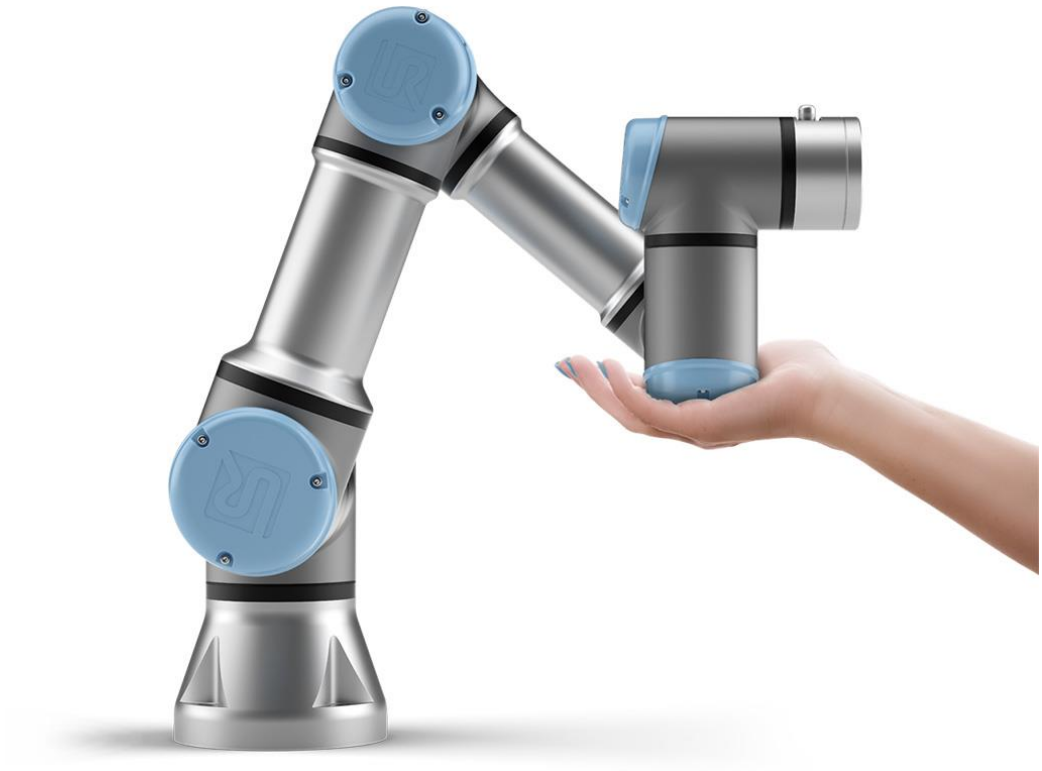


SEMINARJI PRI PREDMETU
KOMPLEKSNI MERILNI SISTEMI
2023/2024

Fakulteta za elektrotehniko

Univerza v Ljubljani

SEMINARJI PRI PREDMETU KOMPLEKSNI MERILNI SISTEMI

Študijsko leto: 2023/24

Uredil: Gregor Geršak

Laboratorij za metrologijo in kakovost

Ljubljana, januar 2024

PREDGOVOR

V študijskem letu 2023/24 je šestnajst študentov premislilo, raziskalo, opisalo in predstavilo vrsto projektnih nalog s področja merjenja. Izbrane tematike so temeljile na njihovih hobijih, strasteh, izkušnjah, zanimanjih ali trenutnih idejah. Vsako temo so študenti preučili z metrološkega stališča, si zamislili, na kakšen način bi izbrano veličino posredno merili, kakšne merilne instrumente bi pri tem potrebovali. Raziskali so, kakšno točnost potrebujejo taki instrumenti, velikokrat pa tudi ali primerni merilni instrumenti sploh že obstojijo. Meroslovno so obdelali in ocenili posamezne prispevke celotni merilni negotovosti in študirali vplivne veličine. Poudarek njihovega dela je gradnja modela meritve in posledično izračun merilne negotovosti. Svoja dognanja so s Pecha Kucha predstavitvijo predstavili sošolcem, napisali povzetek v obliki znanstvenega članka in pripravili promocijsko pasico svojega seminarja.

Tudi letos so se študenti izredno izkazali in s sodelovanjem prof. dr. Janka Drnovška, prof. dr. Jovana Bojkovskega in prof. dr. Gregorja Geršaka dokazali, da so tematike njihovih projektov pri predmetu Kompleksni merilni sistemi sveže, aktualne in zelo kompleksne.

Gregor Geršak

VSEBINE SEMINARJEV PRI PREDMETU KOMPLEKSNI MERILNI SISTEMI

2023/2024

ŠTUDENT	TEMATIKA SEMINARJA
Alič, Gregor	Koncentracija CO_2
Avsec, Oliver	Izgorelost športnika
Baras, Boštjan	Kvaliteta računalniške miške
Hauptman, Anamarija	Nadležnost zvonjenja cerkvenih zvonov
Holcer, Alen	Merjenje moške plešavosti
Jezernik, Gašper	Položaj drona
Kranjec, Jan	Učinkovitost avtonomnega kirurškega sistema
Lorbek Ivančič, Dan	Težavnost robotske naloge
Makovec Martin	Učinkovitost integracije kobota v industriji
Petrovčič, Maruša	Obrabljanje cestišča
Primšar, Blaž	Zaupanje v spletno trgovino
Reshkov, Ivan	Vpliv inteligentnih robotov na družbo
Štrumbelj, Lavra	Navijaško vzdušje
Verdev, Žan	Merjenje povezanosti nogometne ekipe
Yudin, Alexey	Merjenje lenobe
Založnik, Izidor	Kakovost drv
Mohorčič, Matej	Model vrednotenja podjetja

Merjenje koncentracije ogljikovega dioksida iz temperature in vlažnosti

Gregor Alič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: gregor372@gmail.com

Povzetek. Že dolgo časa je znano, da količina ogljikovega dioksida v prostoru negativno vpliva na kognitivno funkcijo ljudi. Žal pa so merilniki tega plina zelo dragi, zato v veliko primerih niso primerni za vgraditev v prostore. Ravno nasprotno pa velja za merilnike vlage in temperature in jih zato lahko vgradimo v praktično katerikoli prostor. V tem članku bom predstavil pilotno študijo, kjer bom poskusil iz vlažnosti in temperature napovedati količino CO2 v prostoru. Predstavil bom svoje podatke in model, ki je najbolj primeren za ta problem. Poleg tega bom tudi predlagal nekaj možnih razširitev tega modela, ki bi omogočala še večjo robustnost napovedi.

Ključne besede: ogljikov dioksid, vlaga, temperatura, merjenje CO2

1 UVOD

Kognitivna zmogljivost ljudi je ena izmed tistih stvari, ki si jih vsi želimo izboljšati. Pa naj bo to s pomočjo izobraževanja, hobijev ali pa na kakšen drug način. Ena izmed presenetljivih dejavnikov, ki vplivajo na našo kratkoročno kognitivno zmogljivost pa je količina ogljikovega dioksida v prostoru [1], [2]. Pri 1400 delcih CO2 na miljon delcev naj bi se naša kognitivna zmogljivost zmanjšala za kar 25%, kompleksno strateško razmišljanje pa kar za 50% [3]. Za primerjavo, 1400 delcev na miljon (*parts per million - ppm*) ali celo slabše je velikokrat koncentracija ogljikovega dioksida v slabo ventiliranih prostorih.

2 IDENTIFIKACIJA PROBLEMA

Kljub temu, da količina ogljikovega dioksida lahko tako močno vpliva na našo zmožnost razmišljanja, pa se ta faktor meri le poredko. Zato so velikokrat učenci v šolah, zaposleni v pisarnah in pa celo vozniki avtomobilov in motorjev izpostavljeni povišanim ravnem CO2.
Razlog zato seveda leži v ceni merilnikov. Te se namreč gibljejo nekje okrog 100 €, za dražje merilnike pa je seveda treba odšteti tudi več kot 200 €.
Popolno nasprotje tega pa so merilniki temperature in relativne vlage. Take senzorje se lahko kupi le za nekaj evrov in se jih zato lahko vgradi v praktično katerikoli prostor, ne da bi nas skrbelo za ceno.

Moja ideja je, da bi preko merjenja temperature in relativne vlage poskusili oceniti količino ogljikovega dioksida v prostoru. Ko je oseba diha v prostoru, poleg izdihanega ogljikovega dioksida izdiha tudi veliko vlage in seveda s svojim telesom segreva sobo. Tudi če je v sobi več oseb, bo vsaka izmed oseb prispevala k vsem trem merjenim vrednostim. Prav tako bo odpiranje okna znižalo CO2 in relativno vlažnost. Kako močno so te tri vrednosti kolerirane bomo preverili v nadaljevanju.

Če moja hipoteza drži, bi tako lahko v osnovne šole, vse prostore v hišah, pisarne in pa celo avtomobile ali pa motoristične čelade vgradili izredno cenovno ugodne merilnike, preko katerih bi lahko ocenili količino ogljikovega dioksida v nekem prostoru. Tako bi zvišali kognitivno sposobnost, počutje, v primeru avtomobilov pa celo varnost vseh prebivalcev.

3 PREDPOSTAVKE

Ker je ta raziskava le pilotna študija, bo vsebovala veliko količino predpostavk:

- Dobljeni koeficienti modela so veljavni le specifično za mojo sobo
- Podatki so bili zbrani le v zimskem obdobju, kar močno vpliva na zunanjo temperaturo in vlago
- V prostoru ni bilo nobenih dodatnih grelnikov ali pa razvlaževalcev, ki bi vplivali na izmerjene vrednosti

Za podrobnejše raziskave in implementacijo, bi bilo potrebno izbrati kompleksnejše modele, ki bi se lahko izognili takim predpostavkam.

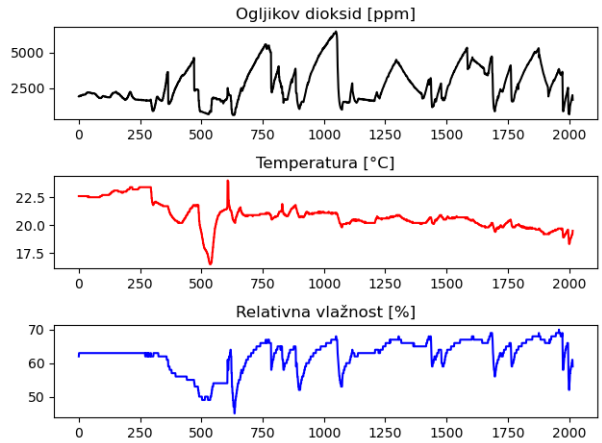
4 MERILNE VELIČINE

Poleg koncentracije ogljikovega dioksida, ki jo bom označil s črko C, sem se odločil za merjenje štirih veličin:

- Notranja temperatura T_N
- Notranja relativna vlažnost H_N
- Zunanja temperatura T_Z
- Zunanja relativna vlažnost H_Z

Kot že omenjeno, sta T_N in H_N močno povezana s količino ogljikovega dioksida. Na njih pa vplivata tudi zunanja relativna vlaga in temperatura.
Žal pa za T_Z in H_Z nisem uspel pridobiti dovolj dobrih podatkov, zato sem jih v končnem modelu izpustil.

5 Podatki



Slika 1: Podatki, pridobljeni med 12. in 19. decembrom. Iz grafov za temperaturo in vlažnost želimo napovedati zgornji graf.

5.1 Statistična analiza

Ko sem pridobil podatke (slika 1) sem najprej izvedel kratko statistično analizo. Zanimala me je predvsem korelacijska matrika, ki jo lahko vidimo v tabeli 1.
Iz korelacijske matrike je jasno videti, da sta reativna vlažnost in koncentracija ogljikovega dioksida zelo povezani veličini.

	Temperatura	Vlažnost	CO2
Temperatura	1,000000	0,105958	-0,069664
Vlažnost	0,105958	1,000000	0,598799
CO2	-0,069664	0,598799	1,000000

Tabela 1: Korelacijska matrika

6 Model

Glede na statistično analizo sem zato predpostavil enostaven linearni model:

$$C = A_1 T_N + A_2 H_N + A_3 T_Z + A_4 H_Z + B \qquad (1)$$

V tej enačbi so A_1, A_2, A_3, A_4 in B koeficienti, ki jih dobimo z linearno regresijo.

Koeficient	Vrednost
A_1	-0,01865421
A_2	0,07210854
B	3,70453452

Tabela 2: Koeficienti, pridobljeni s pomočjo linearne regresije

Kmalu za tem pa sem ugotovil, da se podatkom za koncentracijo ogljikovega dioksida bolje prilagaja eksponentna skala, saj so podatki med 0 ppm pa vse do 10 000 ppm.
Svoj preprosti linearni model sem zato izboljšal na sledeči način:

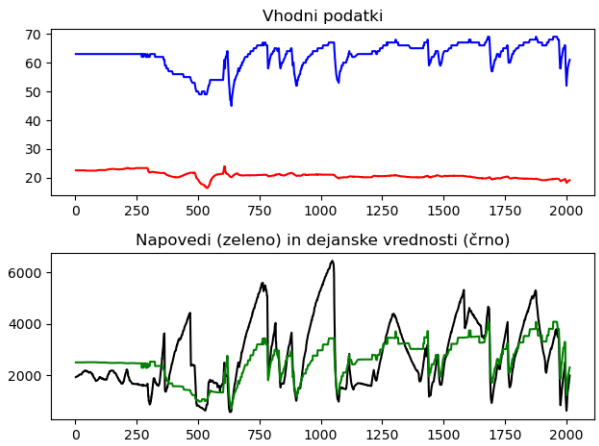
$$C = \exp\left(A_1 T_N + A_2 H_N + A_3 T_Z + A_4 H_Z + B\right) \qquad (2)$$

Kot se že omenil, pa mi ni uspelo pridobiti kvalitetnih podatkov za zunanjo temperaturo in vlažnost, zato sem ta dva člena v modelu izpustil.

7 Rezultati

S pomočjo linearne regresije, mi je uspelo dobiti vrednosti koeficientov, ki so vidni v tabeli 2.

Z dobljenimi koeficienti sem nato preizkusil rezultate na množici podatkov. Te sem izrisal na sliki 2.



Slika 2: Napovedi in resnični podatki, dobljeni z modelom 2

Kot vidimo napovedane vrednosti relativno dobro sledijo trendom. Ko rastejo resnične vrednosti, rastejo tudi napovedane. Podobno skupaj resnične in napovedane meritve tudi padajo.
Seveda se resnične in napovedane vrednosti ne ujemajo vedno, kot lahko vidimo v okolici 1000. točke na sliki 2. Vendar pa napovedane vrednosti zelo dobro pokažejo, kdaj se je količina ogljikovega dioksida dvignila na previsoko raven.
Na testni množici je srednja absolutna napaka oziroma MAE 783 ppm. Vrednost koeficienta R^2 pa je $0,40$.

8 Negotovost

8.1 Izračun negotovosti

Poglejmo še negotovost, ki izhaja iz merjenja. Iz specifikacij merilnika Aranet 4, lahko vidimo, da je temperatura izmerjena na $\pm 0,3$°C natančno, relativna vlažnost pa na $\pm 3\%$ natančno. Ker več podatkov o napaki nimamo, moramo predpostaviti kvadratno porazdelitev. Standardna negotovost takšne meritve je $u = \frac{a}{\sqrt{3}}$. Iz zgornje enačbe tako dobimo standardno negotovost za temperaturo in vlažnost (enačba 3).

$$\begin{aligned} u(T) &= \frac{a_T}{\sqrt{(3)}} = 0,173°\text{C} \\ u(H) &= \frac{a_H}{\sqrt{3}} = 1,73\% \end{aligned} \tag{3}$$

Za izračun kombinirane standardne negotovosti pa potrebujemo še vrednosti občutljivnostnih koeficientov c_T in c_H. Vrednosti le-teh pridobimo s parcialnim odvajanjem našega modela po spremenljivkah T_N in H_N (enačba 4).

$$\begin{aligned} c_T &= \frac{\delta C}{\delta T} = A_1 \exp\left(A_1 T + A_2 H + B\right) \\ c_H &= \frac{\delta C}{\delta H} = A_2 \exp\left(A_1 T + A_2 H + B\right) \end{aligned} \tag{4}$$

Kombinirano standardno negotovost lahko sedaj s pomočjo enačb 3 in 4 izračunamo po enačbi 5.

$$u_c(C) = \sqrt{(c_T u(T))^2 + (c_H u(H))^2} \tag{5}$$

8.2 Primeri

Najprej si za prvi primer poglejmo vhodne podatke, ki so bili izmerjeni pri nizki koncentraciji ogljikovega dioksida in izračunajmo popolni merilni rezultat.

$$\begin{aligned} T = 19,5°\text{C}, H &= 50\% \\ c_T = -19,4, c_H &= 74,9 \\ u_c(C) &= 130\text{ppm} \end{aligned} \tag{6}$$

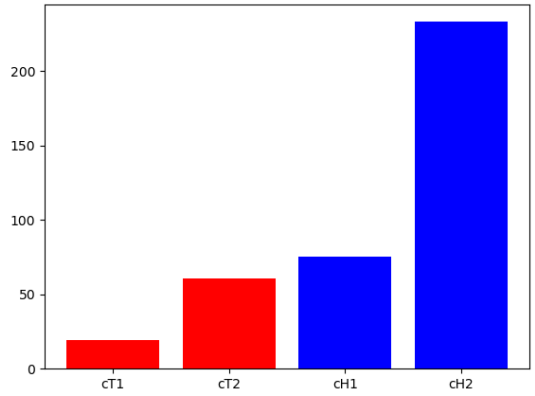
$$C = 1039\text{ppm} \pm 130\text{ppm}$$

Poglejmo si še primer pri visoki koncentraciji ogljikovega dioksida.

$$\begin{aligned} T = 20,5°\text{C}, H &= 66\% \\ c_T = -60,3, c_H &= 233,2 \\ u_c(C) &= 403\text{ppm} \end{aligned} \tag{7}$$

$$C = 3233\text{ppm} \pm 403\text{ppm}$$

Kot lahko vidimo iz histograma koeficientov (slika 3) nam pri meritvah največjo negotovost prispeva meritev relativne vlažnosti. To je smiselno, saj je merilnik natančen le na $\pm 3\%$, koeficient A_2 pa ima veliko višjo vrednost kot A_1.



Slika 3: Histogram občutljivostnih koeficientov

Iz popolnih meritev za oba primera pa vidimo, da je kombinirana standardna negotovost za našo uporabo relativno majhna.

9 Uporabnost modela

Kot smo že videli model ni popolnoma natančen. Iz izračunov v enačbah 6 in 7 vidimo, da je napaka hitro večja kot 100ppm. Poleg tega smo na testni množici videli, da je povprečna absolutna napaka modela dosegla vrednost 783ppm.
Pa je model zato neuporaben? Odgovor je seveda ne. Namen vsakega merjenja je namreč odločanje. V našem primeru se odločamo, ali je koncentracija ogljikovega dioksida v nekem prostoru dosegla kritično mejo. V tem primeru nato odpremo okno in prezračimo prostor. Predstavljeni model je seveda zmožen vsaj približno oceniti koncentracijo ogljikovega dioksida, kar je za naše potrebe popolnoma dovolj. Najboljša implementacija je po mojem mnenju merilnik, ki odda signal, ko koncentracija CO2 v prostoru doseže neko alarmno mejo, recimo 2000ppm.

Kot že omenjeno, je to le pilotna študija in je na tem področju potrebno še veliko raziskav, da bodo meritve bolj robustne. Kljub temu pa menim, da je možnost uporabe relativne vlažnosti in temperature kot indikatorjev koncentracije CO2 popolnoma realna.

Literatura

[1] Du, Bowen, et al. *Indoor CO2 concentrations and cognitive function: A critical review*, Indoor air 30.6 (2020): 1067-1082.
[2] Allen, Joseph G., et al. *Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: a controlled exposure study of green and conventional office environments*, Environmental health perspectives 124.6 (2016): 805-812.
[3] Karnauskas, K. B., et al. *Fossil fuel combustion is driving indoor CO2 toward levels harmful to human cognition*, GeoHealth (2020)

Meritev pozicije drona

Gašper Jezernik

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija.
E-pošta: gasper.jezernik001@gmail.com

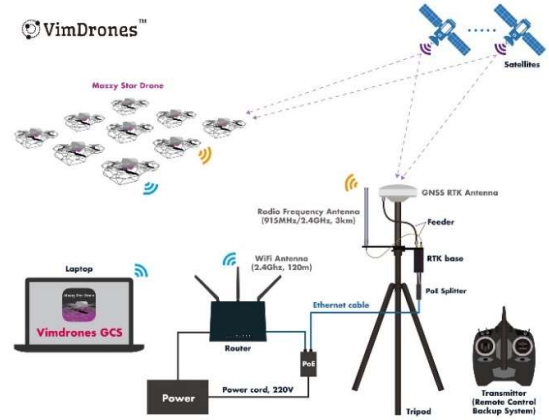
Povzetek. V članku smo se osredotočili na določanje pozicije dronov, ki jih uporabljamo za prikazovanje svetlobnih animacij. Identificirali smo težavo, kjer trenutni sistem za natančno določanje pozicije dronov predstavlja visoke stroške. Zato smo se odločili pozicijo drona določiti z matematičnim modelom in uporabo že vgrajenih senzorjev. Predstavili smo matematični model, ki združuje relativne in absolutne meritve ter obravnava problematiko napak pri integraciji relativnih senzorjev. Cilj modela je s pomočjo vgrajenih senzorjev zmanjšati negotovost meritve pozicije GNSS modula.
Ključne besede: dron, GPS, IMU, pozicija.

Drone position measurement

In this article, we focus on the positioning of drones used to display light animations. We identified a problem where the current system for accurate drone positioning is costly. We therefore decided to determine the position of the drone using a mathematical model and using the sensors already built in. We presented a mathematical model that combines relative and absolute measurements and addresses the problem of errors in the integration of relative sensors. The aim of the model is to reduce the uncertainty in the position measurement of the GNSS module.
Keywords: drone, GPS, IMU, position.

1 Uvod

Določanje pozicije drona je uporabno v več različnih aplikacijah, še posebej v tistih, ki zahtevajo avtonomno vodenje. V tem članku smo se osredotočili na drone, ki se uporabljajo za prikazovanje svetlobnih animacij (slika 1). Pri teh je uporabljenih več 100 dronov, ki se usklajeno premikajo, da prikazujejo slike in animacije. Cilj modela je s pomočjo dodatnih senzorjev zmanjšati negotovost meritve pozicije GNSS modula.



Slika 1: Sistem šov dronov. [1]

2 Identifikacija problema

Trenutni sistem uporabljen za natančno določanje pozicije teh dronov je RTK-GNSS (Real Time Kinematic Global Navigation Satellite System), ki pa je zelo draga tehnologija še posebej, kadar je za izvedbo teh animacij potrebno več 100 dronov.
Pozicijo drona bomo tako določili z matematičnim modelom in preostalimi že vgrajenimi senzorji. To so žiroskop, pospeškometer, magnetometer in GNSS sprejemnik.

3 Identifikacija veličin

V tem poglavju so predstavljeni senzorji ter njihove lastnosti. Potrebno je poznati razliko med relativnimi in absolutnimi senzorji. Z absolutnimi dobimo iz senzorja direktno informacijo o poziciji. Z relativnimi pa lahko pozicijo izračunamo samo s seštevanjem posameznih prispevkov.

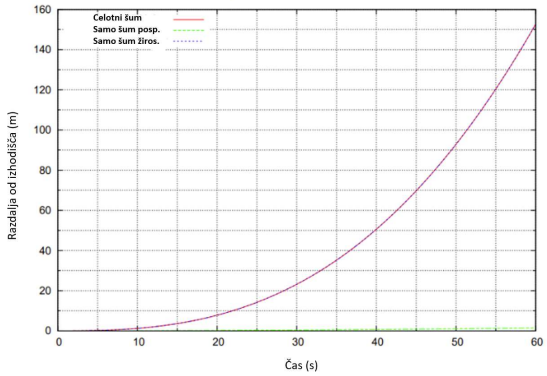
3.1 MEMS žiroskop

MEMS žiroskop je mikroelektromehanski sistem, ki meri kotno hitrost vrtenja okoli določene osi. Deluje na principu Coriolisove sile, ki deluje na vibrirajočo maso v sistemu. Kotna hitrost se izračuna iz razlike v amplitudi vibracij med dvema osema. MEMS žiroskop meri kotno hitrost z enoto radian na sekundo (rad/s). Merilna negotovost MEMS žiroskopa je odvisna od več dejavnikov, kot so temperatura, vlaga, vibracije, šum in drift.[2]
Eden od problemov žiroskopa je, da lahko izračunamo kot nagiba samo s seštevanjem prispevkov. Pri vsakem seštevanju prištejemo tudi morebitno napako, kar pripelje do velike napake po večih meritvah. To se v tehniki senzorske fuzije po navadi rešuje s Kalmanovim filtrom, s pomočjo katerega lahko k tej meritvi

združimo še meritev magnetometra in tako zmanjšamo vpliv adicije napak.

3.2 Pospeškometer

Pospeškometer je naprava, ki meri pospešek telesa, ki se giblje v prostoru. Pospešek meri v enotah (m/s^2). Merilna negotovost pospeškometra je odvisna od vrste in kakovosti naprave, pa tudi od zunanjih dejavnikov, kot so vibracije, temperatura itd.[3]
Če želimo izračunati pozicijo drona, moramo pospešek dvakrat integrirati. Najprej, da dobimo hitrost, in nato še enkrat, da dobimo pozicijo drona. Tudi pri tej meritvi se napake prištevajo.
Študija je pokazala, da pri izračunu pozicije s pomočjo pospeškometra in žiroskopa, največ napake doprinese napaka v žiroskopu (slika 2). Če izničimo napako na pospeškometru, pride do podobne napake, kot če sta prisotni obe napaki. Če pa izničimo napako žiroskopa, je pa napaka močno zmanjšana. Razlog je, da s pomočjo orientacije, ki jo dobimo iz žiroskopske meritve, preslikamo pospeške v globalni koordinatni sistem. Če je ta preslikava napačna, se napačno doda kompenzacija gravitacije in integrira pospešek, kar povzroči velika odstopanja. Na sliki 2 je vidno, da po 60 sekundah napaka pri stacionarnem dronu lahko doseže do 150 m. Zaradi takšnih pojavov je nujno v model vključiti tudi absolutne merilnike pozicije.[4]



Slika 2: Napaka v poziciji drona v odvisnosti od časa letenja. [4]

3.3 Magnetometer

Magnetometer meri jakost ali smer magnetnega polja. Lahko meri absolutno ali relativno vrednost magnetne indukcije *B* ali magnetne poljske jakosti *H*. Merilna negotovost magnetometra je odvisna od vrste in metode meritve, pa tudi od zunanjih dejavnikov, kot so temperaturna nihanja, vibracije, električni šumi, bližina feromagnetnih materijalov in motnje magnetnega polja.[4]

3.4 GNSS

GNSS je kratica za globalni navigacijski satelitski sistem, ki omogoča določanje položaja in hitrosti. GNSS deluje tako, da sprejema signale več satelitov, ki krožijo okoli Zemlje in jih primerja z znanimi podatki o njihovih orbitah in urah. Iz teh podatkov lahko GNSS izračuna razdaljo do vsakega satelita in določi svoj položaj v treh dimenzijah. GNSS meri veličino, ki se imenuje geodetska koordinata in je sestavljena iz geografske širine, dolžine in višine nad referenčnim elipsoidom. Merilna negotovost GNSS je odvisna od številnih dejavnikov, kot so število in geometrija vidnih satelitov, kakovost sprejetih signalov, atmosferski vplivi, večpotno širjenje, napake v satelitskih urah in orbitah ter napake v modelih in algoritmih. Merilna negotovost GNSS se lahko giblje od nekaj centimetrov do nekaj metrov ali več, odvisno od uporabljenega sistema in načina dela.[5]

Slika 3: GNSS in magnetometer modul. [6]

4 Problem merljivosti pozicije drona

Največji problem pri merjenju pozicije predstavljajo relativni senzorji, pri teh se seštevajo tudi vse napake, kar povzroči veliko napako na dolgi rok. Absolutni senzorji, kot so GNSS in magnetometer, te napake nimajo, imajo pa večjo negotovost same meritve, v primeru GNSS tudi do nekaj metrov.
Takšna narava meritev nam dodatno oteži matematični model, saj bi morali razdeliti model na dva dela. Na krajši rok bi morali imeti relativni senzorji večji upliv, po daljšem času pa bi se morali bolj zanesti na meritve absolutnih senzorjev.

