



Záverečná karta projektu

Názov projektu

Evidenčné číslo projektu

APVV-18-0023

Efektívne metódy pre vnorené riadenie založené na optimalizácii

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: CentraleSupélec Paríž a TU Wien

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

Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch:

1. Marián Polóni, Andrej Chríbik: "Low-Energy Synthesis Gases from Waste as Energy Source for Internal Combustion Engine". SAE International Journal of Engines. Volume 13, Issue 5, pp. 1-16, 2020, Article ID: 03-13-05-0040, doi:10.4271/03-13-05-0040.
2. Peter Minarčík, Hynek Procházka, Martin Gulan: "Advanced supervision of smart buildings using a novel open-source control platform". Sensors. December 19, 2020, pages 1–22. ISSN/eISSN:1424-8220, www.mdpi.com/journal/sensors.
3. Peter Minarčík, Hynek Procházka, Martin Gulan: "A Data-Driven Identification Procedure for HVAC Processes with Laboratory and Real-World Validation". Processes 2022, 10, 83. <https://doi.org/10.3390/pr10010083>.
4. NOGA, Marek - JUHÁS, Martin - GULAN, Martin. Hybrid virtual commissioning of a robotic manipulator with machine vision using a single controller. In Sensors. Vol. 22, iss. 4 (2022), s. 1 - 17, art. no. 1621. ISSN 1424-8220. V databáze: CC: 000762680100001 ; WOS: 000762680100001 ; SCOPUS: 2-s2.0-85124870212.
5. CHRÍBIK, Andrej - POLÓNI, Marián - MAGDOLEN, Ľuboš - MINÁRIK, Matej. Medium-energy synthesis gases from waste as an energy source for an internal combustion engine. In Applied Sciences. Vol. 12, iss. 1 (2022), s. 1 - 22, art. no. 98. ISSN 2076-3417. V databáze: CC: 000741786000001 ; WOS: 000741786000001 ; SCOPUS: 2-s2.0-85121758464.
6. Rohal'-Ilkiv, B. Gulan, M. Minarčík, P.: Computationally Efficient Continuous-Time Model Predictive Control of a 2-DOF Helicopter via B-Spline Parameterization. Sensors 2023, vol.23, 4463. <https://doi.org/10.3390/>

Najvýznamnejšie príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách:

1. Boris Rohal-Ilkiv, Martin Gulán, Peter Minarcík: "Explicit spline-based continuous-time MPC: a study on design and performance". The 21st IFAC World Congress, July 12-17, 2020, Berlin, Germany. pp. 1-6.
2. Gergely Takács, Jakub Mihalík, Erik Mikuláš and Martin Gulán: "MagnetoShield: Prototype of a Low-Cost Magnetic Levitation Device for Control Education". The 2020 EDUCON IEEE Global Engineering Education Conference, April 27-30, 2020, Porto, Portugal. pp. 1-10.
3. Gergely Takács, Erik Mikuláš, Martin Vríčan, Martin Gulán: "Current-saving sampling for the embedded implementation of positive position feedback". e-conference: Inter-noise 2020, Seoul, Republic of Korea, 23-26.8.2020, pp. 1-6.
4. Martin Gulán, Ngoc Anh Nguyen, Gergely Takács: "Implications of Convex Lifting Based Inverse Parametric Optimization in Implicit Model Predictive Control: A Case Study". e-conference: 59th IEEE Conference on Decision and Control. Jeju Island, Republic of Korea, 14-18.12.2020, pp. 1-6.
5. TAKÁCS, Gergely - BOLDOCKÝ, Ján - MIKULÁŠ, Erik - KONKOLY, Tibor - GULÁN, Martin: MotoShield: Open Miniaturized DC Motor Hardware Prototype for Control Education. In Proceedings of the 2021 Frontiers in Education Conference, October 13-16, 2021, Lincoln, USA. pp. 1-10, ISBN: TBD.
6. TAKÁCS, Gergely - MIKULÁŠ, Erik - VARGOVÁ, Anna - KONKOLY, Tibor - ŠÍMA, Patrik - VADOVIČ, Lukáš - BÍRO, Matúš - MICHAL, Marko - ŠÍMOVEC, Matej - GULÁN, Martin. BOBShield: An Open-Source Miniature "Ball and Beam" Device for Control Engineering Education. In Proceedings of the IEEE Global Engineering Education Conference EDUCON 2021. 1. vyd. Piscataway: IEEE, 2021, S. 1155 - 1161. ISBN 978-1-7281-8479-1.
7. TAKÁCS, Gergely - VRÍČAN, Martin - MIKULÁŠ, Erik - GULÁN, Martin. An early hardware prototype of a miniature low-cost flexible link experiment. In Proceedings of the 27th International Congress on Sound and Vibration. Gliwice, Poland: Silesian University Press, 2021, S. 838 - 845. ISSN 2329-3675. ISBN 978-83-7880-799-5.
8. MINARČÍK, Peter - PROCHÁZKA, Hynek - GULÁN, Martin: "A Laboratory System for Educational and Research Purposes of HVAC Processes". The 22st IFAC World Congress, July 09-14, 2023, Yokohama, Japan. pp. 1-8.
9. TAKÁCS, Gergely - MIKULÁŠ, Erik - GULÁN, Martin - VARGOVÁ, Anna - BOLDOCKÝ, Ján: "AutomationShield: An Open-Source Software and Hardware Initiative for Control Engineering Education". The 22st IFAC World Congress, July 09-14, 2023, Yokohama, Japan. pp. 1-6.
10. VARGOVÁ, Anna - BOLDOCKÝ, Ján - TIBENSKÝ, Peter - MIKULÁŠ, Erik - GULÁN, Martin - TAKÁCS, Gergely: "AeroShield: An Open-Source Propeller-Driven Pendulum Device for Control Engineering Education". The 22st IFAC World Congress, July 09-14, 2023, Yokohama, Japan. pp. 1-6.
11. Minarcík, P., Prochazka, H., Gulán, M.: An Experimental Platform for Monitoring, Identification, and Control of HVAC Processes. Accepted for the 22nd IFAC World Congress 2023, Yokohama, 9 July – 14 July, Japan.
12. Takács, G., Mikuláš, E., Gulán, M., Vargova, A., Boldocky, J.: AutomationShield: An Open-Source Hardware and Software Initiative for Control Engineering Education. Accepted for the 22nd IFAC World Congress 2023, Yokohama, 9 July – 14 July, Japan.
13. Vargova, A., Boldocky, J., Gulán, M., Tibensky, P., Mikuláš, E., Takács, G.: AeroShield: An Open-Source Propeller-Driven Pendulum Device for Control Engineering Education. Accepted for the 22nd IFAC World Congress 2023, Yokohama, 9 July – 14 July, Japan.

Uplatnenie výsledkov projektu

Výsledky získané počas riešenia projektu môžu byť uplatnené v širokom spektre praktických technických úloh, v ktorých vnorené systémy riadenia umožňujú do výsledného produktu zabudovať vo vyššej miere pokročilú inteligentnú a adaptívnu funkcionálnu. Výsledky sú metodicky formulované tak, aby pokryli celú škálu úloh návrhu optimálneho riadenia pre tieto systémy, a to, či už na báze priamej (on-line) optimalizácie zvolenej kritériálnej funkcie riadenia, alebo na báze explicitného (off-line) získaného, riešenia tejto úlohy. Navrhnuté riešenie pritom vždy budú plne rešpektovať zadané obmedzenia a limitácie vyplývajúce z požiadaviek stanovených pri formulácii úlohy a budú sa vyznačovať schopnosťou byť

nasaditeľný na vnorených, často prednostne lacných mikropočítačových výpočtových platformách. Aplikačnou oblasťou pre dosiahnuté výsledky projektu sú najmä mechatrické systémy v priemyselných aplikáciách, v spotrebnej technike, v technike vykurovania a klimatizácie moderných budov, v aplikáciách na presné polohovacie a mikro-polohovacie systémy, robotiku, aktívne tlmenie vibrácií a diagnostiku stavu konštrukcií. Oblasťou uplatnenia budú i asistenčné systémy v automobilovej technike, navigačné systémy autonómnych vozidiel a lietajúcich bezpilotných UAV aparátov a podobne.

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

Dosiahnuté výsledky projektu sa opierajú o spoločné črty implicitných a explicitných formulácií optimalizačných úloh prediktívneho riadenia, v ich lineárnej, časovo-spojitej formulácii s využitím aplikácie techniky B-splajnových funkcií. Táto technika bola použitá ako k aproximácii signálov, tak i kritériálnej funkcie riadenia spolu s jej uvažovanými obmedzeniami. Hlavným prínosom techniky B-splajnových funkcií v tejto aplikácii je ich parametricky veľmi efektívna – úsporná formulácia signálov, vedúca na nový tvar kritériálnej funkcie riadenia, v ktorom ako optimalizované premenné vystupujú len body tvoriace tzv. radiaci polygón splajnu. Ukazuje sa, že pri explicitnom vyjadrení optimálneho riadiaceho zákona cestou multiparametrického programovania, takto navrhnuté riešenie vedie na veľmi nízke počty kritických regiónov vytvárajúcich polytopickú partíciu nad prípustným stavovým priestorom, ktorú pri reprezentácii dátových štruktúr v explicitnom vyjadrení prediktívneho zákona riadenia je potrebné udržiavať v pamäti počítača. Týmto skúmané riešenie má predpoklady lepšie vyhovovať bežným technickým možnostiam nízko-nákladových vnorených platforiem pri implementácii riadenia v reálnom čase. Navyše počet vznikajúcich regiónov nie je priamo závislý na požadovanej dĺžke horizontu riadenia, garantujúcej stabilitu a rekurzívnu zlučiteľnosť riešenia. Počas riešenia projektu bol otvorený i smer bádania využívajúci k redukcii zložitosti MPC regulátorov koncept konvexného zdvihnutia. Dosiahnuté výsledky v rámci uvedeného smerovania tu potvrdili potenciál pre uplatnenie v rýchlych aplikáciách optimálneho riadenia na lacných vnorených 8 a 32-bitových mikroradičových platformách.

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

The achieved results of the project are based on common features of implicit and explicit formulations of predictive control optimization tasks, in their linear, time-continuous formulation using application of the B-spline functions technique. This technique was used both for the approximation of signals and the cost function together with its considered limitations. The main benefit of the B-spline function technique in this application is their parametrically very efficient - economical formulation of signals, leading to a new shape of the control cost function, in which only the points forming the so-called spline polygon appears. It turns out that when the optimal control law is expressed explicitly by way of multiparametric programming, the proposed solution leads to a very low numbers of critical regions creating a polytopic partition over the admissible state space, which when representing data structures in the explicit form of the predictive control law must be kept in the computer's memory. The solution investigated here has the prerequisites to better meet the common technical possibilities of low-cost platforms when implementing in real-time control. Moreover, the number of emerging regions does not directly depend on the required length of the control horizon, guaranteeing stability and recursive feasibility. During the implementation of the project, a research direction using the concept of convex lifting to reduce the complexity of MPC controllers was also opened. The results achieved in the mentioned direction here confirmed the potential for usage in fast applications of optimal control on low-cost embedded 8 and 32-bit microcontroller platforms.