

Oponentní posudek habilitační práce

Ing. Martina Gulana, PhD.

„Efficient Embedded Explicit Model Predictive Control via Convex Lifting“

Habilitační práce je zaměřena na perspektivní oblast prediktivního řízení, které na rozdíl od klasických postupů zpětnovazebního řízení, založených na reakci odpovídající regulační odchylce (u diskrétního řízení a polohového PSD regulátoru na celé historii hodnot odchylek v okamžicích vzorkování a u přírůstkového PSD regulátoru na třech posledních vzorcích odchylky), pracuje s predikčním horizontem.

Prediktivní řízení patří mezi partie teorie řízení s aplikacemi jak v technických úlohách, tak i v oblastech netechnických, např. ve finančnictví (odhad vývoje cen akcií a kurzů měn a z toho vyplývající strategie chování na finančním trhu).

I když se omezíme na aplikace technické, i zde najdeme značně odlišné úlohy, související s řízenými systémy. Příkladem je predikce odběru tepla, která vychází z meteorologických předpovědí, v tomto případě jde o systémy s pomalými změnami hodnot řízených veličin a navíc zatížené dopravním zpožděním při distribuci tepla, opakem jsou systémy s rychlou dynamikou, jejichž časové konstanty jsou v řádu milisekund. To v klasické strategii pohyblivého horizontu s sebou nese nutnost volit „velmi krátkou“ periodu vzorkování, a tím i velké nároky na odpovídající reakci prediktivního regulátoru v konfiguraci prediktor – optimalizátor.

Je zřejmé, že práce je netriviální, svými **nároky odpovídá požadavkům na habilitační práci, pro rozvoj oboru je velmi přínosná** a ve své komplexnosti má také pedagogickou hodnotu z hlediska metodiky řešení úloh dané aplikační oblasti.

V teoretickém úvodu autor charakterizuje modely prediktivního řízení (Model Predictive Control, MPC) a vymezuje: (1) *implicitní MPC*, kdy optimální řešení je získáno iterativní numerickou procedurou, a (2) *explicitní MPC*, využívající parametrické konvexní programování. A právě druhý přístup je nosným tématem habilitační práce.

Protože explicitní model prediktivního řízení má velké nároky na paměť a čas výpočtu, cílem bylo pomocí optimalizačních technik je snížit a umožnit implementaci v prostředí „levných“ vnořených (embedded) výpočetních platform.

Významným výsledkem práce je postup, jak inverzní parametrickou optimalizaci řešit rozkladem na části specifických vlastností a přitom snížit celkovou složitost výpočtu, aniž by se to negativně projeвило na stabilitě, kvalitě a optimalitě řízení.

Práce kromě teoretického návrhu metod prediktivního řízení a jejich implementace ověřuje jejich přínos a praktickou použitelnost v úloze aktivního tlumení vibrací.

Z formálního hlediska je habilitační práce koncipována formou 62stránkového teoretického rozboru prediktivního řízení, který následují nejvýznamnější publikace autora vztahující se ke zkoumané problematice. Podrobný přehled a rozbor souvisejících prací v tomto zaměření v 2. kapitole je velmi cenným zdrojem pro komplexní seznámení.

Stěžejními pojmy habilitační práce pro model prediktivního řízení jsou rozklad polyedru na disjunktní části a *konvexní po částech afinní zdvihnutí*, autorem zavedené na str. 21. V dalším pak autor využívá (mimo jiné) vlastností, že každý spojitý nelineární řídicí

system lze získat pomocí parametrického konvexního programování (pCP) a optimální řešení problému lineární a kvadratického programování je po částech afinní funkcí definovanou nad rozkladem polyedru vymezeného prostorem parametrů. Hlavním výsledkem přístupu založeného na inverzním konvexním parametrickém programování je snížení složitosti výpočtu v modelu prediktivního řízení.

Teoretický návrh algoritmu byl také implementován a prakticky ověřen v úloze aktivního tlumení vibrací, jak demonstrují grafické výstupy. Jako laboratorní mechanické zařízení pro tato ověření byl použit konzolový nosník. Jak autor uvádí, dynamické chování přípravku s piezokeramickými aktuátory lze zobecnit na třídu mechanických systémů, jako jsou rotory vrtulníků, robotické manipulátory a solárních panelů v prostředí mikrogravitace. K vlastnímu řízení byl využit mikrokontroler Atmel ATmega 328p vnořený do platformy Arduino. 8-bitový mikrokontroler byl taktován 16MHz externím krystalovým oscilátorem. Z dalších technických parametrů laboratorních experimentů je důležitá diskretizace se vzorkovací periodou 0,02 sec a predikční horizont 50 kroků, tj. 1 sec v časovém vyjádření.