5 Matematični model

Celotni model za določanje pozicije predstavlja enačba 1. Pri večih veličinah združujemo vrednosti relativnih in absolutnih senzorjev. Zaradi napake, ki nastopi pri

integriranju relativne meritve, se bolj zanesemo na absolutno meritev. To je implementirano s konstantami 0,2 in 0,8. Model je zapisan samo za x smer, zapis za y smer bi se razlikoval le v enačbi 3.

$$s_x(t) = 0.2 \cdot \left(s_x(0) + \int_0^t \left(0.2 \cdot \left(v_x(o) + \int_0^t \left(a_{acc}(t) \cdot cos \left(0.2 \cdot \left(\phi(o) + \int_0^t \omega(t)\, dt \right) + 0.8 \cdot \phi_{mag} \right) \right) dt \right) + 0.8 \cdot v_{xgnss} \right) dt \right) + 0.8 \cdot s_{xgnss} \quad (1)$$

Slika prikazuje kako si sledijo izračuni, ki na koncu privedejo do pozicije (s_x).

Slika 4: Prikaz zaporedja izračunov.

5.1 Postopna razlaga modela

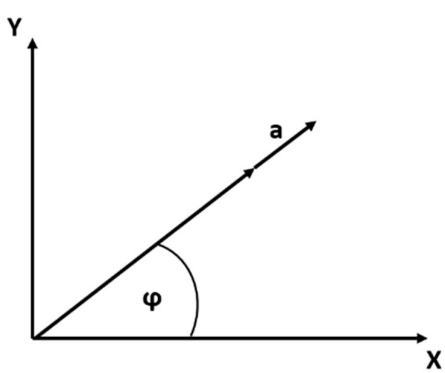
Najprej se iz kotne hitrosti žiroskopa in kota, ki ga dobimo iz magnetometra, izračuna orientacija drona (enačba 2).

$$\phi(t) = 0.2 \cdot \left(\phi(o) + \int_0^t \omega(t)\, dt \right) + 0.8 \cdot \phi_{mag} \quad (2)$$

S pomočjo pridobljene orientacije se v naslednjem izračunu (enačba 4) izmerjeni pospešek preračuna v prispevke x in y smeri.

$$a_y(t) = a_{acc}(t) \cdot sin(\phi(t)) \quad (3)$$

$$a_x(t) = a_{acc}(t) \cdot cos(\phi(t)) \quad (4)$$



Slika 5: Koordinatni sistem in prikaz pospeška in kota.

V naslednjem koraku združimo prispevke hitrosti (enačba 5). Prvi prispevek je integral pospeška, pridobljenega iz enačbe (4). Drugi prispevek je hitrost izmerjena z GNSS modulom.

$$v_x(t) = 0.2 \cdot \left(v_x(o) + \int_0^t a_x(t)\, dt \right) + 0.8 \cdot v_{xgnss} \quad (5)$$

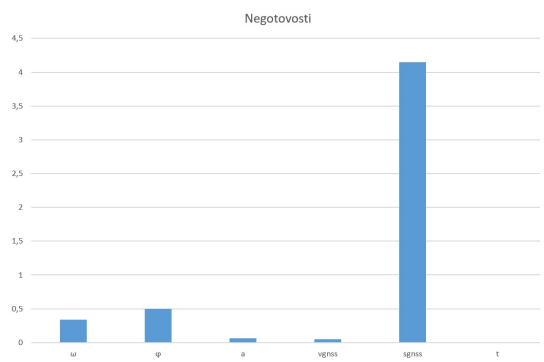
Zadnji korak je izračun pozicije (enačba 6), ki se izračuna z integralom hitrosti iz enačbe (5) in pozicije pridobljene prek GNSSa.

$$s_x(t) = 0.2 \cdot \left(s_x(0) + \int_0^t v_x(t)\, dt \right) + 0.8 \cdot s_{xgnss} \quad (6)$$

6 NEGOTOVOST MERJENE VELIČINE

Pri upoštevanju negotovosti sem izbral senzorje, ki so vgrajeni v šov dronih. IMU je vgrajen na samem kontrolerju, GNSS in magnetometer pa sta vgrajena na zunanjem modulu. Vrednosti negotovosti za posamezno napravo so prikazane na sliki 6.

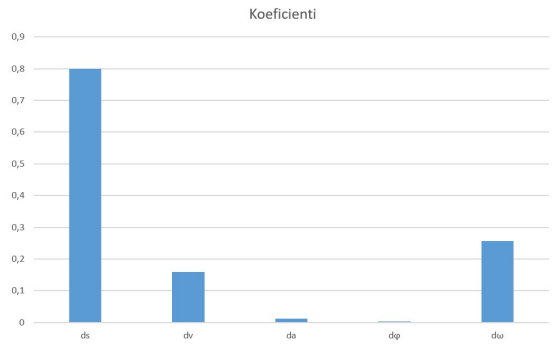
- IMU - ICM42605
  - Negotovost žiroskopa: 3,8 mdps/sqHz
  - Negotovost pospeškometra: 70 µg/sqHz
- GNSS - M9N
  - Negotovost meritve hitrosti: 0,05 m/s
  - Negotovost pozicije: 4,15 m R95
- Magnetometer - RM3100
  - Negotovost meritve kota: 0,5 °
- Čas - 16Mhz, 20ppm oscilator
  - Negotovost meritve časa: 0,00004 s



Slika 6: Diagram prispevkov negotovosti.

7 VPLIVNE VELIČINE

Zaradi pomanjkanja dejanskih meritev ne moremo vedeti, kakšen bo šum na relativnih senzorjih. Posledično ne vemo, kako se bo ta šum sešteval med zaporednimi meritvami in kakšna bo napaka po n meritvah. Zato smo kot primer za izračun koeficientov vzeli le prvo meritev pozicije, pri kateri se napake še ne prištevajo. Začetne pogoje smo postavili na 0: $\phi_0 = 0$, $v_0 = 0$, $s_0 = 0$. Meritve pa določili sledeče: $\phi_{mag} = 1$, $v_{xgnss} = 0{,}2$, $s_{xgnss} = 0{,}2$, $\omega = 1$, $a_{acc} = 0{,}2$. Izračunani občutljivostni koeficienti so vidni na sliki 7.



Slika 7: Diagram občutljivostnih koeficientov.

8 POPOLNI MERILNI REZULTAT

Kot omenjeno v prejšnjem poglavju je merilni rezultat (enačba 7) izračunan le iz prve meritve senzorjev, pri kateri dron vzleti v točki 0. Cilj modela je bil zmanjšati negotovost meritve pozicije GNSS modula, kar nam je tudi uspelo. Negotovost pozicije GNSS modula je bila 4,15 m, z modelom in dodanimi senzorji pa se je zmanjšala na 3,4 m.

$$s_x = 0{,}2\ \mathrm{m} \pm\ 3{,}4\ \mathrm{m} \tag{7}$$

9 INTERDISCIPLINARNOST

V nadaljnem razvoju aplikacije za določanje pozicije drona bi bilo potrebno znanje elektrotehnike (meritve senzorjev), računalništva (algoritmi) in geodezije (GNSS izračuni).

10 ŠTUDIJA IZVEDLJIVOSTI

Da bi bil ta model uporaben v praksi, bi bilo potrebno napisati še modela za y in z smeri gibanja. Prav tako je v trenutnem modelu upoštevan pospešek samo ene smeri, kot pri avtomobilu. Za uporabo v dronu, bi bilo potrebno meriti pospešek v vseh treh smereh gibanja, kar še dodatno poveča kompleksnost modela. Poleg tega je še problem časovne sinhronizacije senzorjev in izvedba modela v diskretni obliki.

Določanje pozicije mobilnih platform se v praksi izvaja z zapletenimi algoritmi, ki rešujejo problem združevanja senzorjev. To pa je največkrat rešeno s Kalmanovim filtrom. Za uporabo v praksi, bi bilo potrebno razviti algoritme in filtre, ki pa bi še vedno temeljili na principu našega modela.

LITERATURA

[1] "Vimdrones Drone Light Show Ready-To-Fly 10-drone Package." Accessed: Jan. 09, 2024. [Online]. Available: https://shop.vimdrones.com/products/vimdrones-drone-light-show-ready-to-fly-package

[2] "Vibrating structure gyroscope," *Wikipedia*. Apr. 15, 2023. Accessed: Jan. 09, 2024. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Vibrating_structure_gyroscope&oldid=1149895304

[3] "Inertial measurement unit," *Wikipedia*. Dec. 07, 2023. Accessed: Jan. 09, 2024. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Inertial_measurement_unit&oldid=1188754769

[4] O. J. Woodman, "An introduction to inertial navigation," *University of Cambridge*, Aug. 2007.

[5] "Satellite navigation - Wikipedia." Accessed: Jan. 09, 2024. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Satellite_navigation

[6] "GNSS m9n," Bing. Accessed: Jan. 12, 2024. [Online]. Available: https://www.bing.com/images/search?q=GNSS+m9n&FORM=HDRSC3

Ocenjevanje kvalitete drv

Izidor Založnik

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: iz9627@student.uni-lj.si

Povzetek. V članku je opisan merilni sistem, ki oceni kvaliteto drv glede na vrsto, vlažnost in gostoto lesa ter glede na čas, ko je bil les posekan. Predstavljen je matematičen model in lestvica, prav tako pa tudi popoln merilni rezultat z izračunanimi prispevki k skupni negotovosti za izbrane vplivne veličine.

Ključne besede: merjenje, kurilna vrednost, matematični model, popolni merilni rezultat

Assessment of firewood quality

The article describes a measuring system that assesses the quality of wood based on the type, moisture and density of the wood, as well as the time when the wood was cut. It introduces a mathematical model and a scale, along with a complete measurement result including calculated contributions to the standard uncertainty for selected influencing quantities.

1 UVOD

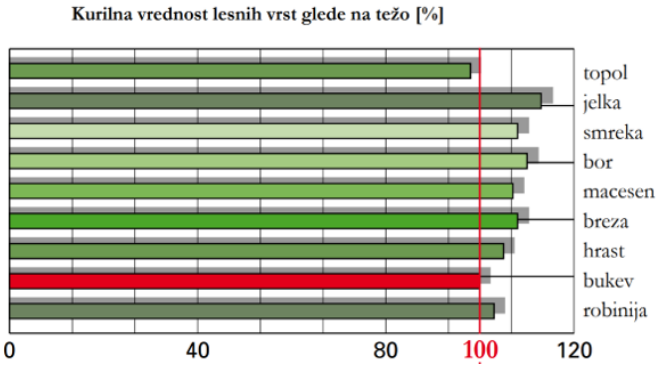
V sodobnem svetu, kjer trajnost postaja ključna vrednota, pridobiva izbira kvalitetnega in okoljsko sprejemljivega vira ogrevanja vedno večji pomen. Ker se še vedno veliko ljudi doma ogreva na drva, pri njihovem nakupu pa si želijo zagotoviti kvaliteten vir ogrevanja, je v nadaljevanju predstavljen merilni sistem, s katerim na sistematičen način ocenimo kakovost drv. S takšnim modelom ne olajšamo le proces odločanja, ampak pripomoremo tudi k zmanjšanju ogljičnega odtisa in trajnostni rabi gozdov.

2 IDENTIFIKACIJA VELIČIN

Kakovost drv merimo posredno preko spodaj opisanih fizikalnih veličin in koeficientov.

2.1 Kurilna vrednost lesa glede na maso

Kurilna vrednost lesa glede na maso je ena najpomembnejših lastnosti lesa in izraža količino energije, ki se sprosti med popolnim gorenjem enote mase goriva. Kurilne vrednosti različnih drevesnih vrst se razlikujejo znotraj majhnega intervala, kljub temu pa so vrednosti pri iglavcih v povprečju nekoliko višje. Razlog je predvsem v višji vsebnosti lignina in delno tudi v višji vsebnosti smole, voska in olja, ki se pojavlja pri iglavcih [1], [3]. Kurilna vrednost lignina znaša 25,12 MJ/kg, medtem ko je kurilna vrednost celuloze 17,38 MJ/kg. [1]



Slika 1: Kurilne vrednosti lesnih vrst glede na težo [%] [3].

2.2 Vsebnost vode

Na energijsko vrednost močno vpliva vlažnost lesa oz. vsebnost vode v lesu. Pri gorenju vlažnega lesa se namreč del energije porabi za izparevanje vode, kar pomeni, da ima bolj suh les višjo energijsko vrednost [1].

V lesu ločimo prosto vodo (ni vezana v lesno snov) in vezano vodo (v celičnih stenah). Pri izhlapevanju izhlapi najprej prosta voda (v povprečju ima les takrat 30 % vlažnost), nato pa pride do izhlapevanja vezane vode. Pri tem postane les higroskopski in začne spreminjati volumen in dimenzijo. Za izhlapevanje kilograma vode se porabi 2,44 MJ energije [4], [7].

Vodo v lesu opredeljujemo na dva načina.V prvem načinu vodo v lesu izrazimo z vlažnostjo (označena z u (%)), ki predstavlja delež mase vode v lesu glede na maso absolutno suhega lesa, ali kot vsebnost vode (označena z w (%)), ki izraža maso vode v lesu glede na maso svežega lesa [7], [3]. Povezavo med zgoraj opisanimi veličinami podaja enačba 1.

$$w = \frac{100 \cdot u}{100 + u}, \tag{1}$$

Prejet
Odobren

Kot že omenjeno zgoraj, se v procesu zgorevanja lesa energija troši za izhlapevanje vode, količina porabljene energije pa je odvisna od vsebnosti vode v lesu, saj se za vsakih 10 % vsebnosti vode kurilna vrednost lesa zmanjša za 12 % [5].

2.3 Gostota

Na kurilno vrednost lesa glede na volumen ima močan vpliv gostota lesa, ki je odvisna od drevesne vrste. Glede na gostoto poznamo dve vrsti lesa: termin trdi les uporabljamo za drevesne vrste, ki imajo visoko gostoto lesa (npr. bukev), mehak les pa za drevesne vrste, ki imajo nižjo gostoto lesa (v to kategorijo spadajo predvsem iglavci). Prav tako gostota vpliva tudi na način in dolžino sproščanja energije, saj les z večjo gostoto zgoreva počasneje. [1]

2.4 Čas sečnje

Kot ugotavlja avtor diplomske naloge Tradicionalna pravila za določanje časa poseka, je na podeželju, med poznavalci lesa in gozda, še vedno prisotno ljudsko izročilo, ki govori o "pravem" času sečnje lesa. Eno izmed pravil, ki se nanaša na pravilni čas sečnje, je upoštevanje luninega koledarja (tj. upoštevanje luninih men).

V opravljeni raziskavi se izkaže, da velika večina anketirancev (84,3 %) meni, da čas sečnje vpliva na odpornost in kvaliteto lesa. Ker na vseh anketiranih območjih uporabljajo enako pravilo luninega koledarja, da je posek lesa omejen na obdobje od ščipa (tj. polne lune) do mlaja, je v matematičnem modelu upoštevan tudi vpliv časa sečnje. [1]

3 Problem merljivosti

Na podlagi matematičnega modela, ki je predstavljen v nadaljevanju, je ocena kvalitete drv predstavljena kot kurilna vrednost lesa glede na prostornino, ki nam pove, koliko energije se sprosti pri gorenju enega kubičnega metra lesa. Zato je uporabljena že obstoječa lestvica, ki ima spodnjo mejo pri 0 J/m^3, navzgor pa ni omejena.

4 Matematični model

Iz zgoraj opisanih vplivnih veličin, sem sestavil naslednji matematični model:

$$K = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} E \cdot (1 - 0,12)^{\frac{w}{10}} \cdot \frac{m}{V} \cdot (1 - k \cdot t). \quad (2)$$

Uporabljene spremenljivke v matematičnem modelu so:

- K ... kurilna vrednost lesa glede na prostornino [J/m^3],
- E ... kurilna vrednost lesa glede na maso [J/kg],
- w ... vsebnost vode v lesu [%],
- m ... masa lesa [kg],
- V ... volumen lesa [m^3],
- k ... koeficient vpliva časa sečnje ($0 \leq k \leq 1$),
- t ... koeficient časa sečnje (0 ali 1),
- N ... število merjencev.

Prvi del enačbe predstavljajo kurilne vrednosti lesa glede na maso (E), ki bi jih imel uporabnik podane v tabeli in jih glede na vrsto lesa vnesel v model.

Drugi del enačbe predstavlja eksponentna funkcija, s katero opišemo vpliv vlažnosti na energijsko vrednost lesa, ki je bila predstavljena v poglavju 2.2.

Na kurilno vrednost vpliva tudi gostota lesa, ki jo izmerimo posredno preko merjenja mase, ki je v matematičnem modelu označena z m, in merjenja volumna, ki je označen z V. Z množenjem kurilne vrednosti lesa glede na maso in gostote pretvorimo tudi enoto v J/m^3.

V zadnjem delu enačbe pa upoštevamo vpliv časa sečnje. Parameter t ima vrednost 0, za pravilni čas sečnje (od ščipa do mlaja), oz. ima vrednost 1 za čas med mlajem in ščipom. Parameter k pa predstavlja koeficient vpliva časa sečnje, ki ima vrednost od 0 do 1. Vrednost parametra za posamezno vrsto lesa bi pridobili s poskusi, kjer bi primerjal kurilne vrednosti lesa, ki je bil posekan med polno luno in mlajem, z lesom, ki je bi posekan med mlajem in ščipom.

5 Negotovost merjene veličine

Ker kvalitete drv ne moremo meriti neposredno, je za izračun njene negotovosti potrebno upoštevati prispevke negotovosti posameznih izmerjenih veličin. Skupna negotovost je zato definirana kot geometrijska vsota posameznih prispevkov negotovosti z enačbo:

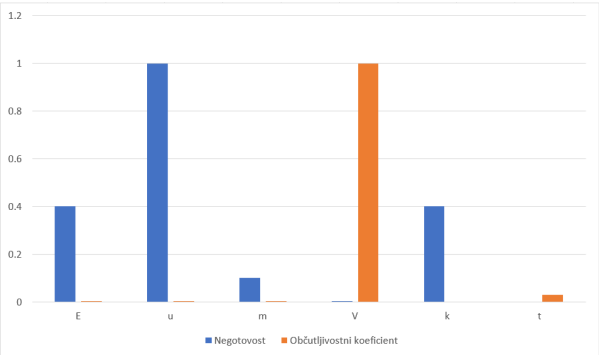
$$u(K) = \sqrt{c_1^2 u^2(E) + c_2^2 u^2(u) + c_3^2 u^2(m) + c_4^2 u^2(V) + c_5^2 u^2(k) + c_6^2 u^2(t)}$$

kjer so koeficienti c_n občutljivostni koeficienti merjenih veličin, katerih vrednosti dobimo s parcialnim odvajanjem kurilne vrednosti lesa glede na prostornino K po posameznih veličinah.

$$c_n = \frac{\partial K}{\partial x_n}$$

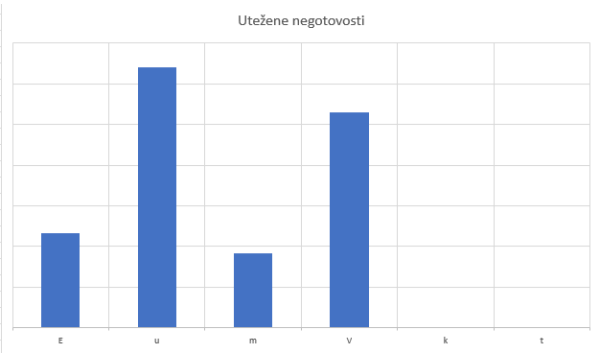
Na sliki 2 je prikazan histogram, kjer so z modro barvo prikazane negotovosti merjenih veličin, z oranžno barvo pa njihovi občutljivostni koeficienti za vrednosti parametrov:

$$E = 18.82,\ u = 20\ \%,\ m = 6\ \text{kg},\ V = 0.0083\ \text{m}^3,\ k = 0.03,\ t = 0,\ N = 1$$



Slika 2: Histogram negotovosti in občutljivostnih koeficientov.

Ker se iz slike 2 ne vidi najboljše, katere veličine imajo največji vpliv na končno negotovost, je na sliki 3 prikazan dodaten histogram, ki prikazuje utežene negotovosti, ki jih dobimo z množenjem negotovosti merjenih veličin in njihovih občutljivostnih koeficientov. S tem si lažje predstavljamo končne prispevke k skupni negotovosti. Iz grafa torej vidimo, da za vrednosti parametrov, ki so podani višje v poglavju, največja prispevka k končni negotovosti prispevata merjenje vlažnosti in prostornine lesa.



Slika 3: Histogram uteženih negotovosti

6 Vplivne veličine

Vplivna veličina ki lahko močno vpliva na rezultat je število merjencev, saj bi lahko v primeru meritve samo enega merjenca napačno ocenili povprečno kurilno vrednost celotne skladovnice. Zato je v matematičnem modelu predvideno N število meritev, končni rezultat pa je njihova povprečna vrednost.

7 Popolni merilni rezultat

Popolni merilni rezultat vključuje izmerjeno vrednost, korekcijo merilnih inštrumentov in skupno negotovost. Za izbrane vrednosti parametrov, ki so bile predstavljene v poglavju 5, je popolni merilni rezultat enak:

$$E = (10950 - K)\ \text{MJ/m}^3 \pm 90\ \text{MJ/m}^3, n = 2, p = 95\%, \tag{3}$$

kjer je bila razširjena negotovost določena kot standardna negotovost, pomnožena s faktorjem razširitve $n = 2$, kar pri normalni porazdelitvi ustreza ravni zaupanja približno 95 %.

8 Študija izvedljivosti

Projekt se mi zdi izvedljiv, saj že obstajajo vsi merilniki potrebni za izvedbo meritev. Eden glavnih izzivov bi se nanašal na izbiro dovolj natančnih merilnikov, ki ne bi presegali določenega cenovnega razreda. Prav tako bi bilo pred realizacijo projekta potrebno izvesti še dodatne raziskave o vplivu časa sečnje, s katerimi bi še natančneje ocenili kvaliteto drv.

Na sliki 4 je prikazan primer merilnika, na osnovi katerega bi lahko zasnovali končni produkt. Naprava s pomočjo laserjev izmeri volumen predmetov, prav tako pa izmeri tudi njihovo maso. Uporabnik merilnega sistema bi nato izmeril še vlažnost lesa s prenosnim merilnikom vlažnosti in izmerjene podatke ter ostale lastnosti merjenca vnesel v sistem preko zaslona na dotik. Naprava bi vse vnešene podatke vnesla v matematični model in vrnila končno oceno kvalitete drv.

Slika 4: Primer merilnika mase in prostornine.

9 Interdisciplinarnost

Poleg elektrotehnike, ki je prisotna pri vseh meritvah, je za izvedbo projekta potrebno zaobjeti več različnih vej znanosti. Najpomembnejša izmed njih je lesarstvo, saj matematični model temelji na koeficientih, katerih vrednosti se pridobi z znanjem in raziskavanjem lastnosti lesa. Prav tako pa bi lahko v končni produkt vključili

tudi robotiko, s katero bi si olajšali in avtomatizirali merilni proces.

10 Zaključek

V članku smo predlagali matematični model za ocenjevanje kvalitete drv. Vsem uporabnikom bi z merjenji nekaterih lastnosti lesa podali njegovo oceno kakovosti, na podlagi katere bi lahko temeljila njihova odločitev o nakupu. Raziskali smo veličine, ki bi lahko pomembno vplivale na rezultat meritev, prav tako smo prikazali tudi primer popolnega merilnega rezultata. Na koncu smo opisali tudi eno izmed možnosti končnega produkta, ki bi ga lahko vpeljali na tržišče.

Literatura

[1] J. Kunaj, *Tradicionalna pravila za določanje časa poseka lesa, Dosegljivo:* http://www.digitalna-knjiznica.bf.uni-lj.si/vs_kunaj_jurij.PDF; [Dostopano: 18. 1. 2024]

[2] *Kurilna vrednost lesa, Dosegljivo:* https://www.trajnostnaenergija.si/Trajnostna-energija/Ohranite-okolje-%C4%8Disto/Lesna-biomasa/Kurilna-vrednost-lesa; [Dostopano: 18. 1. 2024]

[3] *Kakovostna lesna goriva za vsakogar, Dosegljivo:* https://www.gozdis.si/f/docs/objave-gte/Kakovostna_lesna_goriva_za_vsakogar.pdf; [Dostopano: 18. 1. 2024]

[4] *Les kot gorivo, Dosegljivo:* http://www.zgs.si/delovna_podrocja/lesna_biomasa/les_kot_gorivo/index.html; [Dostopano: 18. 1. 2024]

[5] *Vpliv vlage na energijsko vrednost, Dosegljivo:* http://www.zgs.si/delovna_podrocja/lesna_biomasa/izracunajte_si_sami/vpliv_vlage_na_energijsko_vrednost/index.html; [Dostopano: 18. 1. 2024]

[6] *Vsebnost vode, Drva, Meritve, Dosegljivo:* https://www.dovrtel-sistemi.si/documents/sekcija-dimnikarjev/Strokovna-gradiva/Kakovost-drv_Krajnc.pdf; [Dostopano: 18. 1. 2024]

[7] *Ogrevanje z lesnimi gorivi, Dosegljivo:* http://www.s4q.si/images/mojeSlike/files/BioVill_Koristni_podatki(1).pdf; [Dostopano: 18. 1. 2024]

[8] *Evaluation of the calorific values of wastes from some tropical wood species, Dosegljivo:* https://www.redalyc.org/journal/485/48564750002/html/#e3; [Dostopano: 18. 1. 2024]

Merjenje obrabljanja cestišča

Maruša Petrovčič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

Povzetek. Ceste so vsakodnevno izpostavljene različnim virom obrabljanja - tako različnim prometnim obremenitvam, kot tudi mnogim okoljskim dejavnikom. V tem članku obravnavamo vplive, ki jih imajo posamezne veličine na obrabljanje določenega odseka cestišča. Raziskali smo obstoječo literaturo in zakonodajo na področju gradnje cest in oblikovali izbor vplivnih veličin, za katere predpostavljamo, da imajo največji vpliv na obrabljanje cestišča. Predlagali smo matematični model, ki upošteva tako vpliv prometnih obremenitev kot okoljskih dejavnikov. Za primer kombinacije vplivnih veličin smo izračunali prispevke k skupni negotovosti obrabljanja cestišča in določili vrednosti občutljivostnih koeficientov ter zapisali popoln merilni rezultat.

Ključne besede: cestišče, obrabljanje, matematični model, prometna obremenitev, okoljski dejavniki

Road deterioration

Roads are daily exposed to various sources of wear - both traffic loads and environmental factors. In this article, we discuss the effects of different factors on the deterioration of a particular road section. We have investigated the existing literature and legislation in the field of road construction and created a selection of influential factors, which we assume have the greatest impact on road deterioration. We proposed a mathematical model that includes both the impact of traffic loads and environmental factors. For an example set of measurements of influential factors, we calculated contributions to the total uncertainty of the road deterioration. We determined the values of the sensitivity coefficients and the complete measuring result.

1 Uvod

1.1 Merilni problem

Cestno omrežje je nepogrešljiv del infrastrukture, brez katerega sodoben način življenja ne bi bil mogoč. Na njem temeljita svetovna trgovina in ekonomija, po drugi strani pa gradnja novih cestnih povezav in vzdrževanje obstoječih zahtevata znatne finančne vložke.

Ob načrtovanju novih cest mora biti v obzir vzeta pričakovana prometna obremenitev ceste, pa tudi morebitni okoljski dejavniki, ki bi lahko pospešili njeno obrabljanje in skrajšali predvideno življenjsko dobo [1]. Izjemno povečana prometna obremenitev ali prisotnost preobremenjenih tovornih vozil lahko privedeta do poškodb vozišča, ki se lahko ob neustrezni oz. ne dovolj ekspeditivni sanaciji povečajo do te mere, da postane vozna površina neprimerna za promet, stroški popravila pa znatno narastejo. Potrebno je torej ustrezno načrtovanje cestišča, izbira primernih gradbenih materialov, po izgradnji pa odgovorno upravljanje.

Poškodbe vozišča se kažejo v obliki kolesnic in zgladitev, mrežastih in drugih razpok, valov na vozišču, udarnih jam in drugih neželenih pojavov. Vsi našteti tako ali drugače vplivajo na kakovost vožnje, tako z vidika varnosti, kot z vidika udobja.

Ta članek se osredotoča na merjenje obrabljanja cestišča prek merjenja različnih veličin, za katere predpostavljamo, da na to vplivajo. Pri tem se osredotočamo na asfaltirane ceste, ki spadajo v kategoriji glavnih in regionalnih cest, lahko pa bi rezultate aplicirali tudi na avtoceste, ob upoštevanju porazdelitve prometa na več pasov. Za odsek ceste, ki ga obravnavamo, predpostavljamo še, da v bližini ni dreves, ki bi lahko s svojim koreninskim sistemom vplivala na cestišče, ter da odsek ni bil prizadet zaradi morebitnega razlitja kemikalij ali obsežnejšega požara.

