

Program

Digitalna transformacija robotiziranih tovarnih prihodnosti

DIGITOP

Rezultat D4.2:

Stanje raziskav na področju zajemanja veščin operaterja

Projekt/RRP	DIGITOP/RRP 4 - Aktivnost 4.4 Zajemanja veščin operaterjev - pregled raziskav
Vrsta dokumenta	Poročilo o rezultatu D4.2
Verzija dokumenta	v1
Sodelujoči partnerji	ULFE-LAK, IJS-E2, METRONIK
Avtorji	Goran Andonovski, Miha Glavan, Gregor Černe, Andrej Zdešar, Dejan Gradišar, Gregor Dolanc, Aleš Temeljotov
Datum priprave	26. 01. 2024

Kazalo

1	UVOD.....	3
2	VPOGLED V VEŠČINE OPERATERJEV	3
3	MODELI ČLOVEŠKIH OPERATERJEV	4
	BIBLIOGRAFIJA	6

1 Uvod

Digitalizacija tovarne je močno vplivana s strani novih trendov, ki se pojavljajo v okviru programov Industrije 4.0, avtomatizira tradicionalne proizvodne procese in sisteme ter izkorišča prednosti sodobnih tehnologij. To pomeni spremembo tradicionalnih proizvodnih procesih in poslovnih modelih. Zaradi tega je pritegnila veliko pozornost tako v poslovnih krogih kot v akademskem svetu [1]. V okviru koncepta Industrije 4.0 se vzpostavlja sinergija med industrijskimi stroji, ljudmi in proizvodnimi sistemi preko ustvarjanja virtualnih kolaborativnih mrež. Te mreže omogočajo odzivanje na tržne spremembe, pri čemer kritično vlogo igrajo kibernetično-fizični sistemi. Ti sistemi omogočajo integracijo vseh elementov, povezanih s proizvodnim procesom. Vendar pa se soočamo z izzivom pomanjkanja integracije med fizičnimi izdelki in virtualnimi modeli, zaradi česar so podatki v življenjskem ciklu izdelka pogosto izolirani, razdrobljeni in neaktivni. V tem kontekstu kibernetično-fizični sistemi igrajo ključno vlogo pri razvoju koncepta digitalnega dvojčka [2]. Digitalni dvojčki v splošnem obsegajo različne segmente v sklopu pametnih tovarn. Eden od vidikov, ki ga tudi obravnavamo v okviru projekta DIGITOP (Aktivnosti 1.3, 4.4, 4.5, 4.6, 8.3 in 8.4) je zajem in digitalizacija veščin operaterjev. V tem poročilu bomo pregledali obstoječo literaturo, ki bo v pomoč pri razvoju novih algoritmov in implementacija obstoječih.

2 Vpogled v veščine operaterjev

Zaznavanje operaterjevih veščin temelji na izkoristku obstoječih meritev, pri čemer je koristna tudi uvedba dodatnih senzorjev. Raziskave na tem področju se pogosto osredotočajo na razumevanje interakcije med operaterji in stroji. To vključuje analizo, kako operaterji komunicirajo s krmilnimi vmesniki, stroji in orodji, ter proučevanje, kako njihova dejanja vplivajo na celoten proizvodni proces. Z uporabo metod strojnega učenja lahko iz zbranih podatkov analiziramo vzorce obnašanja in iz njih izluščimo vpogled v veščine, ki jih operaterji posedujejo. Ta pristop nam omogoča, da:

- Identificiramo delovne tokove in procese, ki so ključni za učinkovito proizvodnjo.
- Razpoznamo in katalogiziramo posamezne veščine operaterjev, kar omogoča boljše razumevanje njihovega prispevka k proizvodni učinkovitosti.
- Ocenjujemo in izboljšujemo uspešnost dela operaterjev, kar lahko vodi do optimizacije procesov in izboljšanja kakovosti izdelkov.

