



### **Posudek na dizertační práci “Plánování pohybu podél specifikované cesty s uvažováním všech pohybových omezení“ (Ing. Lukáš Bláha)**

Předložená dizertační práce pojednává o plánování a řízení pohybu robotických soustav. Klasické problémy plánování trajektorie při daných geometrických a dynamických omezeních jsou řešeny novými algoritmy založenými na teorii Groebnerových bází. Tyto výpočetní procedury představují hlavní originální výsledky práce.

Zvolené téma práce je bezesporu velmi aktuální a zajímá vědeckou komunitu našeho oboru. To autor dokládá citacemi a referencemi na mnoho významných publikací z poslední doby. Metody zpracování dizertační práce hodnotím jako adekvátní a dobře zvolené, vedoucí k výsledkům významným pro daný obor. Když místo stávajících empirických metod lze pro řešení problému využít nově vyvinuté metody exaktní a analytické, je to evidentní přínos a posunutí našeho chápání dané problematiky.

Co se formální stránky týče, práce je dobře členěna, je dobře srozumitelná a “čtivá“. Je psaná v českém jazyce, s malým množstvím překlepů, nepřesností a gramatických neobratností, viz seznam níže.

Publikační činnost studenta: Dva příspěvky na prestižních akcích (IFAC WC, IEEE AUV). Tři příspěvky na lokálních akcích (PC Štrbské Pleso a Jeseníky, studentská konference v Plzni). Applied Mechanics and Materials, Solid State Phenomena, Mechatronic Systems and Materials – není mi jasné, o jaký typ publikace jde. Celkově jde podle mě o přiměřený objem a kvalitu prezentovaných prací. Na druhou stranu, pokud mezi pracemi není žádný ani třeba podmíněně přijatý článek do významného impaktovaného časopisu, je to myslím škoda – dosaženým technickým výsledkům by to podle mého názoru více odpovídalo.

#### **Připomínky k práci:**

- rozbor třetí úrovně (tj. regulace) v úvodním textu: zbytečně jsou zdůrazňována jen a pouze čistě zpětnovazební řešení, přímovazební principy mají také myslím co nabídnout
- kapitola 1.1.3 - nezmínit MPC v kontextu optimálních metod návrhu řízení s omezeními je myslím chyba
- strana 34 - nazývat vztah 2.9 lineární kombinací polynomů je podle mě nesprávné a matoucí, když "koeficienty" této "lineární" kombinace jsou rovněž polynomy (tedy nikoliv čísla, resp. prvky tělesa)
- algoritmus GAVS zmiňovaný několikrát na straně 128 není myslím předtím v textu explicitně a zřetelně zaveden (byť je asi celkem zřejmé, že jde o verzi GBVS pro dva integrátory, bez uvažování omezení na jerk - je to tak?)



**Dotazy na uchazeče:**

Strana 68, sekce 3.2.2 Vysvětlete. V čem přesně je problém s uvažováním obecného koncového bodu  $[x_f1, x_f2]$  místo počátku  $[0,0]$ ? Nejde o jednoduchou lineární transformaci souřadnic? V čem je problém? Jak je sekce 3.2.2 v souladu s poznámkou 6 pod čarou na straně 71?

Strana 69 - odkaz [26] - vysvětlete (jde mi o větu "Jako příklad je uváděn vliv nespojitosti zrychlení... a stabilitu stroje")

Proč se podmínky na zrychlení-brzdění v rovnicích 3.9 a 3.20 liší? Správné mi připadá 3.20.

Zhodnoťte využitelnost metod MPC, a zvláště on-line variant jako explicitní MPC, pro řešitelnost t-optimalního řízení uvažovaného ve Vaší práci. Třeba pro příklad na straně 88. Jaké vidíte výhody a nevýhody?

