Interakcija človek–stroj pri pogojno avtomatizirani vožnji: študija medkulturnih razlik Slovenija – ZDA

Timotej Gruden[1], Bruce Kogut[2], Jaka Sodnik[1]

[1] Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
[2] Columbia University, New York, Columbia Business School, New York, U.S.A.
E-pošta: timotej.gruden@fe.uni-lj.si

Human-Computer Interaction in Conditionally Automated Vehicles: Slovenia – U.S.A. Cross-Cultural Study

Abstract. *This study investigates the effectiveness of assisted and partial take-over (APTO) systems in conditionally automated vehicles (SAE Level 3) in two cultural contexts: Slovenia and the United States. Building on previous research that demonstrated improved take-over quality in Slovenian drivers using APTO, the authors repeated the experiment in New York using identical driving simulator setups. The study involved a total of 64 participants and compared two approaches: a simple multimodal take-over request (TOR) and the improved APTO system. Key performance metrics included reaction time, time to collision, time to lane crossing, and crash frequency. The results showed that the Slovenian drivers benefited significantly from APTO, while the American drivers did not show any statistically significant improvements. This suggests that American drivers may already be responding appropriately to the simple TORs, possibly due to greater experience with automation technologies. The results emphasize the importance of cultural and contextual factors in the design of human-machine interfaces. Future research should explore additional performance measures and develop comprehensive models to better understand driver behavior in automated contexts.*

1 Uvod

S prihodom pogojno avtomatiziranih vozil (SAE L3) [1] se kaže vse večja pomembnost uspešne predaje oz. prevzema vodenja tako s strani voznika kot tudi s strani vozila. Pogojno avtomatizirana vozila zmorejo voziti povsem samodejno v za to določenih okoliščinah – njihovi domeni obratovanja (ang. operational design domain – ODD). Ko se vozilo bliža točki, ki predstavlja meje njegovih zmogljivosti, npr. konec avtoceste, nenadno poslabšanje vremena ali vidljivosti, okvara senzorjev, zapora ceste, … sproži zahtevo za prevzem vodenja (ZPV, ang. take-over request – TOR). Prav uspešno posredovanje zahteve za prevzem vodenja preko namenskih uporabniških vmesnikov predstavlja ključno ranljivost takih vozil in s tem aktualno raziskovalno področje. Če je voznik nepozoren, zamišljen ali preobremenjen, lahko posledice neuspešnega prevzema predstavljajo veliko varnostno tveganje. Za uspešno uveljavitev novih vozil na trgu in s tem izboljšanje kakovosti življenja je taka tveganja nujno odpraviti.

1.1 Sorodne raziskave

Dosedanje študije so obširno raziskale dejavnike, ki vplivajo na uspešnost in učinkovitost prevzema vodenja. Najpogosteje je šlo za ugotovitve o primernih časih posredovanja zahteve za prevzem [2], primernih modalnostih uporabniškega vmesnika (zvočno, taktilno, vidno) [3] ter ostalih nalogah, ki jih vozniki počnejo med vožnjo [4]. Sanghavi idr. so pokazali, da je zahtevo za prevzem najprimerneje podati pet (5) sekund pred kritično točko [5], v študiji, ki so jo izvedli Shi idr., pa se je najbolje izkazala zahteva, podana šest (6) sekund pred kritično točko [6]. S stališča modalnosti so se za najuporabnejše izkazali večmodalni vmesniki [7]. Glede sekundarnih nalog, ki jih vozniki lahko opravljajo med avtomatizirano vožnjo, se je pokazalo da so vozniki pri gledanju filmov in branju potrebovali več časa za prevzem kot pri igranju iger na mobilnem telefonu [8].