S tem se odpirajo nove možnosti za optimizacijo proizvodnih procesov, kjer se človeški faktor in tehnološka naprednost združujeta v iskanju najučinkovitejših rešitev. Tako lahko digitalizacija in povezane tehnologije ne le izboljšajo procese, ampak tudi omogočajo razvoj novih veščin in pristopov v industrijskem okolju.

Razumevanje odnosa med človekom in računalnikom izhaja iz raznolikosti prepletenih disciplin. K sodobnemu razvoju na tem področju so prispevala tri glavna interesna področja [3]. Ta vključujejo vmesnik človek-stroj (ki obsegajo fizične in fiziološke aspekte), modele programskih vmesnikov (ki pokrivajo informacijske, psihološke in sociološke vidike) ter mehanske modele (zlasti ergonomske). Vsako od teh področij je obravnavano kot ločena enota. Trenutno predstavlja avtomatizacija odnosa med operaterjem in strojem kontinuum, ki ga lahko razdelimo na šest kategorij: ročno delo, podpora odločanju, dovoljenje, odpuščanje, obravnavanje izjem in

popolna avtomatizacija [3]. Te kategorije se razlikujejo glede na stopnjo človekovega vključevanja in avtonomije stroja, od ročnega sortiranja pošte do popolnoma avtomatiziranega nadzora nad temperaturo opreme.

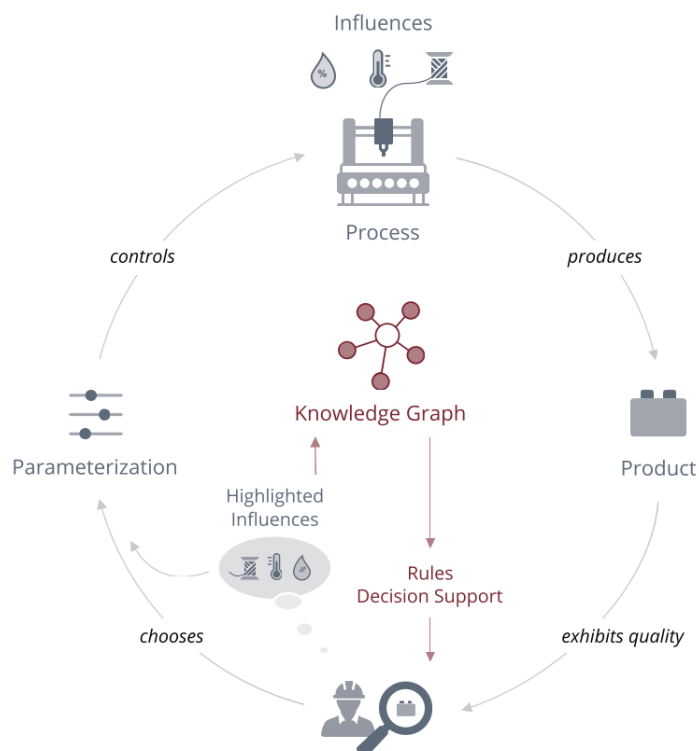
3 Modeli človeških operaterjev

V nadaljevanju bomo v nekaj sklopih organizirali različne metode in pristope, ki rešujejo problema modeliranja operaterja. V [4] je predstavljena študija, ki se osredotoča na modeliranje interakcij med človeškimi operaterji in računalniškimi sistemi za ocenjevanje napak in zanesljivosti v kontrolnih sistemih. Predstavljena metoda uporablja teorijo usmerjenih grafov za analitično oceno in vrednotenje zanesljivosti in časovnih kazalnikov procesa vodenja.

