Spremljanje slabosti med avtomatizirano vožnjo z dominantno frekvenco elektrogastrograma

Timotej Gruden[1], **Jaka Sodnik**[1]

[1] *Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija*
E-pošta: timotej.gruden@fe.uni-lj.si

Monitoring Sickness during Automated Driving with Dominant Frequency of Electrogastrogram

Motion sickness remains an important barrier to comfort and acceptance in fully automated vehicles, particularly when passengers perform visually demanding non-driving-related tasks. This study investigates whether electrogastrography (EGG) features are associated with the progression of simulator sickness during automated driving. Twenty-six participants completed an approximately 12-minute simulated SAE Level 5 drive while performing a reading task. Simulator Sickness Questionnaire scores were collected before and after the drive. EGG signals were analyzed in overlapping 60-second windows. Dominant frequency (DF), dominant-frequency magnitude, crest factor (CF), and signal amplitude were extracted. For each participant, differences between the first and final quarters of the drive as well as whole-drive temporal slopes were calculated. Associations with changes in total SSQ and nausea subscale scores were evaluated using Spearman's rank correlation. The DF slope showed the strongest association with both total sickness increase (ρ = .624) and nausea increase (ρ = .615). Changes in DF and CF exhibited weaker-to-moderate associations. These findings suggest that the temporal slope of EGG dominant frequency may provide a useful objective indicator of motion-sickness progression, although validation in larger samples is required.

1 Uvod

Prihajajoča popolnoma avtomatizirana vozila bodo vlogo trenutnega voznika spremenila v vlogo potnika, ki lahko čas vožnje nameni branju, delu ali uporabi zaslonov. Prav takšne dejavnosti poleg mnogih prednosti zmanjšujejo potnikovo dojemanje gibanja vozila in povečujejo možnost slabosti med vožnjo zaradi nasprotujočih si informacij, ki prihajajo iz različnih čutil. Slabost zato ni le vprašanje udobja, temveč lahko omejuje učinkovitost avtomatizirane mobilnosti in zmanjšuje uporabni čas med vožnjo. [1, 2, 3].

V raziskavah na temo avtomatizirane vožnje se simptomi pogosto ocenjujejo z vprašalniki, npr. vprašalnik o simulatorski slabosti (ang. Simulator Sickness Questionnaire - SSQ) omogoča standardizirano oceno slabosti kot celote in posameznih simptomov, kot so vrtoglavica, očesni napor ipd. [4]. Žal pa taki vprašalniki navadno ponujajo oceno le tik pred ali neposredno po izpostavljenosti nekemu dalj časa trajajočemu dražljaju, npr. simulaciji. Za pravočasno prilagajanje dinamike vozila, uporabniških vmesnikov ali drugih ukrepov bi potrebovali objektivno fiziološko mero, ki bi omogočala meritve sočasno z napredovanjem simptomov.

Elektrogastrografija (EGG) je metoda za neinvazivno merjenje električne aktivnosti želodca z elektrodami na površini trebuha. Spremembe želodčnega ritma so namreč neposredno povezane s slabostjo tako v realnih kot tudi navideznih okoljih [5, 6, 7]. V večini dosedanjih raziskav na temo uporabe EGG v vozilih so raziskovalci primerjali zgolj daljša časovna obdobja, ki obsegajo vsako vožnjo kot celoto. V predhodni obravnavi tega eksperimenta smo s kratkočasovno spektralno analizo pokazali premike dominantne frekvence (DF) in zmanjšanje prevladujočih vrhov v spektru (ang. Crest factor – CF), vendar je analiza temeljila le na manjšem številu udeleženih oseb, pri katerih je bila slabost najbolj opazna. [8].

