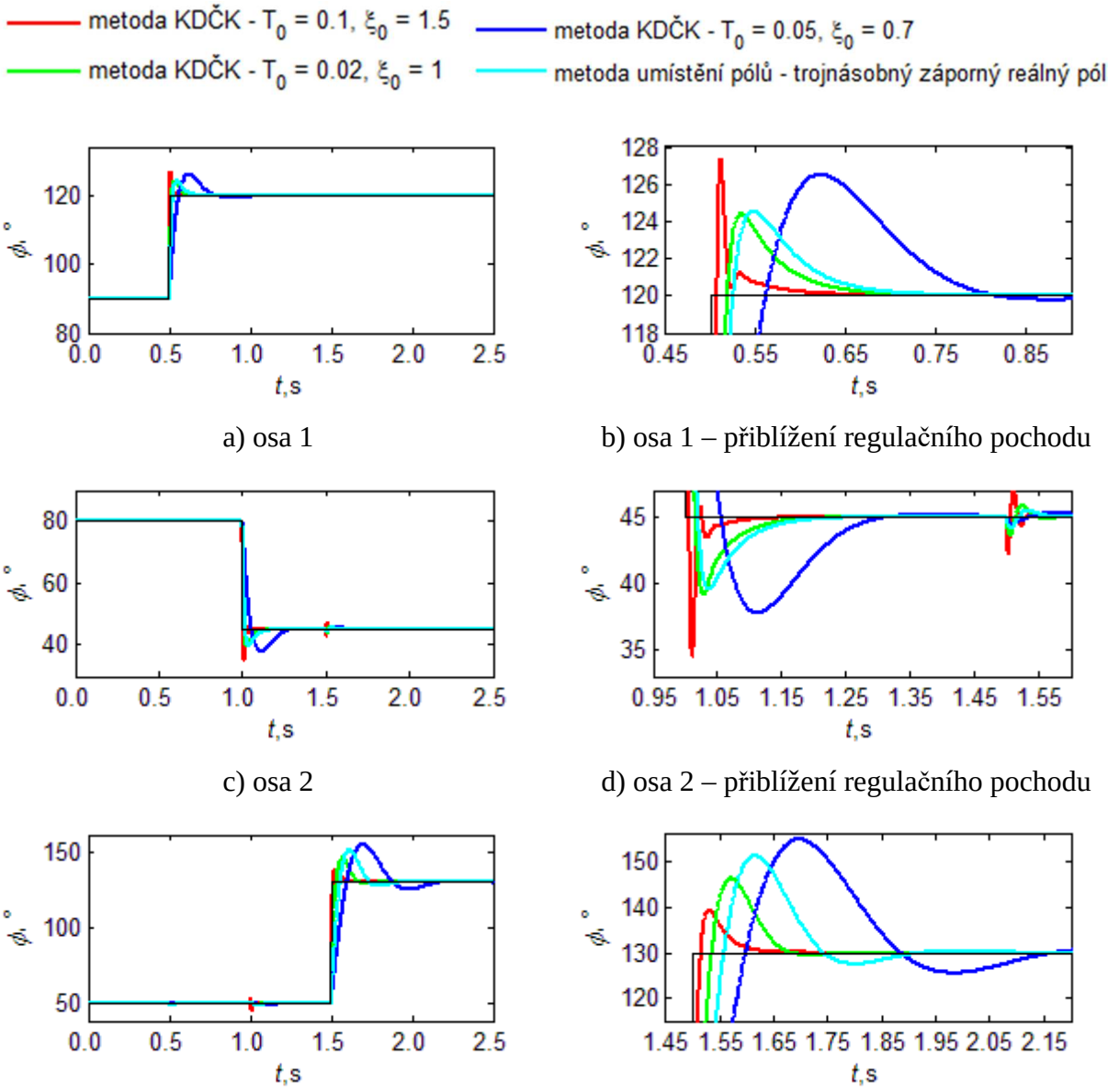
e) osa 3 f) osa 3 – přiblížení regulačního pochodu

Obr. 3.10 – Vliv počtu segmentů na kvalitu regulačního pochodu

Zvýšením počtu segmentů se kvalita řízení výrazně nezlepšuje. Na obrázcích jsou v legendě čtyři průběhy, ale na některých obrázcích nejsou vidět. To je způsobeno tím, že se některé průběhy překrývají a z tohoto přiblížení nejsou průběhy dostatečně vidět

3.2.4 Porovnání metod nastavení parametrů PID regulátorů

Na následujícím obrázku jsou porovnány metody kompenzace dominantní časové konstanty s různými parametry a metoda umístění pólů.



a) osa 1

b) osa 1 – přiblížení regulačního pochodu

c) osa 2

d) osa 2 – přiblížení regulačního pochodu

e) osa 3

f) osa 3 – přiblížení regulačního pochodu

Obr. 3.11 – Porovnání metod nastavení parametrů PID regulátoru

Porovnáním metod na Obr 3.11 je vidět, že vhodným nastavením parametrů PID regulátorů lze dosáhnout různých regulačních pochodů. Volbou parametrů lze ovlivnit rychlost ustálení regulačního pochodu a velikost překmitu.