Cilj našega modela je, da se lahko podatek o obrabljanju cestišča uporabi za oceno, ali je bila cesta ustrezno projektirana oziroma za načrtovanje rekonstrukcije na obstoječi trasi. Meritve nekaterih izbranih merilnih veličin se že uporabljajo pri projektiranju cest v praksi.

1.2 Standardi in specifikacije

Področje gradnje in upravljanja s cestami je dobro urejeno z različnimi predpisi s strani države. Tehnična specifikacija za javne ceste, ki jo je izdala Direkcija RS za ceste, se naslanja na ustrezne tuje specifikacije na tem področju (ameriške, nemške, britanske).

Omeniti velja nekaj tehničnih specifikacij, ki definirajo nekatere merilne veličine, ki so že javno sprejete in uveljavljene na tem področju, ter so zato posebej primerne za uporabo v našem modelu. To so tehnične specifikacije za javne ceste s področja projektiranja:

- TSC 06.541 : 2003 (Dimenzioniranje ojačitev obstoječih asfaltnih voziščnih konstrukcij) [2],
- TSC 06.520 : 2009 (Dimenzioniranje novih asfaltnih voziščnih konstrukcij) [3],
- TSC 06.512 : 2003 (Klimatski in hidrološki pogoji) [4],
- TSC 06.511 : 2009 (Prometne obremenitve: Določitev in razvrstitev) [5].

2 IDENTIFIKACIJA VELIČIN

Predpostavljamo, da je obrabljanje cestišča posledica vzrokov, ki bi jih lahko razdelili v tri kategorije: vpliv prometa, vpliv podnebnih in okoljskih dejavnikov ter vpliv trenutnega stanja cestišča. Veličine, ki so uporabljene v matematičnem modelu, so podrobneje predstavljene v nadaljevanju.

2.1 Promet

Določitev prometne obremenitve vozišča je opisana v tehnični specifikaciji TSC 06.511 : 2009. Posebej zanimivo je, da je obremenitev vozišča sorazmerna z osno obremenitvijo na četrto potenco, torej dvakrat večja osna obremenitev 16-krat bolj obremenjuje vozišče.

Osno obremenitev izražamo s faktorjem ekvivalentne obremenitve FE_{naz}, ki podaja obremenitev ene osi v razmerju glede na nazivno osno obremenitev, ki znaša $L_{\mathrm{stat}} = 100$ kN:

$$FE_{\mathrm{naz}} = 10^{-8} \cdot f_{\mathrm{o}} \cdot (f_{\mathrm{k}} \cdot L_{\mathrm{stat}})^4, \tag{1}$$

pri čemer sta:

- f_{o} - faktor razporeditve osi na vozilu (enojna os/os v tandemu),
- f_{k} - faktor razporeditve koles na osi vozila (enojno kolo/dvojno kolo/enojno široko kolo).

Za posamezno vozilo faktor ekvivalentnosti vozila FE_{v} izračunamo kot vsoto obremenitev vseh osi:

$$FE_{\mathrm{v}} = \sum FE_{\mathrm{naz}}. \tag{2}$$

Ekvivalentno dnevno prometno obremenitev lahko določimo s tehtanjem ali s štetjem vozil. Če vozila štejemo, lahko ekvivalentno dnevno prometno obremenitev izračunamo kot vsoto zmnožkov faktorjev ekvivalentnosti posamezne vrste vozil in števila vozil te vrste:

$$T_{\mathrm{d}} = \sum (FE_{\mathrm{v}} \cdot n_{\mathrm{v}}). \tag{3}$$

Pri tem predstavljata:

- FE_{v} - faktor ekvivalentnosti reprezentativnega motornega vozila,
- n_{v} - število motornih vozil določene vrste na dan.

Če vozila tehtamo, torej poznamo dejanske osne obremenitve vseh vozil, je ekvivalentna dnevna prometna obremenitev T_{d} vsota vseh izmerjenih osnih obremenitev FE_{naz}:

$$T_{\mathrm{d}} = \sum FE_{\mathrm{naz}}. \tag{4}$$

Upoštevati moramo še vplive širine prometnega pasu, nagib nivelete cestišča (potek osi cestišča glede na nadmorsko višino) ter prisotnost morebitnih neravnosti vozišča, ki lahko povzročijo nihanje vozila. Tako dobimo merodajno prometno obremenitev za eno leto, T_{n}:

$$T_{\mathrm{n}} = 365 \cdot T_{\mathrm{d}} \cdot f_{\mathrm{šp}} \cdot f_{\mathrm{nn}} \cdot f_{\mathrm{dv}}. \tag{5}$$

Pri tem so:

- T_{d} - ekvivalentna dnevna prometna obremenitev,
- $f_{\mathrm{šp}}$ - faktor širine prometnih pasov,
- f_{nn} - faktor vzdolžnega nagiba nivelete,
- f_{dv} - faktor dodatnih dinamičnih vplivov.

V primeru, da je na obravnavanem odseku ceste predvideno naraščanje prometne obremenitve, lahko to upoštevamo z dodatnim faktorjem.

Vrednosti faktorjev f_{o}, f_{k}, $f_{\mathrm{šp}}$, f_{nn} in f_{dv} so podane v specifikaciji [5]. Podane so tudi povprečne vrednosti faktorjev ekvivalentnosti FE_{v} za reprezentativna vozila: osebna vozila, avtobuse in različne kategorije tovornih vozil.

2.2 Kombinacija vode in temperatur okrog 0 °C

Ko se temperature zraka nahajajo nad lediščem, dež ali staljeni sneg pronicata v razpoke v cestišču. Ob padcu temperatur pod 0 °C voda v razpokah začne zmrzovati, zaradi česar se ji prostornina poveča za približno 10 %. To povzroči zelo visoke tlake na okolico [6], zaradi česar se obstoječe razpoke še povečajo.

Voda pod cestiščem, ki bi morala odteči, med zimo zamrzne v plasteh pod cestiščem. Če zamrzne v velikih količinah, nastanejo ledene leče, ki povzročajo velike sile na material nad njimi. To lahko povzroči dvig delov vozišča in njegovo deformacijo [7].

Ko temperature narastejo, se ledene leče stalijo, kar zmanjša nosilnost plasti pod cestiščem, saj na mestu ledu ostane prazen prostor. Cestišče je tako bolj izpostavljeno obrabi ob težki prometni obremenitvi in obstaja večja verjetnost nastanka udarnih jam. Poleg tega led pod cestiščem še dodatno onemogoča odtekanje vode.

Vpliv nihanja temperatur okrog ledišča opisuje število ciklov zmrzovanja in taljenja (C_{zt}; angl. *Freeze-Thaw Cycle, FTC*) v enem letu, ki je definirano kot:

$$C_{\mathrm{zt}} = \frac{\text{št. prehodov ledišča}}{2}. \tag{6}$$

Na ta način upoštevamo samo eno smer prehoda temperatur čez ničlo.

Upoštevati moramo še prisotnost vode, ki je pogoj za nastanek ledu. S tenziometrom merimo vlažnost zemlje ob cestišču (v_{zi}) v enotah kPa in računamo njeno povprečje znotraj zimske sezone:

$$\overline{V_{\mathrm{z}}} = \mathrm{average}(v_{\mathrm{zi}}), \tag{7}$$

torej povprečno vrednost od prvega dne, ko temperatura zraka pade pod ledišče, do zadnjega dne, ko pade pod ledišče (v naslednjem koledarskem letu).

2.3 Tekoča voda

Neustrezno urejen sistem odvodnjavanja meteorne vode lahko povzroči velike količine vode, ki tečejo po vozišču. Stalni ali hudourniški potoki, ki tečejo po cestišču, povzročajo razpoke in erodirajo površino. Prisotnost tekoče vode na cestišču upoštevamo s faktorjem površinskega dotekanja vode (P_{dv}), ki lahko zavzame vrednosti 0, 1 ali 2:

$$P_{\mathrm{dv}} = \begin{cases} 0; \text{tekoča voda na cestišču v večjih količinah ni prisotna} \\ 1; \text{tekoča voda je prisotna na cestišču ob dežju (hudournik), taljenju snega} \\ 2; \text{tekoča voda je na cestišču prisotna ves čas} \end{cases}$$

2.4 Vročina

Visoke temperature povzročijo mehčanje bitumna, ki je uporabljen kot vezivo v asfaltiranih voziščih, saj se pri visokih temperaturah zniža njegova viskoznost. Tako je vozna površina še posebej občutljiva na visoke prometne obremenitve, kar lahko vodi do nastanka kolesnic. V obravnavani literaturi nismo našli eksaktne temperature, pri kateri se bitumen tako zmehča, da to že pomembno vpliva na njegovo nosilnost. Táko mejno temperaturo (T_{m}), bi bilo torej potrebno določiti z ustreznim eksperimentom.

Vpliv visokih temperatur v našem modelu upoštevamo z vključitvijo števila dni v letu, ko temperatura zraka preseže mejno temperaturo ($T > T_{\mathrm{m}}$), kar označimo kot število vročih dni, $\check{S}_{\mathrm{vd}}$.

2.5 Starost cestišča

Na trenutno obrabljanje cestišča vpliva tudi njegova starost [8], oziroma njegova trenutna obrabljenost. Bolj kot je cestišče obrabljeno, bolj je izpostavljeno vplivom ostalih vplivnih veličin, zato se še hitreje obrablja. Pomembna vplivna veličina je starost asfalta (S_{a}, čas od polaganja v letih), saj s časom asfalt oksidira in postaja vse bolj trd in drobljiv.

2.6 Dnevno nihanje temperatur

Tako kot ostalim snovem, se tudi asfaltu pri segrevanju in ohlajanju spreminja prostornina. To povzroča notranje sile v strukturi, ki lahko s časom povzročijo nastanek razpok. Predpostavljamo, da je vpliv na nastanek razpok sorazmeren z razliko med najvišjo in najnižjo dnevno temperaturo, zato smo za vplivno količino izbrali povprečje dnevnih razponov temperatur (d_{ni}) znotraj leta:

$$\overline{D_{\mathrm{n}}} = \mathrm{average}(d_{\mathrm{ni}}). \tag{8}$$

2.7 Sončno sevanje

Na proces staranja asfalta, torej na spreminjanje njegove kemijske strukture, najpomembneje vpliva sončno sevanje [9]. Za točno določitev energije, ki jo prejme določena površina ceste, bi bilo potrebno meriti moč UV radiacije v $\mathrm{W/m^2}$ (angl. *UV dose rate*), npr. s piranometrom, in izračunati integral le-te čez celotno leto, da dobimo energijo v $\mathrm{J/m^2}$, ki doseže cestišče (angl. *UV dose*):

$$W_{\mathrm{uv}} = \int_{\mathrm{leto}} P_{\mathrm{uv}} dt. \tag{9}$$

Predpostavljamo, da je staranje zaradi sončnega sevanja proporcionalno prejeti energiji W_{uv}.

Ostale morebitne vplivne veličine v tem modelu niso vključene. Ponekod je sestava plasti cestišča ob vgradnji posebej prilagojena določenim dejavnikom, na primer vlažnim tlem ali vročini, česar naš model ne upošteva.

3 Definicija lestvice

Matematični model obrabljanja cestišča predvideva lestvico med 0 in neskončno, pri čemer 0 pomeni, da na obravnavani odsek ceste ne deluje nobena izmed obravnavanih vplivnih veličin, torej se cestišče ne obrablja. Izhod modela je obrabljanje cestišča $\mathcal{O}$, ki je brezrazsežnostna količina. Večja vrednost $\mathcal{O}$ pomeni, da se obravnavani odsek ceste s časom hitreje obrablja kot odsek z nižjo vrednostjo $\mathcal{O}$.

4 Matematični model

Predlagan matematični model obrabljanja cestišča je predstavljen z enačbo:

$$\begin{aligned} \mathcal{O} = w_1 \cdot T_{\mathrm{n}} + w_2 \cdot C_{\mathrm{zt}} \cdot \overline{V_{\mathrm{z}}} + w_3 \cdot P_{\mathrm{dv}} + \\ + w_4 \cdot \check{S}_{\mathrm{vd}} + w_5 \cdot S_{\mathrm{a}} + w_6 \cdot \overline{D_{\mathrm{n}}} + w_7 \cdot W_{\mathrm{uv}}. \end{aligned} \tag{10}$$

Merjene veličine, ki vplivajo na obrabljanje cestišča, so predstavljene v drugem poglavju. V enačbi nastopajo še utežnostni koeficienti w_{i} za $i \in [1, 7]$, ki bi jih bilo potrebno eksperimentalno določiti. Določajo namreč, kolikšen delež posamezna merjena veličina prispeva k skupnemu obrabljanju $\mathcal{O}$. Hkrati koeficienti w_{i} poskrbijo tudi za krajšanje enot, tako da je izračunano obrabljanje cestišča brezrazsežnostna količina.

5 Negotovost merjene veličine

Negotovost obrabljanja cestišča je odvisna od negotovosti meritev vplivnih veličin, ki so bile uporabljene pri izračunu:

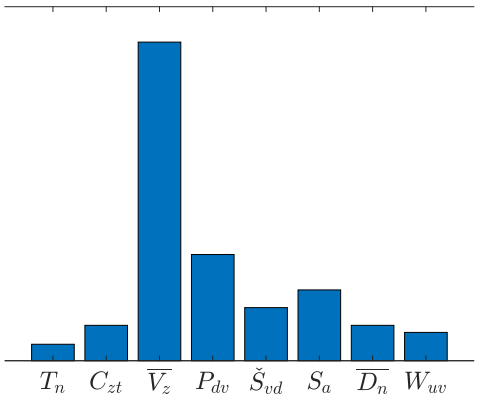
$$u(\mathcal{O}) = \sqrt{\begin{aligned} & c_1^2 \cdot u^2(T_{\mathrm{n}}) + c_2^2 \cdot u^2(C_{\mathrm{zt}}) + \\ & + c_3^2 \cdot u^2(\overline{V_{\mathrm{z}}}) + c_4^2 \cdot u^2(P_{\mathrm{dv}}) + \\ & + c_5^2 \cdot u^2(\check{S}_{\mathrm{vd}}) + c_6^2 \cdot u^2(S_{\mathrm{a}}) + \\ & + c_7^2 \cdot u^2(\overline{D_{\mathrm{n}}}) + c_8^2 \cdot u^2(W_{\mathrm{uv}}). \end{aligned}} \tag{11}$$

Občutljivostne koeficiente izračunamo iz predlaganega matematičnega modela kot:

$$\begin{aligned} & c_1 = \frac{\partial \mathcal{O}}{\partial T_{\mathrm{n}}},\ c_2 = \frac{\partial \mathcal{O}}{\partial C_{\mathrm{zt}}},\ c_3 = \frac{\partial \mathcal{O}}{\partial \overline{V_{\mathrm{z}}}} \\ & c_4 = \frac{\partial \mathcal{O}}{\partial P_{\mathrm{dv}}},\ c_5 = \frac{\partial \mathcal{O}}{\partial \check{S}_{\mathrm{vd}}},\ c_6 = \frac{\partial \mathcal{O}}{\partial S_{\mathrm{a}}} \\ & c_7 = \frac{\partial \mathcal{O}}{\partial D_{\mathrm{n}}},\ c_8 = \frac{\partial \mathcal{O}}{\partial W_{\mathrm{uv}}}. \end{aligned} \tag{12}$$

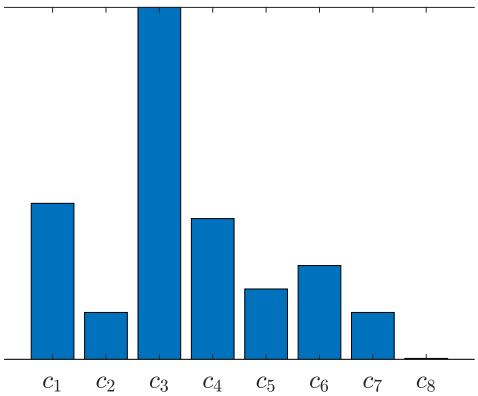
Negotovost merjenja prometne obremenitve T_{n} je odvisna od časa merjenja prometne obremenitve. Potrebno je meriti dovolj časa, da za izbrani odsek ceste dobimo reprezentativen vzorec. Poleg tega pri štetju vozil brez tehtanja k negotovosti doprinašajo še faktorji ekvivalentnosti reprezentativnih vozil FE_{v}, ki so bili določeni za splošno cesto in ne upoštevajo dejanskih osnih obremenitev vozil na obravnavanem odseku.

Histogram na sliki 1 prikazuje prispevke negotovosti posameznih merjenih veličin k skupni negotovosti obrabljanja cestišča. Opazimo lahko, da je največji prispevek negotovosti meritve vlažnosti zemlje, ki je lahko problematična zaradi izvajanja meritev blizu točke ledišča.



Slika 1: Histogram prispevkov k skupni negotovosti

Histogram na sliki 2 prikazuje primer ocene občutljivostnih koeficientov za primer meritve izbranih veličin z upoštevanjem enačbe (12). Tudi tu ima največjo vrednost koeficient c_3, ki je vezan na meritev vlažnosti zemlje $\overline{V_{\mathrm{z}}}$.



Slika 2: Histogram vrednosti občutljivostnih koeficientov

6 Vplivne veličine in preizkus modela

Preučevanje obrabljanja cestišča je v veliki meri vezano na preučevanje okoljskih vplivov nanj. Tu je potrebno poudariti, da se med sezonami lahko pojavljajo velike razlike v vremenu, zato je za pridobitev verodostojnega rezultata potrebno upoštevati večletna povprečja (meritev temperature, količine sončnega obsevanja). Poleg tega lahko določeni dejavniki, kot na primer preusmeritve prometa zaradi gradbenih posegov ipd., vplivajo tudi na meritve prometne obremenitve.

7 Popoln merilni rezultat

Končni merilni rezultat sestoji iz izmerjene vrednosti, korekcije rezultata (K) ter razširjene merilne negotovosti. Popoln merilni rezultat za primer kombinacije vplivnih veličin prikazuje enačba (13).

$$\mathcal{O} = (121.9 + K) \pm 8.0,\ k = 2,\ p = 95\ \% \qquad (13)$$

8 Študija izvedljivosti

V praksi se v gradbeni stroki pri projektiranju cest že upošteva merodajno dnevno prometno obremenitev ter klimatske in hidrološke pogoje. Po drugi strani pa veličine, kot so starost cestišča, dnevno nihanje temperatur in sončno sevanje, bodisi manj vplivajo na obrabljanje cestišča, ali pa so težje merljive in zato pri načrtovanju niso upoštevane. Smiselno bi bilo raziskati, ali naj se v gradbene standarde vključijo tudi še ne upoštevani dejavniki. Dober vpogled v njihovo pomembnost, bi dobili že z določitvijo utežnostnih koeficientov w_{i} tega matematičnega modela.

9 Interdisciplinarnost

Obravnavana tematika spada na področje gradbeništva, zato so zahteve glede izvedbe meritev in izbire merjenih veličin vezane na standarde s tega področja. Po drugi strani pa je cestišče močno izpostavljeno vplivom okolja, v večji meri vplivom vremenskih dejavnikov, s čimer se ukvarja meteorološka stroka. Izvedba meritev in obdelava podatkov sodita na področje elektrotehnike.

10 Zaključek

Standardi, ki urejajo gradnjo cest, upoštevajo le manjši delež dejavnikov, ki vplivajo na obrabljanje cestišča. Predlagan matematični model poleg prometne obremenitve upošteva tudi vpliv faktorjev, kot so nihanje temperature, prisotnost vode, starost asfalta in sončno obsevanje. Z našim matematičnim modelom bi lahko ocenili, ali je bil določen odsek ceste primerno projektiran, kdaj in kje bo spet potrebna obnova in na katere dejavnike je potrebno biti posebej pozoren pri rekonstrukciji.

LITERATURA

[1] N. Delatte, *Concrete pavement design, construction, and performance*. Crc Press, 2018.

[2] "Projektiranje: Dimenzioniranje ojačitev obstoječih asfaltnih voziščnih konstrukcij," Uradni list RS, št. 65/09. Direkcija Republike Slovenije za ceste, 2009.

[3] "Projektiranje: Dimenzioniranje novih asfaltnih voziščnih konstrukcij," Uradni list RS, št. 65/09. Direkcija Republike Slovenije za ceste, 2009.

[4] "Projektiranje: Klimatski in hidrološki pogoji," Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, št. 9/ 2003. Direkcija Republike Slovenije za ceste, 2003.

[5] "Prometne obremenitve: Določitev in razvrstitev," Uradni list RS, št. 91/09. Direkcija Republike Slovenije za ceste, 2009.

[6] U. Isacsson in H. Zeng, "Relationships between bitumen chemistry and low temperature behaviour of asphalt," *Construction and building materials*, vol. 11, no. 2, str. 83–91, 1997.

[7] F. Padilla, J.-P. Villeneuve in J. Stein, "Simulation and analysis of frost heaving in subsoils and granular fills of roads," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 25, no. 2, str. 89–99, 1997.

[8] R. Tauste, F. Moreno-Navarro, M. Sol-Sánchez in M. Rubio-Gámez, "Understanding the bitumen ageing phenomenon: A review," *Construction and Building Materials*, vol. 192, str. 593–609, 2018.

[9] E. Remisova in D. Briliak, "Evaluation of the effect of thermo-oxidative aging and uv radiation on asphalt stiffness," *Materials*, vol. 16, no. 10, str. 3716, 2023.

Učinkovitost integracije sodelujočega robota v industriji

Martin Makovec

Fakulteta za elektrotehniko
Tržaška cesta 25, Ljubljana, Slovenija
mm7432@student.uni-lj.si

Povzetek. Članek se osredotoča na oceno učinkovitosti integracije robota v industrijo z namenom preverjanja, ali je robot ustrezno vključen v proizvodne procese ter ali uspešno izpolnjuje svojo nalogo. Pri tej oceni avtorji ne le analizirajo izvedbo naloge same, temveč upoštevajo tudi psihološki in fizični vpliv robota na ljudi, ki z njim delajo ali so v njegovi bližini. Cilj raziskave je pridobiti celovit vpogled v interakcijo med robotom in delovnim okoljem, pri čemer se upoštevajo tako tehnični vidiki izvajanja naloge kot tudi dobrobit in počutje ljudi, ki so vpleteni v delovni proces s robotom.

Ključne besede: sodelujoči robot, robotika, matematični model, integracija, negotovost, merilni rezultat

Efficiency of collaborative robot integration in industry This paper focuses on the evaluation of the effectiveness of robot integration in industry to check whether the robot is properly integrated into production processes and whether it is successfully fulfilling its task. In this assessment, the authors not only analyse the performance of the task itself, but also take into account the psychological and physical impact of the robot on the people working with it or in its vicinity. The aim of the research is to gain a comprehensive insight into the interaction between the robot and the working environment, taking into account both the technical aspects of the task performance and well-being of the people involved in the working process with the robot.

Keywords: cooperative robot, robotics, mathematical model, integration, uncertainty, measurement result

I. Uvod

V industriji 4.0, kjer se digitalna transformacija vse bolj uveljavlja, igrajo sodelujoči roboti ključno vlogo pri optimizaciji proizvodnih procesov. Z razvojem tehnologije so se roboti postopoma premikali iz zaprtih varnostnih ograj v neposredno bližino človeških delavcev, s čimer odpirajo vrata kreativnemu in učinkovitemu sodelovanju med stroji in ljudmi. V tem kontekstu postaja ključno vprašanje, kako uspešno integrirati sodelujoče robote v delovno okolje ter kakšne izboljšave prinašajo na področju proizvodnje.

V primerjavi z industrijskimi roboti ponujajo sodelujoči roboti povečano produktivnost, prilagodljivost, vsestranskost in varnost. Namenjeni so izvajanju nalog ob človeški delovni sili, delijo isti delovni prostor s sodelavci ter ponujajo večjo mobilnost in prilagodljivost. Osnoven pregled področja sodelujočih robotov danes in vpogled v njihov prihodnji potencial je predstavljen v [1]. Za uspešno integracijo sodelujočih robotov mora predhodno biti vzpostavljena ustrezna infrastruktura. Osredotočenost raziskave [2] je zagotoviti temelje in štiristopenjski načrt za olajšanje oblikovanja, razvoja in integracije sodelujočih robotov. Poleg tega je eden izmed poglavitnih izzivov sodelujočih robotov zagotoviti njihov pozitiven vpliv na svojo okolico in ljudi, ki z njimi delujejo [3]. Nedavne študije so v namen varnega delovanja sodelujočih robotov ter približevanja človeku izkoristile tudi tehnike strojnega učenja [4]. V [5] so predstavljeni rezultati projekta ClaXon, ki preučuje in implementira interakcije med ljudmi in sodelujočimi roboti v tovarnah. Projekt je pripeljal do integracije sodelujočega robota v proizvodnem obratu avtomobilov Audi v Bruslju, Belgija.

V tem članku se bomo osredotočili na razvoj matematičnega modela, ki bo omogočil merjenje učinkovitosti integracije sodelujočega robota. Ne zgolj osredotočeni na povečanje produktivnosti in kakovosti, temveč tudi na izboljšave na področju varnosti, zanesljivosti in vpliva na človeka. Naš pristop temelji na holističnem razumevanju integracije, kjer ne ocenjujemo le robotove učinkovitosti pri proizvodnih opravilih, temveč ocenjujemo tudi njegov vpliv na zaposlene ter njihovo počutje med delom s sodelujočim robotom.

S poudarkom na celovitem pristopu želimo prispevati k razvoju industrije, kjer so roboti ne le avtonomni izvajalci nalog, temveč tudi aktivni soustvarjalci delovnega okolja, ki pripomorejo k dvigu kakovosti proizvodnje in dobrobiti zaposlenih.

II. Identifikacija veličin

Oceno proizvodnje pri integraciji sodelujočega robota podajamo preko naslednjih veličin.

A. Hitrost in kvaliteta

Hitrost proizvodnje merimo s številom proizvedenih izdelkov na neko časovno enoto, kar označujemo z v. Prav tako upoštevamo pri tem tudi kvaliteto proizvodnje, saj vse izdelke z napakami q odštejemo od skupne proizvodnje.

B. Učinkovitost

Učinkovitost merimo v ceni materiala c, ki ga porabimo za proizvod enega izdelka.

C. Zanesljivost

Zanesljivost merimo tako, da štejemo, koliko delovnih ur h robot oziroma človek ne oddela v enem letu. Pri tem se tudi dopusti štejejo v delovni čas in v modelu veljajo kot ne oddelane delovne ure, saj jih robot nima.

Poleg ocene proizvodnje pa nas zanima tudi vpliv robotov na zaposlene in njihovo okolico.

D. Srčni utrip

Naša predpostavka je, da se z nervozo pri delu ustrezno poveča srčni utrip. Merimo povprečen srčni utrip hr skozi delovni dan. Za meritev uporabimo elektrokardiograf (EKG).

E. Prevodnost kože

V nelagodnih ali stresnih situacijah se poveča znojenje osebe in s tem posredno prevodnost kože. Prevodnost kože merimo posredno z galvanskim členom, ki je z dvema elektrodama, pritrjenima na prsta povezan v tokokrog. Merimo povprečno prevodnost kože p zaposlenih skozi dan.

F. Varnost

Varnost merimo tako, da štejemo število bližnjih srečanj z robotom (ang. near misses) v nekem daljšem časovnem obdobju, s čimer se znižuje varnost.

III. Definicija lestvice

Glede na to, da za naš merilni problem ni predpisane specifične lestvice, smo razvili lastno lestvico, ki se skladno prilagaja našemu matematičnemu modelu. Ta lestvica je pozitivno semidefinitna, kar pomeni, da minimalna vrednost znaša 0, medtem ko zgornje omejitve v teoriji ni, kar omogoča neskončno širino možnih vrednosti. Učinkovitost integracije, določena po naši lestvici, izraža vrednost 1, ki je ekvivalentna človekovemu izvajanju nalog. S povečanjem ali zmanjšanjem vrednosti naše meritve nato kažemo, kolikokrat je robot učinkovitejši v primerjavi s človekom. Pri vrednosti 0 v teoriji robot izvaja nalogo neskončnokrat manj učinkovito kot človek na istem mestu, medtem ko je pri vrednosti 1 robot enakovreden človeku. Vrednost 2 predstavlja dvakrat večjo učinkovitost, in tako naprej.

IV. Matematični model

Matematični model temelji na koeficientih, ki primerjajo proizvodnjo pred in po vpeljavi sodelujočega robota, kjer podpisani r naznanja veličine po vpeljavi robota, medtem ko podpisani h naznanja veličine pred vpeljavo robota. Vse veličine uporabljene za izračun sledečih koeficientov so opisane v poglavju II.

$$Q = \frac{v_r - q_r}{v_h - q_h}, \tag{1}$$

$$E = \frac{c_h}{c_r}, \tag{2}$$

$$R = \frac{2080 - h_r}{2080 - h_h}, \tag{3}$$

$$H = \frac{\int_{t_0}^{t} hr_h(t)\,dt}{\int_{t_0}^{t} hr_r(t)\,dt}, \tag{4}$$

$$K = \frac{\int_{t_0}^{t} p_h(t)\,dt}{\int_{t_0}^{t} p_r(t)\,dt}. \tag{5}$$

Koeficient hitrosti in kvalitete Q predstavlja relativno spremembo hitrosti uspešne proizvodnje, E predstavlja relativno spremembo cene za proizvod izdelka, preko česar merimo učinkovitosti proizvodnje. Zanesljivost merimo preko koeficienta R, ki predstavlja razmerje oddelanih letnih ur, pri čemer smo predpostavili, da ima leto 2080 delovih ur. S tem smo pridobili vse koeficiente, ki vplivajo na samo proizvodnjo, koeficienta H in K pa merita robotov vpliv na človeka. Koeficient H meri povprečno spremembo srčnega utripa, medtem ko koeficient K meri povprečno spremembo prevodnosti kože.

$$P = w_1 Q + w_2 E + w_3 R, \tag{6}$$

$$V = w_4 H + w_5 K, \tag{7}$$

$$S = 1 - e^{-\frac{1}{N^2}}. \tag{8}$$

Koeficienta produktivnosti P in počutja človeka V, ki nastopata v končni enačbi, dobimo z uteženo vsoto zgoraj izračunanih koeficientov. Koeficient S, ki definira varnost robota pa je na začetku 1 in se po zgornji funkciji manjša z vsakim bližnjim srečanjem z robotom N.

$$U = \sqrt{P \cdot V \cdot S} \tag{9}$$

Končna enačba, ki podaja učinkovitost integracije sodelujočega robota v industriji U, je sestavljena iz produkta med koeficientom produktivnosti P, koeficientom počutja človeka V ter koeficientom varnosti S, ki je nato korenjen.

V. Negotovost merjene veličine

V matematičnem modelu, negotovost u posredno merjenih veličin izhaja iz posameznih negotovosti direktno merjenih veličin, ki so vključene v model. Skupno negotovost se nato izračuna s pomočjo naslednje enačbe.

$$u(U) = \sqrt{c_1^2 u^2(P) + c_2^2 u^2(V) + c_3^2 u^2(S)} \tag{10}$$

Posamezni prispevki negotovosti so pomnoženi s pripadajočimi občutljivostnimi koeficienti c. Ti koeficienti se za neko dano funkcijo f (v zgornjem primeru U) izračunajo kot parcialni odvodi funkcije f glede na posamezno spremenljivko.

$$c_n = \frac{\delta f(x_1 ... x_n)}{\delta x_n} \tag{11}$$

Ker so vse veličine znoraj P člena števne velja $u(P) = 0$. Prav tako so števne tudi vse veličine znotraj S člena in je tudi $u(S) = 0$. Izraz se nam tako poenostavi v

$$u(U) = c_2 u(V), \tag{12}$$

$$c_2 = \frac{\delta U(P, V, S)}{\delta V} = \frac{PS}{2\sqrt{PVS}}. \tag{13}$$

Ugotoviti moramo le, koliko je $u(V)$, kar lahko izračunamo preko merilnih negotovosti koeficientov srčnega utripa H in prevodnosti kože K.

$$u(H) = \sqrt{c_{H1}^2 u(hr_h)^2 + c_{H2}^2 u(hr_r)^2}, \tag{14}$$

$$c_{H1} = \frac{\delta H(hr_h, hr_r)}{\delta hr_h} = \frac{hr_h}{\int_{t_0}^{t} hr_r(t)\, dt}, \tag{15}$$

$$c_{H2} = \frac{\delta H(hr_h, hr_r)}{\delta hr_r} = \frac{-hr_r \int_{t_0}^{t} hr_h(t)\, dt}{(\int_{t_0}^{t} hr_r(t)\, dt)^2}, \tag{16}$$

$$u(K) = \sqrt{c_{K1}^2 u(p_h)^2 + c_{K2}^2 u(p_r)^2}, \tag{17}$$

$$c_{K1} = \frac{\delta K(p_h, p_r)}{\delta p_h} = \frac{p_h}{\int_{t_0}^{t} p_r(t)\, dt}, \tag{18}$$

$$c_{K2} = \frac{\delta K(p_h, p_r)}{\delta p_r} = \frac{-p_r \int_{t_0}^{t} p_h(t)\, dt}{(\int_{t_0}^{t} p_r(t)\, dt)^2}. \tag{19}$$

Vidimo lahko, da se z daljšanjem integrirnega časa naša negotovost zmanjšuje, saj gredo koeficienti c_{H1}, c_{H2}, c_{K1} in c_{K2} proti 0. Končen rezultat za merilno negotovost $u(V)$, ki jo nato uporabimo v enačbi 12 je torej:

$$u(V) = \sqrt{c_{V1}^2 u(H)^2 + c_{V2}^2 u(K)^2}, \tag{20}$$

$$c_{V1} = \frac{\delta V(H, K)}{\delta H} = w_4, \tag{21}$$

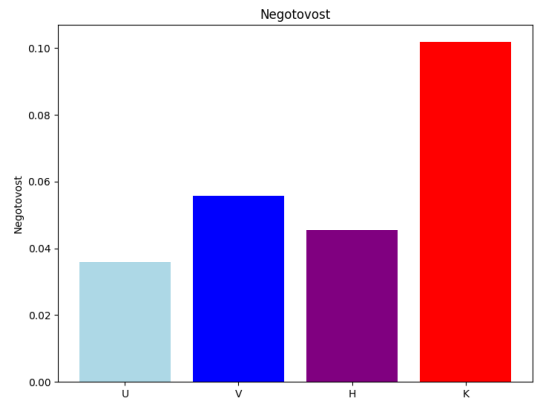
$$c_{V2} = \frac{\delta V(H, K)}{\delta K} = w_5. \tag{22}$$

Za primer vrednosti: $hr_h = 60, hr_r = 66, p_h = 9E - 06, p_r = 10E - 06, w_4 = 0.5, w_5 = 0.5, u(hr) = 0.0354, u(p) = 0.1, P = 1.5, V = 0.9, S = 1$, sta na slikah 1 in 2 podana tudi histograma negotovosti pri dveh različnih časih opazovanja.

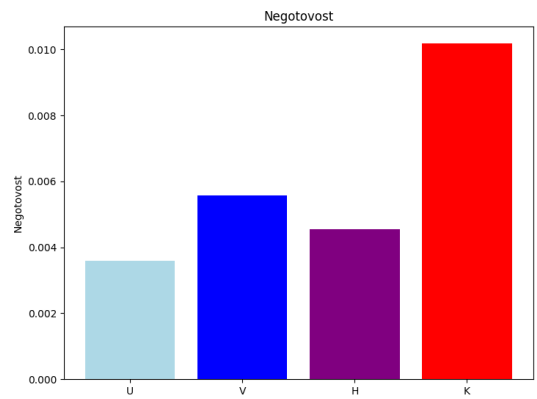
Na slikah 3 in 4 pa sta podana še histograma vseh pripadajočih občutljivostnih koeficientov.

VI. Vplivne veličine

Pri eksperimentu se soočamo z mnogimi vplivnimi veličinami, ki lahko končni rezultat zelo vplivajo. Med temi je zagotovo najpomembnejši človek, saj se njegovo počutje in zdravje lahko spreminjata iz dneva v dan, kar lahko vpliva na njegove psiho-fizične parametre. Da bi omilili te vplive, izvajamo meritve na čim večji množici ljudi ob različnih trenutkih dneva in nato povprečimo rezultate.



Negotovost členov.



Negotovost členov pri desetkrat daljšem času opazovanja.

Drugi manjši vplivi izhajajo iz merilnega okolja in merilnih instrumentov. Vpliv merilnega okolja lahko učinkovito odpravimo z izvajanjem eksperimentov v zaprtem prostoru z nadzorovano in konstantno temperaturo ter ostalimi dejavniki, ki bi lahko vplivali na počutje posameznika. Vpliv merilnih instrumentov blažimo z ustrezno umeritvijo vseh instrumentov pred eksperimentom, hkrati pa se trudimo, da so naprave čim manj intruzivne.

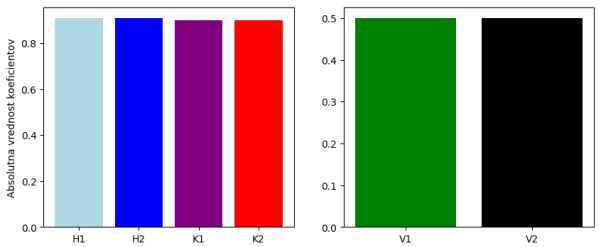
VII. Popoln merilni rezultat

V našem primeru je popoln merilni rezultat predstavljen z izmerjeno vrednostjo, ki je normirana na referenčne meritve, in je dopolnjena z razširjeno merilno negotovostjo, ki je pomnožena s faktorjem razširitve in opredeljena pri določeni ravni zaupanja.

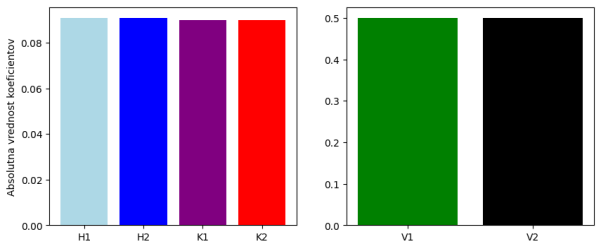
$$U_1 = 1.162 \pm 0.072, K = 2, p = 95\%, \tag{23}$$

$$U_2 = 1.1619 \pm 0.0072, K = 2, p = 95\% \tag{24}$$

Zgoraj je predstavljen popoln merilni rezultat, za oba časa opazovanja, hipotetične meritve s predlaganim matematičnim



Vrednosti koeficientov.



Vrednosti koeficientov pri desetkrat daljšem času opazovanja.

modelom za ocenjevanje integracije sodelujočega robota v industrijo. Končni rezultat je normiran, pri čemer imajo referenčne meritve vrednost 1. Interpretiramo ga tako, da je robot za 16 % boljši od posameznika pri opravljanju določene naloge v industriji.

VIII. Študija izvedljivosti

Naš poslovni model temelji na zagotavljanju storitev merjenja in svetovanja v kontekstu integracije sodelujočih robotov z ljudmi v industriji. To je zlasti namenjeno podjetjem, ki si želijo učinkovito vpeljati robote na določena delovna mesta. Izvedba meritev je izvedljiva, saj so že na voljo vsi potrebni merilni instrumenti, zagotovitev ustrezne merilne infrastrukture pa je tudi dosegljiva. Potrebno je le še empirično potrditi ali ustrezno prilagoditi matematični model, da pridobimo čim bolj zanesljive rezultate. S tem bi omogočili podjetjem natančno in celovito oceno učinkovitosti za potrebo optimizacije procesov ob uvajanju sodelujočih robotov v njihovo proizvodno okolje.

IX. Interdisciplinarnost

Pri vsakem kompleksnejšem problemu se kaže interdisciplinarnost, kar velja tudi za našo obravnavano tematiko. V tem kontekstu se prepletajo različna strokovna področja, kot so elektrotehnika, ki je ključna za razvoj merilnih instrumentov ter obdelavo signalov. Robotika, ki združuje elektrotehniko, strojništvo in računalništvo, prevzema vlogo pri načrtovanju, izgradnji in delovanju sodelujočih robotov. Biologija prispeva k razumevanju psihofizioloških meritev, kjer preučujemo človekove signale in njihove povezave z dobrobitjo. Psihologija se vključuje pri definiciji čustev, medtem ko ekonomija igra ključno vlogo pri raziskavi trga in vrednotenju poslovnega modela. S takim celostnim pristopom omogočamo, da se različna znanstvena področja združijo in dopolnjujejo, kar omogoča poglobljeno obravnavo in reševanje kompleksnih izzivov v našem raziskovalnem področju.

X. Zaključek

Naša raziskava izpostavlja potrebo po holističnem razumevanju integracije sodelujočih robotov, kjer so ti ne le avtonomni izvajalci nalog, temveč aktivni soustvarjalci delovnega okolja. Zavedamo se, da je ključnega pomena ne le povečevati produktivnost in kakovost proizvodnje, ampak tudi skrbeti za varnost, zanesljivost ter dobrobit zaposlenih.

Nudimo vpogled v inovativen pristop k razvoju industrije, kjer sodelujoči roboti niso zgolj orodja, temveč partnerji v ustvarjanju kakovostnejšega delovnega okolja. Naš matematični model omogoča podjetjem oceno učinkovitosti integracije sodelujočih robotov ter predstavlja korak naprej k ustvarjanju proizvodnih procesov, ki so bolj prilagojeni človeškim potrebam in hkrati optimizirani za učinkovito sodelovanje z roboti.

Literatura

[1] F. Sherwani, M. M. Asad, and B. Ibrahim, “Collaborative robots and industrial revolution 4.0 (ir 4.0),” in *2020 International Conference on Emerging Trends in Smart Technologies (ICETST)*, 2020, pp. 1–5.

[2] A. M. Djuric, R. Urbanic, and J. Rickli, “A framework for collaborative robot (cobot) integration in advanced manufacturing systems,” *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, vol. 9, no. 2, pp. 457–464, 2016. [Online]. Available: http://www.jstor.org/stable/26267460

[3] H. Oberc, C. Prinz, P. Glogowski, K. Lemmerz, and B. Kuhlenkötter, “Human robot interaction – learning how to integrate collaborative robots into manual assembly lines,” *Procedia Manufacturing*, vol. 31, pp. 26–31, 2019, research. Experience. Education. 9th Conference on Learning Factories 2019 (CLF 2019), Braunschweig, Germany. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919303683

[4] R. Galin and R. Meshcheryakov, “Collaborative robots: Development of robotic perception system, safety issues, and integration of ai to imitate human behavior,” in *Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin’s Readings”*, A. Ronzhin and V. Shishlakov, Eds. Singapore: Springer Singapore, 2021, pp. 175–185.

[5] I. El Makrini, S. A. Elprama, J. Van den Bergh, B. Vanderborght, A.-J. Knevels, C. I. Jewell, F. Stals, G. De Coppel, I. Ravyse, J. Potargent, J. Berte, B. Diericx, T. Waegeman, and A. Jacobs, “Working with walt: How a cobot was developed and inserted on an auto assembly line,” *IEEE Robotics Automation Magazine*, vol. 25, no. 2, pp. 51–58, 2018.

Učinkovitost avtonomnega kirurškega sistema

Jan Kranjec
Fakulteta za elektrotehniko,
Univerza v Ljubljani,
Tržaška c. 25, 1000 Ljubljana
E-pošta: jk6238@student.uni-lj.si

***Abstract*—Medical technology incorporating autonomous surgical platforms represents an innovative field of advancement. This article introduces a methodology for assessing their efficiency compared to experienced surgeons, emphasizing crucial parameters like operation time, number of stitches, incision accuracy, response to unforeseen events, and blood loss.The proposed index allows a numerical comparison between autonomous systems and experienced surgeons.**

***Index Terms*—Autonomous surgical systems, Surgical efficiency, Incision accuracy, Efficency index**

I. Uvod

Pri operativnih posegih se v sodobni kirurgiji vse pogosteje uporablja minimalno invazivna kirurgija (MIS), ki predstavlja napredno metodo z manjšim vplivom na pacienta. Kirurgi izvajajo tovrstne posege bodisi samostojno bodisi s pomočjo robotskih sistemov, kar je znano kot minimalno invazivna kirurgija s pomočjo robota (RMIS). Z izjemnimi tehnološkimi napredki se odpira vizija avtonomnih kirurških platform, ki bi bile sposobne samostojno izvajati operativne posege. V tem članku predstavljamo pristop za merjenje in ocenjevanje učinkovitosti avtonomnih sistemov v primerjavi z že uveljavljenimi pristopi. Predstavljamo ključne parametre, ki jih želimo meriti, da bi omogočili natančno in celovito oceno učinkovitosti avtonomnih kirurških platform:

- **Čas operacije:** Za oceno učinkovitosti merimo čas trajanja celotne operacije. Krajši čas operacije kaže na večjo učinkovitost sistema.
- **Število šivov:** Natančnost sistema pri zapiranju ran merimo s številom uporabljenih šivov pri pravilno zaprtih ranah. Manjše število šivov kaže na visoko natančnost in spretnost sistema. Pomembno pa je, da to število primerjamo z uveljavljenimi standardi za specifično vrsto operacije, s čimer zagotovimo primerljivost rezultatov.
- **Natančnost rezov:** Ključno za oceno kirurškega sistema je natančnost rezov. Pravilni kirurški rezi so ključni za uspeh operacije in zmanjšanje morebitnih zapletov. V medicinski praksi se običajno določi specifično toleranco za odstopanje od optimalne trajektorije kirurškega reza, kar omogoča oceno natančnosti izvedbe posega.
- **Odziv na nepredvidljive dogodke:** Pri operativnih posegih se pogosto srečujemo z nepredvidljivimi dogodki, kot so nepričakovane krvavitve, neželeni premiki organov in možne poškodbe okoliških struktur. Sposobnost sistema, da se prilagodi in učinkovito odzove na takšne dogodke, je ključna za varnost pacienta in uspešnost operacije. Višji odstotek pravilnih odzivov kaže na večjo zanesljivost sistema v dinamičnih situacijah.
- **Izguba krvi:** Merjenje izgube krvi med operacijo vključujemo kot kritičen parameter, ki bistveno vpliva na stanje pacienta. Manjša izguba krvi je pokazatelj boljšega obvladovanja operativnega posega, kar prispeva k varnosti pacienta.

Za končno oceno predlagamo uvedbo indeksa, ki omogoča primerjavo učinkovitosti avtonomnih kirurških platform z delovanjem izkušenih kirurgov pri isti vrsti operativnega posega. Indeks, označen kot E, bo podal vrednost na območju od 0 do neskončno, kjer nič odstotkov pomeni, da je avtonomni sistem 100% manj učinkovit kot izkušen kirurg, vrednost 1.2 bi pomenila, da je sistem 20% bolj učinkovit in tako naprej. Ta številčna vrednost bo jasno prikazala, v kolikšni odstotni meri je sistem bolj ali manj učinkovit v primerjavi z izkušenim kirurgom pri določenem operativnem posegu.

II. Merilne Metode in Instrumentacija za merjenje učinkovitosti

Najprej moramo raziskati način merjenja posameznih veličin, opisanih v prejšnjem poglavju, ter identificirati merilne metode in instrumentacijo, ki ju bomo uporabili za pridobivanje relevantnih podatkov.

Čas operacije se bo meril med začetkom in koncem operativnega posega in sicer z uporabo časovnika.

Število šivov bi lahko določili ročno, vendar se odločamo za uporabo visokoločljivostnih kamer, ki zaznavajo in avtomatizirano beležijo vsak posamezen šiv. To zmanjšuje možnost človeških napak, ki bi se lahko pojavile pri ročnem štetju, in omogoča bolj natančno ter zanesljivo kvantifikacijo šivov med operativnim posegom.

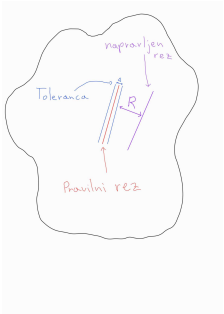


Fig. 1. Primer meritve kirurškega reza

Natančnost reza bi prav tako zaznavali preko kamer in napredne programske opreme za analizo slike, ki bi lahko zaznala in izmerila odstopanja od predhodno določenih kirurških smernic ali načrtov. Odstopanje bi bilo izmerjeno v milimetrih, pri čemer se hkrati oceni, ali je rez znotraj ali izven specifične tolerance, ki jo določimo za optimalen rezultat operativnega posega, kot je prikazano na sliki 1. Nato bi izračunali povprečje teh odstopanj.

Za meritev odziva na nepredvidljive dogodke bi morali najprej določiti kirurški načrt, kako bi se operativni poseg moral izvesti. Nato bi vse dogodke, ki niso v načrtu, smatrali kot nepredvidljive dogodke. Razvili bi merilnik za razpoznavanje pravilnega odziva na nepredvidljive dogodke. Pri razvoju bi upoštevali mnenje izkušenega kirurga, ki bi ocenil kakšen je pravilen odziv (uspešno zaustavil nepričakovano krvavitev itd.). Število pravilnih odzivov bi nato delili s številom vseh nepredvidljivih dogodkov in tako pridobili odstotek pravilnih odzivov.

Za merjenje izgube krvi obstajajo številne metode. Kolorimetrična ocena krvi je pokazala močno povezavo z referenčnim volumnom krvi, pri čemer je ta metoda pokazala znatno manjšo pristranskost v primerjavi z drugimi pristopi, kot so gravimetrična metoda ali vizualna ocena [1]. Vizualna ocena, čeprav je široko uporabljena, ni natančna, zlasti pri večjih krvavitvah. Gravimetrična metoda pa ima svoje omejitve, saj temelji na približku "1 g ustreza 1 ml krvi" in ne upošteva gostote krvi glede na trenutno hematokritsko vrednost, kar povzroča merilne netočnosti. Kolorimetrična metoda, kot inovativna tehnika za zaznavanje izgube krvi, im visoko natančnost in zmanjšano pristranskost v mejah klinično pomembne meje, kar pomeni, da je ta metoda bolj zanesljiva za klinično uporabo [1].

III. Matematični model merjenja učinkovitosti

Razvili smo matematični model za oceno učinkovitosti avtonomnih kirurških sistemov. Model temelji na ključnih parametrih, ki smo jih opisali v poglavju I in II. Cilj modela je kvantificirati učinkovitost avtonomnih kirurških sistemov v primerjavi z izkušenimi kirurgi.

Začnemo z definicijo veličin, ki jih bomo uporabili v našem modelu:

- T - čas trajanja operacije [min]
- S - število šivov
- $\overline{R}$ - povprečna natančnost reza [mm]
- O - odziv na nepredvidljive dogodke [%]
- K - izguba krvi [ml]

Na podlagi teh meril lahko definiramo matematični model kot:

$$E = w_T \left(\frac{T_r}{T}\right) + w_S \left(\frac{S_r}{S}\right) + w_{\overline{R}} \left(\frac{\overline{R}_r}{\overline{R}}\right) + w_O \left(\frac{O}{O_r}\right) + w_K \left(\frac{K_r}{K}\right) \tag{1}$$

V enačbi primerjamo rezultate avtonomnega kirurškega sistema z referenčnimi rezultati, ki jih je dosegel kirurg $(T_r, S_r, R_r, O_r, K_r)$. Vsaka veličina operacije je normalizirana z razmerjem med referenčno vrednostjo (označeno z indeksom r) in dejansko vrednostjo, ki jo doseže avtonomni kirurški sistem. Vsaka normalizirana veličina je nato pomnoženo z utežjo (označeno z w), ki določa, kako pomembna je ta veličina za končno oceno E.

Na primer, časovni člen $\left(\frac{T_r}{T}\right)$ nam pove, koliko je AKS boljši od kirurga glede na čas operacije. Če ta člen vrne vrednost 1.2, to pomeni, da je AKS za 20% boljši od kirurga glede na čas operacije. To je zato, ker je čas operacije, ki ga je dosegel AKS, krajši od referenčnega časa T_r, ki ga je dosegel kirurg. Podobno lahko interpretiramo tudi druge člene. Na primer, člen $\left(\frac{S_r}{S}\right)$ nam pove, koliko je AKS boljši od kirurga glede na število šivov. Če ta člen vrne vrednost 0.8, to pomeni, da je AKS za 20% slabši od kirurga, saj je uporabil več šivov kot kirurg.

Končna ocena E je torej seštevek učinkovitosti vseh teh meril, pri čemer vsako merilo prispeva k oceni glede na svojo pomembnost (utež) in uspešnost (normalizirano vrednost). Uteži določimo glede na pomembnost posamezne veličine pri posameznem operativnem posegu. Tako lahko za vsak poseg izračunamo, koliko je avtonomni kirurški sistem bolj ali manj učinkovit od kirurga.

IV. Merilna Negotovost

Merilna negotovost je ključni kazalnik, ki odraža kakovost izvedene meritve. Skupna negotovost se definira kot celota negotovosti posameznih izmerjenih veličin in njihovih občutljivostnih koeficientov. Za naš model smo skupno negotovost izračunali po formuli:

$$u(E) = \sqrt{c_T^2 u(T)^2 + c_S^2 u(S)^2 + c_R^2 u(R)^2 + c_O^2 u(O)^2 + c_K^2 u(K)^2} \tag{2}$$

Kjer so c_T, c_S, c_R, c_O, c_K občutljivostni koeficienti, $u(T), u(S), u(R), u(O), u(K)$ pa predstavljajo negotovosti posameznih meritev. Na histogramu 2 je prikazana razporeditev posameznih prispevkov k skupni negotovosti. Opazimo, da je časovna negotovost najmanjša, medtem ko je negotovost pri merjenju natančnosti reza in pravilnega odziva na nepredvidljive dogodke največja. To lahko pripišemo omejitvam trenutnih programov za razpoznavanje, ki še niso dovolj natančni [2].

Občutljivostne koeficiente smo pridobili z izračunom parcialnih odvodov po posameznih veličinah:

- Parcialni odvod glede na T:

$$\frac{\partial E}{\partial T} = -w_T \cdot \frac{T_r}{T^2}$$

- Parcialni odvod glede na S:

$$\frac{\partial E}{\partial S} = w_S \cdot \frac{S_r}{S^2}$$

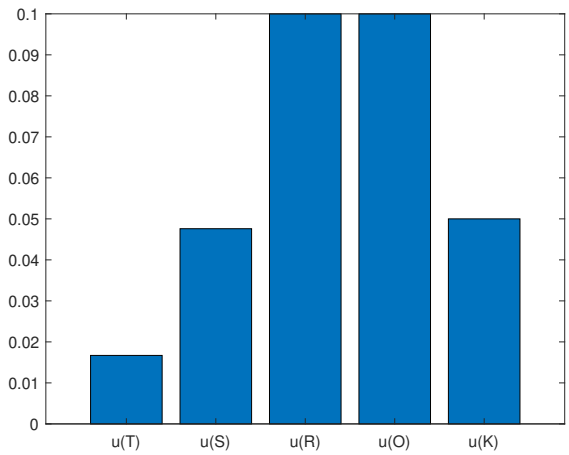


Fig. 2. Posamezni prispevki k skupni negotovosti

- Parcialni odvod glede na $\overline{R}$:

$$\frac{\partial E}{\partial \overline{R}} = -w_{\overline{R}} \cdot \frac{\overline{R}_r}{\overline{R}^2}$$

- Parcialni odvod glede na O:

$$\frac{\partial E}{\partial O} = w_O \cdot \frac{1}{O_r}$$

- Parcialni odvod glede na K:

$$\frac{\partial E}{\partial K} = -w_K \cdot \frac{K_r}{K^2}$$

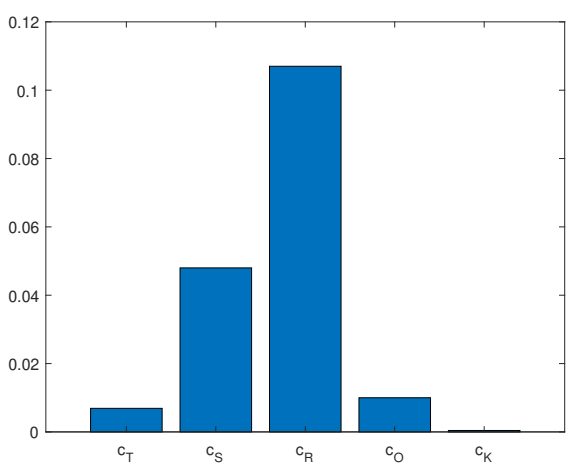


Fig. 3. Občutljivostni koeficietni

V. Vplivne veličine pri merjenju učinkovitosti

Pri ocenjevanju učinkovitosti avtonomnih kirurških sistemov izstopa težavnost izvedbe operacije kot ključen dejavnik. Stopnja zahtevnosti operacije neposredno vpliva na število merjenih veličin, povečuje kompleksnost merilnih postopkov ter s tem možnosti za morebitne napake pri meritvah.

Poleg tega ima tudi usposobljenost kirurga izrazit vpliv na meritve referenčnih veličin.

VI. Popolni merilni rezultat

Za primer popolnega merilnega rezultata smo določili naslednje vrednosti:

$$\begin{aligned} &\frac{T_r}{T} = 0.42, \quad \frac{S_r}{S} = 1.00, \quad \frac{\overline{R}_r}{\overline{R}} = 1.20, \\ &\frac{O}{O_r} = 0.80, \quad \frac{K_r}{K} = 0.42 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} &w_T = 0.10, \quad w_S = 0.15, \quad w_R = 0.20, \\ &w_O = 0.30, \quad w_K = 0.25 \end{aligned} \tag{4}$$

Podatke o času operacije in številu šivov smo pridobili iz članka, ki opisuje operativni poseg avtonomnega robota STAR [3]. Podatke smo vstavili v matematični model 1 in pridobili naslednji rezultat:

$$E = 0.78 \pm 0.01, \tag{5}$$

Iz tega izračuna sledi, da je v predstavljenem scenariju AKS za 22% manj učinkovit v primerjavi z izkušenim kirurgom. Vrednost negotovosti rezultata znaša 1%.