V závěru autor poukazuje na skutečnost, že reálné systémy na rozdíl od laboratorního přípravku se většinou liší tím, že nemají konstantní fyzikální vlastnosti, a navrhuje syntézu implicitní a explicitní varianty řízení. V laboratorních podmínkách byly strukturální změny emulovány.

Zbývající část práce tvoří vybrané publikace autora, které se úzce váží k tématu habilitační práce. Vesměs jde o články v prestižních časopisech (*IEEE Transactions on Automatic Control*, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, *Mechatronics*), světovém kongresu *IFAC* a kapitoly v knize nakladatelství Springer. Ve většině z nich je habilitant prvním autorem.

Úvodní část předcházející tyto články byla však nadstandardně podrobná a řada výsledků z vědeckých článků se v ní již objevila. Vzhledem k početnějším autorským kolektivům se v nich objevily i některé další aspekty řízení a výsledky simulačních výpočtů. Přínos habilitanta je v nich však zcela zřejmý.

Práce vedle odborné náplně má také vysokou jazykovou a grafickou úroveň zpracování, jen výjimečně se objevují drobná přehlédnutí – např. na str. (i) ve slově „štandardnou“ chybí písmeno (má být „štandardnou“) a podobně v nadpisu sekce 1.2.2 na str. 4 místo „implemenation“ má být „implementation“, na str. 15 je přesmyčka „propsective“ – „prospective“.

Snad jen z formálního hlediska v definicích je zvykem kurzívou psát jen zaváděné pojmy, ne celé znění. V kurzívě se píše znění matematických vět (s výjimkou čísel, závorek, názvů funkcí a speciálních symbolů, pro něž se i zde používá normální styl).

Na str. 20 je uvedeno, že sekvenční prohledávání Algoritmem 3.1 vyžaduje v nejhorším případě počet operací v pohyblivé řádové čárce daný složitým sumačním vztahem. Obvyklé je tento počet vyjadřovat pomocí asymptotické časové složitost \mathcal{O} , která součtový tvar přesného počtu operací pro nejhorší případ redukuje na dominantní složku bez násobících konstant.

Dotazy na habilitanta:

1. V habilitační práci jsou navržené metody aplikovány na úlohu aktivního tlumení. Jsou tyto metody obecně použitelné i pro systému s „pomalou“ dynamikou?

2. V teoretickém rozboru zmiňujete přístupy založené na metodách z oblasti soft computing (genetické algoritmy a neuronové sítě) a využití geometrických struktur počítačové geometrie (Delaunayho triangulace). Můžete blíže vysvětlit, jak konkrétně jsou v oblasti prediktivního řízení implementovány (tj. jak je úloha v GA reprezentována, jak se volí její parametry, typ neuronové sítě) a kde se dá využít Delaunayho triangulace?
3. Jak výrazně se navrhovaná syntéza implicitní a explicitní varianty řízení u systémů s měnicími se fyzikálními vlastnostmi projeví na složitosti výpočtu a paměťových nárocích?
4. V jakých dalších úlohách byste prediktivní řízení vedle popsaného aktivního tlumení vibrací využil?

Závěr:

Z předložených materiálů lze konstatovat, že Ing. Martin Gulan, PhD. je autorem a spoluautorem významných vědeckých článků, publikovaných v prestižních časopisech a světových kongresech z oblasti teorie řízení. Autor v nich prokázal hluboké teoretické znalosti a tvůrčí schopnosti a rovněž schopnost využívat softwarové i hardwarové prostředky a aplikovat teoretické výsledky v řízení reálných modelů. Cenné je také to, že autor v zaměření habilitace nadále výzkumně pracuje a lze předpokládat, že dosavadní výsledky dále rozvine a případně zúročí při vedení studentů doktorského studia a jejich zapojení do vědecké práce.

Habilitační práce splňuje podmínky vyhlášky 6/2005 Ministerstva školství Slovenské republiky, a proto ji

doporučuji

k obhajobě před Vědeckou radou STU SjF v Bratislavě

V Brně dne 15. 1. 2019

Prof. RNDr. Ing. Miloš Šeda, Ph.D.
Ústav automatizace a informatiky
Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně