



Slovenská excelentnosť vo výskume
pokročilého automatického riadenia pre
inteligentný priemysel

V1.2. Správa o budúcich významných smeroch výskumu automatického riadenia na STUBA

Dátum 31.1.2025
v.1

OBSAH

Informácia o výstupe.....	3
Exekutívny sumár.....	4
Skratky.....	5
Úvod.....	6
Kľúčové smery výskumu na STU.....	7
Umelá inteligencia, strojové učenie, adaptívne riadenie.....	7
Robustné, bezpečné a dôveryhodné riadenie.....	7
Pokročilé prediktívne riadenie pre dynamické systémy.....	8
Cyber-fyzikálne systémy, distribuované riadenie a bezpečnosť.....	9
Zelené a udržateľné riadenie v robotike a mechatronike.....	9
Interakcie človek-robot (HRI) a intuitívne rozhrania.....	10
Závery.....	11

INFORMÁCIA O VÝSTUPE

Balík	NV1
Termín	31.1.2025
Dátum	31.1.2025
Verzia	v.1
Autori	Miroslav Fikar, Martin Gulan, František Duchoň, Pavol Tanuška
Recenzenti	Radoslav Paulen
Diseminačná úroveň	Public

Abstrakt	Projekt je orientovaný ako doplnkový k projektu FrontSeat podporeného v schéme Horizont Európa. Cieľom je vykonávať a financovať doplnkové aktivity, ktoré neboli v pôvodnom projekte uvažované. Hlavné ciele projektu sú: - Excelentný výskum v oblasti automatického riadenia - Vzdelávanie a posilňovanie výskumných väzieb v oblasti automatického riadenia - Rozvoj infraštruktúry pre podporu výskumu v oblasti automatického riadenia
-----------------	---

História revízií dokumentu

Verzia	Dátum	Zmeny	Autori
v.1	2025-01-31	Prvá verzia	Miroslav Fikar, Martin Gulan, František Duchoň, Pavol Tanuška

Upozornenie

Financované Európskou úniou. Vyjadrené názory a stanoviská sú však len názormi autora (autorov) a nemusia nevyhnutne odrážať názory a stanoviská Európskej únie. Európska únia ani orgán poskytujúci príspevok za ne nemôžu niesť zodpovednosť.

EXEKUTÍVNY SUMÁR

Tento dokument je výstupom 1.2 „Správa o budúcich významných smeroch výskumu automatického riadenia na STUBA“ projektu FS-MATCH, ktorý je financovaný z programu Európskej únie, číslo projektu: 09I01-03-V04-00024, grantová schéma: VAIA 09I01-03-V04. Účelom správy je upriamiť pozornosť na sľubné smery rozvoja automatizácie, robotiky a mechatroniky na STUBA. Vzhľadom na rozmanité výskumné témy, ktorými sa dnes STUBA zaoberá, správa sa zameriava na hlavnú tému, ktorou sa zaoberá projekt FrontSeat, konkrétne na aplikácie automatického riadenia relevantné pre potreby inteligentného priemyslu.

SKRATKY

Skratka	Význam
STU	Slovenská technická univerzita v Bratislave
AI	Umelá inteligencia
ML	Strojové učenie
RL	Posilňovacie učenie
FDI	Detekcia a izolácia porúch
MPC	Prediktívne riadenie
CPS	Cyber-fyzikálne systémy
HVAC	Kúrenie, ventilácia, klimatizácia
HRI	Interakcie človek-robot
HMI	Rozhranie stroj-človek
AR-VR	Rozšírená a virtuálna realita