**Překlepy, neobratnosti, drobné chyby:**

- "typickým příkladem je přistání sondy Curiosity na Mars"
- strana 21 dole - řídicí => řídicí
- strana 22 ... pojem singularita není vysvětlen
- strana 24 ... "takzvaně striktně konvexní množina" ... co to je prosím za „definici“
- strana 27 - "syzigies" - nevysvětleno
- strana 28 nahoře: co je  $k[x_1, x_2, \dots]$  ... není vysvětleno
- strana 29 - pojem Jerk je hrubě nahozen, vůbec nevysvětlen ...
- strana 34 - proč Hilbert's basis? anglicky ... podobně nadpis 2.4.4. Dickson's lemma ... podobně strana 64 (Problém 3.1 optimal control)
- strana 38, příklad - chybí závorky u  $(x^2 - y^3)$
- strana 38, definice 2.10 - pojem  $\text{in}(I)$  není zaveden
- strana 130 - části sledoval Y

Závěrem mohu tedy s potěšením konstatovat, že předložený text z mého pohledu splňuje požadavky kladené na dizertační práci a doporučuji ji k obhajobě.

V Praze dne 23.11.2014.

Doc. Ing. Martin Hromčík, PhD.  
katedra řídicí techniky  
Fakulta elektrotechnická  
ČVUT v Praze

Doc. Ing. Mgr. Václav Záda, CSc.  
Technická univerzita v Liberci  
Fakulta mechatroniky –MTI  
Studentská 2, 461 17 LIBEREC  
e-mail: [vaclav.zada@tul.cz](mailto:vaclav.zada@tul.cz)  
tel. 485 353 289, 734 396 921

## **Oponentní posudek disertační práce**

Autor : **ing. Lukáš BLÁHA**

Téma : **PLÁNOVÁNÍ POHYBU PODÉL SPECIFIKOVANÉ CESTY  
S UVAŽOVÁNÍM VŠECH POHYBOVÝCH OMEZENÍ**

Oponentský posudek je vypracován na základě dopisu Doc. RNDr. Miroslava Lavičky, Ph.D., děkana Fakulty aplikovaných věd, Západočeské univerzity v Plzni, ze dne 20. října 2014 a dodané disertační práce.

### **Přehledové hodnocení disertace**

Předložená disertační práce pana Ing. Lukáše Bláhy má celkem 190 stran. Z toho vlastní text je uveden na 160 stránkách, dále následují dodatky, použitá literatura se 113 publikačními zdroji a seznam 8 publikovaných a 15 nepublikovaných prací autora.

Disertační práce se zabývá problematikou plánování pohybu podél předem zvolené cesty mechatronických systémů, zejména s aplikacemi v robotice. Omezení na rychlosti a zrychlení jsou respektována. Práce obsahuje některé původní přístupy a pravděpodobně vlastní zkušenosti autora s používáním navrhovaných metod při řešení konkrétních úloh. Zvolené téma je aktuální.

Práce je rozdělena do čtyř kapitol. V úvodním shrnutí autor uvádí některé skutečnosti, které jej pravděpodobně vedly k zvolenému tématu disertace. Po nutném abstraktu a obsahu následuje rozsáhlý úvod do problematiky v podobě první kapitoly. Druhá kapitola představuje v podstatě další, rozšířený, úvod do problematiky s využitím Gröbnerovy báze. V třetí kapitole je diskutována problematika nejčastěji aplikovaného způsobu optimálního řízení, jde o řízení s minimalizací spotřeby času, tzv. t-optimální řízení. Tato problematika byla studována již od druhé poloviny 20. století, proto měl uchazeč k dispozici nepřehledné množství literatury, včetně aplikací v robotice. Za podstatnou část práce lze chápat kapitolu 4., kde se aplikují výsledky popsané v kapitole 3.

## Připomínky k disertační práci

Způsob zpracování působí na čtenáře vcelku dobře. Práce je dostatečně srozumitelná a přehledná. Gramatických nedostatků je v práci málo. Je škoda, že bylo kladeno tolik důrazu na kapitolu 3. (více jak 60 stran), zatím co kapitola 4. se jeví velmi krátká (méně než 30 stran). Poněvadž se disertační práce hlásí k nelineárnímu řízení, bylo by dobře, kdyby zvolené metody byly verifikovány zejména na robotech s více stupni volnosti. Roboty představují výrazně nelineární systémy a lze na nich velmi dobře demonstrovat úspěšnost, či nespěšnost, složitých algoritmů.