VII. Študija izvedljivosti

Merilnik, bi oblikovali kot vadbeno platformo za izvajanje operativnih posegov. Ključna naloga platforme bi bila merjenje različnih parametrov med kirurškim posegom, nato pa bi na koncu izračunala indeks učinkovitosti AKS. Ta indeks bi ponudil konkreten vpogled v delovanje robotskega sistema in omogočil primerjavo z izkušenim kirurgom.

Merilnik bi bil izjemno uporaben na različnih področjih. Z njegovo pomočjo bi lahko raziskovalci in razvijalci bolje razumeli delovanje kirurških robotov, identificirali šibke točke in usmerjali razvoj novih tehnologij. Uporaba merilnika bi omogočala natančno analizo primerjalnih prednosti in pomanjkljivosti med delovanjem robota in izkušenega kirurga.

Poleg tega bi bil merilnik koristen pri usposabljanju kirurgov in preverjanju njihovega napredka. Prav tako bi lahko služil kot orodje za certificiranje kirurgov, zagotavljajoč neodvisno merjenje njihove spretnosti in zmožnosti v primerjavi s standardi stroke.

Celoten potencial merilnika pa bi se lahko razvil še naprej, če bi se integriral v obstoječe sisteme in postal standardna praksa pri evalvaciji kirurških robotov ter izobraževanju kirurgov.

VIII. Interdisciplinarnost

Pri izvedbi ideje o merilniku učinkovitosti avtonomnih kirurških sistemov je ključna vloga več znanstvenih ved, ki sodelujejo pri ustvarjanju in izpopolnjevanju sistema. Glavne znanstvene vede, ki bi bile vključene, so računalništvo in informatika, medicina ter kirurgija.

Računalništvo in informatika bi imela ključno vlogo pri razvoju programske opreme, ki bi omogočala prepoznavanje kirurških rezov in razpoznavanje pravilnega odziva na nepredvidljive dogodke med operativnimi posegi. Sposobnost obdelave in analize podatkov, zajetih med operacijo, bi omogočila merjenje učinkovitosti AKS ter identifikacijo področij, kjer je mogoče izboljšati njegovo delovanje.

Medicina bi prinesla strokovno znanje pri merjenju z barvno oceno (kolorimetrična ocena) med operacijo. To bi omogočilo meritev izgube krvi. Kirurgija bi predstavljala ključno vodilo za razvoj merilnika za razpoznavanje pravilnih odzivov na nepredvidljive dogodke, saj bi bilo nujno razumeti kirurške postopke in pravilno izvajanje posegov. Kirurško znanje bi zagotovilo, da merilnik zna izmeriti kašni odzivi so pravilni in kakšni ne.

Pri tem projektu je ključna interdisciplinarnost, saj zahteva tesno sodelovanje med programerji, zdravniki in kirurgi.

References

[1] M. J. Jung in A. Smith, "New methods for measuring blood loss during minimally invasive surgery," *Journal of Clinical Monitoring and Computing*, vol. 34, no. 5, str. 987–994, 2020.

[2] R. VV, "Lstm machine learning models 89

[3] H. Saeidi, J. D. Opfermann, M. Kam, S. Wei, S. Leonard, M. H. Hsieh, J. U. Kang in A. Krieger, "Autonomous robotic laparoscopic surgery for intestinal anastomosis," *Science robotics*, vol. 7, no. 62, str. eabj2908, 2022. PMID: 35080901.

ELEKTROTEHNIŠKI VESTNIK 78(X): 1–4, 2011
EXISTING SEPARATE ENGLISH EDITION

Varnost spletnega nakupa

Blaž Primšar

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: bp4693@student.uni-lj.si

Povzetek. Pri spletnem nakupovanju in vedenju na internetu na splošno moramo biti vedno pazljivi, da nismo žrtev prevare. Ob nepazljivosti pri spletnem nakupovanju lahko izgubimo od majhnih do večjih vsot našega premoženja. Zaznava ali je spletna trgovina zaupljiva ali ne je zelo odvisna od izkušenj uporabnika. Z matematičnim modelom predlaganim v tem članku to zaznavo uporabniku zelo olajšamo. Matematični model je prav tako preizkušen na dveh primerih spletnih strani, kjer ima ena velik faktor zaupanja medtem, ko ima druga nizek faktor zaupanja. Če s tem modelom preverimo naš spletni nakup preden ga opravimo si lahko prihranimo denar in skrbi.

Ključne besede: Spletni nakup, Varnost, Spletna trgovina, Prevara

Online shopping security

When shopping online and behaving on the Internet in general, we must always be careful not to fall victim to scams. Inattention when shopping online, we can lose small to large sums of our assets. Whether an online store is trustworthy or not depends very much on the user's experience. The mathematical model proposed in this article makes this perception much easier for the user. The mathematical model is also tested on two examples of websites where one has a high confidence factor while the other has a low confidence factor. If we use this model to check our online purchase before making it, we can save money and worry.

1 UVOD

Spletno nakupovanje je lahko zelo preprosto in praktično ob upoštevanju smernic varnega vedenja na internetu, saj le tako lahko preprečimo zlonamernim spletnim stranem in trgovinam zlorabo naših podatkov in financ. Je pa zaznavanje le teh zelo odvisno od znanja in izkušenj samega uporabnika, ki obišče te spletne strani. Zato sem se odločil narediti matematični model, ki bi uporabnikom omogočil lažjo razpoznavo nevarnosti pri spletnih nakupih.

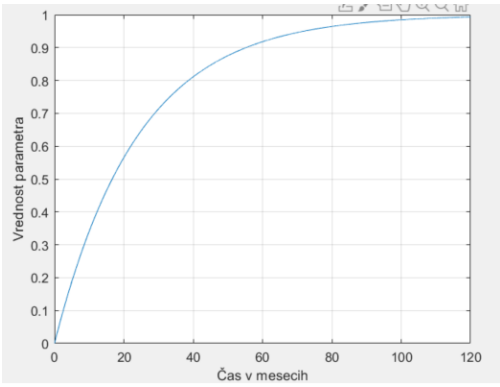
2 IDENTIFIKACIJA VELIČIN

Parametre matematičnega modela sem izbral glede na že ustaljeno dobro prakso za varno spletno nakupovanje [1] in jih prilagodil za uporabo z novo merilno lestvico, kar pomeni, da so vsi omejeni na območje med 0 in 1.

2.1 Čas obstoja

Prvi parameter modela je čas obstoja domene spletne trgovine s sledečim potekom:

$$T_e = 1 - e^{-\frac{t}{24}} \tag{1}$$



Slika 1:Čas obstoja.

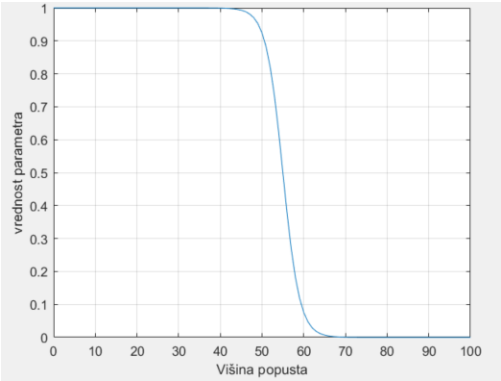
Čas obstoja je zelo dober pokazatelj ali je spletna trgovina bolj ali manj varna, saj veliko prevarantskih spletnih trgovin nastane tik pred pričakovanim povečanjem prometa, kot sta črni petek ali predbožično obdobje medtem, ko so zaupljive spletne trgovine prisotne že veliko dlje časa. Čas t je merjen v mesecih obstoja in normiran na 24 mesecev. To se mi je zdela primerna meja, ker so prevarantske spletne trgovine v veliko primerih mlajše od 24 mesecev, zaupljive pa veliko starejše od 24 mesecev. Čas v mesecih je javno dostopen podatek za spletne domene.

2.2 Višina popusta

Za izbiro tega parametra sem se odločil, ker je ta prav tako zelo dober pokazatelj zaupljive spletne trgovine. Njegov potek je sledeč:

$$V_d = \frac{-1}{1 + e^{-\frac{N_d - 50}{2}}} + 1 \tag{2}$$

Prejet
Odobren



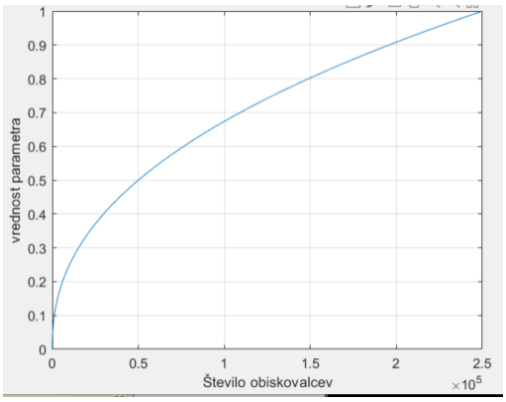
Slika 2:Višina popusta.

Tu je N_d višina popusta trenutnega izdelka, ki ga nameravmo kupiti. Višine popustov v zaupljivih spletnih trgovinah so pogosto nizke in ne absurdne, kot npr. 50% ali več. Iz tega razloga je enačba parametra prilagojena na to predpostavko.

2.3 Število obsikovalcev

Ta parameter je en od pokazateljev popularnosti spletne trgovine, vendar je lahko tudi zavajujoč, iz tega razloga je v končnem modelu upoštevan z manjšo težo. Zavajujoč je lahko če je njihovo število umetno zvišano. Potek parametra je sledeč:

$$U_c = \frac{1}{1 + e^{-50*10^{-6}*(N_v - 100000)}} \tag{3}$$



Slika 3:Število obiskovalcev.

Faktor N_v je število uporabnikov spletne trgovine na kateri želimo opraviti nakup. Tak potek sem izbral glede na podatke o povperčnem številu obiskovalcev spletnih strani.

2.4 Zasnova spletne strani

V model sem vključil tudi zasnovo spletne strani s sledečim zapisom:

$$W_d = 0.2 * f_{https} + 0.4 * f_{gd} + 0.4 * f_{ge} \tag{4}$$

Kjer je f_{https} faktor, ki upošteva prisotnost https protokola, f_{gd} je faktor grafičnega oblikovanja spletne trgovine in vključuje slabo kvaliteto slik izdelkov, slab uporabniški vmesnik in uporabo privzetih fontov (Moderne spletne trgovine pogosto ne uporabljajo privzeti fontov npr. Times New Roman zaradi slabšega izgleda). Nato sem izbral še faktor f_{ge}, ki upošteva slovnične napake v besedilu spletne trgovine. Vsi ti faktorji so binarni kar pomeni, če je prisotna ena napaka v področjih faktorjev je ta enak 1. Upoštevani so vsak s svojo utežjo.

2.5 Mnenje uporabnikov

Še zadnji parameter, ki sem ga izbral upošteva mnenja uporabnikov, ki je kot parameter števila obiskovalcev v končnem modelu upoštevan z manjšo utežjo zaradi istega razloga. Potek parametra je sledeč:

$$U_f = \frac{N_{pos} - N_{neg}}{N_{all}} \tag{5}$$

Tu sta N_{pos} in N_{neg}, število pozitivnih in negativnih mnenj uporabnikov. Lahko se zgodi, da spletna trgovina nima prisotnih mnenj uporabnikov, ali pa podatka o številu pozitivnih in negativnih mnenj nimamo. V prvem primeru ta parameter postavimo na 0, v drugem pa približno ocenimo njegovo vrednost.

3 Definicija lestvice

Za varnost spletnega nakupa sem definiral novo lestvico, ki pove kako varen je nakup glede na pridobljene meritve. Lestvica ima razpon od 0 do 4, kjer vrednost 0 pomeni najmanj varen nakup, vrednost 4 pa pomeni najbolj varen nakup. Kot sem omenil v prejšnjem poglavju so parametri matematičnega modela zasnovani v skladu z mejami te merilne lestvice.

Sprejemljiva meja varnosti spletnega nakupa je 3,25. Za to vrednost sem se odločil zaradi neupoštevanja faktorja mnenja uporabnikov, ko le teh ni, saj v tem primeru že pademo na 3,5. Če bi bila meja bližje 3,5 bi v primeru, da so vsi drugi parametri zelo dobri, lahko spletno trgovino napačno označili za nezaupljivo.

4 Matematični model

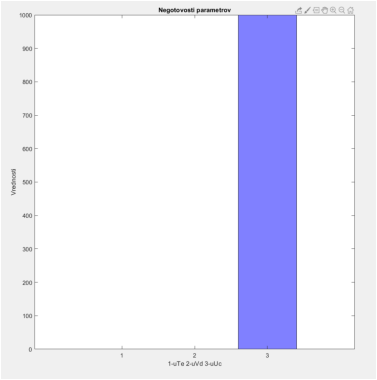
Matematični model sem zasnoval za uporabo z ustvarjeno lestvico in je podan tako:

$$\begin{aligned} VSN =& (1 - e^{-\frac{t}{24}}) + \\ & \left(\frac{-1}{1 + e^{-\frac{N_d - 55}{2}}} + 1\right) + \\ & 0.5\left(\frac{1}{1 + e^{-50\times10^{-6}(N_c - 100000)}}\right) + \\ & 0.5\frac{N_{\text{pos}} - N_{\text{neg}}}{N_{\text{all}}} + 0.2 f_{\text{https}} + 0.4 f_{\text{gd}} + 0.4 f_{\text{ge}} \end{aligned} \tag{6}$$

Tu sta parametra števila obiskovalcev in mnenja uporabnikov upoštevana z manjšo težjo zaradi razlogov opisanih v poglavju 2.

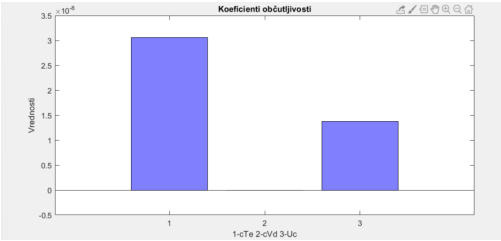
5 Negotovost merjene veličine

V matematičnem modelu imajo negotovosti trije parametri, čas obstoja, višina popusta in število obiskovalcev. Drugi parametri so neki faktorji, ki so ali niso prisotni zato nimajo podane negotovosti. Negotovost časa obstoja je 0,5, za višino popusta je negotovost prav tako 0,5, za število obiskovalcev je negotovost 1000. Te negotovosti so prikazane na histogramu na sliki 1.

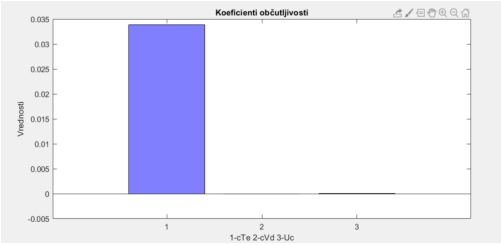


Slika 4:Negotovosti parametrov.

Model sem preizkusil na dveh spletnih trgovinah in na ta način pridobil tudi občutljivostne koeficiente za oba primera. Ti koeficenti so prikazani na slikah 5 in 6.



Slika 5:Občutljivostni koeficienti za prvi primer.



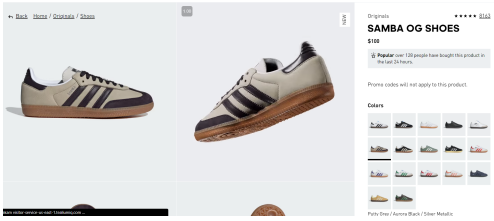
Slika 6:Občutljivostni koeficienti za drugi primer.

Oba primera, na katera se nanašata sliki 5 in 6, sta opisna v naslednjem poglavju.

Popolni merilni rezultat

5.1 Primer adidas.com

Za prvi primer sem vzel spletno stran podjetja adidas za regijo ZDA. Tu sem izbral en izdelek, izmeril vse parametre in dobil sledeče podatke: $t = 339$, $N_d = 0$, $N_c = 250000$, $N_{pos} = 2$, $N_{neg} = 0$, $N_{all} = 2$, $fhttps = 1$, $fgd = 1$, $fge = 1$.



Slika 7:Izdelek za prvi primer [2].

Ko te podatke vstavimo v matematično model dobimo sledeči rezultat:

$VSN = 3,74 \pm 0,12, k = 2, p = 95\%$

Iz rezultata, ki je nad mejo določeno v poglavju 3, vidimo da je izbran spletni nakup varen.

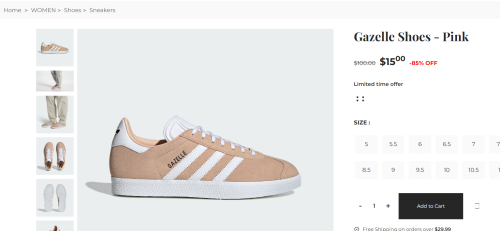
5.2 Primer dfaeda.vip

Tokrat sem poiskal spletno stran, ki je podobna tej iz prvega primera z visokimi popusti, kar je že en od pokazateljev nezaupljive spletne trgovine. Tudi tu sem izbral en izdelek in dobil nalsednje vrednosti: $t = 5$, $N_d = 85$, $N_c = 0$, $N_{pos} = 0$, $N_{neg} = 2$, $N_{all} = 2$, $fhttps = 1$, $fgd = 1$, $fge = 1$.

Ko te nove podatke vstavimo v matematični model dobimo rezultat:

$VSN = 0,94 \pm 0,42, k = 2, p = 95\%$

Tokrat vidimo, da je vrednost veliko manjša od meje varnega spletnega nakupa, torej ga ne opravimo.



Slika 8:Izdelek za drugi primer [3].

6 Študija izvedljivosti

Ta matematični model bi lahko realizirali kot samostojno spletno stran, kjer uporabnik izmerjene parametre vstavi sam in na tak način pridobi rezultat. Bolj preprosta uvedba tega modela bi bila kot razširitev v spletnem brskalniku. Tu bi glede na izbran izdelek za spletno trgovino avtomatsko izmerili potrebne parametre in na ta način pridobili faktor varnosti spletnega nakupa. Slednja opcija bi bila za uporabnike veliko bolj praktična in enostavna.

7 INTERDISCIPLINARNOST

Pri aplikaciji tega modela, bi potrebovali sodelovanje iz področja informatike, za pridobivanje podatkov o času obstoja spletne strani, številu obiskovalcev, in številu uporabniških mnenj. Uporabili bi tudi znanje strokovnjakov iz področja grafičnega oblikovanja za preverjanje ustreznosti zasnove spletne strani.

8 ZAKLJUČEK

Opravili smo pregled področja varnega spletnega nakupovanja in zasnovali model, ki nam olajša zaznavo spletnih prevar. Ta model vključuje glavne pokazatelje nezaupljivih spletnih trgovin. Predlagan model bi se zagotovo lahko izboljšalo z pregledom večih primerov varnih in prevarantskih spletnih strani, ter iz teh rezultatov pogledati kateri od parametrov so zelo dobri pokazatelji in po potrebi kakšnega dodati, odstraniti ali prilagoditi.

LITERATURA

[1] S. Raath, "10 signs a shopping website is fake," Oct 2023. [Online]. Available: https://www.expressvpn.com/blog/signs-a-shopping-website-is-fake/

[2] adidas, "Adidas samba og shoes - beige: Unisex lifestyle: Adidas us," 2023. [Online]. Available: https://www.adidas.com/us/samba-og-shoes/IE5835.html?pr=still$_i nterestedslot = 1rec = mt$

[3] dfaeda, 2024. [Online]. Available: https://www.dfaeda.vip/gazelle-shoes-pink-p-4515.html

Blaž Primšar je leta 2023 diplomiral s področja elektrotehnike na Univerzi v Ljubljani in je trenutno magistrski študent na smeri Robotika na isti fakulteti.

Merjenje izgorelosti v vzdržljivostnih športnikih

Oliver Avsec

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: oa2276@student.uni-lj.si

Povzetek. V delu je predstavljen koncept merjenja izgorelosti in spremljanje stanja produktivnosti treninga vzdržljivostnega športnika ter matematični model. Na podlagi raziskav je bilo ugotovljeno, da ima mnogo športnikov težave s pravim doziranjem treninga ter zato njihova zmogljivost stagnira ali celo nazaduje. Vidiki izgorelosti se odražajo tudi mnogih, a ne izključno samo športnih vidikih kot so: poslabšanje športne zmogljivosti, splošna utrujenost, motnje spanje, nihanja razpoloženja in drugi. V ta namen je v nadaljevanju prikazan pristop merjenja stanja produktivnosti treninga z namenom, da na podlagi tega podatka lahko prilagodimo količino in intenziteto treninga tako, da se izognemo pretreniranosti in izgorelosti, hkrati pa izboljšamo našo športno zmogljivost.

Ključne besede: izgorelost, produktivnost treninga, matematični model, nosljive naprave

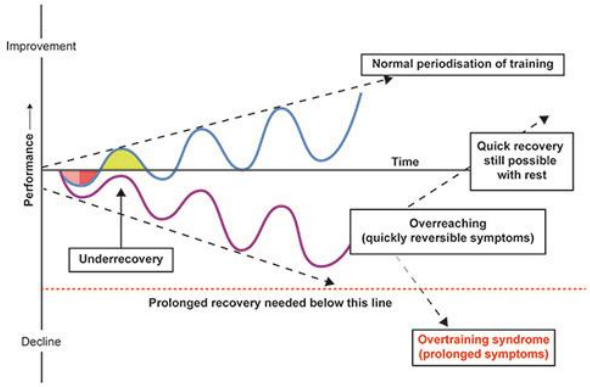
Measuring burnout in endurance athletes

The paper presents the concept of measuring burnout and monitoring the training productivity status of endurance athletes and a mathematical model. Based on research, it was found that many athletes have problems with the right dosage of training and as a result their performance stagnates or even declines. Aspects of burnout are also reflected in many, but not exclusively, athletic aspects such as: deterioration in athletic performance, general fatigue, sleep disturbances, mood swings and others. To this end, the following is an approach to measuring the state of training productivity, with the aim of using this information to adjust the amount and intensity of training to avoid overtraining and burnout, while improving our sport performance.

Keywords: overtraining, training productivity, mathematical model, wearable devices

1 UVOD

Poglavitni cilj vadbe v kontekstu športa je izboljšanje telesne zmogljivosti, poleg same vadbe je nujno potrebno tudi obdobje počitka, v katerem se lahko telo privadi na spremembe in obnovi razgrajene snovi. Dokler ima telo poleg dovolj intenzivne vadbe tudi dovolj počitka, to vodi v superkompenzacijo in izboljšavo zmogljivosti. V nasprotnem primeru, kjer naenkrat preveč obremenimo telo ali mu ne damo dovolj časa za regeneracijo, nastopi izgorelost. Izgorelost se lahko deli na dve fazi in sicer: akutna ali kratkoročna izgorelost in kronična ali dolgoročna izgorelost (potrebno preveriti). Dokler smo še v fazi kratkoročnega pretiravanja, se lahko z naknadnim počitkom izognemo hujšim dolgoročnim posledicam, kot so povečano tveganja poškodb, oslabljen imunski sistem, poslabšano mentalno zdravje in drugi [1], [2]. Zato je posebej pomembno nameniti pravilnemu intenzivnemu treningu več pozornosti, saj se poleg športne zmogljivosti prenese tudi na vsakdanje vidike posameznikovega življenja. Pomembno se je tudi zavedati, da izgorelost ni samo težava amaterskih in rekreativnih športnikov, ampak tudi vrhunskih, olimpijskih športnikov, ki so prisiljeni vedno bolj trdo delati in držati korak s konkurenco [3]. Na podlagi anket na poletnih OI leta 1996 v Atlanti in zimskih OI leta 1988 v Naganu, so ugotovili, da je bilo med 10 in 28 % športnikov na posameznem dogodku izgorelih od preintenzivnega treninga, ki se je odražal na zmanjšanju njihove športne zmogljivosti [1].



Slika 1: Prikaz spremembe zmogljivosti z različnimi trenažnimi procesi

2 MERJENE VELIČINE

Kljub pomembnosti problema ne obstajajo univerzalno sprejeti diagnostični kriteriji za določanje izgorelosti športnikov [4], [5]. Obstaja sicer mnogo predlaganih različnih biomarkerjev kot so: testosteron, kreatin

kinaza, železo, sečna kislina, amonijak, koncentracija kateholaminov, kortizol in mnogi drugi [5]. Velika večina pa ima problem, da niso sami po sebi dovolj zanesljivi, saj si mnoge raziskave med seboj nasprotujejo glede na njihovo učinkovitost in so lahko njihove spremembe tudi posledice drugih pojavov. Dodatna težava je tudi v kontekstu dostopnega in enostavnega merjenja, saj za merjenje večine biomarkerjev potrebujemo redne obiske športnih laboratorijev.

Med opravljenimi raziskavami vseeno prevladujejo nekateri parametri, ki so statistično bolj korelirani z nastopom izgorelosti. Najbolj pomemben in splošno priznan kot zlati standard je čas do odpovedi pri intenzivnosti 10 % nad aerobnim pragom posameznika, ki traja med 15 do 40 minut in pri katerih izgorelost odraža na zmanjšanju časa do odpovedi od 14 do 27 % [5], [6]. V zadnjem času je vedno več pozornosti namenjeno tudi športnim psihološkim vprašalnikom, ki jih nekateri označujejo kot bolj učinkovite pri zaznavanju v zgodnjih fazah izgorelosti [7]. Med pogostejšimi uporabljenimi vprašalniki sta »profil nihanja počutja« (ang. Profile of Mood Swings ali POMS) in stopnja zaznanega napora (ang. Rate of Perceived Exertion ali RPE). Prvi vprašalnik POMS poskuša meriti nihanja v počutju športnika preko različnih vidikov počutja kot so: napetost, depresija, jeza, utrujenost, živahnost in zmedenost. Pri izgorelih športnikih se pričakuje, da bodo negativni vidiki začeli bistveno bolj prevladovati v primerjavi z začetnim stanjem [1], [5]. Pri stopnji znanega napora poskušamo oceniti subjektivno doživljanje napora subjekta z oceno na Borgovi lestvici od 6 do 20 [8], specifično v temu primeru želimo primerjati znano vrednost napora pri neki moči ter kasneje opazovati spremembe doživljanja napora pri enaki moči. Ostale fiziološke veličine, ki smo jim namenili pozornost so raven laktata v krvi pri drugem laktatnem pragu, maksimalni srčni utrip in koncentracija adrenokortikotropnega hormona (ACTH). Znano je, da upad maksimalne zmogljivosti pogosto spremlja tudi zmanjšanje ravni laktata v krvi pri večini vzdržljivostnih športih. Pri kolesarjih pogosto pride do premika laktatne krivulje v desno zaradi česar pride do navideznega povečanja anaerobnega praga [5], [9]. Pogost pojav je tudi upad maksimalnega srčnega utripa, čeprav se strokovnjaki ne strinjajo glede vzroka. Lahko bi bil vzrok zmanjšane moči med maksimalnim naporom zaradi nezmožnosti doseči največje moči [1], [5], [9]. Kljub temu, da je nekoliko manj konvencionalen parameter, kar se tiče merjenje izgorelosti, je koncentracija ACTH dober pokazatelj preobremenitve. Pri mnogih različnih raziskavah so pokazali, da se pri maksimalnemu naporu izločane vrednosti ACTH jasno zmanjšane med 42 in 48 % [5].

Vse veličine bi merili neposredno. Čas do odpovedi bi merili s štoparico v sekundah, ki so enota SI. Psihološke spremembe bi merili s pomočjo prej omenjenih psiholoških vprašalnikov, obe veličini nimata enot. Laktat v krvi bi merili s pomočjo merilca ravni laktata v krvi in sicer v enotah mmol/L. Maksimalni srčni utrip bi merili s pomočjo športnega traku za merjenje srčnega utripa v enotah utrip/minuto (ang. Beats per minute ali BPM). Koncentracijo ACTH bi merili s pomočjo analize krvi, enota za meritev je pg/mL.

Glede na podano literaturo bi lahko bili izbrani tudi nekateri drugi parametri, a sem za se prej naštete odločil na kombinaciji dostopnosti in objektivnosti – kljub temu, da je ACTH nekoliko težje merljiv, je njegova sprememba bolj korelirana z stanjem izgorelosti, saj ima mnogo ostalih veličin zelo mešane rezultate v raziskavah, kar nam otežuje našo izbiro veličin.