Žal pa večina študij obravnava prevzem vodenja kot diskreten dogodek v času, čeprav gre v resnici za proces, ki se prične s trenutkom nastanka situacije, ki zahteva prevzem, vse do stabilnega in varnega nadaljevanja vožnje. Kakovost prevzema vodenja se namreč ne odraža samo v hitrosti prevzema, ampak tudi v tem, kako zanesljivo in transparentno poteka proces predaje, torej kako se voznik ponovno vključi v svojo primarno nalogo. Izkaže se na primer, da nekateri vozniki prevzamejo samo del vozne naloge – zavijanje ali zaviranje – namesto obeh, kar lahko privede do nepopolnega in v nekaterih primerih celo nevarnega prevzema [9].

Da bi zaobšli te težave smo v predhodnih raziskavah predlagali dve izboljšavi tradicionalnemu načinu prevzema vodenja zgolj na podlagi zahteve za prevzem vodenja:

- delen prevzem vodenja (DPV), ki vozniku ob nepopolnem prevzemu (le prečno ali le vzdolžno ročno vodenje vozila) pomaga z avtomatizacijo drugega dela;
- dodatno podprt prevzem vodenja (PPV), ki vozniku pomaga z dodatnimi opozorili, v kolikor je neuspešen pri prevzemanju [10].

V študiji, ki je potekala med vozniki v Sloveniji, smo potrdili, da ta dodatna pristopa izboljšata kakovost prevzema vodenja z več vidikov (varnostna razdalja, močni pospeški, itd.) brez negativnega vpliva na voznikovo zadovoljstvo z vožnjo oz. uporabniško izkušnjo med vožnjo. Teh ugotovitev ni možno v celoti

posplošiti, saj se obnašanje voznikov iz različnih geografskih območij razlikuje že zaradi razlik v infrastrukturi, različnih prometnih pravil, drugačnega poteka usposabljanja voznikov in različni izpostavljenosti naprednim avtomatiziranim sistemom [11]. Vozniki v Združenih državah Amerike imajo na primer lahko drugačna pričakovanja glede vedenja sistema in različno stopnjo zaupanja v avtomatizacijo v primerjavi z evropskimi vozniki. [12]. Posledično je potrebna potrditev veljavnosti predlaganih pristopov z DPV in PPV tudi v drugih okoljih, da se ugotovi, ali jih je mogoče učinkovito uveljaviti na mednarodni ravni.

1.2 Raziskovalna vprašanja

V tem prispevku tako poročamo o ponovitvi originalne študije [10], ki smo jo tokrat izvedli v New Yorku v Združenih državah Amerike (ZDA). S popolnoma enako postavitvijo poskusa v simulatorju vožnje in primerjavo med rezultati voznikov iz Slovenije in ZDA želimo oceniti robustnost in splošnost predlaganega pristopa z delnim in dodatno podprtim prevzemom vodenja (DPPV). Poleg tega lahko s primerjalno študijo opažamo razlike v obnašanju in fiziološkem stanju voznikov med tema dvema populacijama, izpostavljenima enakim pogojem.

Natančneje, v tem prispevku podamo odgovore na naslednji dve raziskovalni vprašanji:

1. Ali predlagani pristop z dodatnimi podpornimi sistemi za prevzem vodenja (DPPV) izboljša kakovost prevzema voznikov v ZDA?
2. Ali se odzivi na prevzem vodenja s predlaganim pristopom razlikujejo med vozniki v Sloveniji in ZDA?

V nadaljevanju je najprej predstavljena metodologija in tehnična postavitev uporabniške študije. Poglavje št. tri predstavlja rezultate, v naslednjem poglavju pa so podane ključne ugotovitve, kratek zaključek in možnosti za nadaljnje raziskave.

2 Metodologija

Ker rezultati prvotne študije [10] predlagajo uporabo kombinacije pristopov z delnim in dodatno podprtim prevzemom vodenja pogojno avtomatiziranih vozil, smo v tej ponovitvi izvedli le simulacije kombiniranega pristopa z delnim in dodatno podprtim prevzemom vodenja (DPPV) ter osnovnega prevzema zgolj s podano večmodalno zahtevo za prevzem vodenja (ZPV). Študijo smo načrtovali na način, da je vsak voznik preizkusil prevzem vodenja v obeh eksperimentalnih pogojih, in sicer je vsak opravil štiri prevzeme z DPPV in štiri prevzeme zgolj s podano ZPV. Vseh osem ovir na progi, ki so zahtevale prevzem vodenja, je bilo enakih za vse udeležence, posamezen voznik pa se je z vsako oviro srečal le enkrat.

2.1 Tehnična postavitev

Obe študiji (v Sloveniji in ZDA) sta bili izvedeni v kompaktnem simulatorju vožnje, ki sestoji iz treh zaslonov skupne ločljivosti 5760 x 1080 točk, premične platforme s štirimi prostostnimi stopnjami (4-DOF), volana s stranskimi ročkami, treh pedalov in prestavne ročice. Simulator v Sloveniji (slika 1 levo) je imel dodaten zaslon za prikaz merilnika hitrosti in obvestil, na simulatorju v ZDA (slika 1 desno) je bila hitrost vozila projicirana na glavnem zaslonu. Za simulacijo vozil smo uporabili programsko opremo SCANeR Studio (AVSimulations, Francija).

Večmodalna zahteva za prevzem vodenja je bila podana šest sekund pred prihodom do kritične situacije. Vključevala je: 1) zvočno opozorilo z leve ali desne strani vozila, glede na konkretno situacijo s tiste strani, kjer je vozilo pričakovalo nevarnost, 2) taktilno opozorilo – vibracije v voznikovem sedežu in 3) opozorilne ikone na plošči z merilnikom hitrosti (le v Sloveniji, simulator v ZDA ni imel dodatnega zaslona). Zvok je posnemal opozorilo za neprimerno višino letala Boeing 747, za vibracije smo uporabili šest vibracijskih motorčkov z 12000 obrati na minuto.

Pristop z DPPV je vključeval večmodalno ZPV in se poleg tega prilagajal voznikovim odzivom oz. pomanjkanju le teh. Hkrati s podano zahtevo je vozilo začelo blago zavirati. Vozilo je nudilo možnost delnega prevzema vodenja – če je voznik prevzel le vodenje prečnega premikanja (z vrtenjem volana), je vzdolžno vodenje ostalo avtomatsko blago zaviranje. Med celotnim procesom je vozilo merilo predvideni čas do trka (ang. time-to-collision – TTC). V kolikor je TTC



Slika 1. Simulator vožnje na Univerzi v Ljubljani, Slovenija (levo) in Columbia University, New York, ZDA (desno).

padel pod prag treh sekund, je vozilo podalo dodatno opozorilo za prevzem z vsesmernim piskom, vibracijami in nenadnim kratkim pritiskom zavore, ki je povzročilo močen trzaj. Če je TTC padel pod kritični prag ena in pol sekunde, se je sprožilo samodejno zaviranje v sili.

Vožnja je vseskozi potekala po ravni tripasovni avtocesti s slabo vidljivostjo zaradi močnega dežja. Vozilo je v pogojno avtomatiziranem načinu vozilo po srednjem pasu s hitrostjo 110 km/h, na cesti je bilo tudi nekaj drugih vozil. Na cca. 20 km odseku ceste je bilo na naključnih mestih postavljenih osem situacij, ki so zahtevale prevzem vodenja s strani voznika in obvoz bodisi po levem bodisi po desnem voznem pasu, največkrat zaradi del na cesti ali prometne nesreče.

2.2 Neodvisne in odvisne spremenljivke

Z uporabniško študijo smo želeli preveriti, ali predlagani pristop z DPPV pozitivno vpliva na proces prevzema vodenja v primerjavi z zgolj podano zahtevo za prevzem. Ker smo primerjali tudi razlike med odzivi voznikov v Sloveniji (SI) in ZDA, sta bili *neodvisni spremenljivki* dve:

- uporabljen pristop $\in \{\text{DPPV, samo ZPV}\}$,
- lokacija $\in \{\text{SI, ZDA}\}$.