Přejdeme ke konkrétním připomínkám:

Na stránkách 28-9 jsou formulovány dva cíle práce. Z nich 1., cituji „seznámit se s relativně novou teorií ...“, nelze chápat jako cíl. Je vždy osobní záležitost každého řešitele seznámit se s nějakou teorií, kterou používá ve své práci. **Skutečný cíl práce** lze tedy spatřovat výhradně v tzv. druhém cíli na str. 29. , viz 4. ř. shora. Na téže stránce je potom definován hlavní výsledek práce.

Vybrané chyby:

- Str. 23, první vzorec v (1.5) je chybný.
- Obr. 1.3, není uvedena hodnota  $l_{1,max}$ ,  $l_{2,max}$ , ani které křivky (červené, modré) se k nim vztahují. Čtenář si to musí vyvozovat sám. Podobně i u některých dalších obrázků.
- Str. 32, definice 2.2 – byla by vhodná definice okruhu polynomů  $k[x_1, \dots, x_n]$ .
- Str. 32, označení (2.4) neodpovídá zavedenému označení (2.3). Varietou v definici 2.4 se rozumí množinu všech řešení, viz (2.3), společných několika polynomům, ale pak ji

- v (2.4) autor vymezuje dvojici křivek (ani není řečeno, že jsou anulovány). Chtělo by to jiné označení, např. V s vlnovkou apod.
- Str. 35<sup>8</sup>, viz Poznámka. Má být „...polynomy této množiny se anulují na varietě V“, nikoli „zaniknou“.
  - Str. 36, bylo velmi vhodné uvést obecnou definici uspořádání, než se přejde k speciálním typům, užívaným v práci.
  - Str. 131<sup>2</sup>, na místo „... jeho pohyblivé části sledovali“ má být „sledovaly“. Další jazykové nedostatky nevypisuji, je jich málo.
  - Str. 133, rovnice robota (4.1) je uvedena bez třecích sil.
  - Str. 133, vztah (4.7), výraz s 2. derivací představuje tzv. multi-indexovou matici. Ty se dnes prakticky nepoužívají. Běžně se užívají tenzorové zápisy ve složkovém tvaru. Nicméně uvedený vztah by měl být detailně rozepsán. Podobně i další vztahy na následujících stránkách.
  - Str. 134<sup>3</sup>, má být „zrychlení“ namísto „zrychleních“.
  - Str. 134, vztah (4.11), matice  $\partial r/\partial q$  může být i singulární. Podobně vztahy (4.12) atd.

## Hlavní nedostatky práce

- str. 138, vztah (4.47) je zcela nesprávný. Vztah nalevo od implikace v (4.47), je též popsán v (4.46), má být minimalizován. Jeho inverzí a následnou maximalizací však nedostaneme vztah napravo od implikace v (4.47). Nestačí totiž v (4.46) změnit integrand na inverzní a domnívat se, že dostaneme inverzní kritérium. Přesně tedy

$$\min \int_0^{t_f} 1 dt = \min \int_{s_0}^{s_f} \frac{1}{\dot{s}} ds \neq J^{-1}, \text{ kde } J = \max \int_{s_0}^{s_f} \dot{s} ds,$$

kde minimalizace i maximalizace se berou přes řízení  $u$ . V důsledku toho v celém dalším textu se počítá jiná úloha, než  $t$ -optimální řízení, které je deklarováno v průběhu celé práce.

- Disertační práce je demonstrována na velmi jednoduchých příkladech. Nejsložitější úloha se nachází v podkapitole 4.4 od str. 150 dále. Avšak i tato úloha je zvolena velmi jednoduchá. Reálné roboty mají zpravidla 6 stupňů volnosti a jsou výrazně nelineární. Zjednodušení na 2 stupně volnosti se tak jeví jako zcela nedostatečné pro aplikace. Dalším faktem je, že odvození, viz vztah (4.74) je chybné. Pisatel si špatně vyložil větu o kinetické energii obecného pohybu pro 2. člen, viz obr. 4.15. Tato chyba se pak přirozeně táhne dál v řešení uvedené úlohy.