ZÁVĚR

Cílem této práce je navržení systému decentralizovaného řízení manipulátoru pomocí regulátorů PID. Prostor kinematických veličin se rozdělil na menší segmenty. V těchto segmentech se provedla identifikace modelu a nastavení parametrů regulátorů dle zvoleného návrhu řízení. Po porovnání výsledků regulace je zřejmé, že došlo k částečnému zlepšení regulačních pochodů oproti konstantním parametrům regulátorů v celém rozsahu kinematických veličin.

Kvalitu řízení lze částečně ovlivnit zvoleným počtem segmentů nebo použitím jiného modelu. V práci je uvedeno nastavení parametrů PID regulátorů, které vychází ze všech naměřených dat. Tato metoda má tu nevýhodu, že se musí uchovávat velké množství dat.

Úkolem tak bylo vytvořit jednoduchý návrh řízení, který by se dal dále použít na skutečném modelu. Proto byla také v práci použita tzv. průběžná metoda nejmenších čtverců, která si nemusí pro výpočet parametrů pamatovat všechna data, ale pouze matici 3×3, která je v každém okamžiku vzorkování upravena podle nových dat. Výhoda této metody je menší paměťová náročnost a také přizpůsobení parametrů regulátorů během chodu regulace.

Při řešení této úlohy byl největším problémem čas simulace. Model obsahuje algebraickou smyčku (počítání poruchy ***d***). Výpočet poruchy dělal velký problém, Museli se měnit parametry simulace, časy kroků a tolerance výpočtů, než vše proběhlo tak, jak mělo. Např. simulace regulace při velkých maticích tlumení se zadanou dobou simulace 2,5 vteřiny trvala i několik desítek vteřin. Při řízení reálného modelu robota by tento problém odpadl, protože by se nemusela počítat porucha (součást modelu).

Aby se model přiblížil více realitě, bylo by vhodné model doplnit o omezení vstupní veličiny do soustavy, tedy výstup regulátoru.

LITERATURA

ABB, 2016. ABB Robots. *Used-robots.com* [online]. [cit. 2016-04-06]. Dostupné z: https://www.used-robots.com/abb.

BURÝ, Alois. 2007. Teorie systémů a řízení. VŠB - Technická Univerzita Ostrava. [online]. [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~bur50/tar07.pdf

CVEJN, Jan. 2015. *Průmyslové roboty – učební text*. [offline]. [cit. 2016-05-15].

CVEJN, Jan. 2016. *Průběžná varianta metodou identifikace nejmenších čtverců*. [elektronická pošta]. Message to: st36212@student.upce.cz. 10. 3. 16:22 [cit. 2016-05-03]. Osobní komunikace.

ČAPEK, Karel. 2013. *R.U.R.: Rossum's Universal Robots : kolektivní drama o vstupní komedii a třech dějstvích*. Praha: Dobrovský, 2013, 123 s. Omega (Dobrovský). ISBN 978-80-7390-062-5.

ČERNOHORSKÝ, Josef. 2012. Základy robotiky – pohony a věci s tím související. *Reflexe požadavků průmyslu na výuku v oblasti automatického řízení a měření.* [online]. [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: www.fm.tul.cz/esf0247/index.php?download=346

DOČKAL, Lubomír. 2013. *Zvláštní typy převodů a převodovek* [online]. Vsetín,[cit. 2016-03-12]. Dostupné z: http://www.spssvsetin.cz/index_htm_files/dumy/14/VY_32_INOVACE_14_16.pdf

DOLEČEK, Petr. 2012. Krokový motor - princip. *MyLMS* [online].[cit. 2016-02-16]. Dostupné z: http://www.mylms.cz/text-krokovy-motor-princip/

DUŠEK, František. 2014. *Teorie řídicích systémů – přednášky*. [offline]. [cit. 2016-05-18].

FALC, Petr. 2005. Rotační inkrementální snímač polohy. *Automa.cz.* [online]. [cit 2016-04-26]. Dostupné z: http://automa.cz/index.php?id_document=30393

FEI-KE. 2016. Stejnosměrné stroje: motory. In: *Katedra elektroniky* [online]. Ostrava [cit. 2016-02-16]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat430/old/Studium/Materialy/VS/kap22.pdf

GLENN, Simon. 2015. Classical Model of Rigid Rotor. *Slideplayer.com*. [online]. [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: http://slideplayer.com/slide/5282899/

CHURÝ, Lukáš. ŽÁK Martin. 2006. Robotika II.: Průmysloví roboti - základní pojmy. *Programujte.com* [online]. [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: http://programujte.com/clanek/2006032007-robotika-ii/

KAULER, Jan. 2016. Materiály k 1. přednášce: Kinematická dvojice, Třídy a rozdělení kinematických dvojic, Kinematické řetězce, Kinematické řetězce. *Robotika v lékařství.* [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: https://www.fbmi.cvut.cz/files/predmety/374/public/Prednaska_1.pdf