V nekaj študijah, so se **mehki sistemi** in mehka logika izkazali za primerno orodje za modeliranje interakcij med operaterjem in strojem. Avtorji v [5] so razvili računalniški sistem za reševanje ergonomskih problemov povečanja učinkovitosti avtomatiziranih sistemov na osnovi mehkih modelov. V [6] je predlagana metoda za izbiro delovnih pogojev, ki vplivajo na verjetnost človeških napak, temelječa na primerjavi alternativnih scenarijev. Metoda uporablja koncept mehkega modela za ocenjevanje delovnih pogojev glede na stopnjo bližine idealnim pogojem in integralno oceno scenarija z združevanjem mehkih množic posameznih pogojev. Predstavljene so pripadnostne mehke funkcije, algoritem za primerjavo alternativnih scenarijev in primer, ki ilustrira primerjavo različnih delovnih pogojev posadke vozila. Naslednja študija [7] obravnava uporabo mehke logike pri razvoju inteligentnih vmesnikov človek-stroj, še posebej tistih, ki so odporni na človeške napake pri nadzoru industrijskih procesov. Članek poudarja pomen oblikovanja vmesnikov, ki so odporni na človeške napake, za ohranitev budnosti operaterjev pri upravljanju nepričakovanih dogodkov v industrijskih okoljih. Metodologija vključuje razvoj celostne arhitekture, ki vsebuje model vedenja človeškega operaterja, osredotočen na možna dejanja in napake. Pridobljeni vpogledi se uporabljajo za oblikovanje splošnih pravil za programiranje takšnih vmesnikov z uporabo mehke logike. Namen je izboljšati interakcijo med človekom in strojem, jo narediti bolj odporno na napake in s tem povečati učinkovitost ter varnost v industrijskih procesih. Nekoliko drugačen problem, ki so ga avtorji rešili s pomočjo mehkih modelov je predstavljen v [8]. V tej študiji so avtorji predstavili nevro-mehki model človeka operaterja v sistemu ročnega vodenja. Za prikaz učinkovitosti so v praksi preizkusili predlagano metodo modeliranja in izvedli simulacijo z realnimi podatki. V študiji [21] je predstavljena uporaba intervalnega mehkega modeliranja Takagi-Sugeno (TS), ki učinkovito zajame zapleteno dinamiko človeških operaterjev (*ang. Human operator*, HO). Ta metoda je bila testirana z računalniško igro za sledenje cilju, pri čemer so bili zbrani podatki od igralcev z različnimi ravneh znanja. Rezultati potrjujejo, da metoda uspešno modelira HO, saj značilno obvladuje njihovo negotovost in nelinearnost s predvidenimi zgornjimi in spodnjimi mejami.

Drugo orodje in metodologijo, ki smo jo zaznali v literaturi so **grafi znanja** (*ang. knowledge graphs*). V prispevku [9] je predstavljen pristop k zbiranju semantičnega znanja o procesu in gradnji ustreznega grafa znanja, ki zajema strokovno znanje, pridobljeno prek množičnega sodelovanja strokovnjakov v proizvodnem procesu (Slika 1). Prikazano je, kako se lahko informacije, vsebovane v tem znanju, pretvorijo v razumljiva pravila. Ta pristop je zasnovan tako, da se lahko uporablja med proizvodnjo brez dodatnega osebjia in brez povzročanja zamud v proizvodnem procesu. V nadaljnji študiji [10] so avtorji izboljšali obstoječo metodologijo za pridobivanje tihega znanja operaterjev, ki se osredotoča na vpogled v njihove odločitvene procese, z uvedbo podatkovno osnovane

uteži informacij operaterjev. To omogoča boljši nadzor nad zanesljivostjo delavcev in individualnimi pristranskostmi, kar poveča kakovost zbranega znanja. Metode so bile ovrednotene na realnem naboru podatkov v domeni modeliranja z dodajanjem, kjer so pokazali izboljšanje v primerjavi s prejšnjo metodo. Glavni prispevek raziskave je prikaz, kako se lahko pol-strukturirano znanje, zbrano v proizvodnji, agregira in preveri za izgradnjo robustne baze pravil, kar služi kot manj vsiljiva, podatkovna alternativa tradicionalnim tehnikam ekstrakcije znanja.



Slika 1. Primer delovnega toka in uporabo grafi znanja za podporo odločanja.