## Otázky k obhajobě:

- V části 4.4 od str. 150 je řešen případ téměř nejjednoduššího možného manipulátoru. Otázka: Byly provedeny, resp. lze provést v přiměřeném čase, výpočty i pro složitější případy? Lze reálně odhadnout, jak dlouho by probíhal výpočet pro robot se třemi až šesti rotačními členy?
- Jak se změní výpočty od podkapitoly 4.2, použijeme-li správné časové kritérium pro optimalizaci?
- Jaký je význam kritéria  $J = \max_{s_0} \int_{s_0}^{s_f} \dot{s} ds$ , které bylo ve skutečnosti použito?

## Souhrn odpovědí na podstatné otázky kladené na disertaci

### a) zhodnocení významu DP

Význam disertační práce je přiměřený, tj. ani významný, ani podprůměrný.

### b) vyjádření k postupu a použitým metodám

Z algebraické geometrie jsou použity vybrané části. Souhrn vět a definic v prvních dvou kapitolám mohl být kratší. Autor z těchto kapitol dále využívá pouze část. Navíc vše je demonstrováno na jednoduchých úlohách. Vlastní přístup autora k řešení není špatný, ale je třeba jej dotáhnout do konce jak na teoretické, tak i aplikační bázi. Z hlediska teoretického se vyžaduje vyslovení a dokázání teoretických závěrů se závažnými důsledky. Z hlediska praktického se vyžaduje aplikace soustavy algoritmů na složitých praktických úlohách, včetně jejich verifikace výhodnosti či nevýhodnosti.

### c) stanovisko k výsledkům a k původnímu přínosu

V souvislosti k již dříve vysloveným hlavním nedostatkům autor své výsledky zbytečně poškodil. Původní přínos DP sice existuje, ale je sporadický.

- Z hlediska algebraické geometrie je přínos samozřejmě nulový.
- Z hlediska plánování trajektorie podél specifikované cesty jsou výsledky prokázány ne dosti přesvědčivě. Aplikace je třeba provádět na skutečně reálných mechatronických soustavách s dostatečnou mírou obtížnosti a obecnosti. Je třeba vždy uvádět dobu potřebnou k provedení výpočtu ve srovnání s časem potřebným na provedení daného

pohybu. Pokud se týká teoretického přínosu, zde bych viděl přínos skutečně malý. Obdobné inženýrské metody lze snadno nalézt v řadě publikací po celém světě.

#### **d) systematicčnost, přehlednost apod.**

Práce je dostatečně přehledná, systematicčnost nepostrádá. Autor měl ovšem mnohem více péče věnovat zejména kapitole 4., zatím co kapitoly 1 až 3 mohly být přiměřeně redukovány.

#### **e) Publikace**

Celkový počet publikací autora je osm. Domnívám se, že tento počet je více než postačující. Úroveň těchto publikací jsem nestudoval, zaměřil jsem se výhradně na DP v souladu s „Pokyny pro vypracování oponentního posudku“. Navíc se domnívám, že hlavní věcí při získávání hodnosti Ph.D. by měla být vlastní DP, zatím co publikace by měly být až na místě druhém.

### **Závěrečné hodnocení**

Disertační práce pana Ing. Lukáše Bláhy je zpracována na přiměřené odborné úrovni. Pokud dokáže odstranit *Hlavní nedostatky práce* a dokáže odpovědět na otázky určené k obhajobě, **doporučuji**, v případě úspěšného průběhu obhajoby, uzavřít řízení návrhem na **jmenování doktorem** v příslušném oboru.

V Liberci 8. prosince 2014

  
Doc. Ing. Mgr. Václav Záda, CSc.





Vážený pán  
doc. RNDr. Miroslav Lávička, Ph.D.  
Dekan FAV  
Západočeská univerzita v Plzni  
Univerzitní 8  
306 14 Plzeň  
Česká republika

## Posudok na dizertačnú prácu Ing. Lukáša Bláhu

Predložená dizertačná práca Ing. Lukáša Bláhu k získaniu akademického titulu Doktor v oboru Kybernetika „Planovanie pohybu podél špecifikovanej cesty s uvažovaním všetkých pohybových omezení“ bola vypracovaná pod vedením školiteľa prof. M. Schlégl, CSc. na Katedre Kybernetiky Fakulty aplikovaných vied ZČU v Plzni. Text v rozsahu 190 strán je členený na abstrakt, štyri kapitoly, záver, zhrnutie, dve prílohy, literatúru a zoznam publikovaných i nepublikovaných prác autora.