3 MATEMATIČNI MODEL

3.1 Končna enačba

Naš model smo postavili tako, da smo preprosto zmnožili vse spremenljivke, nato smo dosegli želeno dinamiko spremenljivke s funkcijami merjene veličine in prilagodljivostnimi koeficienti, ki prilagajo prispevke spremenljivke v dveh znanih vrednostih in na podlagi njihove statistične vrednosti, ugotovljena na podlagi večje primerjalne raziskave, prirejen prispevek k skupni veličini [5]. Moja končna enačba za merjenje izgorelosti je

$$OTS = T * F * ACTH_{MAX} * L_{LT2} * HR_{MAX} * RPE \quad (1)$$

kjer so posamične spremenljivke:

- *OTS* – skupna funkcija izgorelosti
- *T* – funkcija časa do odpovedi submaksimalni obremenitvi
- *F* – funkcija rezultata POMS vprašalnika
- $ACTH_{MAX}$ – funkcija spremembe ACTH med maksimalno vadbo
- L_{LT2} – funkcija ravni laktata v krvi pri submaksimalni obremenitvi
- HR_{MAX} – funkcija maksimalnega srčnega utripa
- *RPE* – funkcija ocene fizičnega napora pri submaksimalni obremenitvi

3.2 Definicija lestvice OTS

Lestvica *OTS* je intervalna merska lestvica, natančneje definirana na intervalu od 0 do 10, kjer imajo sledeči podintervali naslednje opise glede na njihovo produktivnost za izboljšanje zmogljivosti:

od 0 do 1 – premalo treninga, upad športne zmogljivosti

od 1 do 4 – premalo treninga za napredovanje, ohranjanje športne zmogljivosti

od 4 do 8 – produktivni trening za napredovanje, izboljšanje športne zmogljivosti

od 8 do 10 – pretiravanje z intenzivnim treningom, kratkoročno izboljšanje športne zmogljivosti, dolgoročno stagnacija ali upad športne zmogljivosti
več od 10 – pretiravanje z intenzivnim treningom, dolgoročno stagnacija ali upad športne zmogljivosti, potrjena izgorelost

Lestvica ni navzgor omejena, a za vse vrednosti več od 10 samo potrjuje, da je športnik zagotovo v stanju izgorelosti in potrebuje zmanjšanje volumna ter intenzitete treninga.

3.3 Funkcije posameznih merjenih veličin

Enačbe posameznih funkcij spremenljivk so naslednje:

$$T = a_1 * \left(\frac{t_{NORMAL}}{t_{OTS}}\right) - a_2 \qquad (2)$$

kjer je t_{NORMAL}, čas do odpovedi pri »svežem« športniku podan v sekundah, in t_{OTS}, čas do odpovedi pri pretreniranem športniku v sekundah. Faktor a_1 ima enoto s^{-1}, a_2 pa nima enote.

$$F = b_1 * POMS + b_2 \qquad (3)$$

kjer je POMS rezultat enakoimenskega psihološkega vprašalnika. Faktorja b_1 in b_2 sta oba brez enote.

$$ACTH_{MAX} = c_1 * \sqrt[3]{\frac{1}{\Delta ACTH}} - c_2 \qquad (4)$$

kjer je $\Delta ACTH$ procentualna sprememba ACTH med vadbo, relativno na mirovanje. Faktorja c_1 in c_2 sta oba brez enote.

$$L_{LT2} = \frac{d_1}{\log(10\frac{L}{mmol} * LA)} - d_2 \qquad (5)$$

kjer je *LA* absolutna koncentracija laktatne kisline v krvi, podana v enoti mmol/L. Faktorja d_1 in d_2 sta oba brez enote.

$$HR_{MAX} = e_1 * \left(\frac{HR_{OT}}{HR_N}\right)^{-1} - e_2 \qquad (6)$$

kjer je HR_{OT} srčni utrip med maksimalnim naporom, a je športnik v stanju pretreniranja. Enota utripi na minuto (BPM). HR_N je srčni utrip med maksimalnim naporom pri »svežem« športniku. Enota je prav tako utripi na minuto (BPM). Faktorja e_1 in e_2 sta oba brez enote.

$$RPE = f_1 * \log_{16}(eff) - f_2 \qquad (7)$$

kjer je *eff* ocena fizičnega napora pri LT2 na podlagi Borgove lestvice, kjer športnik subjektivno oceni doživljanje napora na lestvici med 6 in 20. Faktorja f_1 in f_2 sta oba brez enote.

4 MERILNA NEGOTOVOST

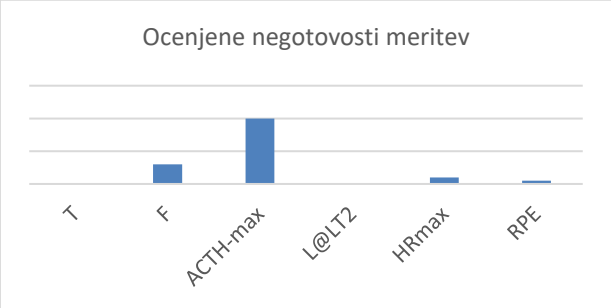
$$u^2(OTS) = \left(\frac{\partial OTS}{\partial T}\right)^2 u(T)^2 + \left(\frac{\partial OTS}{\partial F}\right)^2 u(F)^2 + \left(\frac{\partial OTS}{\partial ACTH_{MAX}}\right)^2 u(ACTH_{MAX})^2 + \left(\frac{\partial OTS}{\partial L_{LT2}}\right)^2 u(L_{LT2})^2 + \left(\frac{\partial OTS}{\partial HR_{MAX}}\right)^2 u(HR_{MAX})^2 + \left(\frac{\partial OTS}{\partial RPE}\right)^2 u(RPE)^2 \qquad (8)$$

kjer so:

- *T, F,* $ACTH_{MAX}$, L_{LT2}, HR_{MAX}, *RPE* – spremenljivke merjene veličine
- *u(T), u(F),* $u(ACTH_{MAX})$, $u(L_{LT2})$, $u(HR_{MAX})$, *u(RPE), u(OTS)* – merilne negotovosti veličin

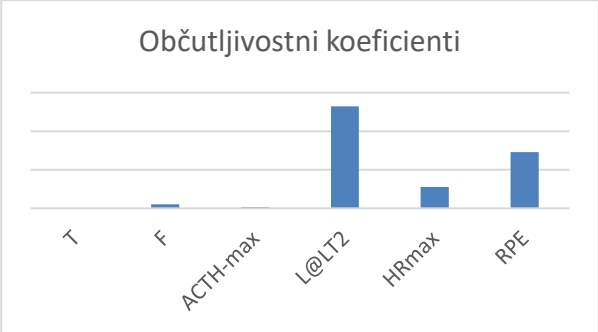
Posamične merilne negotovosti so predstavljene na sliki (št. Slike). $ACTH_{MAX}$ ima največjo ocenjeno merilno negotovost, sledijo mu rezultat POMS vprašalnika, maksimalni srčni utrip in ocena napora. Pričakovano ima najnižjo merilno negotovost meritev časa do odpovedi. Za večino fizioloških veličin bi bile lahko merilne negotovosti še nižje, a uporabljene vrednosti bolje zastopajo dostopnejše merilnike, ki še vedno dosegajo osnovne zahteve.

Tabela 1: Tabela z ocenjenimi merilnimi negotovostmi vseh merjenih veličin



Slika (št. Slike) prikazuje občutljivostne koeficiente. Največji koeficient ima nivo laktata v krvi, sledijo mu maksimalni srčni utrip, ocena napora in POMS vprašalnik. Najmanjše vrednosti imata ACTH in čas do odpovedi, kar je sicer v nasprotju s tem, da so veličine z večjimi koeficienti bolj odvisne od ostalih vplivnih veličin. To napako lahko pripišemo prepoenostavljeni končni enačbi za izgorelost.

Tabela 2: Vrednosti občutljivostnih koeficientov za vrednosti spremenljivk *T* = 1.95, *F* = 1.4, *ACTH-max* = 1.35, *L@LT2* = 1.11, *HRmax* = 1.12, *RPE* = 1.11



5 VPLIVNE VELIČINE

Da bi lahko čim bolj natančno in objektivno izmerili želene merjene veličine, je potrebno najprej izločiti mnogo zunanjih vplivov, ki so bili zanemarjeni v temu seminarju, saj bi bil končen seminar preobsežen. Kljub temu se je pomembno zavedati njihovega vpliva na posamično merjeno veličino, zato so spodaj naštete vsaj

nekatere vplivne veličine, ki pomembno vplivajo na merjene veličine:

- merjenje časa do odpovedi: motivacija športnika, pripravljenost za maksimalno obremenitev, osiromašene glikogenske zaloge [9],
- rezultat POMS vprašalnika: zunanji vplivi na motivacijo in psiho športnika, napačna interpretacija vprašanj,
- ocena napora: napačna interpretacija lestvice,
- nivo laktata: osiromašene glikogenske zaloge [9],
- maksimalni srčni utrip: spremembe srčnega utripa zaradi bolezni/okužb [5],
- ACTH: standardizirani pogoji in metode, časovna občutljivost odvzema vzorca [5].

Za vse veličine je še posebej ključnega pomena, da so meritve narejena v čim bolj enakem okolju, saj izračunavamo vrednost funkcije merjene veličine na podlagi normiranih vrednosti. Za ustvarjanje popolne slike pogosto niso dovolj samo podatki iz nedavne zgodovine, z večjo količino zgodovinskih podatkov si lahko ustvarimo popolnejšo in boljšo sliko o športniku. To je posebej pomembno, saj ločitev med posameznimi fazami produktivnosti niso črno-bele [10].

6 POPOLNI MERILNI REZULTAT

Popolni merilni rezultat z upoštevanjem izmerjene vrednosti, korekcije (K), negotovosti (u) in faktorja razširjene negotovosti (k) je sledeč:

$$OTS = (izmerjena\ vrednost - K) \pm u(OTS),\ \mathrm{k} = 1 \quad (9)$$

Ker korekcijo izmerjenih vrednosti upoštevamo pri vsaki meritvi posebej, lahko končni rezultat z ocenjenimi vrednostmi za primer iz tabele 2 zapišemo kot

$$OTS = (5.0) \pm 1.1,\ \mathrm{k} = 1 \quad (10)$$

Kar se tiče negotovosti, je uporabljen faktor negotovosti 1, saj se je na primerih izkazalo, da bi bilo območje negotovosti preširoko in interpretacija ne bi imela smisla.

7 UPORABNOST MODELA

Cilj opraviti vse meritve biti dovolj natančen in dostopen z uporabo nosljivih naprav je delno uspel, meritvi laktata in ACTH še nista na dovolj visoki in praktični ravni, da bi bili široko dostopni. Model bi se lahko uporabil za grobo oceno stanja produktivnosti športnika. Izpopolniti bi ga bilo treba na podlagi večje količine podatkov, saj bo tako najbolje odražal realno stanje – trenutni model je bil osnovan na zelo majhni količini podatkov in ima posledično mnogo pomanjkljivosti. Za natančnejše in boljše rezultate bi bilo treba model nekoliko spremeniti in dopolniti, saj trenutno ni izpolnjuje vseh naših ciljev, ki smo si jih zadali na začetku.

8 ZAKLJUČEK

V članku je bil predstavljen predlagan model merjenja pretreniranosti v vzdržljivostnih športnikih preko šestih merjenih veličinah, kjer bi se čim večji del meritev opravil s pomočjo nosljivih naprav. Z modelom lahko ocenimo produktivnost našega treninga oz. kako blizu/daleč smo od izgorelosti. V model bi lahko vključili ali nadomestili še mnoge druge veličine, a se zaradi pomanjkanja dokazov na področju ne moremo jasno odločiti, katere so bolj indikativne. Predlagan model služi za grobo oceno izgorelosti, za natančnejše in točnejše rezultate bi bilo potrebno model nadgraditi na podlagi večji količini podatkov.

LITERATURA

[1] R. N. Alves, L. O. P. Costa, in D. M. Samulski, „Monitoring and prevention of overtraining in athletes“, *Rev Bras Med Esporte*, let. 12, 2006.

[2] S. L. Halson, G. I. Lancaster, A. E. Jeukendrup, in M. Gleeson, „Immunological responses to overreaching in cyclists“, *Med. Sci. Sports Exerc.*, let. 35, št. 5, str. 854–861, maj 2003, doi: 10.1249/01.MSS.0000064964.80040.E9.

[4] A. Angeli, M. Minetto, A. Dovio, in P. Paccotti, „The overtraining syndrome in athletes: a stress-related disorder“, *J. Endocrinol. Invest.*, let. 27, št. 6, str. 603–612, jun. 2004, doi: 10.1007/BF03347487.

[5] A. Urhausen in W. Kindermann, „Diagnosis of overtraining: what tools do we have?“, *Sports Med. Auckl. NZ*, let. 32, št. 2, str. 95–102, 2002, doi: 10.2165/00007256-200232020-00002.

[6] A. Urhausen, H. H. W. Gabriel, B. Weiler, in W. Kindermann, „Ergometric and Psychological Findings During Overtraining: A Long-Term Follow-Up Study in Endurance Athletes“, *Int. J. Sports Med.*, let. 19, št. 2, str. 114–120, feb. 1998, doi: 10.1055/s-2007-971892.

[7] M. Kellmann in K.-D. Günther, „Changes in stress and recovery in elite rowers during preparation for the Olympic Games“, *Med. Sci. Sports Exerc.*, let. 32, št. 3, str. 676, mar. 2000.

[8] G. Borg, *Borg's perceived exertion and pain scales*. v Borg's perceived exertion and pain scales. Champaign, IL, US: Human Kinetics, 1998, str. viii, 104.

[9] S. L. Halson in A. E. Jeukendrup, „Does Overtraining Exist?“, *Sports Med.*, let. 34, št. 14, str. 967–981, dec. 2004, doi: 10.2165/00007256-200434140-00003.

[10] G. Kenttä in P. Hassmén, „Overtraining and recovery. A conceptual model“, *Sports Med. Auckl. NZ*, let. 26, št. 1, str. 1–16, jul. 1998, doi: 10.2165/00007256-199826010-00001.

Oliver Avsec je diplomiral leta 2023 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Trenutno opravlja magistrski študij na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Njegova raziskovalna področja zanimanja vključujeta robotiko in avtomatiko.

ELEKTROTEHNIŠKI VESTNIK 78(X): 1–5, 2011
EXISTING SEPARATE ENGLISH EDITION

Uztreznost zamenjave človeka z inteligentnim robotom

Ivan Reshkov

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: ir8542@student.uni-lj.si

Povzetek. Roboti so postali nepogrešljiv del industrije in gospodinjstva, od povečanja produktivnosti v proizvodnji do avtomatskega vzdrževanja in čiščenja domov. Inteligentni roboti, opremljeni z umetno inteligenco, imajo sposobnost odločanja in učenja, kar omogoča prilagajanje njihovega obnašanja glede na okolico. Avtonomna vozila, predstavniki inteligentnih robotov, postajajo vedno bolj priljubljena. Članek se osredotoča na merjenje in primerjavo uspešnosti človeškega voznika in avtonomnega avtomobila na različnih področjih, kot so poraba goriva, natančnost vožnje, odziv na okolico in varnost.Raznolikost merjenih veličin zahteva različne merilne tehnike. Članek se osredotoča le na nekatere, kot so poraba goriva, prilagodljivost prometnega pasu, čas reakcije, čas potreben za vožnjo do cilja in ohranjanje fokusa in pozornosti.

Ključne besede: inteligentni robot, voznik, avtonomni avto, ustreznost zamenjave, meritve

Adequacy of replacing a human with an intelligent robot

Robots have become an indispensable part of industry and households, from increasing productivity in manufacturing to automatic maintenance and cleaning of homes. Intelligent robots, equipped with artificial intelligence, have the ability to make decisions and learn, enabling them to adapt their behavior to the surroundings. Autonomous vehicles, representatives of intelligent robots, are becoming increasingly popular. The article focuses on measuring and comparing the performance of a human driver and an autonomous vehicle in various areas such as fuel consumption, driving precision, responsiveness to the environment, and safety. The diversity of measured variables requires different measurement techniques. The article focuses only on some, such as fuel consumption, adaptability to traffic lanes, reaction time, time required for travel, and maintaining focus and attention.

1 UVOD

Roboti so danes že prisotni okoli nas. V industriji se vsako leto povečuje uporaba robotov, ki si prizadevajo povečati produktivnost, zmanjšati stroške in zmanjšati napake pri proizvodnji. Imamo jih tudi doma za avtomatsko čiščenje, vzdrževanje vrta, pripravo hrane itd. [2]. Srečamo jih lahko tudi na ulicah. Prvo vprašanje, ki nam pade na pamet, je, kaj je inteligentni robot? Inteligentni robot je vsak robot, ki ima sposobnost odločanja in učenja. Glede na razmere v svojem okolju se robot odloči za svojo naslednjo akcijo. Z uporabo algoritmov umetne inteligence se robot lahko ves čas uči in s tem izboljšuje svoje obnašanje. Ker je področje inteligentnih robotov ogromno, sem se odločil, da bom za svojo nalogo uporabil avtonomni avto in prikazal vse enačbe, primere in rezultate zanj. Glede na to, da postajajo avtonomna vozila vse bolj priljubljena in se premikamo v smeri zmanjšanja vozil na cesti, bomo prišli do trenutka, ko bo vozniku dovoljeno voziti avto samo z določenim razlogom. Ker bodo avtonomna vozila naredila urbana mesta bolj varna in urejena, bo dovoljeno vožnjo avtomobila s strani običajnega voznika le, če voznik prejme dobro oceno na lestvici, ki jo predlagam, kjer primerjamo, kako avtonomno vozilo presega človeka. Ker že obstajajo študije [1], ki potrjujejo, da je avtonomni avto boljši od človeka, bomo merili, kako se človek približuje avtonomnemu avtu. Seveda avtonomni avto ni boljši v vseh kategorijah. Obstajajo kategorije, kjer je trenutno človek boljši, kot so etičnost v prometu, čas vožnje do cilja itd.

Prejet
Odobren

2 IDENTIFIKACIJA VELIČIN

Obstaja veliko veličin, ki bi jih lahko merili. Merili bi lahko:

- Poraba goriva - primerjava porabe goriva med človeškim voznikom in avtonomnim vozilom na enakih poteh in v enakih pogojih.
- Natančnost in doslednost - merjenje natančnosti vožnje, kot je npr. ohranjanje sredine voznega pasu, dosledno upoštevanje omejitev hitrosti in enakomerna vožnja.
- Odziv na okolico - ocena hitrosti odziva na prometne signale, pešce, druge udeležence v prometu in spremembe v okolici.
- Varnost - primerjava števila prometnih nesreč in prekrškov, ki jih povzroči človeški voznik v primerjavi z avtonomnim vozilom.
- Zmožnost izogibanja prometnih nesreč -Sposobnost prepoznavanja nevarnih situacij na cesti in sprejemanje ustreznih ukrepov za preprečitev trčenja ali nesreče.

- Čas reakcije - merjenje časa od zaznavanja nevarnosti do ukrepanja. To lahko vključuje čas zaviranja ali izogibanja oviri.
- Izvajanje prometnih predpisov - analiza, kako dosledno se upoštevajo prometni predpisi, kot so pravila o prednosti, ustavljanje na semaforjih, uporaba smernih utripalk, parkiranje itd.
- Ohranjanje fokusa in pozornosti - merjenje voznikove pozornosti med vožnjo, na primer z uporabo kamer za spremljanje obraza ali sledenje očesnim gibi, ter primerjavo s sposobnostmi avtonomnega vozila pri ohranjanju konstantne ravni pozornosti.
- Vozniška etika - spoštovanje drugih voznikov, sprejemanje odločitev, sodelovanje v prometu, zmanjševanje agresivnega vedenja itn.
- Prilagoditev hitrosti - sposobnost prilagajanja svoje vožnje glede na različne dejavnike, kot so prometni pogoji, okolje, cestne razmere, gostota prometa, vremenske razmere in prometne omejitve.
- Čas potreben za vožnjo do cilja - časovni interval, ki ga potrebuje vozilo ali voznik, da doseže želeno destinacijo ali končni cilj.
- Prilagodljivost prometnega pasu - merjenje razdalje od avta do bele črte na levi in desni strani od avtomobila

Nekatere od meritev tudi zahtevajo različne merilne tehnike in niso enostavno izvedljive. Druge imajo veliko negotovost ali pa so subjektivne. Jaz sem se odločil upoštevati le nekatere, in sicer porabo goriva, prilagodljivost prometnega pasu, čas reakcije, čas potreben za vožnjo do cilja ter ohranjanje fokusa in pozornosti.

2.1 Poraba goriva

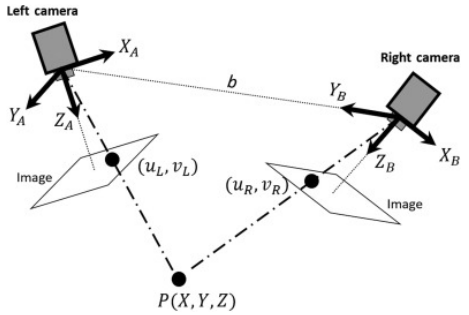
Vsak avto vsebuje merilnik porabe goriva. Porabo goriva *PG* izračunam po formuli (1).

$$PG = \frac{c \cdot 100}{d} \tag{1}$$

kjer je c uporabljeno gorivo v litrih, d pa prevožena razdalja v kilometrih. V števcu množim s 100, s ciljem, da bi dobil porabo goriva na 100 km.

2.2 Prilagodljivost prometnega pasu

Odločil sem se za merjenje razdalje od avtomobila do bele črte na levi in desni strani vozila, kar nam bo omogočilo opazovanje, kako vozilo sledi prometnemu pasu. Razdaljo bomo merili s pomočjo vgrajene kamere na obeh straneh vozila. Pri tem se lahko poslužujemo tehnike, imenovane stereovizija, kjer sta dve kameri postavljeni na različna mesta in zbirata različne slike. S pomočjo teh slik lahko natančno določimo razdaljo do nekega predmeta. Idealni primer je situacija, ko je razdalja od avtomobila do bele črte na obeh straneh enaka. V mojem primeru sem zaradi enostavnosti predpostavil, da se avto vozi po avtocesti, kar omogoča lažje meritve. V primeru vožnje po mestu bi bilo merjenje te prilagodljivosti veliko bolj kompleksno.



Slika 1: Stereovizija: tehnika merjenja razdalje s pomočjo dveh kamer.

2.3 Čas reakcije

Čas reakcije predstavlja interval od zaznavanja nevarnosti do ukrepanja, vključno s časom zaviranja ali izogibanja oviri. Že trenutno potekajo raziskave, ki se osredotočajo na to temo, pri čemer so na voljo tudi številke. Čas reakcije pri človeku kot vozniku se povprečno giblje od 0.75 do 1.5 sekunde, medtem ko avtonomni avto dosega čas reakcije približno 0.5 sekunde.

2.4 Čas potreben za vožnjo do cilja

To je časovni interval, ki ga potrebuje vozilo ali voznik, da doseže želeno destinacijo ali končni cilj. V tem članku sem predpostavil, da je največje trajanje vožnje 60 minut. Ker potrebujem v matematičnem modelu vrednost časa, ki je znotraj območja med 0 in 1, bom čas normaliziral, da dobim ustrezno vrednost znotraj tega območja. To skaliranje je še posebej pomembno zaradi časa reakcije, ki je pogosto krajši od 1 sekunde. Vključevanje časa reakcije v matematični model pomeni, da moram ustrezno zmanjšati vrednost časa, potrebnega za vožnjo do cilja, da upoštevam tudi čas reakcije, ki ni zanemarljiv v tem kontekstu.

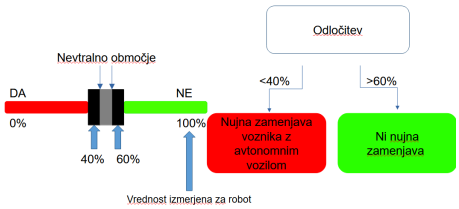
2.5 Ohranjanje fokusa in pozornosti

Tukaj merim voznikovo pozornost med vožnjo, na primer z uporabo kamer za spremljanje obraza ali sledenje očesnim gibom, in nato primerjam s sposobnostmi avtonomnega vozila. Ta meritev se izvede le za voznika, pri čemer dobim funkcijo pozornosti, ki se spreminja s časom. Za avtonomni avto predpostavljam, da ima konstantno vrednost pozornosti.

3 Problem merljivosti

Problem sem zastavil tako, da na podlagi izmerjenih podatkov o človeškem faktorju in avtonomnem vozniku sprejmem odločitev o morebitni zamenjavi človeškega voznika z avtonomnim avtom. Ker sem predpostavil (kar potrjujejo raziskave) [1], da je avtonomni avto vedno boljši od človeka, bom vrednost uspešnosti, izmerjeno za avtonomni avto, vzel kot maksimalno vrednost ali 100% na lestvici. Definiral sem lestvico, ki določa, ali je zamenjava človeka s avtonomnim avtom nujna. Če za

voznika izmerim vrednost uspešnosti pod 40% vrednosti, ki smo jo izmerili za avtonomni avto, je zamenjava nujna. Če človek doseže več kot 60% vrednosti, ki smo jo izmerili za avtonomni avto, potem zamenjava človeka z avtonomnim avtom ni nujna. Nevtralno območje je območje med 40% in 60% uspešnosti robota. V tem primeru ne morem sprejeti odločitve o zamenjavi, saj je negotovost merjenih veličin lahko večja od 10%, kar je prikazano na sliki 2.



Slika 2: Lestvica, odločanje o zamenjavi voznika z avtonomnim avtom

4 Matematični model

Parametri, ki so pomembni za naš matematični model, vključujejo porabo goriva, prilagodljivost prometnega pasu, čas reakcije, čas potreben za vožnjo do cilja in ohranjanje fokusa in pozornosti.

Moj cilj je izmeriti primernost zamenjave človeka z inteligentnim robotom, pri čemer avtonomni avto velja za predstavnika inteligentnih robotov. Matematični model sem oblikoval za ocenjevanje primernosti zamenjave voznika z avtonomnim avtom. Da bi ugotovil, ali je zamenjava potrebna, moram izmeriti določene parametre, kot so tisti, navedeni zgoraj, jih vnesti v moj model ter interpretirati rezultat. Primernost zamenjave interpretiram kot binarno vrednost - DA ali NE.

Najprej izmerim parametre, ki sem jih omenil zgoraj, tako za avtonomni avto kot za človeka. Nato te parametre vstavim v naš matematični model, pri čemer dobim vrednost, ki sem jo poimenoval "vrednost uspešnosti"(M_C in M_R), pri čemer je enota **us**. Matematični model za robota je prikazan z enačbo (2), za človeka pa z enačbo (3).

$$M_R = w_1 \cdot \frac{1}{\frac{c \cdot 100}{d}} + w_2 \cdot (-1) \cdot |\sum_{i=1}^{n} \frac{rl_i}{n} - \frac{rd_i}{n}| + \\ + w_3 \cdot \frac{1}{t_r + \frac{t_c}{3600}} + w_4 \cdot \frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} f \, dt \quad (2)$$

$$M_C = w_1 \cdot \frac{1}{\frac{c \cdot 100}{d}} + w_2 \cdot (-1) \cdot |\sum_{i=1}^{n} \frac{rl_i}{n} - \frac{rd_i}{n}| + \\ + w_3 \cdot \frac{1}{t_r + \frac{t_c}{3600}} + w_4 \cdot F \quad (3)$$

- c ... uporabljeno gorivo v litrih,
- d ... prevožena razdalja v kilometrih,
- rl_i ... razdalja od avta do leve bele črte,
- rd_i ... razdalja od avta do desne bele črte,
- t_r ... čas reakcije,
- t_c ... čas potreben za vožnjo do cilja,
- f ... funkcija fokusa in pozornosti v odvisnosti od časa
- F ... konstanta fokusa in pozornosti za avtonomnega avta
- w_1, w_2, w_3, w_4...uteži, ki povejo koliko določena meritev vpliva na končni rezultat in pokrajšajo enote

Prvi člen stremi k čim manjši vrednosti, ko je poraba goriva večja. V drugem členu izračunavam povprečno razdaljo med vozilom in belo črto na obeh straneh. Če je razdalja enaka na obeh straneh, je vrednost tega člena 0 in ne vpliva na uspešnost (M_C in M_R). Če razdalja ni enaka, je ta člen negativen in zmanjša vrednost uspešnosti. Tretji člen stremi k čim manjši vrednosti, ko je čas reakcije in čas potrebnega za vožnjo do cilja večji. Čas potreben za vožnjo do cilja je normaliziran z največjo vrednostjo (60 minut), kar zagotavlja vrednost med 0 in 1, hkrati pa upošteva čas reakcije, ki je pogosto krajši od 1 sekunde. Četrti člen predstavlja povprečno vrednost funkcije pozornosti, pri čemer je pri avtonomnem avtu pozornost konstantna.