Da bi ocenili kakovost prevzema vodenja, smo med prevzemom vodenja izmerili *odvisne spremenljivke*:

- voznikov reakcijski čas,
- najmanjši čas do trka (TTC),
- čas do spremembe voznega pasu (ang. time to lane crossing – TTLC) in
- ali je prišlo do trka.

2.3 Potek poskusa

V prvotni študiji v Ljubljani je sodelovalo 44 voznikov, kjer je vsak opravil po dva prevzema vodenja za vsak uporabljeni pristop. V ZDA smo zmanjšali število uporabljenih pristopov iz štiri na dva, tako da je lahko vsak voznik opravil štiri prevzeme vodenja za vsak uporabljeni pristop, posledično smo k sodelovanju povabili še 22 voznikov. Skupaj torej obravnavamo podatke 64 voznikov oz. 352 prevzemov vodenja.

Vsak sodelujoči voznik v uporabniški študiji je najprej v podpis dobil obveščeno soglasje za sodelovanje. Po kratki razlagi poteka študije je sledila testna vožnja, med katero so se vozniki privadili na vožnjo v simulatorju in testirali njegove zmožnosti. V osrednjem delu študije so vozniki vozili v pogojno avtomatiziranem vozilu. Med avtomatizirano vožnjo so uporabljali mobilni telefon, ob pozivu sistema (podani zahtevi) pa so morali prevzeti vodenje, čim varneje razrešiti situacijo, ki je avtomobil ne bi zmogel sam, in nato ponovno predati vodenje avtomatiziranemu sistemu. Po preizkusu vsakega izmed pristopov (po dveh oz. po štirih prevzemih) je sledila kratka prekinitev za izpolnitev vprašalnika in nato preizkus preostalih pristopov. Vrstni red preizkušenih pristopov je bil vsakič znova naključen.

3 Rezultati

Slika 2 prikazuje grafe vidikov kakovosti prevzema vodenja glede na uporabljeni pristop in lokacijo.

3.1 Primerjava pristopov med vozniki v ZDA

Za analizo odvisnih spremenljivk smo zgradili mešane linearne modele, pri čemer smo uporabljeni pristop in zaporedne prevzeme vodenja obravnavali kot ponovljene meritve. Uporabljeni pristop smo obravnavali kot fiksni učinek z možnostjo konstantnega in naključnega odklona. Rezultati so bili dani v skupke glede na identifikacijsko oznako voznika.

(a) (b)

(c) (d)

Slika 2. Grafi izmerjenih vidikov kakovosti prevzema vodenja: reakcijski čas (a), najmanjši čas do trka (b), čas do spremembe voznega pasu (c) in število morebitnih trkov (d) glede na uporabljeni pristop in lokacijo.

Analiza je pokazala, da se kakovost prevzema vodenja voznikov v ZDA ne razlikuje statistično pomembno glede na uporabljeni pristop, ne glede na vidik ocenjevanja. Rezultati za reakcijski čas, najmanjši čas do trka in čas do spremembe voznega pasu so prikazani v Tabeli 1. Zaznan je bil le po en trk pri posameznem pristopu.

Tabela 1. Rezultati statistične analize odvisnih spremenljivk glede na uporabljeni pristop med vozniki v ZDA.

Meritev	$\bar{x}$ [s] ZPV	$\bar{x}$ [s] DPV	*df*	*F*	*p*
Reakc. čas	2,20	2,11	(1, 22)	0,811	0,377
Min. TTC	2,53	2,99	(1, 22)	0,587	0,452
TTLC	6,08	6,09	(1, 17,3)	1,809	0,196

3.2 Primerjava predlaganega pristopa med vozniki v Sloveniji in ZDA

Tudi za primerjavo med vozniki v Sloveniji in ZDA smo zgradili mešane linearne modele, pri čemer smo lokacijo in zaporedne prevzeme vodenja obravnavali kot ponovljene meritve. Lokacijo smo obravnavali kot fiksni učinek z možnostjo konstantnega in naključnega odklona. Rezultati so bili dani v skupke glede na identifikacijsko oznako voznika.