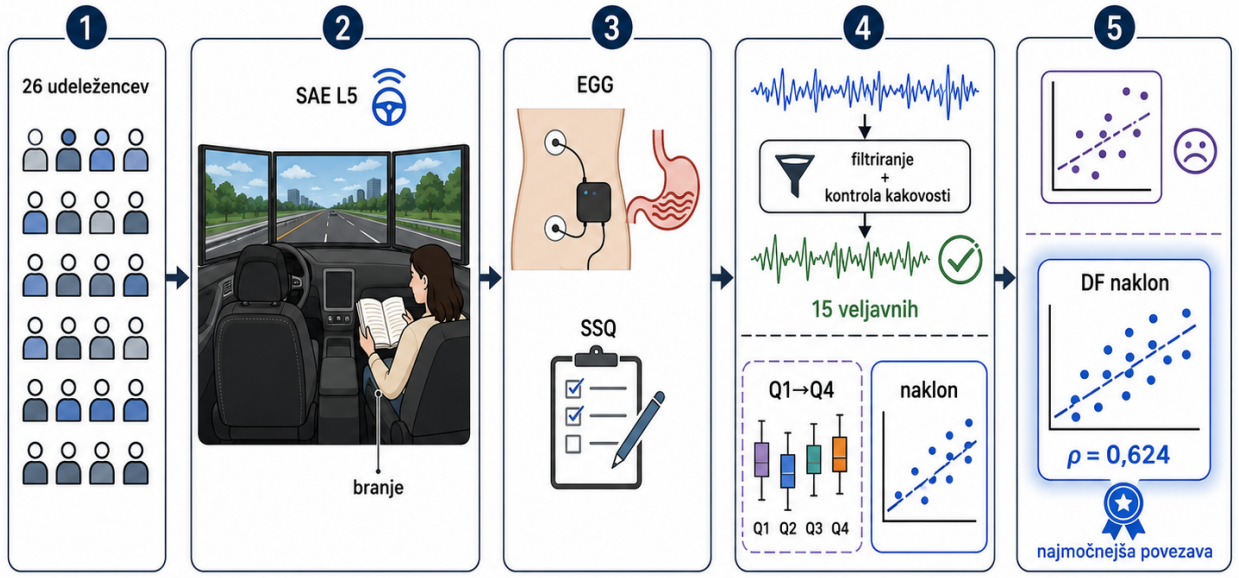
V tem delu (1) analizo opravimo na večjem številu udeležencev v simulatorju vožnje, ne glede na rezultat SSQ, (2) razlike med EGG značilkami na koncu in na začetku vožnje izračunamo kot razlike med medianami vseh vrednosti v zadnji oz. v prvi četrtini vožnje ter (3) dodajamo dinamično analizo naklona posameznih značilk skozi čas tekom celotne vožnje. Glavno raziskovalno vprašanje tega prispevka je, ali je naklon dominantne frekvence EGG skozi čas monotono povezan s spremembo slabosti ter ali je ta povezava izrazitejša od povezav z razlikami med začetkom in koncem vožnje.

Na podlagi predhodnih opažanj smo vnaprej pričakovali pozitivno povezanost med naklonom DF in slabostjo ter negativno povezanost med CF in slabostjo, saj zmanjšanje CF pomeni zmanjšanje izrazitega vrha v spektru EGG signala. Tretje, metodološko pričakovanje je bilo, da bo absolutna vrednost povezave pri časovnem naklonu večja kot zgolj pri razliki med meritvami v zadnji (Q4) in v prvi (Q1) četrtini vožnje, saj naklon zajame celoten potek vožnje. Potek raziskave je grafično prikazan na sliki 1

2 Metodologija

2.1 Uporabniška študija

V študiji je sodelovalo 26 oseb, vsak udeleženec je podal obveščeno soglasje k raziskavi, raziskavo je odobrila



Slika 1: Grafična predstavitev poteka raziskave.

pristojna etična komisija Univerze v Ljubljani. Vožnja je potekala v simulatorju s tremi velikimi zasloni, improviziranо notranjostjo vozila (volan, armaturna plošča, multimedijski sistem) in premično platformo. Vnaprej posneta, približno 12-minutna trasa vožnje je vključevala avtocestni, mestni in podeželski odsek. Vozilo je bilo avtomatizirano do 5. stopnje po lestvici SAE; udeleženci torej niso upravljali z volanom ali pedali, med vožnjo so le reševali nalogo bralnega razumevanja. Za izvedbo simulacije smo uporabili programsko okolje SCANeR Studio (AVSimulations, Boulogne-Billancourt, Francija).

2.2 Subjektivno merjenje slabosti

Vsak izmed udeležencev je izpolnil vprašalnik SSQ neposredno pred vožnjo in po njej. Za vsakega udeleženca smo izračunali rezultate po posameznih podlestvicah, skupni rezultat in spremembo rezultata med koncem in začetkom vožnje.

