

Záverečná karta projektu

Názov projektu Evidenčné číslo projektu **APVV-14-0399**

Nelineárne riadenie s obmedzeniami a odhad stavu mechatronických systémov pre vnorené platformy riadenia

Zodpovedný riešiteľ **prof. Ing. Boris Rohal' - Ilkiv, CSc.**

Príjemca **Slovenská technická univerzita v Bratislave - Strojnícka fakulta**

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Strojnícka fakulta STU v Bratislave

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

Mimo štatútu spoluriešiteľskej organizácie: NTNU Trondheim a CentraleSupélec Paríž

Udelené patenty/podané patentové prihlášky, vynálezy alebo úžitkové vzory, ktoré sú výsledkami projektu

žiadne

Najvýznamnejšie publikácie (knihy, články, prednášky, správy a pod.) zhrňujúce výsledky projektu – uveďte aj publikácie prijaté do tlače

Kapitoly vo vedeckých monografiách vydané v zahraničných vydavateľstvách:

1. GULAN, Martin - NGUYEN, Ngoc Anh - OLARU, Sorin - RODRIGUEZ-AYERBE, Pedro - ROHAL'-ILKIV, Boris. Implications of inverse parametric optimization in model predictive control. In Developments in model-based optimization and control : distributed control and industrial applications. 1st. ed. Cham : Springer International Publishing, 2015, S. 49-70. ISBN 978-3-319-26685-5. V databáze: SCOPUS ; WOS.

Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch:

1. TAKÁCS, Gergely - BATISTA, Gabriel - GULAN, Martin - ROHAL'-ILKIV, Boris. Embedded explicit model predictive vibration control. In MECHATRONICS. Vol. 36, (2016), s. 54-62. ISSN 0957-4158. V databáze: WOS: 000379559900006 ; SCOPUS.

2. ABDOLLAHPOURI, Mohammad - TAKÁCS, Gergely - ROHAL'-ILKIV, Boris. Real-time moving horizon estimation for a vibrating active cantilever. In Mechanical Systems and Signal Processing. Vol. 86, (2017), s. 1-15. ISSN 0888-3270. V databáze: WOS ; CC.

3. GULAN, Martin - TAKÁCS, Gergely - NGUYEN, Ngoc Anh - OLARU, Sorin - RODRIGUEZ-AYERBE, Pedro - ROHAL'-ILKIV, Boris. Efficient Embedded Model Predictive

Vibration Control via Convex Lifting. In IEEE Transactions on Control Systems Technology. Vol. 27, iss. 1 (2019), s. 48-62. ISSN 1063-6536 (2017: 4.883 - IF, 1 - JCR Best Q, 1.832 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: CC: 000452618900005.

4. NGUYEN, Ngoc Anh - GULAN, Martin - OLARU, Sorin - RODRIGUEZ-AYERBE, Pedro. Convex lifting: theory and control applications. In IEEE Transactions on Automatic Control. Vol. 63, no. 5 (2018), s. 1243-1258. ISSN 0018-9286 (2017: 5.007 - IF, 1 - JCR Best Q, 3.433 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: CC ; WOS: 000430968300002.

5. ABDOLLAHPOURI, Mohammad - QUIRYNENC, Rien - HARING, Mark - JOHANSEN, Tor Arne - TAKÁCS, Gergely - DIEHL, Moritz - ROHAL'-ILKIV, Boris: A homotopy-based moving horizon estimation, In International Journal of Control, Vol. 92, Issue 7, Pages 1672-1681, 2019, ISSN: 0020-7179 (Print), 1366-5820 (Online), DOI: 10.1080/00207179.2017.1406150.

6. POLÓNI, Tomáš - KOLMANOVSKY, Ilya - ROHAL'-ILKIV, Boris. Simple Input Disturbance Observer-Based Control: Case Studies. In Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the ASME. Vol. 140, iss. 1 (2018), s. 14501-1 - 14501-8. ISSN 0022-0434 (2017: 1.521 - IF, 3 - JCR Best Q, 0.618 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: WOS: CCC:000415381200015 ; CC.

7. ABDOLLAHPOURI, Mohammad - BATISTA, Gabriel - TAKÁCS, Gergely - JOHANSEN, Tor Arne - ROHAL'-ILKIV, Boris. Adaptive vibration attenuation with globally convergent parameter estimation. In Mechanical Systems and Signal Processing. Vol. 114, iss. 1 (2019), s. 512-527. ISSN 0888-3270 (2017: 4.370 - IF, 1 - JCR Best Q, 1.805 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: CC: 000447112700029 ; WOS: 000447112700029.