Tudi analiza med lokacijama je pokazala, da se kakovost prevzema med vozniki v Sloveniji in ZDA ne razlikujejo statistično pomembno. Rezultati za reakcijski čas, najmanjši čas do trka in čas do spremembe voznega pasu so prikazani v Tabeli 2. Med vozniki v Sloveniji ni bilo zaznanega nobenega trka, med vozniki v ZDA pa en sam trk.

Tabela 2. Rezultati statistične analize odvisnih spremenljivk za predlagani pristop glede na lokacijo.

Meritev	$\bar{x}$ [s] SI	$\bar{x}$ [s] ZDA	*df*	*F*	*p*
Reakc. čas	2,10	2,11	(1, 50,9)	2,633	0,111
Min. TTC	3,02	2,99	(1, 52,7)	0,033	0,856
TTLC	6,08	6,09	(1, 54,2)	0,375	0,543

4 Razprava

V študiji smo preverjali, ali pristop z delnim in dodatno podprtim prevzemom vodenja izboljša kakovost prevzema vodenja voznikov tako v Sloveniji kot tudi v ZDA. Glede na to, da predlagani pristop izboljša kakovost v Sloveniji [10], so rezultati nekoliko presenetljivo prikazali, da podani pristop ne vpliva na kakovost merjenih vidikov med vozniki v ZDA. Prav tako je analiza pokazala, da ni razlik pri uporabi DPPV med vozniki v Sloveniji in ZDA. Dobljene rezultate lahko interpretiramo na način, da so odzivi voznikov v ZDA za razliko od voznikov v Sloveniji že samo na zahtevo za prevzem vodenja dovolj dobri, da jim dodatne pomoči ne predstavljajo tudi dodatnih koristi. Tak razmislek potrjuje tudi hiter pogled na graf na sliki 2b, ki prikazuje, da je najmanj varen odziv slovenskih voznikov ob uporabi pristopa samo z zahtevo za prevzem. Povprečen najmanjši čas do trka voznikov iz ZDA je bil že pri tem osnovnem pristopu višji, pri pristopu z DPPV pa je na obeh lokacijah najvišji. Podobno tudi število trkov brez DPPV (slika 2d) nakazuje, da je ravno slovenskim voznikom pristop z DPPV najbolj koristil. Dobljeni rezultati so drugačni tudi od ugotovitev Millerjeve idr. [12], ki so poročali manj trkov med vozniki v Sloveniji kot v ZDA. Uporabili so sicer različna simulatorja vožnje (strojno opremo) pri obeh poskusih. Možno tudi, da so se zaradi hitrega tehnološkega napredka v zadnjih letih vozniki v ZDA hitreje in bolje prilagodili prihodu pogojno avtomatiziranih vozil. Glede na trenutne razmere lahko trdimo, da je dodatne pomoči smiselno vključiti v vmesnikih za prevzem vodenja, saj določenemu delu ljudi koristi, drugi pa zaradi tega niso na slabšem.

Rezultati torej prikazujejo, da voznikom v ZDA dodatne pomoči pri prevzemu vodenja ne nudijo dodatnih koristi, saj se primerno odzovejo že zgolj ob zahtevi za prevzem vodenja. V prihodnje bi bilo smiselno analizirati še druge vidike prevzema vodenja od obravnavanih štirih, npr. skupno metriko kot je TOPI (ang. take-over performance index) [13], prečne pospeške in fiziološke kazalnike. Prav tako se lahko pripravi skupen statistični model, ki bo vključeval več dejavnikov in posledično natančneje opisoval stvarnost.

Zahvala

Raziskavo sta delno financirali ARIS v okviru raziskovalnega programa ICT4QoL – Informacijsko komunikacijske tehnologije za kakovostno življenje (P2-0246) in Evropska unija v okviru programa Horizon Europe, projekta FRODDO – Federated cybeR-physical infrastructure for ODD cOntinuity (št. 101147819).