ÚVOD

Automatické riadenie, robotika a mechatronika sú navzájom neoddeliteľne prepojené disciplíny, ktoré spoločne formujú technologickú krajinu od pokročilej výroby a rozsiahlych dopravných systémov až po precíznu medicínu, inteligentné mestá a autonómne životné prostredie. V dobe charakterizovanej prehlbujúcou sa digitalizáciou, bezprecedentnou komplexnosťou systémov, dynamicky sa meniacimi externými podmienkami a naliehavými globálnymi výzvami ako klimatická zmena, energetická kríza a demografické zmeny, prechádzajú tieto oblasti mimoriadne dynamickým a konvergentným vývojom. Súčasný výskum sa sústreďuje nielen na tradičné ciele ako zvyšovanie výkonnosti, stability a autonómie systémov, ale aj na ich adaptabilitu voči nepredvídaným zmenám, vrodenu bezpečnosť, odolnosť voči poruchám a kybernetickým útokom, energetickú efektívnosť a predovšetkým na schopnosť autonómne sa učiť a optimalizovať svoju prevádzku priamo z dát. Táto správa predstavuje niekoľko kľúčových smerov, ktoré budú v nasledujúcich rokoch kriticky formovať výskum a rozsiahle aplikácie automatického riadenia, robotiky a mechatroniky.

KLÚČOVÉ SMERY VÝSKUMU NA STU

Umelá inteligencia, strojové učenie, adaptívne riadenie

Integrácia umelej inteligencie (AI) a strojového učenia (ML) predstavuje jeden z najvýznamnejších paradigmatických posunov v riadení a dizajne autonómnych systémov v robotike a mechatronike. S exponenciálnym nárastom objemu dostupných dát z rôznorodých senzorov a pokrokom v algoritmoch výpočtovej sily sú AI a ML schopné transformovať tradičné prístupy:

- **Riadenie založené na dátach (Data-driven Control):** Tento prístup sa zameriava na vývoj metód riadenia, ktoré nevyžadujú explicitný matematický model dynamiky systému. Namiesto toho sa riadiace stratégie učia priamo z rozsiahlych prevádzkových dát získaných z reálnych systémov. To je mimoriadne dôležité pre riadenie komplexných, silne nelineárnych robotických systémov, mechatronických komponentov (napr. pohonné systémy, aktívne zavesenie), zariadení procesného priemyslu (reaktory, separácie,...) kde je presné fyzikálne modelovanie extrémne náročné, časovo náročné alebo dokonca nemožné z dôvodu neznámych interferencií a meniaceho sa prostredia. Výzvou je spracovanie dát s hlukom, zabezpečenie robustnosti naučených riadiacich politík a garancia stability systému.
- **Posilňovacie učenie (Reinforcement Learning - RL):** RL umožňuje riadiacim a robotickým systémom učiť sa optimálne stratégie prostredníctvom interakcie s ich prostredím a maximalizácie dlhodobej kumulatívnej odmeny. Má obrovský potenciál pre úlohy vyžadujúce rozhodovanie v neistom a dynamickom prostredí, ako sú navigácia autonómnych vozidiel v komplexnej premávke, manipulácia s neznámymi predmetmi, flexibilné výrobné linky s adaptívnym rozvrhovaním úloh, alebo adaptívne riadenie dynamickej stability v meniacich sa podmienkach (napr. chôdza humanoidov po nerovnom teréne). Kľúčovou výzvou je "sim-to-real" prenos, teda prenos stratégií naučených v simulácii do reálneho sveta, kde môžu nastať neočakávané interakcie a obmedzenia.
- **Adaptívne a samoučiace sa systémy:** Tieto systémy dokážu automaticky prispôbiť svoje riadiace stratégie neznámym zmenám v dynamike procesu, robotickej platformy alebo prostredia, často s využitím online učenia. To zahŕňa schopnosť kompenzovať opotrebenie komponentov, zmeny zaťaženia, variabilitu materiálov alebo meniace sa environmentálne podmienky (napr. teplota, vlhkosť). Cieľom je udržiavať vysoký výkon a stabilitu riadenia aj pri dlhodobej prevádzke a v nepredvídateľných situáciách.
- **Prediktívna údržba a diagnostika:** Využitie AI/ML na analýzu rozsiahlych dát zo senzorov (napr. vibrácie, teplota, prúd, akustické signály) v mechatronických systémoch a robotoch. To umožňuje nielen včasnú detekciu anomálií a identifikáciu potenciálnych porúch skôr, než nastanú, ale aj predpovedanie zvyškového užitočného života komponentov. Optimalizuje sa tak plánovanie údržby, minimalizujú neplánované prestoje a zvyšuje sa celková spoľahlivosť a dostupnosť zariadení.