KOHOUT, Luděk. 2008. Teorie automatického řízení. *Teorie automatického řízení*. [online]. [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: http://www.edumat.cz/texty/teorie_rizeni.pdf

KUO, Yong-Lin; Liu, Shin-Min. 2015. Position Control f a seriál Manipulator Using Luzzy-PID Controllers. *auSMT.org.* [online]. [cit. 2016-05-18]. ISSN: 2223-9766. Dostupné z: http://www.ausmt.org/index.php/AUSMT/article/view/832/368

MATHWORKS, 2010. Pidtune. *Documentation*. [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: http://www.mathworks.com/help/control/ref/pidtune.html?

MODRLÁK, Osvald. 2002. Z-TRANSFORMACE. *Teorie automatického řízení II.* [online]. [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: http://matlab.fei.tuke.sk/raui/doc/z_transf_M_w.pdf

MRÁZ, Petr. 2008. Průmyslové roboty v praxi [online]. [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12135-VSZ/download/obor_stud/VSZ_-_2351054/VSZ_-_Aplikace_Robotu.pdf

PROKOP, Roman; MATUŠŮ, Radek; PROKOPOVÁ, Zdenka. 2006. *Teorie automatického řízení – lineární spojité dynamické systémy*. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2006. ISBN 80-7318-369-2.

SICILIANO, Bruno; SCIAVICCO, Lorenzo; VILLANI, Luigi; ORIOLO, Giuseppe. 2009. *Robotics – Modelling, Planning and Control*. [online]. London: Springer. [cit. 2016-05-18]. ISBN 978-1-84628-641-4. Dostupné z: https://drive.google.com/open?id=0B_3LThyJViUMWGpiSjBRUGZhODQ

SPONG, Mark; HUTCHINSON,. Seth.; VIDYASAGAR, Mathukumalli. 2006. *Robot modeling and control*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, c2006. ISBN 9780471649908. [online].[cit. 2016-03-12]. Dostupné z: http://www.fit.hcmup.edu.vn/~hungnv/teaching/Robotics/0471649902_-_Robot_Modeling_and_Control.pdf

ŠULC, Bohumil; VÍTEČKOVÁ, Miluše. 2006. Teorie automatického řízení I. *Teorie automatického řízení.* [online]. [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: http://tar.fs.cvut.cz/tar2/tar2.php

ŠVARC, Ivan. 2003. *Teorie automatického řízení*. [online]. [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: http://www.fsiforum.cz/upload/soubory/knihy/Automatizace/Teorie.automatickeho.rizeni_Svarc_2003.pdf

ŠVÉDA, Jiří; SMOLÍK, Jan. 2009. *Nové kinematické struktury strojů*. [online]. [cit. 2016-03-12]. Dostupné z: http://www.czspos.cz/akce/20100225.emo2009/11_nove_kinematicke_struktury_stroju.pdf

TITUS, Jon. 2009. Brushless DC Motors Roll On. *Ecnmag.com* [online]. [cit. 2016-02-16]. Dostupné z: http://www.ecnmag.com/article/2009/09/brushless-dc-motors-roll

TYSON, Mark. 2013. Robotics 101. *ABB* [online]. [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: http://www02.abb.com/global/zaabb/zaabb011.nsf/bf177942f19f4a98c1257148003b7a0a/0f55ae5d8012b4a6c1257b7200358d2e/$file/dmro+1+-+introduction+to+robotics.pdf

VACHALA, Břetislav. 2004. *Dějiny a současnost: Kulturně historická revue*. Praha: Nakladatelství lidové noviny, 2009, 31(3), 25-27.

VAUGHN, Richard. 2013. The difference between Cartesian, Six-Axis, and SCARA Robots. *Machine design*. [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: http://machinedesign.com/motion-control/difference-between-cartesian-six-axis-and-scara-robots

VÍTEČKOVÁ, Miluše. 2006. Výtah ze slovníku L- a Z- transformací. *Matematické metody používané v oblasti automatizace a řízení*.[online]. [cit. 2016-04-27]. Dostupné z: http://books.fs.vsb.cz/MatMet/Kapitoly/Kap21.htm

VOJÁČEK, Antonín. 2015. Princip laserových snímačů vzdálenosti s triangulačním principem měření. *Automatizace.HW.cz*. [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/princip-funkce-laserovych-snimacu-vzdalenosti-s-triangulacnim-principem-mereni.html

Seznam příloh

A – CD

Příloha A

Příloha k diplomové práci

Návrh systému decentralizovaného řízení manipulátoru antropomorfního typu pomocí regulátoru typu PID

Bc. Jiří Tvrdík

CD

Obsah

1 Text diplomové práce

TvrdikJ_NavrhSystemu_JC_2016.docx

TvrdikJ_NavrhSystemu_JC_2016.pdf

2 Úplný zdrojový kód aplikace

Rizeni.zip