Za primerjavo z objektivnimi kazalniki slabosti (EGG) smo uporabili spremembo skupnega rezultata $\Delta SSQ_{\text{skupaj}}$, ter spremembo podlestvice slabosti, $\Delta SSQ_{\text{slabost}}$. Pozitivna vrednost pomeni poslabšanje simptomov.

2.3 Zajem in obdelava EGG signala

EGG smo z napravo BITalino (PLUX biosignals, Lizbona, Portugalska) med celotno vožnjo merili s tremi elektrodami – eno referenčno in dvema za diferencialen zajem enega kanala signala. Frekvenco vzorčenja smo nastavili na 1000 Hz, ker smo z isto napravo hkrati merili še druge signale, ki pa niso predmet trenutne raziskave.

Vzorce izven uporabnega območja 10-bitnega analogno-digitalnega pretvornika smo označili kot neveljavne; poleg tega smo odstranili tudi šest sekund pred in po vsakem odseku neveljavnih vzorcev, da smo zmanjšali vpliv prehodnega pojava. Veljavne segmente zajetega signala smo decimirali na 2 Hz in filtrirali z Butterworthovim sitom tretjega reda s prepustnim območjem med 0,0167 in 0,167 Hz oziroma med 1 in 10 cikli na minuto (cpm).

Veljavne odseke signala smo razdelili v 60-sekundna okna s 50-sekundnim prekrivanjem, torej s korakom po 10 s. Za vsako okno smo izračunali efektivno vrednost signala (RMS), dominantno frekvenco (DF), moč spektralne komponente pri DF (DFmag) in faktor prisotnosti enega vrha v spektru (ang. Crest factor – CF). DF je frekvenca največje spektralne komponente, CF pa je izračunan kot razmerje med največjo in povprečno spektralno močjo v analiziranem pasu. Manjši CF torej pomeni, da je moč signala razpršena skozi širše spektralno območje, ne pa v prevladujočem vrhu okoli dominantne frekvence.

Kot merilo kvalitete zajetega signala, pod katerim pogojem smo meritev posameznega udeleženca vključili v nadaljnjo analizo, smo izbrali:

- vsaj 60% veljavnih oken,
- vsaj 1 veljavno okno v prvi četrtini vožnje,
- vsaj 1 veljavno okno v zadnji četrtini vožnje.

Merilo je izpolnilo 15 od 26 udeležencev. Za vsako značilko smo izračunali mediano v prvi ($Q1$) in zadnji četrtini ($Q4$) ter razliko $\Delta x = x_{Q4} - x_{Q1}$. Naklone DF, DFmag in CF smo ocenili s prilagoditvijo linearne funkcije na vrednosti posamezne značilke skozi vsa veljavna okna glede na čas od začetka vožnje. Izračunani naklon tako predstavlja trend spreminjanja značilke posameznega udeleženca skozi celotno vožnjo in ne obravnava močno prekrivajočih se oken kot neodvisna opazovanja. Pozitiven naklon DF pomeni postopno premikanje najmočnejše spektralne komponente proti višjim frekvencam.

2.4 Statistična analiza

Za mero povezanosti med izmerjenimi EGG značilkami in slabostjo, izmerjeno s standardiziranim vprašalnikom, smo uporabili Spearmanov korelacijski koeficient ρ. Ker je vzorec majhen in porazdelitve niso nujno normalne, je

Tabela 1: Izmerjene vrednosti značilk EGG in spremembe skupnega rezultata SSQ po udeležencih.