Robustné, bezpečné a dôveryhodné riadenie

Okrem kybernetických hrozieb zostáva robustnosť a bezpečnosť kritickými aspektmi, najmä pre systémy interagujúce s ľuďmi a operujúce v nepredvídateľných, dynamických prostrediach:

- **Riadenie s obmedzeniami a neistotami:** Vývoj riadiacich stratégií pre roboty a mechatronické systémy, ktoré garantujú výkonnosť a bezpečnosť aj v prítomnosti značných neistôt v modeloch (napr. nedokonalosti senzorov, neočakávané trenie, premenlivé zaťaženie) a

prísnych obmedzeniach (napr. limity rýchlosti, sily, úroveň emisií, kolízne zóny pre kolaboratívne roboty). Tento výskum zahŕňa techniky ako robustné riadenie, adaptívne riadenie a stochastické riadenie.

- **Formálne metódy overovania (Formal Verification):** Aplikácia matematicky rigorózných metód na overovanie správnosti a bezpečnosti riadiacich algoritmov a ich implementácie. Toto je obzvlášť kritické v systémoch, kde zlyhanie môže mať katastrofálne následky (napr. medicínske roboty, systémy riadenia letu, autonómne vozidlá). Overovanie sa zameriava na to, či systém vždy spĺňa špecifikované bezpečnostné vlastnosti.
- **Detekcia a izolácia porúch (Fault Detection and Isolation - FDI):** Pokročilé metódy na včasnú detekciu, diagnostiku a izoláciu porúch v senzoch (napr. drift, výpadok), aktuátoroch (napr. zaseknutie, znížený výkon) a procesoch robotických a mechatronických systémov. Cieľom je umožniť systému buď autonómne rekonfigurovať riadenie (fault-tolerant control) alebo bezpečne prejsť do núdzového stavu, čo je nevyhnutné pre autonómne a bezpečné operácie.
- **Dôveryhodnosť a vysvetliteľnosť (Trust and Explainability):** Obzvlášť pri riadení založenom na AI/ML, kde sú rozhodovacie procesy často "čiernou skrinkou", je kľúčové zabezpečiť, aby boli riadiace rozhodnutia dôveryhodné, predvídateľné a v prípade poruchy aj vysvetliteľné pre ľudských operátorov alebo regulátorov. Výskum sa zameriava na metódy, ako je "explainable AI" (XAI) aplikovaná na riadiace algoritmy.

Pokročilé prediktívne riadenie pre dynamické systémy

Prediktívne riadenie (MPC) je už etablovanou, vysoko efektívnou pokročilou riadiacou metódou, no jej výskum pokračuje v smeroch relevantných pre automatizáciu, robotiku a mechatroniku s cieľom prekonať existujúce hranice:

- **Nelineárne MPC (NMPC):** Riešenie optimalizačných problémov s nelineárnou dynamikou systémov pre zvýšenie výkonnosti a presnosti riadenia (napr. riadenie robotických manipulátorov s komplexnou kinetikou a dynamikou, let dronov v turbulentnom prostredí, presné polohovanie mechatronických platforiem). Výskum sa zameriava na efektívne algoritmy a ich optimalizovanú implementáciu v reálnom čase, často s využitím GPU akcelerácie.
- **Hybridné MPC:** Riadenie robotických a mechatronických systémov, ktoré kombinujú spojitú a diskretnú dynamiku. Príklady zahŕňajú roboty s meniacimi sa kontaktnými režimami (napr. chôdza, uchopenie), výrobné systémy so spínačmi a logickými stavmi, alebo systémy, kde je potrebné integrovať sekvenčné a spojitú riadenie. Riešenie takýchto problémov často vedie k zložitým zmiešano-celočíselným programom.
- **Distribúované a kooperatívne MPC:** Aplikácia MPC na rozsiahle prepojené robotické systémy (napr. viaceré roboty v sklade, sieť energetických mikro-sústav), kde jednotlivé subsystemy majú svoje vlastné riadiace jednotky, ktoré spolu komunikujú a kooperujú pre dosiahnutie globálneho cieľa. Výzvou je minimalizácia komunikačnej záťaže a zabezpečenie stability a optimálnosti celého distribuovaného systému.
- **MPC s učením/dátami:** Integrácia princípov strojového učenia pre adaptáciu modelov alebo priamo riadiacich politík v rámci rámca MPC. Ide o spojenie robustnosti MPC s adaptabilitou AI, čo umožňuje robotom a mechatronickým systémom lepšie sa prispôsobiť novým úlohám, neznámym poruchám alebo nepredvídaným environmentálnym zmenám.