Ko pridobim te vrednosti, jih vstavim v enačbo (4) in dobim rezultat izražen v odstotkih. Če je vrednost A večja od 60%, zamenjava človeka ni nujna. V primeru, da je vrednost A manjša od 40%, pa je zamenjava človeka nujna.

$$A = \frac{M_C}{M_R} \cdot 100\% \quad (4)$$

A...razmerje uspešnosti človeka proti avtonomnim avtom (robot) v procentih M_R...meritve za robota, M_C...meritve za človeka

5 Negotovost merjene veličine

Merilna negotovost je kvantitativno merilo, ki opisuje, kako močno dvomimo v izmerjeni rezultat. Negotovost posredno merjenih veličin je odvisna od vseh posameznih prispevkov negotovosti vseh merjenih veličin. Skupna negotovost se izračuna kot koren vsote kvadratov negotovosti neposredno merjenih veličin. Če mojo enačbo matematičnega modela zapišem v bolj enostavni obliki kot

$$M_C = w_1 \cdot PG + w_2 \cdot (-1) \cdot PPP + w_3 \cdot T + w_4 \cdot f \quad (5)$$

je skupna negotovost za človeka:

$$u(M_C) = \sqrt{c_1^2 \cdot u^2(PG) + c_2^2 \cdot u^2(PPP) + c_3^2 \cdot u^2(T) + c_4^2 \cdot u^2(f)} \quad (6)$$

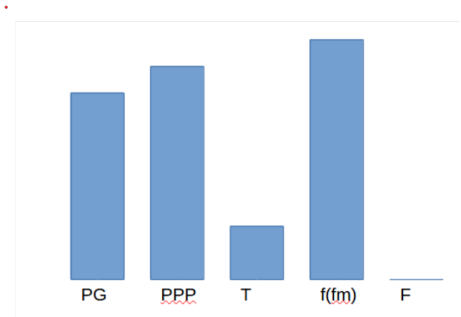
in za avtonomni avto oz. robot:

$$u(M_C) = \sqrt{c_1^2 \cdot u^2(PG) + c_2^2 \cdot u^2(PPP) + c_3^2 \cdot u^2(T)} \quad (7)$$

V enačbah nastopajo negotovosti posameznih prispevkov veličin, ki so pomnoženi z občutljivostnimi koeficienti, ki se jih lahko izračuna za vsak parameter posebej s pomočjo parcialnega odvoda:

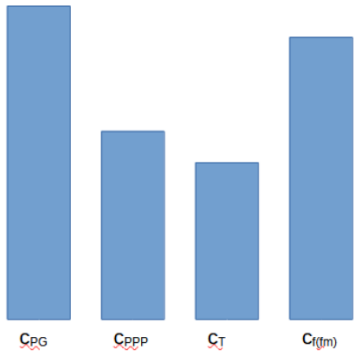
$$c_n = \frac{\delta M_C}{\delta x_n} \tag{8}$$

Največji vpliv k negotovosti pričakujem, da bo imelo merjenje fokusa in pozornosti. Na sliki (3) vidimo histograma pozameznih prispevkov k skupni negotovosti.



Slika 3: Histogram pozameznih prispevkov k skupni negotovosti

Seveda, v slabših vremenskih razmerah se negotovosti povečajo. Na sliki 4 vidimo histogram občutljivostnih koeficientov.



Slika 4: Histogram občutljivostnih koeficientov

6 Vplivne veličine

Na meritve naše veličine največji vpliv imajo vremenske razmere. Druge pomembne vplivne dejavnike predstavljajo gneča v prometu, cestni zastoji in različne cestne razmere. Vse te dejavnike vplivajo na porabo goriva, ohranjanje fokusa in pozornosti, čas reakcije ter čas, potreben za vožnjo, kot tudi na prilagodljivost prometnega pasu.

7 Popolni merilni rezultat

Popoln merilni rezultat v našem primeru bi bil podan z izmerjeno vrednostjo, ustrezno korekcijo, pridobljeno iz certifikatov uporabljenih merilnih naprav, in skupno negotovostjo. Ob upoštevanju matematičnega modela in izbrane lestvice, popoln merilni rezultat (prikazan le za človeka) je:

$$M_C = (M_{Cizm} - Kor) + -u(M_C), k = 2, p = 95\% \tag{9}$$

kjer so M_{Cizm}...izmerjena vrednost, Kor...korekcija, u(M_C)...merilna negotovst, k...faktor raširitve, p...stopnja zaupanja

8 Interdisciplinarnost

Za izvedljivost te meritve je nujno poznavanje področja elektrotehnike in meritev. Pomembno je tudi poznavanje s področja umetne inteligence. Današnja uporaba umetne inteligence se nenehno širi, zato lahko utrujenost voznika, njegovo vozniško etiko, pozornost, izvajanje prometnih predpisov itn. ocenjujemo s pomočjo algoritmov umetne inteligence. Merilni problem, ki sem ga definiral, bo močno vplival na prihodnost urbanih mest in njihovo strukturo. Zamenjava človeka z avtonomnim avtom (robotom) bo temeljito spremenila našo družbo.

9 Zaključek

Skupna analiza meritev in uporaba matematičnega modela v kontekstu avtonomnih vozil ter vplivov različnih dejavnikov na vožnjo, predstavljajo kompleksno področje, ki zahteva poznavanje elektrotehnike, meritev in umetne inteligence. Vremenske razmere, prometna gneča in cestne razmere bistveno vplivajo na rezultate meritev, s čimer se povečujejo negotovosti. Uvedba umetne inteligence v vožnjo odpira nove možnosti za oceno voznikovega vedenja in sposobnosti. Merilni problem, zlasti v povezavi z avtonomnimi vozili, bo imel pomemben vpliv na prihodnost urbanih mest in njihovo mobilnostno strukturo. Z uporabo algoritmov umetne inteligence za oceno voznikovega stanja se odpirajo možnosti za izboljšanje varnosti in učinkovitosti v prometu. Vendar pa je treba pri interpretaciji meritev upoštevati vse vplivne dejavnike in skupno negotovost, ki izhaja iz merilnega procesa. Zamenjava človeka z avtonomnimi vozili ima potencial za temeljito spremembo družbe in mobilnosti. Ocenjevanje ustreznosti te zamenjave z uporabo razvitega matematičnega modela in lestvice omogoča boljšo razumevanje, kdaj je to upravičeno. Kljub izzivom in negotovostim, ki jih prinaša, merilni problem prispeva k razvoju inteligentnih transportnih sistemov in oblikovanju prihodnosti mobilnosti.

Literatura

[1] WALL-Y,*Self-driving cars are safer than human drivers, study shows, WarpNews, 2023.*

*[2] Sofía R. Ustáriz,*Robotics at home: examples of robots designed to support us at home, BBVA, 2021.

[3] J. Pavlovic, G. Fontaras,*How accurately can we measure vehicle fuel consumption in real world operation?, ScienceDirect, 2021.*

[4] G. Bathla, A. Kumar, R.N. Thakur Autonomous Vehicles and Intelligent Automation: Applications, Challenges, and Opportunities, Hindawi, 2022.

[5] D. František, P. Hubinský, J. Hanzel, A. Babinec, M. Tölgyessy*Intelligent Vehicles as the Robotic Applications, Procedia Engineering, 2012.*

[6] G. Geršak, Merilna negotovost za začetnike, ver5.0, Fakulteta za elektrotehniko, julij 2008.

Merjenje povezanosti nogometne ekipe

Žan Verdev

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

Povzetek. Ta članek predstavlja razvoj inovativnega merilnega sistema za ocenjevanje povezanosti nogometne ekipe. Sistem integrira različne merilne veličine, vključno z moralo, komunikacijo in statističnimi podatki, ki so normirani in ocenjeni za doseganje skupne ocene povezanosti. V študiji izvedljivosti je model testiran na primeru tekme, ki kaže obetavne rezultate za nadaljnjo uporabo v profesionalnem nogometu. Poudarjena je bila tudi interdisciplinarnost pristopa, ki združuje psihologijo, športno znanost in podatkovno analitiko.

Ključne besede: Merilni sistem, povezanost ekipe, morala, komunikacija, statistični podatki

Measuring the Connectivity of a Football Team

This article presents the development of an innovative measurement system for assessing the coherence of a football team. The system integrates various metrics, including morale, communication, and statistics, which are normalized and evaluated to achieve a common assessment of connectivity. In the feasibility study, the model is tested on a match case, showing promising results for further use in professional football. The interdisciplinary approach, which combines psychology, sports science and data analytics, was also highlighted.

Keywords: Measurement system, team connection, morale, communication, statistics

1. UVOD

V dinamičnem in konkurenčnem svetu nogometa je povezanost ekipe ključni dejavnik za uspeh. Medtem ko individualne spretnosti in fizične zmogljivosti igralcev predstavljajo temeljne komponente uspešnosti, je sinergija, ki izvira iz povezanosti ekipe, tista, ki pogosto loči zmagovalce od poražencev. Kljub temu pa je merjenje te povezanosti pogosto zapostavljeno ali neustrezno obravnavano v obstoječih analitičnih pristopih. Ta članek predstavlja razvoj naprednega merilnega sistema, ki objektivno, kakor tudi subjektivno kvantificira povezanost nogometne ekipe. Sistem združuje različne dimenzije - od morale in komunikacije do statističnih podatkov igre, da bi zagotovil celovit vpogled v notranje dinamike ekipe. Ta interdisciplinarni pristop ne samo da izboljša razumevanje povezanosti ekipe, ampak ponuja tudi praktična orodja za trenerje in športne analitike za optimizacijo uspešnosti ekipe. Povezanost med igralci se odraža na različne načine, od njihove interakcije na igrišču do skupne odzivnosti na taktične spremembe, ki so ključnega pomena za dinamično naravo nogometne igre. S preučevanjem teh odnosov in interakcij naš model omogoča globlji vpogled v to, kako se individualne spretnosti in skupinska dinamika združujejo, da oblikujejo uspešno ekipo. V tem članku podrobno obravnavamo različne metode in pristope, uporabljene za razvoj tega modela, in raziskujemo, kako lahko njegova uporaba v praksi prispeva k boljšemu razumevanju in razvoju strategij za izboljšanje ekipne uspešnosti.

2. DEFINICIJA VELIČINE

Merjena veličina Povezanost nogometne ekipe (Pov) bi definirali kot pozitivno vrednost, katera se giblje v razponu med 0 in 1.

Ta razpon je bil izbran zaradi njegove sposobnosti, da jasno prikaže procentualno povezanost v ekipi, kar omogoča lažje primerjanje povezanosti v različnih situacijah, kot so različne kombinacije igralcev na igrišču.Vrednost 0 bi pomenila, da med tekmo nismo zaznali sprememb morale, komunikacije in statističnih podatkov, kar bi pomenilo, da ekipa ni bila povezana. Višja vrednost meritve bi pomenila, da so igralci na tekmi bolj povezani.

Za merjenje povezanosti bomo merili nekaj subjetivnih in objetivnih veličin, katere so pomembne za sinergijo in uspešnost ekipe. Te so: morala ekipe, učinkovitost komunikacije med igralci in statistični podatki igre. Za merjenje teh veličin bomo uporabili kombinacijo anket, opazovanj in objektivnih statističnih metod.

Naša merilna veličina je definirana izključno za okvir posamezne nogometne tekme. Pomembno je omeniti, da je naš model za ocenjevanje povezanosti nogometne ekipe zasnovan na način, ki ne vključuje morebitnih zamenjav igralcev med samo tekmo.

3. MATEMATIČNI MODEL

Matematični model, ki ga predlagamo je predstavljen v enačbi (1) in temelji na merjenih veličinah, ki so bile zapisane v drugem poglavju.

$$Pov = \omega_M * \frac{5+\int_0^{90}\sum_{i=1}^{n}\frac{\frac{\sum_{j=1}^{11}S_{pj}}{11}}{1+e^{-0.1*(t-t_i)}}dt}{5+\int_0^{90}\sum_{i=1}^{n}\frac{5}{1+e^{-0.1*(t-t_i)}}dt} + \\ + \omega_{Kom} * \frac{\frac{1}{6}*\sum_{i=1}^{6}O_i}{10} + \\ + \omega_{Stat} * \left(\frac{P_b}{100}+\frac{S_g}{25}+\frac{U_p}{500}+\frac{Kot}{20}-\frac{Prek}{20}\right) \quad (1)$$

Kjer oznake predstavljajo:

- S_{pj}… ocena spremembe morale posameznega igralca
- t_i… čas ob doseženem ali prejetem golu
- n… število doseženih ali prejetih golov
- O_i… ocena učinkovite komunikacije
- P_b… procent posesti žoge
- S_g… število strelov
- U_p… število uspešnih podaj
- Kot… število kotov
- $Prek$… število prekrškov
- ω_M… utež morale ekipe
- ω_{Kom}… utež učinkovite komunikacije
- ω_{Stat}… utež statističnih podatkov

Za lažje razumevanje matematičnega modela so v nadaljevanju predstavljeni posamezni šrispevki za merjenje povezanosti nogometne ekipe.

3.1 MORALA EKIPE

Morala ekipe je bistvena komponenta v merjenju povezanosti nogometne ekipe, saj močno vpliva na igralce tako individualno kot kolektivno. Merjenje morale je kompleksen izziv, saj gre za subjektivno in dinamično veličino, ki se lahko spreminja zaradi različnih dejavnikov, kot so uspeh na igrišču, medsebojne interakcije igralcev in taktične odločitve trenerja.

$$M_{nor} = \omega_M * \frac{5+\int_0^{90}\sum_{i=1}^{n}\frac{\frac{\sum_{j=1}^{11}S_{pj}}{11}}{1+e^{-0.1*(t-t_i)}}dt}{5+\int_0^{90}\sum_{i=1}^{n}\frac{5}{1+e^{-0.1*(t-t_i)}}dt} \quad (2)$$

Za kvantitativno oceno morale smo uporabili kombinacijo anketnih odgovorov igralcev. Vsak igralec po končani tekmi izpolni anketo, na kateri oceni spremembo svoje morale (S_{pj}) ob doseženim ali prejetim golom. Lestvica za spremembo morale se giblje od -5 do 5, kjer predstavlja vrednost -5 najvišji padec morale, vrednost 5 najvišji dvig morale in vrednost 0 ne nakazuje na spremembo morale.

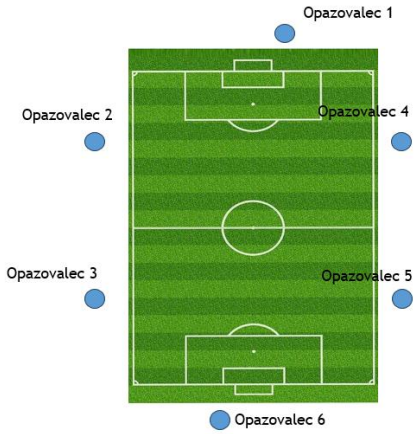
Nadalje smo te podatke povprečili in modelirali z uporabo sigmoidne funkcije, ki učinkovito zajame hitrost spremembe morale v odziv na dogodke na igrišču. Ta pristop omogoča, da morala ni le ocenjena kot trenutni izraz, ampak kot dinamična veličina, ki se razvija in spreminja skozi celotno tekmo.

V naslednjem koraku smo določili skupno moralo ekipe za celotno trajanje tekme. To smo izvedli z integracijo sigmoidnih funkcij, ki smo jih uporabili za modeliranje morale, od začetka tekme (t = 0) do njenega konca (t = 90 minut).

Končni korak pri izračunu morale je bilo njeno normiranje na vrednostni razpon od 0 do 1. To smo dosegli tako, da smo celotno izračunano moralo ekipe delili z maksimalno možno vrednostjo morale. Takšna maksimalna morala bi se teoretično pojavila, če bi bile vrednosti spremembe morale pri vseh igralcih stalno ocenjene kot 5.

3.2 UČINKOVITA KOMUNIKACIJA

Za merjenje učinkovitosti komunikacije med igralci nogometne ekipe na tekmi smo se osredotočili na opazovanje in ocenjevanje. To nalogo smo izvedli s šestimi zunanjimi opazovalci, ki so bili postavljeni okoli igrišča. Ti opazovalci so po zaključku tekme podali svoje ocene učinkovitosti komunikacije znotraj ekipe na lestvici od 1 do 10, kjer je ocena 1 pomenila zelo slabo in ocena 10 zelo dobro komunikacijo. Slika 1 nazorno prikazuje zamišljeno postavitev naših opazovalcev in ocenjevalcev na igrišču, ki so bili zadolženi za ocenjevanje učinkovitosti komunikacije med igralci nogometne ekipe.



Slika 1: Postavitev opazovalcev na igrišču

Te ocene smo nato uporabili za izračun povprečne ocene komunikacijske učinkovitosti ekipe. Povprečno oceno smo delili s številom 10, s čimer smo jo normirali na območje med 0 in 1. Ta postopek nam je omogočil pridobiti standardizirano in primerljivo merilo učinkovitosti komunikacije med različnimi ekipami in tekmami.

$$Kom_{nor} = \omega_{Kom} * \frac{\frac{1}{6}*\sum_{i=1}^{6}O_i}{10} \quad (3)$$

3.3 STATISTIČNI PODATKI

Zadnji segment našega modela za merjenje povezanosti nogometne ekipe predstavljajo objektivni statistični podatki, zbrani med tekmo. Vključili smo ključne parametre, kot so posest žoge, skupno število strelov, število uspešnih podaj, število kotov in število prekrškov. Vsak od teh statističnih podatkov smo normirali z uporabo maksimalnih vrednosti, ki smo jih pridobili iz preteklih izkušenj, s čimer zagotavljamo doslednost in primerljivost meritev med različnimi tekmami in ekipami. Ta normiranje nam omogoča, da kvantitativno ocenimo in primerjamo uspešnost različnih ekip.

$$Stat = \omega_{Stat} * \left(\frac{P_b}{100} + \frac{S_g}{25} + \frac{U_p}{500} + \frac{Kot}{20} - \frac{Prek}{20}\right) \quad (4)$$

4. NEGOTOVOST MERJENE VELIČINE

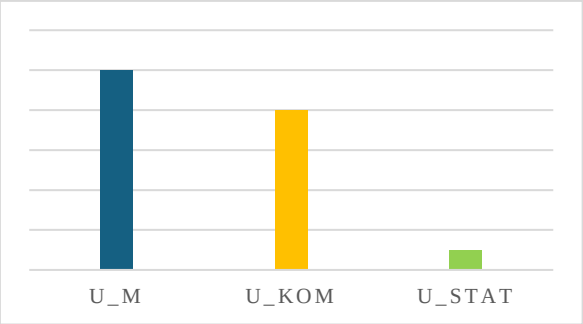
Merjena veličina povezanosti nogometne ekipe (Pov) bo določena posredno, saj temelji na meritvah veličin, uporabljenih v našem matematičnem modelu. Skupna merilna negotovost našega modela se izračuna z naslednjo enačbo:

$$u(Pov) = \sqrt{c_1^2 * u^2(\mathrm{M_{nor}}) + c_2^2 * u^2(\mathrm{Kom_{nor}}) + c_3^2 * u^2(\mathrm{Stat})} \quad (5)$$

V tej enačbi (5) nastopajo posamezni negotovostni prispevki merjenih veličin, ki so pomnoženi z njihovimi občutljivostnimi koeficienti. Ti koeficienti se izračunajo preko parcialnih odvodov matematičnega modela po vsaki merilni veličini.

Slika 2 jasno prikazuje prispevke negotovosti merjenih veličin, ki vplivajo na skupno merilno negotovost. Opazimo, da največji prispevek k skupni negotovosti izhaja iz morale ekipe in učinkovitosti komunikacije. To je predvsem posledica subjektivne narave teh merjenih veličin, ki so ocenjene preko anket, opazovanja in ocenjevanja. Subjektivne metode merjenja prinašajo večjo variabilnost in manjšo zanesljivost, saj so odvisne od percepcij in interpretacij posameznikov, kar lahko vodi do večjih odstopanj v rezultatih. Zato je pri ocenjevanju teh veličin potrebna posebna pozornost, da se zagotovi čim večja objektivnost in zmanjša vpliv individualnih razlik na končni rezultat merjenja.

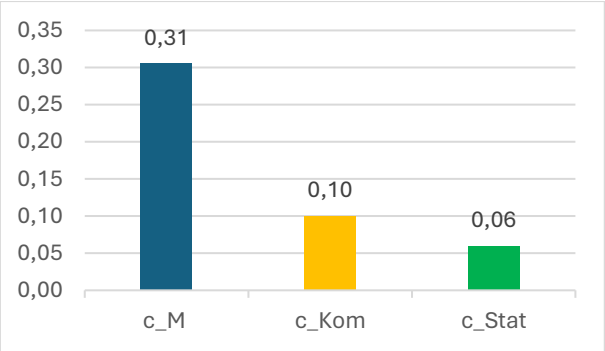
Prispevek statistike k skupni negotovosti, kot je prikazano na grafu, je opazno manjši v primerjavi z drugimi komponentami, kot sta morala in komunikacija. To kaže na večjo zanesljivost in objektivnost statističnih podatkov. Kljub temu je pomembno omeniti, da tudi statistični podatki niso popolnoma imuni na napake, saj lahko vključujejo variabilnost, kot so različne interpretacije dogodkov na igrišču ali napake pri zbiranju podatkov.



Slika 2: Histogram za posamezne prispevke k skupni negotovosti

5. VPLIVNE VELIČINE

V okviru našega merilnega sistema smo preučili občutljivostne koeficiente, da bi razumeli, kako posamezne komponente vplivajo na skupno povezanost nogometne ekipe. Kot je prikazano na Slika 3, so bili koeficienti izračunani na podlagi parcialnih odvodov funkcij, ki predstavljajo moralo (c_M), komunikacijo (c_Kom) in statistične podatke (c_Stat) naše ekipe. Občutljivostni koeficient za moralo (c_M) je izkazal največji vpliv, kar kaže na to, da morala igralcev predstavlja ključni dejavnik v dinamiki povezanosti ekipe. Koeficient za komunikacijo (c_Kom) je prav tako pomemben, vendar v manjši meri, medtem ko je statističnim podatkom (c_Stat) pripisan manjši vpliv. Ta ugotovitev poudarja, da čeprav so objektivni statistični podatki pomembni, so subjektivni dejavniki, kot sta morala in komunikacija, bistveni za razumevanje povezanosti v nogometni ekipi. Analiza občutljivostnih koeficientov tako omogoča boljše razumevanje, kateri aspekti zaslužijo posebno pozornost pri razvoju strategij za izboljšanje sinergije znotraj ekipe.



Slika 3: Histogram občutljivostnih koeficientov

Na podlagi velikosti občutljivostnih koeficientov smo določili uteži za naš matematični model povezanosti nogometne ekipe. Izbrali smo uteži:

$$\omega_M = 0{,}6\,;\ \omega_{Kom} = 0{,}3\,;\ \omega_{Stat} = 0{,}1 \quad (6)$$

Ta izbira odraža relativni pomen posameznih komponent morale, komunikacije in statističnih podatkov za skupno povezanost ekipe. Večja utež morale poudarja njeno prevladujočo vlogo v skupni povezanosti, medtem ko manjša utež statističnih podatkov odraža njihov manjši, a še vedno pomemben prispevek.

6. POPOLNI MERILNI REZULTAT

V šestem poglavju "Popolni merilni rezultat" bomo prikazali, kako se uporabi naš merilni sistem v praksi. Kot primer smo vzeli tekmo med Fulhamom in Arsenalom, ki se je zaključila z rezultatom 2:1.

$$Pov = (0{,}4353 - K) \pm 0{,}0620 \tag{7}$$

Naši izračuni kažejo, da je bila ekipa Arsenala med to tekmo 43,53 % povezana, kar je podprto s standardno merilno negotovostjo ±6,20 %. Ta rezultat odraža integrirano oceno morale, komunikacije in statističnih podatkov, uteženih glede na njihove občutljivostne koeficiente. Ta primer ilustrira, kako naš sistem lahko kvantitativno izrazi dinamiko ekipe in s tem ponuja vredno orodje za analizo in izboljšanje timske uspešnosti.

7. ŠTUDIJA IZVEDLJIVOSTI

V kontekstu modernega nogometa, kjer je analitika postala ključna komponenta za razumevanje in izboljšanje ekipne uspešnosti, predstavlja naš merilni sistem povezanosti ekipe dragoceno orodje. Naš teoretični model je ne samo teoretično uporaben, ampak ima tudi visoko praktično vrednost. Poslovni model, ki ga predlagamo, bi športnim organizacijam in klubom ponudil naš merilni sistem kot storitev. Klubi bi lahko prejeli natančne analize povezanosti svoje ekipe, kar bi jim omogočilo boljše razumevanje medsebojne dinamike in optimizacijo ekipne uspešnosti. Naša študija izvedljivosti kaže, da bi takšen produkt lahko imel znatno tržno vrednost, še posebej v profesionalnem nogometnem okolju, kjer je vsak odstotek izboljšanja lahko odločilen za končni uspeh.

8. INTERDISCIPLINARNOST

Interdisciplinarnost našega merilnega sistema za povezanost nogometne ekipe odseva integracijo več znanstvenih in praktičnih disciplin. Model združuje psihologijo, za razumevanje morale in komunikacije med igralci; športno znanost, ki prispeva k analizi fizičnih in statističnih podatkov; in podatkovno analitiko, ki omogoča obdelavo in interpretacijo zbranih podatkov. Psihologija pomaga pri oblikovanju anket in razlagi dinamike ekipe, športna znanost pa zagotavlja okvir za merjenje in vrednotenje igralčevih uspešnosti. Podatkovna analitika pa igra ključno vlogo pri združevanju teh različnih področij v koherenten in učinkovit model. Ta multidisciplinarni pristop ne samo obogati našo analitično metodo, ampak tudi zagotavlja, da so naše ugotovitve utemeljene na robustni in celoviti znanstveni podlagi.

9. ZAKLJUČEK

Naša študija je uspešno razvila in validirala merilni sistem za ocenjevanje povezanosti nogometne ekipe, ki združuje različne subjektivne in objektivne metrike. Model, ki smo ga predstavili, predstavlja pomemben napredek v analitiki športnih ekip, saj omogoča celovit vpogled v dinamiko ekipne povezanosti. Obenem smo identificirali območja, kjer so potrebne nadaljnje raziskave in izboljšave, zlasti v zmanjševanju negotovosti povezanih s subjektivnimi merami, kot sta morala in komunikacija. Kljub temu so rezultati obetavni in kažejo velik potencial za širšo uporabo v športni industriji. Naša študija poudarja pomen interdisciplinarnega pristopa in je odskočna deska za nadaljnje raziskave v tej hitro rastoči domeni.

LITERATURA

[1] L. Gershgoren *et al.*, "Expertise in soccer teams: A thematic inquiry into the role of Shared Mental Models within team chemistry," *Psychol. Sport Exerc.*, vol. 24, pp. 128–139, May 2016, doi: 10.1016/j.psychsport.2015.12.002.

[2] D. Araújo and K. Davids, "Team Synergies in Sport: Theory and Measures," *Front. Psychol.*, vol. 7, 2016, Accessed: Jan. 19, 2024. [Online]. Available: https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2016.01449

[3] "The four stages of achieving team chemistry | Coach & Athletic Director," Coach and Athletic Director. Accessed: Jan. 19, 2024. [Online]. Available: https://coachad.com/articles/four-stages-team-chemistry/

[4] "In team sports, chemistry matters," ScienceDaily. Accessed: Jan. 19, 2024. [Online]. Available: https://www.sciencedaily.com/releases/2018/12/181204095355.htm

[5] "FotMob," FotMob. Accessed: Jan. 19, 2024. [Online]. Available: https://www.fotmob.com/

ELEKTROTEHNIŠKI VESTNIK 83(N): NN-NN, 2016
IZVIRNI ZNANSTVENI ČLANEK

Intenzivnost navijaškega vzdušja

Lavra Štrumbelj

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: ls7144@student.uni-lj.si

Povzetek. Članek predstavlja matematični model za merjenje in primerjavo intenzivnosti navijaškega vzdušja na športnih tekmovanjih. Za določanje intenzivnosti, upošteva različne faktorje, kot so glasnost zvoka, število navijačev in pomembnost tekme. Za vsako merjeno veličino v modelu so določeni koeficienti občutljivosti, ki kvantificirajo njihov vpliv na skupno negotovost intenzivnosti navijaškega vzdušja. Model je razmeroma preprosto izvedljiv in je pripravljen za štiri ekipne športe. Uporaba modela bi omogočila boljše razumevanje in primerjavo med športnimi dogodki ter izboljšanje organizacije in doživetja za obiskovalce.

Ključne besede: navijaško vzdušje, izkušnja, tekmovanje, šport

Fan atmosphere intensity

This article describes a mathematical model for measuring and comparing the intensity of the fan atmosphere at sports events. It considers various factors such as sound volume, number of fans, and game importance to determine the intensity. The model assigns sensitivity coefficients to each measured variable to quantify their impact on the uncertainty of fan atmosphere intensity. The model is relatively simple to implement and is applicable to four team sports. Using the model enables better understanding and comparison of sports events, as well as improving organization and the visitor experience.