ID	ΔRMS [μV]	ΔDF [cpm]	Naklon DF [cpm/min]	ΔDFmag [μV^2]	Naklon DFmag [μV^2/min]	ΔCF –	Naklon CF [min^{-1}]	ΔSSQ –
095	6.25	0.72	0.0493	0.034	0.0364	-2.472	-0.1769	11.22
099	-6.01	3.44	0.1683	-0.281	-0.0048	0.574	0.1201	11.22
101	-4.63	1.13	0.1088	-0.555	-0.0705	-0.924	0.0286	11.22
103	-1.54	-0.19	-0.0002	-0.097	-0.0073	-0.560	-0.0524	7.48
104	18.99	-0.44	0.0095	0.717	0.0296	0.780	0.0076	11.22
105	4.60	0.41	-0.0167	0.099	0.0086	-0.123	0.0215	0.00
106	13.14	0.75	0.0557	0.148	0.1306	-0.849	-0.0479	14.96
108	10.07	-0.36	0.0048	0.162	0.0080	-2.992	-0.2654	52.36
109	-1.45	0.31	0.0324	-0.211	-0.0391	-2.008	-0.1429	3.74
111	1.50	-0.22	-0.0348	0.018	0.0157	-1.533	-0.1085	0.00
113	11.76	-0.88	-0.0944	1.985	0.2615	2.364	0.1831	-3.74
114	4.24	-0.25	-0.1203	0.028	0.1907	-0.353	-0.0107	-3.74
115	6.31	-0.50	-0.0841	0.172	0.0233	0.213	0.0754	11.22
116	5.28	-0.59	-0.1126	0.452	0.0871	1.674	0.1138	3.74
117	-1.33	0.22	0.0150	-0.465	0.0473	-0.597	-0.0893	3.74
Povprečje	4.477	0.235	-0.0013	0.147	0.0478	-0.454	-0.0229	8.98
Mediana	4.595	-0.188	0.0048	0.034	0.0233	-0.560	-0.0107	7.48
Std.	6.990	1.052	0.0809	0.602	0.0875	1.467	0.1216	13.40

pričakovana povezava lahko monotona brez stroge linearnosti. Za vsako povezavo smo izračunali še dvostransko p-vrednost, permutacijsko p-vrednost s 5000 permutacijami ter 95-odstotni interval zaupanja s 3000 ponovitvami.

3 Rezultati

Opisna statistika pridobljenih rezultatov je podana v tabeli 1. Smer spremembe in naklona dominantne frekvence je bila med udeleženci skoraj enakomerno razdeljena (pri 7 se je DF povečala, pri 8 pa zmanjšala). Nasprotno se je CF od prvega do zadnjega kvartila zmanjšal pri 10 od 15 udeležencih. Že ta opis kaže, da univerzalnega premika DF ni, pomembnejše je torej, ali se razlike v trendu ujemajo z razlikami v simptomih slabosti.

3.1 Primerjava prve in zadnje četrtine vožnje

Med obravnavanimi razlikami v EGG se je kot najmočneje povezana s podlestvico slabosti izkazala sprememba dominantne frekvence ΔDF. Spearmanov koeficient je znašal $\rho = 0{,}436$, 95-odstotni interval zaupanja pa $[-0{,}168;\ 0{,}849]$. Permutacijski test sicer ni dosegel običajne meje statistične pomembnosti ($p_{\mathrm{perm}} = 0{,}103$), vendar rezultat nakazuje, da se je udeležencem z večjo slabostjo povečala tudi dominantna frekvenca EGG. Povezanost med ΔDF in spremembo skupnega rezultata SSQ je bila šibkejša, ($\rho = 0{,}293$, 95-odstotni interval zaupanja $[-0{,}234;\ 0{,}739]$, $p_{\mathrm{perm}} = 0{,}280$).

ΔCF se je zmanjšal s povečanjem slabosti. Za skupni rezultat SSQ je korelacija znašala $\rho = -0{,}350$ (95-odstotni interval zaupanja $[-0{,}778;\ 0{,}241]$, $p_{\mathrm{perm}} = 0{,}204$), za podlestvico slabosti pa $\rho = -0{,}303$ (95-odstotni interval zaupanja $[-0{,}773;\ 0{,}349]$, $p_{\mathrm{perm}} = 0{,}279$). Negativna smer povezave pomeni, da je bilo večje povečanje simptomov slabosti povezano z večjim zmanjšanjem CF oziroma z manj izrazitim posameznim vrhom v spektru EGG signala. Takšen rezultat je skladen s povečano spektralno razpršenostjo ob močnejši slabosti, vendar široki intervali zaupanja kažejo na precejšnjo negotovost ocene.

Razlika efektivne vrednosti signala ΔRMS je bila šibko pozitivno povezana s spremembo skupnega SSQ ($\rho = 0{,}261$, $p_{\mathrm{perm}} = 0{,}343$), medtem ko povezave s podlestvico slabosti praktično ni bilo ($\rho = 0{,}063$, $p_{\mathrm{perm}} = 0{,}829$). Sprememba moči dominantne frekvence ΔDF_{mag} prav tako ni pokazala opazne povezanosti s skupnim SSQ ($\rho = 0{,}061$) ali s podlestvico slabosti ($\rho = -0{,}131$).

Rezultati razlik med kvartiloma torej kažejo predvsem dve smerno smiselni povezavi: povečanje dominantne frekvence je bilo povezano z večjim porastom simptomov, zmanjšanje faktorja vrha pa z večjo subjektivno slabostjo. Nobena od teh povezav pri analiziranem vzorcu ni dosegla statistične značilnosti po permutacijskem testu.

3.2 Naklon izmernenih značilk EGG signala

Najizrazitejši rezultat analize je bila pozitivna korelacija med naklonom dominantne frekvence in spremembo skupnega rezultata SSQ. Spearmanov koeficient je znašal $\rho = 0{,}624$, 95-odstotni interval zaupanja $[0{,}182;\ 0{,}877]$, običajna vrednost $p = 0{,}013$, permutacijska vrednost pa $p_{\mathrm{perm}} = 0{,}014$. Podobna povezanost je bila ugotovljena tudi za spremembo podlestvice slabosti, kjer je bilo $\rho = 0{,}615$, 95-odstotni interval zaupanja $[0{,}215;\ 0{,}836]$, $p = 0{,}015$ in $p_{\mathrm{perm}} = 0{,}019$. Rezultat kaže, da je bilo pri udeležencih z večjim porastom simptomov prisotno izrazitejše naraščanje dominantne frekvence EGG skozi čas. Naklon DF je bil tako bolj povezan s subjektivno slabostjo kot sama razlika dominantne frekvence med četrtim in prvim kvartilom. To nakazuje, da lahko trend vsebuje več informacij o razvoju simptomov kot primerjava dveh ločenih delov vožnje.

Naklon CF je bil šibko negativno povezan s spremembo skupnega SSQ ($\rho = -0{,}237$, 95-odstotni interval zaupanja $[-0{,}708;\ 0{,}350]$, $p_{\mathrm{perm}} = 0{,}402$) in s spre-

membo podlestvice slabosti ($\rho = -0{,}169$, 95-odstotni interval zaupanja $[-0{,}703;\ 0{,}514]$, $p_{\mathrm{perm}} = 0{,}551$). Smer povezave je bila skladna z rezultati razlik med kvartiloma, vendar je bila njena velikost manjša.

Naklon moči dominantne frekvence je bil šibko negativno povezan s skupnim rezultatom SSQ ($\rho = -0{,}288$, $p_{\mathrm{perm}} = 0{,}294$) in s podlestvico slabosti ($\rho = -0{,}335$, $p_{\mathrm{perm}} = 0{,}224$). Intervali zaupanja so pri obeh povezavah vključevali nič, zato rezultatov ni mogoče interpretirati kot zanesljiv učinek.

Med vsemi analiziranimi značilkami je samo naklon dominantne frekvence izkazal statistično pomembno povezanost z obema izidoma SSQ. Rezultat nakazuje na možnost uporabo kratkočasovne analize EGG in kaže, da sta smer in hitrost spreminjanja dominantne frekvence med vožnjo lahko primernejša kazalnika razvoja slabosti kot posamezne absolutne vrednosti ali zgolj razlika med začetkom in koncem vožnje.

4 Razprava

Analiza kaže, da naklon DF povzema fiziološko napredovanje slabosti bolje od preproste razlike med začetkom in koncem vožnje. Razlika med medianama prve in zadnje četrtine vsebuje informacijo le dveh delov signala in ne upošteva vmesnega poteka. Naklon po drugi strani združi vsa veljavna okna, zato je manj odvisen od manjših lokalnih sprememb in neposredno opisuje smer spremembe čez celotno vožnjo. Dejstvo, da je mediana naklona DF med posameznimi udeleženci blizu nič, hkrati pa je njegova povezava s SSQ močna, je prav tako pomembno: DF se očitno ne spreminja enako pri vseh, temveč je smer in hitrost premika povezana z intenzivnostjo simptomov.

Rezultati dopolnjujejo predhodno analizo štirih udeležencev z izrazitejšo slabostjo, pri kateri sta bila opažena povečanje DF in zmanjšanje CF [8]. V trenutnem (širšem) vzorcu začetno-končni spremembi ohranita pričakovani smeri povezav, vendar sta šibkejši in manj natančni. Negativna povezava ΔCF je fiziološko smiselna, saj manjši CF pomeni, da spekter ni več osredotočen okoli enega izrazitega vrha.

Frekvenčni pas za analizo je obsegal 1–10 cpm, običajni želodčni ritem pa se praviloma pojavlja v ožjem delu tega območja. Pozitiven naklon DF lahko zato odraža postopno premikanje prevladujoče aktivnosti proti hitrejšim komponentam, kar je skladno ugotovitvami prejšnjih raziskav [5, 6, 7].

Tudi za praktično uporabo je naklon DF zanimiv zato, ker ga je mogoče ocenjevati sproti v drsečem časovnem oknu. Potencialni sistem v vozilu bi lahko zaznal pozitiven trend in ga združil z dinamiko vozila, dejavnostjo potnika ali drugimi fiziološkimi signali. Sedanja analiza sicer še ne določa praga za zaznavo in ni napovedni model, pokaže pa, katera oblika analize EGG signala je primerna za nadaljnjo obravnavo.

Pri interpretaciji velja opozoriti tudi na nekaj omejitev same raziskave. 1) DF je predstavljena kot največji vrh v spektru signala. Če se moč razdeli med več bližnjih komponent, kjer lahko DF navidezno preskoči med njimi, CF pa se zmanjša. Smiselna fiziološka razlaga zato temelji na skupni obravnavi DF, CF in kakovosti signala, ne na eni sami spektralni vrednosti. 2) Majhen vzorec zgolj 15 uporabnih signalov zaradi metodoloških omejitev EGG (velika občutljivost na premike) lahko povzroči pristranskost, še posebej če sta gibanje telesa in slabost povezana z verjetnostjo artefaktov. 3) SSQ je bil izmerjen le pred in po vožnji, zato ne poznamo dejanskega časa nastopa simptomov in ne moremo zanesljivo pokazati, ali se je sprememba DF zgodila pred subjektivno zaznanim poslabšanjem.

Nadaljnje raziskave naj vključujejo večji vzorec, sprotno čim manj invazivno subjektivno ocenjevanje ter modele z naključnimi učinki, ki bi uporabili celoten časovni potek in eksplicitno obravnavali manjkajoča okna.

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] C. Diels *idr.*, "Motion sickness in automated vehicles: Principal research questions and the need for common protocols," *SAE Int. J. Connected Autom. Veh.*, vol. 5, no. 2, 2022, doi: 10.4271/12-05-02-0011.

[2] W. Emond, D. Bohrmann, in M. Zare, "Will visual cues help alleviating motion sickness in automated cars? A review article," *Ergonomics*, vol. 67, no. 6, pp. 772–800, 2024, doi: 10.1080/00140139.2023.2286187.

[3] I. Yunus *idr.*, "A review of vehicle dynamics and control approaches for mitigating motion sickness in autonomous vehicles," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 132990–133024, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3592407.

[4] R. S. Kennedy *idr.*, "Simulator Sickness Questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness," *Int. J. Aviation Psychol.*, vol. 3, no. 3, pp. 203–220, 1993, doi: 10.1207/s15327108ijap0303_3.

[5] T. Gruden *idr.*, "Electrogastrography in autonomous vehicles—An objective method for assessment of motion sickness in simulated driving environments," *Sensors*, vol. 21, no. 2, art. 550, 2021, doi: 10.3390/s21020550.

[6] N. B. Popović *idr.*, "Lessons learned: Gastric motility assessment during driving simulation," *Sensors*, vol. 19, no. 14, art. 3175, 2019, doi: 10.3390/s19143175.

[7] D. W. Kim, C. Ryu, in S. I. Lee, "Usefulness of a developed four-channel EGG system with running spectrum analysis," *Yonsei Med. J.*, vol. 41, pp. 230–236, 2000, doi: 10.3349/ymj.2000.41.2.230.

[8] T. Gruden, S. Stančin, in J. Sodnik, "Observing motion sickness progression in fully automated vehicles with electrogastrography," *ICIST 2026 Proceedings*, 2026, v tisku.