V zadnjih nekaj letih je področje **vzpodbujevalnega učenja** (*ang. reinforcement learning, RL*) pritegnilo veliko pozornosti. Prav tako je bilo na področju modeliranja in spremljanja učinkovitosti operaterjev izvedenih nekaj poskusov uporabe te metodologije. V članku [11] je predstavljen pristop za razvoj ne-sprotnega RL agenta na podlagi zgodovinskih podatkov. Namen tega RL agenta je podpora pri usmerjanju operaterjev za doseganje boljših in bolj konsistentnih rezultatov. RL agent se uči pravil vodenja na osnovi preteklih akcij operaterjev (zgodovinskih podatkov) v procesu ulivanja jeklenih trakov (*ang. twin-roll steel strip casting process*). RL agent pomaga pri določanju optimalne referenčne sile. V članku [12] so avtorji uporabili enomesečne zgodovinske podatke izdelave posameznega izdelka na CNC strojih za razvoj modela, ki opisuje akcije operaterjev (*ang. control policies*). Zbrani so bili podatki iz različnih senzorjev, ki predstavljajo niz informacij, dostopnih operaterjem, in njihove akcije. Za razvoj modela so uporabili regresijske modele (SVM), model grozdov (*ang. Random Forest Regressor*) in globoke nevronske mreže (*ang. Deep Neural Networks*). V članku [13] so avtorji razvili podporno-odločitveni sistem (*ang. Decision Support System, DSS*) za povečanje proizvodnje novih izdelkov. Razvoj sistema je temeljil na zbiranju podatkov, učenju in ekstrakciji znanja, pri čemer je bil sistem namenjen podpori operaterjem. Sistem spremlja vsak zagon procesa in formalizira zbrano znanje v obliki

izkušenj. DSS analizira in se uči iz vsake nove pridobljene izkušnje (zajem izkušenj z Markovim odločitvenim procesom, učenje RL modela, z modelom procesa in neposredno iz preteklih dogodkov). Končni rezultat je seznam priporočil za izboljšanje sistema.

S stališče uporabe razvitih modelov in pristopov pri modeliranju obnašanja operaterja in njegove interakcije s strojem je najbolj razširjena rešitev gradnje podporno-odločitvenih sistemov [11, 13-20]. V [22, 23] sta predstavljeni raziskavi, ki se osredotočata na obdelavo informacij operaterjev v kontrolnih sobah jedrskih elektrarn in kako to vpliva na njihovo uspešnost pri diagnostičnih nalogah. Prva študija [22] raziskuje povezavo med mentalno obremenitvijo operaterja in tokom informacij, pri čemer uporablja modele informacijskega toka ter subjektivne in fiziološke metode (kot je sledenje očem) za merjenje obremenitve. Druga raziskava [23] predlaga metodologijo za kvantificiranje kognitivnega toka informacij z integracijo kvalitativnega in kvantitativnega pristopa, pri čemer prav tako ocenjuje učinkovitost tega pristopa v smislu napovedovanja časa diagnoze in natančnosti operaterjev.

Bibliografija

- [1] Salierno, G., Leonardi, L., & Cabri, G. (2021). The future of factories: Different trends. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(21), 1–18.
- [2] Buldakova, T. I., & Suyatinov, S. I. (2019). Hierarchy of Human Operator Models for Digital Twin. *Proceedings - 2019 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019*, 1–5.
- [3] Yahr, S. W., Monson, R. J., & Benjamin, S. J. (2000). Humans and machines as dual elements of complex systems. *Naval Engineers Journal*, 112(4), 79–91.
- [4] Lavrov, E. (2022). Mathematical Models of Human-Computer Interaction. Analysis of Human Operator Activity in Terms of Error Generation and Problem Elimination. *2022 IEEE 9th International Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2022 - Proceedings*, 325–328.
- [5] Lavrov, E. A., Paderno, P. I., Burkov, E. A., Siryk, O. E., & Pasko, N. B. (2020). Information Technology for Modeling Human-machine Control Systems and Approach to Integration of Mathematical Models for Its Improvement. *Proceedings of 2020 23rd International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2020*, 117–120.
- [6] Rotshtein, A. P. (2018). Selection of Human Working Conditions Based on Fuzzy Perfection. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 57(6), 927–937.
- [7] Kolski, C., & Malvache, N. (2006). Intelligent interfaces based on fuzzy logic: Example with a human-error-tolerant interface approach. In *Studies in Fuzziness and Soft Computing* (Vol. 201, Issue 2006, pp. 339–366).
- [8] Lee, S. J., & Lyou, J. (2007). Neuro fuzzy modeling of manual control system with a human operator. *ICCAS 2007 - International Conference on Control, Automation and Systems*, 767–770.
- [9] Nordsieck, R., Heider, M., Winschel, A., & Hahner, J. (2021). Knowledge Extraction via Decentralized Knowledge Graph Aggregation. *Proceedings - 2021 IEEE 15th International Conference on Semantic Computing, ICSC 2021*, 92–99.