Najvýznamnejšie príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách:

1. ABDOLLAHPOURI, Mohammad - HARING, Mark - JOHANSEN, Tor Arne - TAKÁCS, Gergely - ROHAL'-ILKIV, Boris. Nonlinear state and parameter estimation using discrete-time double Kalman filter. In IFAC-PapersOnLine. Vol. 50, 20th World congress on the International Federation of Automatic Control. Toulouse, France. July 9-14, 2017 (2017), s.12137-12143. ISSN 2405-8963. V databáze: SCOPUS ; WOS.

2. BATISTA, Gabriel - TAKÁCS, Gergely - ROHAL'-ILKIV, Boris. Application aspects of active-set quadratic programming in real-time embedded model predictive vibration control. In IFAC-PapersOnLine. Vol. 50, 20th World congress on the International Federation of Automatic Control. Toulouse, France. July 9-14, 2017 (2017), s.12130-12136. ISSN 2405-8963. V databáze: SCOPUS ; WOS.

3. GULAN, Martin - TAKÁCS, Gergely - NGUYEN, Ngoc Anh - OLARU, Sorin - RODRIGUEZ-AYERBE, Pedro - ROHAL'-ILKIV, Boris. Embedded linear model predictive control for 8-bit microcontrollers via convex lifting. In IFAC-PapersOnLine. Vol. 50, 20th World congress on the International Federation of Automatic Control. Toulouse, France. July 9-14, 2017 (2017), s. 11184-11191. ISSN 2405-8963. V databáze: SCOPUS ; WOS.

4. HONEK, Marek - GULAN, Martin - VLAD, Cristina - ROHAL'-ILKIV, Boris. Hybrid MPC for gasoline engine air-fuel ratio control using optimal PWA approximation. In IFAC-PapersOnLine. Vol. 50, 20th World congress on the International Federation of Automatic Control. Toulouse, France. July 9-14, 2017 (2017), s.2933-2940. ISSN 2405-8963. V databáze: SCOPUS.

5. ABDOLLAHPOURI, Mohammad - HARING, Mark - JOHANSEN, Tor Arne - TAKÁCS, Gergely - ROHAL'-ILKIV, Boris. Double moving horizon estimation: linearization by a nonlinear transformation. In European Control Conference 2018, June 12-15, 2018, Limasol, Cyprus. 1. vyd. [s.l.] : IEEE, 2018, S. 1148-1153. ISBN 978-3-9524-2699-9. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85059807926

6. MIKULÁŠ, Erik - TAKÁCS, Gergely - GULAN, Martin - ABDOLLAHOPOURI, Mohammad - ROHAL-ILKIV, Boris. Identification and modeling of a nonlinear vibrating beam for real-time control and estimation. In Proceedings of the 25th International Congress on Sound and Vibration. 1. vyd. Gliwice : Silesian University of Technology Press, 2018, S. 1-8. ISSN 2329-3675. ISBN 978-83-7880-552-6.

7. TAKÁCS, Gergely - GULAN, Martin - BAVLNA, Juraj - KÖPLINGER, Richard - KOVÁČ, Michal - MIKULÁŠ, Erik - SOHAIBULLAH, Zarghoon - SALÍNI, Richard. HeatShield: a low-cost didactic device for control education simulating 3D printer heater blocks. In EDUCON 2019 - IEEE Global Engineering Education Conference [elektronický zdroj] : conference proceedings. 1. vyd. Piscataway : IEEE, 2019, S. 385-394, CD ROM. ISBN 978-1-5386-9506-7.

8. TAKÁCS, Gergely - KONKOLY, Tibor - GULAN, Martin. OptoShield: A low-cost tool for control and mechatronics education. In ASCC 2019 : proceedings of the 12th Asian control conference. 1. vyd : JSME, 2019, S. 1001-1006. ISBN 978-4-88898-301-3.