Cyber-fyzikálne systémy, distribuované riadenie a bezpečnosť

Rozvoj hlboko prepojených systémov, kde sú fyzické procesy integrované s výpočtovou a komunikačnou infraštruktúrou (Cyber-Physical Systems - CPS), kladie nové a komplexné nároky na riadenie, najmä v kontexte rozsiahlych robotických a mechatronických aplikácií, ktoré tvoria chrbticu moderného priemyslu (Priemysel 4.0):

- **Distribuované a kooperatívne riadenie:** Stáva sa kľúčovým pre systémy s viacerými aktormi, ktoré musia pracovať koordinovane, ale bez jedného centrálného bodu zlyhania. Príkladmi sú roje dronov vykonávajúce monitorovanie rozsiahlych oblastí, flotily autonómnych vozidiel pohybujúcich sa v synchronizácii, inteligentné výrobné systémy s flexibilnými robotickými bunkami alebo kooperatívne robotické tímy na montážnych linkách. Výzvou je zabezpečenie spoľahlivej a latencie-odolnej komunikácie, dosiahnutie konsenzu a robustnej synchronizácie aj pri obmedzených komunikačných možnostiach.
- **Edge Computing a Fog Computing pre riadenie:** Tieto prístupy zahŕňajú spracovanie dát a riadiace rozhodnutia čo najbližšie k senzorom a aktuátorom (na "okraji" siete). To dramaticky znižuje latenciu pre riadiace slučky s kritickými časovými požiadavkami, minimalizuje závislosť na vzdialených cloudových službách a uvoľňuje šírku pásma siete. Je to kritické pre vysokorychlostné robotické a mechatronické systémy (napr. spracovanie obrazu pre robotické videnie, haptická kontrola), kde je potreba rýchlej odozvy a spracovania rozsiahlych dát v reálnom čase.
- **Kybernetická bezpečnosť a odolnosť:** S nárastom konektivity priemyselných robotov, autonómnych systémov a inteligentných mechatronických zariadení dramaticky rastie aj riziko kybernetických útokov. Výskum sa zameriava na návrh riadiacich stratégií a mechatronických architektúr, ktoré sú inherentne odolné voči narušeniam (napr. manipulácia dát zo senzorov, útoky na aktuátory), dokážu včas detegovať škodlivé zásahy a zmierňovať ich účinky, čím zaisťujú bezpečnosť, integritu a dostupnosť prevádzky aj v nepriateľskom prostredí.

Zelené a udržateľné riadenie v robotike a mechatronike

Svetové výzvy súvisiace s energetikou a životným prostredím, ako aj rastúci dôraz na udržateľnosť, kladú prioritný dôraz na optimalizáciu a efektívnosť v dizajne a prevádzke všetkých automatizovaných a mechatronických systémov:

- **Riadenie energetickej účinnosti:** Tento smer sa zameriava na optimalizáciu spotreby energie v komplexných robotických systémoch (napr. vývoj energeticky úsporných algoritmov chôdze pre humanoidy, minimalizácia spotreby energie priemyselných robotov počas pohotovostného režimu alebo pri vysokých zaťaženiach), ako aj v rozsiahlych inteligentných budovách (optimalizácia HVAC systémov) a dopravných systémoch (riadenie toku dopravy pre zníženie spotreby paliva).
- **Riadenie zdrojov a kruhová ekonomika:** Optimalizácia tokov materiálov a energie v rámci výrobných procesov, ktoré intenzívne využívajú robotiku a mechatroniku. Cieľom je minimalizovať tvorbu odpadu, predĺžiť životnosť komponentov a maximalizovať recykláciu a opätovné použitie materiálov v rámci celého priemyselného ekosystému.
- **Ekologický dizajn mechatronických systémov (Eco-design):** Výskum sa zameriava na vývoj riadiacich stratégií a samotných mechatronických systémov, ktoré sú od začiatku navrhnuté s ohľadom na minimalizáciu ekologickej stopy počas celého životného cyklu – od výroby, cez prevádzku, až po likvidáciu a recykláciu.

Interakcie človek-robot (HRI) a intuitívne rozhrania

S rastúcou autonómiou robotických systémov a komplexnosťou mechatronických zariadení sa mení aj úloha človeka, čo si vyžaduje nové prístupy k interakcii a spolupráci:

- Kognitívne riadenie a učenie z demonštrácie: Robotické systémy, ktoré dokážu interpretovať ľudské zámery (napr. na základe pohybu, pohľadu, reči), učiť sa z ľudských demonštrácií (t.j. naučiť robota novú úlohu sledovaním, ako ju vykonáva človek) a prispôbovať sa kognitívnym schopnostiam a stavu operátorov. Cieľom je “zdieľaná autonómia”, kde robot vykonáva úlohy, ale je pripravený na prevzatie kontroly alebo prijímanie pokynov od človeka.
- Vylepšené rozhrania človek-stroj (HMI): Návrh intuitívnych, prirodzených a efektívnych rozhraní pre monitorovanie, intervenciu a spoluprácu medzi človekom a autonómnym systémom. To zahŕňa rozhrania s haptickou (dotykovou) spätnou väzbou, rozšírenou a virtuálnou realitou (AR/VR) pre vizualizáciu dát a riadenie, hlasové ovládanie a gestá. Cieľom je znižovať kognitívnu záťaž operátora a zvyšovať efektívnosť spolupráce.
- Kolaboratívna robotika (Cobots): Vývoj a riadenie robotov, ktoré bezpečne a efektívne pracujú bok po boku s ľuďmi vo výrobných, medicínskych, logistických a servisných prostrediach. To si vyžaduje pokročilé senzory pre detekciu prítomnosti človeka, inteligentné algoritmy plánovania pohybu a riadenia sily, ktoré zabezpečujú ochranu ľudí a plynulú spoluprácu v zdieľanom pracovnom priestore. Výskum sa zameriava aj na certifikačné normy a bezpečnosť fyzickej interakcie človek-robot (HRI).

ZÁVERY

Táto správa poskytuje prehľad o budúcich smeroch výskumu v oblasti automatického riadenia, robotiky a mechatroniky na STU, konkrétne na 4 jej fakultách, ktoré poskytujú vzdelávanie a výskum v oblasti Kybernetika. Súčasné smery poukazujú na hlbokú konvergenciu s umelou inteligenciou, pokročilými senzorovými a aktuátorovými technológiami, silnými komunikačnými platformami a rastúcim dôrazom na udržateľnosť a bezpečnosť. Od riešenia naliehavých globálnych výziev (napr. klimatické zmeny, starnúca populácia) až po zvyšovanie autonómie a efektívnosti vo všetkých aspektoch života, budúce inovácie v riadení robotických a mechatronických systémov budú nevyhnutné pre pokrok spoločnosti a priemyslu. Táto transformácia si vyžaduje neustálu inováciu, robustný interdisciplinárny výskum a záväzok k vývoju nielen inteligentnejších, ale aj bezpečnejších, adaptívnejších, dôveryhodnejších a zodpovednejších systémov pre budúcnosť.