### Zhodnotenie významu dizertačnej práce pre odbor

Práca sa sústredila na druhú úroveň plánovania pohybu pozdĺž definovanej geometrickej trasy, pričom si za cieľ stanovila plánovanie pohybu so striktným rešpektovaním všetkých pohybových obmedzení. Pri riešení vychádzala z rozboru časovej optimálnosti prechodových dejov integrátorov druhého a tretieho rádu. Takýto postup sa javí ako najjednoduchšie realizovateľné riešenie aj pri riadení sústav, ktorých dynamika je podstatne zložitejšia ako jednoduché reťazce integrátorov.

Ako čiastkové ciele si vytýčila v teoretickej oblasti algoritmizáciu riešených úloh pomocou Gröbnerových báz a v praktickej oblasti návrh generátora riadiacich trajektórií polohy, rýchlosti a zrýchlenia s rešpektovaním všetkých pohybových obmedzení vrátane obmedzenia na strmnosť zrýchlenia, možnosti napájania jednotlivých úsekov trajektórií, možnosti spojitého prechodu medzi ľubovoľnými stavmi uvažovaného trojrozmerného priestoru. Vyžadovala sa pritom nízka výpočtová náročnosť, nezávislosť od vzorkovacej frekvencie a optimalizácia zvolených kritérií kvality.

Hoci je stanovenie takýchto cieľov z hľadiska používateľa mechatronických systémov pochopiteľné, viaceré kroky tejto úlohy predstavujú dodnes objekty aktívneho vysoko špecializovaného výskumu celých kolektívov. Pretože doktorand sa v prvom priblížení neuspokojil s doterajším stavom riešenia jednotlivých problémov, výsledkom je práca so široko definovaným záberom, v rámci ktorého by sa našlo dostatok priestoru hneď pre niekoľko doktorandských prác. Široký záber prináša so sebou nevyhnutné problémy súvisiace s čitateľnosťou, presnosťou a jednoznačnosťou použitých symbolov, či zrozumiteľnosťou výkladu prác prevzatých z literatúry. A s tým aj riziká, že pri všetkej realizovanej šírke záberu by ešte autorovi bolo možné vytknúť, že sa v duchu vytýčených cieľom nezaoberal rešpektovaním všetkých pohybových obmedzení, keď sa napr. vyhol rozboru vplyvu nemodelovanej dynamiky a parazitných časových oneskorení, periódy vzorkovania, neurčitosti parametrov a externých a vnútorných porúch, či uvažovaniu vlastných

frekvencií používaných štruktúr. Tieto problémy sa síce zvyknú riešiť na inej úrovni riadenia, ale úzko súvisia aj s riešenými úlohami generovania trajektórií.

Týmito pripomienkami vôbec nechcem znižovať úroveň práce, ktorú s ohľadom na slovenské pomery pokladám za nadpriemernú, napísanú s minimom chýb a preklepov. Len chcem pripomenúť, že aj pri formuláciách cieľov platí zásada, že málo niekedy znamená viac.

V úvodnej kapitole sa doktorand venuje základným problémom plánovania a generovania pohybu mechatronických systémov pohybu v jednej ose, pozdĺž špecifikovanej trasy. Zadefinuje úlohu časovej optimálnosti riadenia a plánovania pohybu v obmedzenom stavovom priestore a ukáže na význam Gröbnerových báz pri riešení stanovených cieľov.

V druhej kapitole následne definuje základné pojmy z problematiky Gröbnerových báz ako polynóm, monóm, varieta, ideál, afinný priestor, afinné variety a ich parametrizácia. Následne uvádza problematiku usporiadania a redukcie polynómov viacerých premenných a zavádza pojem S-polynómov ako zovšeobecnenia Gaussovej eliminácie. Ukazuje, že výpočet Gröbnerových báz pomocou Buchbergerovho algoritmu možno interpretovať ako zovšeobecnenie metód riešenia lineárnych rovníc. Ukazuje na význam redukovaných Gröbnerových báz, zaoberá sa korektnosťou a konečnosťou použitých algoritmov, vlastnosťami Gröbnerových báz a nakoniec kapitoly uvádza rôzne zaujímavé možnosti ich využitia v algebrickej geometrii, kde Gröbnerova báza odhaľuje geometrické vlastnosti variety.

Základnou aplikáciou z hľadiska riešenej práce je časovo optimálne riadenie reťazca integrátorov pre účely generovania trajektórií. Práca ukazuje, že na všeobecné riešenie úlohy optimálneho riadenia je najskôr nutná transformácia súradníc, ktorou prevedieme cieľový stav do začiatku súradnicového systému. Riešenie takejto úlohy s ľubovoľnými súradnicami cieľového bodu je však nemožné. Riešiť takto vieme len prechod do ustáleného stavu. K ďalším v práci nespomenutým problémom patria pôsobiace poruchy a nemodelovaná dynamika systémov.

V ďalšom sa práca zaoberá riadením reťazcov dvoch a troch integrátorov so symetrickými, resp. nesymetrickými konštantnými obmedzeniami. Analyzujú sa vlastnosti základnej štruktúry časovo optimálneho generátora trajektórií označeného skratkou BAVS, pričom sa uvažujú obmedzenia vstupu, rýchlosti a zrýchlenia. Optimálne riadenie je vďaka viacerým obmedzeniam typu bang-zero-bang, keď sú intervaly s pôsobením medzných hodnôt vstupu oddelené intervalom s nulovým vstupom. Celkovo tak môže pri prechode z rovnovážneho do rovnovážneho stavu vystupovať až 7 intervalov, čo vedie na 8 rôznych typových priebehov. Po analýze možných typov riešení nasleduje odvodenie ich dynamiky pomocou Gröbnerových báz. Výstupom je algoritmus GBVAS.

V štvrtej kapitole sa rieši problém riadenia pohybu robota, ktoré vedie na riadenie reťazcov integrátorov s nelineárne premenlivými, prípadne aj nespojitými obmedzeniami. Sú navrhnuté tri postupy generovania trajektórií s rôznou štruktúrou obmedzení pre generátory druhého rádu. Pre generátory tretieho rádu sa len konštatuje možnosť využitia GBVAS v súčinnosti s vhodnou diskretizáciou riešenia, prípadne aplikovať numerické metódy.

Pretože sami pracujeme na riešení viacerých v práci spomínaných problémov, výsledky kolektívu prof. Schléglu i samotného doktoranda sme si všimli už skôr a vysoko oceňujeme najmä vysokú previazanosť ich teoretického výskumu a praxe. Ako som vyzdvihol už vyššie, prácu pokladám z hľadiska významu pre odbor za výnimočnú. Dnes sa nestretávame často s tým, aby doktorandi s prakticky orientovanou témou práce zároveň vyzdvihovali prednosti matematickej teórie riešenia daných problémov.

## **Vyjadrenie k postupu riešenia problému, použitým metódam a splneniu určeného cieľa**

Práca vychádza z dvoch podstatných zjednodušení:

- z uvažovania po úsekoch konštantných hodnôt akčnej veličiny (medzných a nulových), čo vytvára súvislosti s teóriou časovo optimálneho reléového riadenia;
- z využitia reťazcov integrátorov ako najjednoduchších možných modelov dynamických systémov.

Aj druhé zjednodušenie sa dnes využíva aj v mnohých iných oblastiach automatického riadenia (pozri napr. tzv. ultra-lokálne modely využívané k návrhu inteligentných PID regulátorov v prácach M. Fliessa a jeho kolektívu).

Doktorand ukázal, že dané zjednodušenia sú vhodné aj pre generovanie trajektórií. Návrh uľahčil a formalizoval s využitím matematického aparátu Gröbnerových báz a dotiahol ho až na úroveň používateľských programov vhodných pre praktické aplikácie, čím naplnil stanovené ciele práce.