- [10] Nordsieck, R., Heider, M., Hoffmann, A., & Hahner, J. (2022). Reliability-Based Aggregation of Heterogeneous Knowledge to Assist Operators in Manufacturing. *Proceedings - 16th IEEE International Conference on Semantic Computing, ICSC 2022*, 131–138.
- [11] Ruan, J., Nooning, B., Parkes, I., Blejde, W., Chiu, G., & Jain, N. (2024). Human operator decision support for highly transient industrial processes: a reinforcement learning approach. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2021.
- [12] Nguyen, H. T., Haugen, O., & Olsson, R. (2023). Imitation Learning from Operator Experiences for a Real time CNC Machine Controller. *IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2023-July, 1–8.
- [13] Doltsinis, S., Ferreira, P., Mabkhot, M. M., & Lohse, N. (2020). A Decision Support System for rapid ramp-up of industry 4.0 enabled production systems. *Computers in Industry*, 116, 103190.
- [14] Cuznar Kristjan, Priporočilni sistem za podporo pri odločanju operaterja industrijskega procesa, *magistrska naloga, Fakulteta za elektrotehniko, Univeza v Ljubljani*, 2023
- [15] LEE, S. J., & SEONG, P. H. (2009). Experimental Investigation into the Effects of Decision Support Systems on Operator Performance. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 46(12), 1178–1187.
- [16] Sakarinto, W., Narazaki, H., & Shirase, K. (2011). A decision support system for capturing CNC operator knowledge. *International Journal of Automation Technology*, 5(5), 655–662.
- [17] Huang, J., Chen, Y., & Li, Z. (2015). Human operator modeling based on fractional order calculus in the manual control system with second-order controlled element. *Proceedings of the 2015 27th Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2015*, 4902–4906.
- [18] Li, H., Bi, L., & Shi, H. (2020). Modeling of Human Operator Behavior for Brain-Actuated Mobile Robots Steering. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 28(9), 2063–2072.
- [19] Muhammad, S. (2021). Modeling Operator Performance in Human-in-the-Loop Autonomous Systems. *IEEE Access*, 9, 102715–102731.
- [20] Zhu, H., Cummings, M. L., Elfar, M., Wang, Z., & Pajic, M. (2019). Operator Strategy Model Development in UAV Hacking Detection. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 49(6), 540–549.
- [21] Tufekci, A. E., & Kumbasar, T. (2019). Human Operator Modelling with Interval-valued Takagi-Sugeno Fuzzy Models. *ELECO 2019 - 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, 921–925.
- [22] Kim, J. H., Lee, S. J., & Seong, P. H. (2003). Investigation on applicability of information theory to prediction of operator performance in diagnosis tasks at nuclear power plants. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 50(4 I), 1238–1252.
- [23] Kim, J. T., Shin, S. K., Kim, J. H., & Seong, P. H. (2013). An experimental approach to estimate operator's information processing capacity for diagnosing tasks in NPPs. *Annals of Nuclear Energy*, 59, 100–110.