Literatura

[1] SAE International, „J3016_202104: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles“. Pridobljeno: 28. januar 2023. [Na spletu]. Dostopno na: https://www.sae.org/standards/content/j3016_202104/

[2] A. Eriksson in N. A. Stanton, „Takeover Time in Highly Automated Vehicles: Noncritical Transitions to and From Manual Control“, *Hum. Factors*, let. 59, št. 4, str. 689–705, jun. 2017, doi: 10.1177/0018720816685832.

[3] G. Huang in B. J. Pitts, „Takeover requests for automated driving: The effects of signal direction, lead time, and modality on takeover performance“, *Accid. Anal. Prev.*, let. 165, str. 106534, feb. 2022, doi: 10.1016/j.aap.2021.106534.

[4] N. Zangi, R. Srour-Zreik, D. Ridel, H. Chasidim, in A. Borowsky, „Driver distraction and its effects on partially automated driving performance: A driving simulator study among young-experienced drivers“, *Accid. Anal. Prev.*, let. 166, str. 106565, mar. 2022, doi: 10.1016/j.aap.2022.106565.

[5] H. Sanghavi, M. Jeon, C. Nadri, S. Ko, J. Sodnik, in K. Stojmenova, „Multimodal Takeover Request Displays for Semi-automated Vehicles: Focused on Spatiality and Lead Time“, v *HCI in Mobility, Transport, and Automotive Systems*, H. Krömker, Ur., v Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer International Publishing, 2021, str. 315–334. doi: 10.1007/978-3-030-78358-7_22.

[6] D. Shi, T. Wang, Y. Chen, in C. Liu, „Exploring the Effects of Request Time, Secondary Task, and Take-Over Mode on Take-Over Performance“, v *2021 6th International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE 2021)*, Z. Zhang, Ur., v Lecture Notes in Electrical Engineering. Singapore: Springer Nature, 2022, str. 993–1006. doi: 10.1007/978-981-19-2259-6_88.

[7] S. Petermeijer, P. Bazilinskyy, K. Bengler, in J. de Winter, „Take-over again: Investigating multimodal and directional TORs to get the driver back into the loop“, *Appl. Ergon.*, let. 62, str. 204–215, jul. 2017, doi: 10.1016/j.apergo.2017.02.023.

[8] E. Shi in K. Bengler, „Non-driving related tasks' effects on takeover and manual driving behavior in a real driving setting: A differentiation approach based on task switching and modality shifting“, *Accid. Anal. Prev.*, let. 178, str. 106844, dec. 2022, doi: 10.1016/j.aap.2022.106844.

[9] T. Gruden, S. Tomažič, J. Sodnik, in G. Jakus, „A user study of directional tactile and auditory user interfaces for take-over requests in conditionally automated vehicles“, *Accid. Anal. Prev.*, let. 174, str. 106766, sep. 2022, doi: 10.1016/j.aap.2022.106766.

[10] T. Gruden, J. Sodnik, in G. Jakus, „Assisted Partial Take-Over in Conditionally Automated Driving: A User Study“, *IEEE Access*, let. 11, str. 107940–107957, sep. 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3320286.

[11] H. Summala, „American drivers in Europe: Different signing policy may cause safety problems at uncontrolled intersections“, *Accid. Anal. Prev.*, let. 30, št. 2, str. 285–289, mar. 1998, doi: 10.1016/S0001-4575(97)00083-3.

[12] E. E. Miller, S. Hwang, T. Cegovnik, L. N. Boyle, in J. Sodnik, „Takeover response: differences between US and Slovenia“, v *Proceedings of the 11th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications: Adjunct Proceedings*, v AutomotiveUI '19. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, sep. 2019, str. 227–231. doi: 10.1145/3349263.3351322.

[13] S. Agrawal in S. Peeta, „Evaluating the impacts of situational awareness and mental stress on takeover performance under conditional automation“, *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.*, let. 83, str. 210–225, nov. 2021, doi: 10.1016/j.trf.2021.10.002.