## **Stanovisko k výsledkom dizertačnej práce a k pôvodnému konkrétnemu prínosu predkladateľa dizertačnej práce**

Za hlavný prínos práce pokladám rozvoj metodiky generovania trajektórií pohybových systémov s uvažovaním po úsekoch konštantných hodnôt akčnej veličiny na vstupe reťazcov integrátorov. Práca tak rozvíja teóriu časovo optimálneho reléového riadenia s inovatívnym uplatnením Gröbnerových báz. Z praktického hľadiska možno za prínos považovať samotné vypracované algoritmy.

## **Vyjadrenie k systematike, prehľadnosti, formálnej úprave a jazykovej úrovni dizertačnej práce**

Práca je napísaná prehľadne, zrozumiteľne a s minimom zistených chýb a preklepov. Ich zoznam je vcelku krátky:

Str.23: - chybný prvý riadok vo vzťahu (1.5),  
- chýbajúce bodky nad premennými vo vete nad ním  
- v obr.1.3 mali byť uvedené uvažované medzné hodnoty rýchlostí

Str.24: - netreba zabúdať, že časovo optimálne riadenie typu bang-bang sa obmedzuje len na systémy s plným relatívnym rádom. Toto neplatí pre systémy s nulovou dynamikou (relatívny rád je nižší ako celkový rád), keď treba aj fázu s pôsobiacim nulovým vstupom (zeroing input)

Str.66: - tretí vzťah zhora, nie je definované theta  
- štvrtý vzťah zhora, prvý riadok – vektor sa rovná derivácii skaláru?

Str.150: chýbajúce vyznačenia momentov v obr.4.15

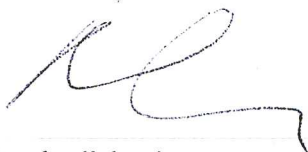
## **Vyjadrenie k publikáciám študenta**

Menovaný spĺňa a prekračuje kritériá na publikačnú činnosť kladené na doktorandov STU FEI Bratislava v oblasti automatizácie, či mechatroniky.

## Predloženú dizertačnú prácu odporúčam k obhajobe.

Bratislava, 2.3.2015

Prof. Ing. Mikuláš Huba, Ph.D.



Otázky do diskusie:

Pokiaľ pri generovaní trajektórií vychádzame z časovo optimálneho riadenia s uvažovaním medzných hodnôt akčnej veličiny, sledovanie vypočítaných trajektórií by bolo možné len za ideálnych podmienok. Ako píšete na str. 70, „časová optimalita je v prípade zpetnovazebného riadenia nebezpečnou vlastnosťou.“ Pôsobenie nezohľadnených porúch tu môže mať za následok, že plánovanú trajektóriu už nikdy nedosiahneme, s čím môžu súvisieť aj neželané efekty ako vznik preregulovania, predĺženie prechodových dejov atď. Ako sa v praxi možno vysporiadať s týmto problémom? Venovali ste sa aj optimálnemu riešeniu tohto kroku?

Za špeciálny prípad generovania trajektórií možno pokladať aj dynamické dopredné riadenie (dynamical feedforward control), pri ktorom sa primárnym regulačným obvodom pracujúcim s modelom systému generujú pre zvolený priebeh požadovanej veličiny zodpovedajúce priebehy akčnej a výstupnej veličiny, ktoré sú ďalej aktualizované sekundárnym regulačným obvodom so stabilizačným regulátorom a s korekciou rekonštruovaných porúch. Takéto riadenie môže byť zvlášť výhodné pri riadení sústav s dopravným oneskorením. Za hraničný príklad takéhoto riadenia možno považovať Smithov prediktor, pri ktorom odpadá stabilizujúci regulátor. Vedeli by ste zanedbané časové oneskorenia (nemodelovanú dynamiku) a pôsobenie priebežne identifikovaných porúch zohľadniť v rámci vašej koncepcie?

Klasické práce z oblasti časovo optimálneho riadenia ukázali, že akčná veličina striedavo prechádza z jednej medznej hodnoty na druhú (bang-bang control spomínané napr. na str. 24). Pri riadení nelineárnych systémov metódou exaktnej linearizácie sa zasa zaviedol pojem nulovej dynamiky, ktorá zodpovedá udržiavaniu výstupu na požadovanej úrovni pomocou tzv. nulovacieho vstupu. Prechodový dej zo všeobecného začiatočného stavu tu v prvej fáze smeruje k dosiahnutiu variety nulovej dynamiky a až potom k dosiahnutiu požadovaného stavu. Aké časovo optimálne prechodové deje možno očakávať pri riadení (nelineárnych) systémov s nulovou dynamikou (s relatívnym rádom nižším ako celkovým)? Pôjde opäť o bang-bang riadenie?

Doplňujúce komentáre:

Časovo optimálnym riadením systémov druhého a tretieho rádu sme sa s mojím školiteľom prof. Šalamonom zaoberali už v mojej kandidátskej práci Číslicový časovo optimálny regulátor s premenlivou štruktúrou (obhájenej v roku 1982, dostupná na Research Gate) a neskôr v početných zadaniach diplomových prác. Už vtedy sme si všimli výhodnosť zjednodušených modelov dynamických systémov vo forme reťazcov integrátorov pri riešení rôznych úloh automatického riadenia. V tom čase boli mnohé zásadné výsledky svetového výskumu z oblasti časovo optimálneho riadenia, či už reprezentovaného americkou, sovietskou, alebo anglickou školou, ďaleko bližšie. Pretože sme sa snažili o overovanie rôznych výsledkov riadením systémov v reálnom čase, k čomu sme už využívali číslicové počítače, jedným z hlavných problémov diskutovaných v odborných článkoch bola perióda vzorkovania, s ktorou sa riadenie realizuje. Preto sme paralelne rozvíjali spojité aj diskkrétne časovo optimálne procesy. Ak by som mohol už aj tak široký záber doktoranda rozšíriť svojimi pripomienkami, bolo by to upozornenie na práce R.E. Kálmana a C.A. Desoera z rokov 1957-1963 venované analýze oblastí dosiahnuteľnosti požadovaného stavu za  $n$  krokov riadenia pri obmedzenom vstupe a návrhu algoritmov diskkrétneho

časovo optimálneho riadenia. Nám sa podarilo upraviť ich prístupy pre potreby číslicového riadenia v duchu kritérií stanovených v práci doktoranda, k čomu možno získať prehľad napr. z práce

Huba, Mikuláš - Bisták, Pavol: Minimum Time PD-Controller Design for 2nd Order Plants. In: Selected Topics on Constrained and Nonlinear Control. STU Bratislava – NTNU Trondheim, 2011. - ISBN 978-80-968627-2-6. - S. 227-234.

Ďalšia poznámka by sa týkala možnosti paralelizácie riadenia systémov s viacerými obmedzeniami, kde Glattfelder a Schaufelberger navrhovali prepínaciu stratégiu „lowest wins“ vychádzajúcu z definovania priorít jednotlivých regulátorov počas prechodových dejov (napr. ak možno systém zrýchľovať, vyššiu prioritu má regulátor dodržiavajúci obmedzenie rýchlosti; ohľadne brzdienia má zasa vyššiu prioritu regulátor polohy). Takýmto spôsobom možno generovanie trajektórií pre riadenie s obmedzením stavu (resp. ekvivalentnej rýchlosti zmien vstupu) podstatne zjednodušiť, pozri napr.

Bisták, Pavol - Huba, Mikuláš: Constrained pole assignment control of a two tank system. In: Proceedings of the 15th International Carpathian Control Conference: ICC 2014; Velké Karlovice, Czech Republic, May 28-30, 2014.

Bisták, Pavol - Huba, Mikuláš: Model reference control of a two tank system. In: Proceedings of the 18th International Conference on System Theory, Control and Computing : Joint Conference SINTES 18, SACCS 14, SIMSIS 18. Sinaia, Romania, October 17-19, 2014. 2014. - ISBN 978-1-4799-3527-7. - S. 52-57