Uplatnenie výsledkov projektu

Výsledky projektu sa uplatnia pri praktickom návrhu a tvorbe efektívnych algoritmov akcelerovaného prediktívneho riadenia zameraného na výkonové možnosti nízko nákladových vnorených mikropočítačových platforiem nasadzovaných dnes vo veľmi širokej oblasti najrôznejších mechatronických systémov, aparátov a zariadení. Výsledky sú metodicky formulované tak, aby pokryli celú úlohu návrhu optimálneho riadenia pre tieto systémy, či už s lineárnou, alebo nelineárnou dynamikou a časovou premenlivosťou, a to, buď na báze priamej (on-line) optimalizácie zvolenej kriteriálnej funkcie riadenia, alebo na báze explicitného, off-line získaného, riešenia tejto úlohy. Navrhnuté riešenia pritom plne rešpektujú zadané obmedzenia a limitácie na priebehy procesných (vstupných, stavových a výstupných) veličín uvažovaného mechatronického systému, vyplývajúce z požiadaviek zákazníka na optimálny, efektívny a bezpečný spôsob prevádzky systému a súčasne popritom zaručujú i dodržanie časovej dĺžky periódy vzorkovania, potrebnej pre danú aplikáciu. Navrhnuté metódy sú vybavené i výkonnými a efektívnymi schémami pre priebežný odhad stavu a parametrov systému s garantovanou konvergenciou, umožňujúcimi konštrukciu adaptívnych schém riadenia mechatronických systémov. Potencionálnou aplikačnou oblasťou pre dosiahnuté výsledky projektu sú najmä mechatronické systémy v aplikáciách na presné polohovacie a mikro-polohovacie systémy, robotiku, aktívne tlmenie vibrácií a diagnostiku stavu konštrukcií, asistenčné systémy v automobilovej technike, navigačné systémy autonómnych vozidiel a lietajúcich bezpilotných UAV aparátov.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v slovenskom jazyku (max. 20 riadkov)

Návrh nových metód a techník akcelerovaného prediktívneho riadenia vybavených odhadom stavu a parametrov, prednostne určených pre aplikáciu na vnorených nízkonákladových mikropočítačových platformách mechatronických systémov, pri rešpektovaní zadaných procesných, prevádzkových a ďalších obmedzení. K akcelerácii riešenia problémov nelineárneho prediktívneho riadenia bola navrhnutá a algoritmicky spracovaná metodika využívajúca techniku optimálnej aproximácie nelineárnej dynamiky riadeného mechatronického systému po častiach afinnou (PWA) funkciou. Za týmto účelom boli navrhnuté a overené účinné postupy pre ich identifikáciu vedúce k redukcii zložitosti problému, a tým i k urýchleniu riešenia samotnej úlohy nelineárneho prediktívneho riadenia. Pre vnorené aplikácie vedúce na vyššie rozsahy zložitosti, vyjadrené počtom potrebných regiónov v stavovom priestore, riešitelia pripravili a otestovali v rámci akcelerácie riešenia nové alternatívne schémy. Dominujúcim výstupom je návrh techniky tzv. bezregiónovej implementácie explicitného prediktívneho riadenia na báze aplikácie myšlienky konvexného zdvihnutia. Táto technika umožňuje výrazne redukovať počet optimalizovaných premenných ako aj veľkosť explicitného regulátora v uvažovaných úlohách. Ako ďalší výstup projektu bol rozpracovaný koncept interpolačného riadenia, ktorý predstavuje výpočtovo veľmi atraktívnu

alternatívu ku štandardnému prediktívnemu riadeniu s výrazne menšími výpočtovými nárokmi a s nižším počtom regiónov ukladaných v pamäti vnorenej jednotky. Na podporu priebežného odhadu stavu a parametrov mechatronických systémov s riadením cez vnorené platformy boli vyvinuté a úspešne implementované metódy jednostupňového i viacstupňového odhadu na báze metodiky pohyblivého horizontu (MHE) kombinovanej s technikou Kalmanovej, alebo rozšírenej Kalmanovej filtrácie.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v anglickom jazyku (max. 20 riadkov)

Design of new methods and techniques of an accelerated predictive control equipped with the state and parameters estimation, preferably intended for application to embedded low cost microcomputer platforms of the mechatronic systems, while respecting specified process, operational and other constraints. To accelerate the solution of nonlinear predictive control problems, a methodology based on the optimal approximation of nonlinear dynamics of the controlled mechatronic system by the piecewise affine (PWA) function was designed and algorithmically processed. To this end, effective procedures for their identification have been devised and validated to reduce the complexity of the problem and thereby accelerate the solution of the nonlinear predictive control problem itself. For embedded applications leading to higher complexity ranges, expressed by the number of regions needed in the state space, the researchers prepared and tested new alternative schemes as part of the solution acceleration. The dominant output is the design of the so-called region-free implementation of the explicit predictive control based on the idea of convex lifting. This technique enables to significantly reduce the number of optimized variables as well as the complexity of explicit controller in various applications. As a further output of the project, the concept of interpolation control has been elaborated, which is computationally very attractive alternative to the standard predictive control, with significantly smaller computational requirements and a lower number of regions stored in the embedded unit. Both single-stage and multi-stage estimation methods based on a moving horizon methodology (MHE) combined with Kalman or extended Kalman filtration techniques have been developed and successfully implemented to support the on-line state and parameter estimation of mechatronic systems controlled using embedded platforms.