Keywords: fan atmosphere, experience, competition, sport

1 UVOD

Vzdušje na tekmi je izrednega pomena tako za ekipo, kot navijače, saj vpliva na igro in željo po ponovnem obisku prihodnjih tekem, hkrati pa lahko poznavanje in kvantifikacija vzdušja pomagata organizatorjem pripravljati učinkovitejše kampanje ter izboljšati izkušnjo obiskovalcem. Model analizira različne elemente športnega dogodka in tako omogoča globlji vpogled v to, kako ti vplivajo na skupno vzdušje.

Cilj je določiti, kakšna je bila intenzivnost navijaškega vzdušja, za preprosto in objektivno primerjavo kakovosti izvedenih dogodkov.

2 IDENTIFIKACIJA PROBLEMA

Problem merjenja vzdušja na tekmovanjih je sicer vseprisoten, a je dejanska izvedba razmeroma kompleksna. Športi se namreč med seboj močno razlikujejo, od načina tekmovanja (vsak posameznik zase, več ekip), razpršenosti navijačev (vsi navijači na istem kraju, razpršenost po prizorišču), dolžine tekmovanj, kjer lahko vzdušje močneje variira in navsezadnje tudi kulture posamezne panoge, kjer so določena pravila navijanja.

Zaradi takšne kompleksnosti in raznolikosti športnih tekmovanj, smo se omejili zgolj na štiri ekipne športe in sicer nogomet, košarko, hokej in rokomet za članski starostni razred. Ti so si namreč v obsegu, ki je pomemben za ta model, med seboj zelo podobni, saj pri njih v danem času med seboj tekmujeta le dve ekipi, prav tako pa imajo podoben sistem beleženja rezultatov in statistike, kot so prekrški, streli, meti oziroma zadetki in menjave.

3 IDENTIFIKACIJA VELIČIN

Veličine, ki so vključene v model, so bile določene na podlagi predpostavljenih dejavnikov, ki vplivajo na dogajanje in vzdušje na tekmovanjih.

3.1 Glasnost zvoka

Glasnost zvoka je dober identifikator dinamike vzdušja na tekmovanju, saj lahko sklepamo, da večja kot je glasnost, bolj razburljivo je dogajanje, večji je užitek prisotnih.

Za določevanje njihocega navijanja, je potrebno meriti glasnost zvoka skozi celotno dogajanje, saj v modelu upoštevamo maksimalno doseženo raven glasnosti g_{max} in povprečno vrednost čez prireditev g_{avg}.

3.2 Število navijačev

Pomembno je upoštevati tudi število navijačev, ki so prišli na ogled tekme, saj nam lahko nakaže njeno atraktivnost. V ta namen zabeležimo število prisotnih ob začetku dogajanja n_{zac}, število ob koncu n_{kon} ter

Prejet d. mesec, leto
Odobren d. mesec, leto

maksimalno število navijačev na prizorišču n_{max}, v katerem koli trenutku.

3.3 Pomembnost tekme

Vse stopnje tekmovanj niso enako pomembne, zato je ključno določiti tudi faktor pomembnosti tekme p. Ta predstavlja vrednost razlikovanja med posameznimi nivoji tekmovanja in je določen kot štirje razredi, prikazani v slednji tabeli.

Tabela 1: Nivoji tekmovanja in njihove pripadajoče vrednosti pomembnosti tekme *p* v modelu

Pomembnost tekme *p*	**Nivo tekmovanja**
1	Amatersko
2	Državno
3	Regijsko
4	Svetovno, olimpijske igre

3.4 Prodaja hrane in pijače

Prodaja gastronomske ponudbe e je prav tako dober indikator vzdušja, saj se ta poveča ob boljšem in zmanjša ob slabšem dogajanju na tekmi. V modelu uporabimo končno vrednost skupne prodaje vse hrane in pijače v času dogodka.

3.5 Statistika

Spremljamo tudi statistiko igre in v modelu upoštevamo število poskusov zadetkov z, v kar pri na primer nogometu štejemo vse strele na gol, strele mimo gola in blokirane strele.

3.6 Spremljevalno dogajanje

Ob koncu tekme, na izhodu, obiskovalce prosimo še za oceno kakovosti spremljevalnega programa na dogodku d. Ta zajema zanimivost plesnih vložkov, zabavnost maskote in povezovalca ter izbiro glasbe. Ocena ima razpon od zelo slabega do zelo pestrega, s skupno petimi koraki po Likertovi lestvici. Srednja vrednost pomeni, da dogajanja ni bilo.

4 PROBLEM MERLJIVOSTI

Navijaško vzdušje je kompleksen pojav, katerega intenzivnost še ni ustrezno raziskana in zato nima določene merske enote ali merilne lestvice. Za izmero smo uvedli novo enoto, vzklik (v) ter definirali ustrezno merilno lestvico. Ta je intervalna, saj zajema linearno prehajanje od minimalne vrednosti, ki predstavlja popolno odsotnost navijaškega vzdušja, do neomejene vrednosti, ki označuje največjo intenzivnost navijanja.

Pri vrednosti 0 vzklikov zaznamo popolno pomanjkanje vzdušja. To je stanje, ko navijači bodisi niso prisotni, bodisi niso vključeni v dogajanje. S povečevanjem števila vzklikov, se intenzivnost vzdušja postopoma povečuje. Lestvica je enostransko omejena navzdol, kar pomeni da ni zgornje meje intenzivnosti, saj se ta lahko neprestano povečuje in dosega vedno višje vrednosti.

5 MATEMATIČNI MODEL

V nadaljevanju je podan matematični model za določitev intenzivnosti navijaškega vzdušja NV iz v 3. poglavju predstavljenih veličin:

$$NV = \left(w_1 \frac{e}{n_{max}} + w_2(d+1) + w_3 p + w_4\left(tan^{-1}(z-k_z) + \frac{\pi}{2}\right)\right) * w_5 \left(0{,}2\frac{g_{max}}{k_g} + 0{,}8 * \frac{g_{avg}}{k_g}\right)^3 * \frac{n_{max}}{k_k} + w_6 * sgn(n_{kon} - n_{zac}). \quad (1)$$

Prvi člen v modelu opisuje prispevek povprečne prodaje hrane in pijače na prizorišču na gledalca. Naslednji opisuje skupno oceno spremljevalnega dogajanja, ki so jo gledalci podali na izhodu. Tretji člen je prispevek faktorja pomembnosti tekme.

Četrti člen opisuje prispevek poskusov zadetkov k vzdušju in ima obliko *arcustangens*. Parameter k_z predstavlja povprečje poskusov zadetkov v eni igri, njegova vrednost pa se razlikuje za vsak šport. V tabeli 2 so prikazane za izbrane štiri športe.

Tabela 2: Izbrani športi in povprečno število metov ali strelov na tekmo

Šport	**Vrednost**
Nogomet [1]	27
Košarka [2]	180
Rokomet [3]	94
Hokej [4]	59

Peti člen opisuje prispevek maksimalne in povprečne glasnosti zvoka s pragom k_g, ki je določen pri 90 dB [5], saj je to ocena povprečne glasnosti tekmovanj na stadionih. Maksimalna glasnost prispeva 20 %, medtem ko povprečna prispeva 80 % k vrednosti člena.

Šeti člen je prispevek zasedenosti prizorišča, kjer maksimalno število obiskovalcev med tekmo delimo s kapaciteto prizorišča k_k.

Zadnji člen pa opisuje spreminjanje števila navijačev med tekmo in sicer je pozitivno, če se število proti koncu veča in negativno če se manjša, glede na definicijo signum funkcije. Tu predpostavljamo, da je navijaško

vzdušje oziroma njegova odsotnost edini razlog za predčasni odhod s tekme.

Vsi členi so tudi uteženi s svojimi faktorji w, glede na prispevek posameznega, k končnemu rezutlatu.

6 NEGOTOVOST MERJENE VELIČINE

Negotovost intenzivnosti navijaškega vzdušja *u(NV)* je geometrijska vsota posameznih prispevkov negotovosti merjenih veličin po enačbi:

$$u(NV) = \sqrt{\begin{matrix} c_e{}^2u^2(e) + c_d{}^2u^2(d) \\ +c_z{}^2u^2(z) + c_p{}^2u^2(p) \\ + c_{g_{max}}{}^2u^2(g_{max}) + c_{g_{avg}}{}^2u^2(g_{avg}) \\ + c_{n_{max}}{}^2u^2(n_{max}) + c_{n_{zac}}{}^2u^2(n_{zac}) \\ +c_{n_{kon}}{}^2u^2(n_{kon}), \end{matrix}} \quad (2)$$

kjer c predstavljajo občutljivostne koeficiente merjenih veličin, ki jih dobimo s parcialnim odvajanjem intenzitete po posameznih veličinah:

$$c_e = \frac{\partial NV}{\partial e} \quad (3)$$

$$c_d = \frac{\partial NV}{\partial d} \quad (4)$$

$$c_z = \frac{\partial NV}{\partial z} \quad (5)$$

$$c_p = \frac{\partial NV}{\partial p} \quad (6)$$

$$c_{g_{max}} = \frac{\partial NV}{\partial g_{max}} \quad (7)$$

$$c_{g_{avg}} = \frac{\partial NV}{\partial g_{avg}} \quad (8)$$

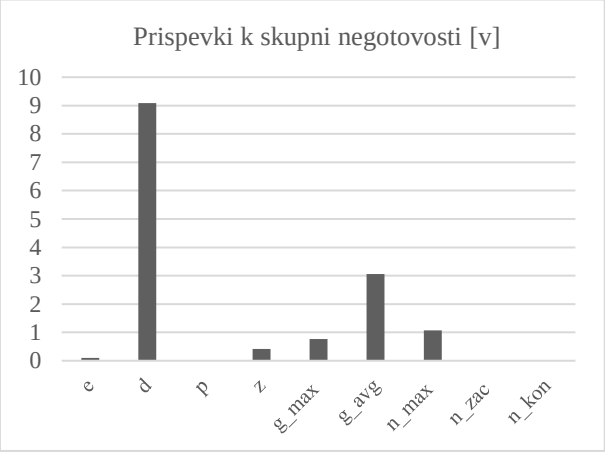
$$c_{n_{max}} = \frac{\partial NV}{\partial n_{max}} \quad (9)$$

$$c_{n_{zac}} = \frac{\partial NV}{\partial n_{zac}} \quad (10)$$

$$c_{n_{kon}} = \frac{\partial NV}{\partial n_{kon}} \quad (11)$$

Pri zgornjem izračunu skupne negotovosti v enačbi (2) predpostavljamo, da so posamezni prispevki negotovosti k merilnemu rezultatu neodvisni.

Za predpostavljene izmerjene vrednosti, koeficiente in uteži modela smo izračunali občutljivostne koeficiente c in prispevke k skupni negotovosti, ki so predstavljeni na grafu 1.



Graf 1: Prispevki merjenih veličin k skupni negotovosti.

Iz grafa 1 je razvidno, da k negotovosti modela največ prispeva spremljevalno dogajanje d. Smiselno bi bilo izboljšati algoritem ali izbrati merilni inštrument za določitev spremljevalnega dogajanja z manjšo negotovostjo, saj bi lahko s tem močno zmanjšali njegov prispevek in s tem vrednost negotovosti modela za določitev intenzivnosti navijaškega vzdušja.

7 VPLIVNE VELIČINE

Na model intenzivnosti navijaškega vzdušja lahko vpliva vrsta dejavnikov, ki prispevajo k dvigu ali zmanjšanju njegove intenzivnosti. Med pomembnimi vplivnimi veličinami je kot prvo počutje navijačev. Če so ti zadovoljni, veseli in polni strasti, se bo najverjetneje navijaška atmosfera dvignila. V nasprotnem primeru lahko močno in negativno vpliva nanjo.

Izrednega pomena je tudi akustika prizorišča, na katerem se dogodek odvija. Če je to dobro oblikovano in opremljeno, lahko ojača navijaške vzklike, petje in skandiranje, hkrati pa lahko slaba zasnova pripelje do senzorične preobremenitve, kar lahko prispeva k poslabšanju vzdušja.

Kultura okolja, v katerem je športna prireditev pripravljena, je prav tako pomemben dejavnik. Če je navijaštvo del živahnega kulturnega izraza, bo to nedvomno vplivalo tudi na samo vzdušje.

Poleg naštetih, imajo na vzdušje vpliv tudi manjši dejavniki, ne nujno povezani s samim odvijanjem dogodka. Takšni sta lahko na primer cena gastronomske ponudbe, kot tudi cena vstopnice. Ugodne cene in dobra ponudba hrane in pijače lahko pripomorejo k bolj sproščenemu vzdušju med navijači in posledično k intenzivnosti.

8 POPOLNI MERILNI REZULTAT

Prava vrednost intenzivnosti navijaškega vzdušja je enaka izmerjeni vrednosti $NV_{IZMERJENO}$, ki jo korigiramo s korekcijo K. Korekcijo K za posamezne merilne

naprave pridobimo od proizvajalcev iz dokumentov o kalibraciji posameznega inštumenta. Popolni merilni rezultat je tako sestavljen iz korigirane vrednosti ter razširjene negotovosti in je prikazan v slednji enačbi:

$$NV = (NV_{IZMERJENO} + K) \pm U(NV) \qquad (12)$$

Upoštevajoč zgornjo enačbo ter predpostavljene izmerjene vrednosti, koeficiente in uteži modela, sledi naslednji popolni merilni rezultat

$$NV = 126\ \text{v} \pm 20\ \text{v}, \qquad k = 2, \qquad p = 95\ \%, \qquad (13)$$

kjer je bila razširjena negotovost določena kot standardna negotovost pomnožena s faktorjem razširitve $k = 2$, ki pri normalni porazdelitvi ustreza ravni zaupanja p približno 95 %.

9 ŠTUDIJA IZVEDLJIVOSTI

Eksperiment je popolnoma izvedljiv, saj vsi merilni inštrumenti, ki bi jih za izvedbo potrebovali, obstajajo ali pa bi morale biti meritve izvedene ročno (štetje). Za merjenje glasnosti bi uporabili merilnik glasnosti zvoka oziroma decibel meter. Za število navijačev bi preverili število prehodov v in iz točke preverjanja vstopnic in na koncu izračunali še maksimalno število navijačev v danem času. Statistiko beleži izbrano podjetje, kjer bi le povzeli njihove podatke, pomembnost tekme pa bi bila nedvoumno določena, glede na stopnjo tekmovanja. Za pridobitev podatkov o prodaji hrane in pijače, bi preverili v računovodstvu prizorišča. Za spremljevalno dogajanje, bi pripravili vprašalnik, ki bi bil na voljo na izhodu iz prizorišča, kot izbirnik med petimi možnostmi.

S poskušanjem, bi bilo za večjo natančnost in zanesljivost modela, potrebno prilagoditi še koeficiente posameznih meritev in njihovih uteži.

10 INTERDISCIPLINARNOST

Projekt vključuje različna področja, kot so elektrotehnika, računovodstvo, psihologija ter statistika.

Za merjenje glasnosti zvoka, bi potrebovali inženirja elektrotehnike, ki bi zagotovil popolnost in brezhibnost meritev ravni hrupa.

Potrebovali bi tudi računovodjo, ki bi pripravil podatke o skupni prodaji hrane in pijače.

Za pridobitev kakovostnih podatkov o spremljevalnem dogajanju in pripravo vprašalnika, bi potrebovali psihologe.

Beleženje rezultatov, obdelavo podatkov in spremljanje dogajanja na igrišču pa bi prepustili specializiranim statistikom za športne tekme.

11 ZAKLJUČEK

Predlagan matematični model za merjenje intenzivnosti navijaškega vzdušja opisuje vplive opisanih parametrov na celokupno vzdušje. Model lahko vsem zainteresiranim ponudi vpogled in kvantitativno omogoča primerjavo športnih dogodkov med seboj. Model je opremljen z vsemi potrebnimi parametri, opisi problematik in negotovosti veličin in predpripravljen za uporabo pri štirih športih. Z nekaj prilagoditvami, bi lahko postal uporaben tudi za širšo izbiro športnih prireditev.

LITERATURA

[1] Soccerfeed, https://soccerfeed.net/average-shots-on-goal-in-a-soccer-game/, (19. 01. 2024)
[2] TeamRankings, https://www.teamrankings.com/nba/stat/field-goals-attempted-per-game, (19. 01. 2024)
[3] Hansen C in drugi, »Performance analisys of male handball goalkeepers at the World Handball chanpionship 2015«, PubMed Central, 7. 10. 2017
[4] Statmuse, https://www.statmuse.com/nhl/ask/nhl-team-average-shots-on-goal-per-game-2022 (19. 01. 2024)
[5] Sonus Hearing, https://www.sonushearing.com/single-post/2019/02/01/did-you-know-decibel-levels-during-a-football-game (19. 01. 2024)

Lavra Štrumbelj je diplomirala leta 2023 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani in istega leta nadaljevala študij na magistrski stopnji, smer Robotika.

Predvidevanje moške plešavosti

Alen Holcer

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: ah9936@student.uni-lj.si

Povzetek. Med moškimi do 50. leta se 30 do 50 % sreča s plešavostjo. Genetski vpliv, čeprav najmanj raziskan, izkazuje največji vpliv na to težavo. Kljub hitremu napredku raziskav na tem področju še ni predlagana konkretna rešitev. V našem članku združujemo raznolike vplive na plešavost v matematičnem modelu za napovedovanje stopnje plešavosti. S tem pridobimo oceno pričakovane stopnje plešavosti. Hkrati nas zanima čas nastopa plešavosti, zato izvajamo meritve izpadanja in gostote lasišča opazovane osebe.

Ključne besede: plešavost, genetika, testosteron, stres, prehrana, meritev lasišča

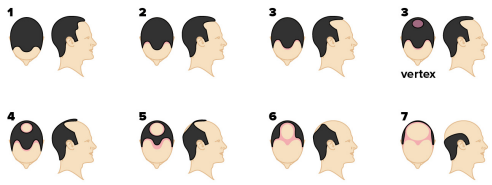
Prediction of male baldness

Between 30 to 50 % of men experience baldness by the age of 50. Despite ongoing research on the topic, the focus is primarily on genetic influence, which remains the least explored but has the most significant impact. Although studies are rapidly advancing, no concrete solution has been proposed yet. In our article, we aim to encapsulate various influences on baldness within a mathematical model to predict the degree of baldness. This approach provides an estimation of the expected baldness level. Additionally, we are interested in the onset time of baldness, so we measure hair loss and scalp density in the observed individuals.

1 Uvod

V svetu, kjer se hitro spreminjajoči življenjski slogi, genetika in okoljski dejavniki tesno prepletajo, se postavlja vprašanje, ali je mogoče predvideti in razumeti vzroke moške plešavosti. Izziv, ki prizadene mnoge moške, zahteva celovit pristop k raziskavam in praksi. Od genetskih predispozicij do vpliva hormonov, stresa, staranja, kajenja in prehrane - vse to so ključni dejavniki, ki oblikujejo potek plešavosti. Poleg tega je potrebno izvajati meritve na lasišču opazovane osebe, saj s tem lahko določimo hitrost izpadanja las.

Danes je najbolj uporabljena lestvica za določanje stopnje plešavosti Norwoodova lestvica [1]. S pomočjo te lestvice lahko ocenimo stopnjo plešavosti, ki se giblje med 1 in 7. Lestvica nazorno prikazuje napredovanje plešavosti, saj je progresivna.



Slika 1: Norwood lestvica

Poleg že obstoječe Norwoodove lestvice bomo dodali tudi lestvico hitrosti izpadanja las, ki jo pridobimo iz meritev. S tem bomo lahko razvili model, ki nam kot izhod poda tako stopnjo plešavosti kot tudi hitrost izpadanja las.

2 Identifikacija veličin

2.1 Vpliv genetike na predvidevanje plešavost

Vpliv genetike na plešavost ostaja še vedno slabo raziskano področje. Razne raziskave predvidevajo, da bi lahko na plešavost vplivalo več kot 160 genov, vendar za to še ni nobene potrjene dispozicije. Pri našem modeliranju smo genetski vpliv poenostavili. Genetski vpliv določimo preko obrazca, na katerem opazovana oseba oceni stopnjo plešavosti svojih staršev in njihovih staršev, uporabljajoč Norwoodovo lestvico [1]. S tem pridobimo 6 stopenj, ki imajo različne uteži v enačbi. Uteži smo določili na podlagi že obstoječih raziskav.

$$G_n = \frac{\sum_{n=1}^{6} X_n(2 - \frac{2n}{100})}{5} \tag{1}$$

Pri tem delu je ključnega pomena tudi vrstni red članov, ki jih vstavimo v enačbo, saj se utež z vsakim družinskim članom zmanjšuje.

1) X_1 - Stopnja plešavosti očeta
2) X_2 - Stopnja plešavosti materinega očeta
3) X_3 - Stopnja plešavosti matere
4) X_4 - Stopnja plešavosti očetovega očeta
5) X_5 - Stopnja plešavosti materine matere
6) X_6 - Stopnja plešavosti očetove matere

Izhod je med 1 in 7 po Norwood lestvici [1].

2.2 Vpliv testosterona na predvidevanje plešavost

Testosteron običajno merimo v slini ali krvi, pri našem primeru pa ga merimo v krvi. Možno je tudi merjenje DHT hormona, vendar z merjenjem testosterona hkrati lahko upoštevamo tudi starost opazovane osebe. Po raziskavah je bilo ugotovljeno, da ta hormon pada za

približno 1,6 % vsako leto od 18. leta pri povprečni osebi. Pri merjenju testosterona je pomemben tudi čas meritve, saj se ta spreminja tekom dneva. Za lažjo določitev nivoja testosterona smo čas meritve razdelili na dopoldne, popoldne in zvečer. Vse meritve testosterona se izvajajo v enotah pmol/L.

$$T = \frac{d((t_d - z) - t) + p((t_p - z) - t) + v((t_v - z) - t)}{d * (t_d - z) + p(t_p - z) + v(t_v - z)} \tag{2}$$

$$z = (s_t - 18)\frac{16}{100} \tag{3}$$

Parametri v funkciji T so:

- d - Ali je bila meritev izvedena dopoldne
- p - Ali je bila meritev izvedena popoldne
- v - Ali je bila meritev izvedena zvečer
- t - Izmerjen testosteron
- s_t - Starost

V funkciji upoštevamo tako čas meritve testosterona kot tudi starost. Pri starosti upoštevamo, da je oseba stara nad 18 let, saj je takrat testosteron na najvišji ravni.

2.3 Vpliv stresa na predvidevanje plešavost

Stres pri osebi vpliva na več stvari, med drugim tudi na lasišče. Nivo stresa lahko zelo natančno določimo pri osebi s pomočjo različnih obrazcev. V našem primeru nas zanima nivo stresa, ki ga razdelimo v štiri stopnje.

$$S = (S_n\frac{7.5}{100} + S_s\frac{9.8}{100} + S_v\frac{32}{100}) + 1 \tag{4}$$

Pri čemer črke v enačbi predstavljajo:

- S_n - Nizek stres
- S_s - Srednji stres
- S_v - Visoki stres

Glede na stopnjo stresa ta prispeva k modelu s procentualnim povišanjem stopnje plešavosti.

2.4 Vpliv kajenja na predvidevanje plešavost

Kajenje ne prispeva veliko k plešavosti, vendar ima vpliv. Zanima nas le, ali opazovana oseba kadi ali ne, saj intenzivnost kajenja ne vpliva.

$$K = (C\frac{10}{100}) + 1 \tag{5}$$

Parameter C se postavi na 1 v primeru, da opazovana oseba kadi. Povišanje za 10 % smo določili iz obstoječih raziskav [5].

2.5 Vpliv prehrane na predvidevanje plešavost

Večina ljudi, ki se sooča z znaki plešavosti, prejme priporočilo zdravnika ali dermatologa glede prehrane. Dokazano je, da določeni vitamini in minerali prispevajo k upočasnjevanju oz. zmanjševanju plešavosti. Ravni vitaminov in mineralov pri opazovani osebi preverjamo v krvi, podobno kot pri testosteronu [2.2].

$$Prehrana = (0.25V_D + 0.05V_C + 0.25F_e * 0.05Z_n) + 1 \tag{6}$$

Vsak vitamin oz. mineral ima svojo spremenljivko, ki je enaka ena v primeru, da je nivo le-tega zadosten.

- V_D - Vitamin D
- V_C - Vitamin C
- F_e - Železo
- Z_n - Cink

2.6 Vpliv starosti na predvidevanje plešavosti

Starost ima pomemben vpliv pri napovedovanju plešavosti. Poleg zmanjšanja testosterona, vpliva tudi na sivenje in tanjšanje las. Vpliv starosti lahko opišemo z logaritemsko funkcijo, ki lepo prikazuje ta vpliv.

$$S_t = \frac{10\log(s - 17)}{100} \tag{7}$$

Kjer je v enačbi:

- s - Starost od 18 leta

Pomembno pri tej enačbi je, podobno kot pri testosteronu [2.2], da upoštevamo starost od 18. leta dalje. To je zaradi poenostavitve enačbe, saj se prvi znaki plešavosti lahko opazijo po 18. letu oz. po puberteti osebe.

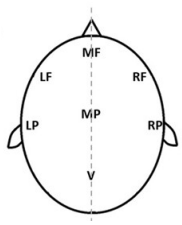
2.7 Meritve lasišča

Dermatologi že uporabljajo naprave, s katerimi izvajajo preglede lasišča za lažjo oceno plešavosti. Ker želimo v našem modelu določiti hitrost izpadanja las, izvajamo meritve lasišča. Merimo gostoto lasišča in razmerje TV na cm^2, pri čemer je gostota število las, medtem ko je razmerje TV število mladih las v primerjavi s številom odraslih. To razmerje je tudi dober pokazatelj, poleg gostote lasišča. Za merjenje smo uporabili napravo Dino-Lite AM-413T.

$$G_l = \frac{\frac{M_{LF}}{L_F} + \frac{M_{MF}}{M_F} + \frac{M_{LR}}{L_R} + \frac{M_{MP}}{M_P} + \frac{M_V}{V}}{5} \tag{8}$$

$$TV_l = \frac{\frac{M_{LF_{TV}}}{L_{F_{TV}}} + \frac{M_{MF_{TV}}}{M_{F_{TV}}} + \frac{M_{LR_{TV}}}{L_{R_{TV}}} + \frac{M_{MP_{TV}}}{M_{P_{TV}}} + \frac{M_{V_{TV}}}{V_{TV}}}{5} \tag{9}$$

Meritve izvajamo na 5 lokacijah glave, katere povprečimo. Nato vrednosti za gostoto in razmerje TV vstavimo v enačbe ter delimo s povprečjem zdravega lasišča. Vrednosti zdravega lasišča smo pridobili iz javno dostopnega članka [7]. Lokacije meritev so vidne na sliki [2].



Slika 2: Lokacije meritev

To je le ena od mnogih meritev. Ker želimo ugotoviti čas pojava plešavosti, je potrebno pridobiti hitrost izpadanja las. To lahko dosežemo z večkratnimi meritvami,

ki so narejene v želenem časovnem intervalu.

$$f_{G_{st}} = \sum_{i=2}^{st} f_{g_i} - f_{g_{i-1}} \tag{10}$$

$$f_{TV_{st}} = \sum_{i=2}^{st} f_{TV_i} - f_{TV_{i-1}} \tag{11}$$

Glede na število meritev, ki je določeno s parametrom st, opazimo razlike med meritvami. Te razlike lahko vstavimo znotraj kvadratnih enačb, ki predstavljajo relacije med našimi razlikami in hitrostmi izpadanja las. Kvadratne enačbe so bile pridobljene iz podatkovne baze članka [7].

$$G(f_{G_{st}}) = 0.000332x^2 - 0.00891x + 0.0559 \tag{12}$$

$$TV(f_{TV_{st}}) = -0.002086x^2 + 0.12955x - 1.0869 \tag{13}$$

$$X = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \tag{14}$$

Z vstavitvijo naših razlik v kvadratno enačbo jo lahko rešimo s pomočjo enačbe [2.7], pri čemer upoštevamo le pozitivne rešitve. Tako dobimo dve števili, ki ju nato povprečimo, kar je zapisano v naslednji enačbi:

$$M = \frac{X_{Gostota} + X_{TV}}{2} \tag{15}$$

Pri izhodu I je pomembno, da število zaokrožimo na dvomestno celo število, saj s tem zagotovimo pravilen izhod iz modela.

- 10 - Lasi izpadajo normalno
- 20 - Lasi izpadajo hitreje
- 30 - Lasi izpadajo zelo hitro

3 Matematični model

Vsi prispevki lahko imajo pozitiven ali negativen vpliv na končni rezultat modela. V našem modelu vzamemo že obstoječo Norwood lestvico [1] in jo prilagodimo.

$$P_P = \left(\frac{(G * K * S * S_t)}{\sqrt{P * T}}\right) + M \tag{16}$$

Levi del enačbe prispeva k predvideni stopnji plešavosti po že obstoječi Norwood lestvici [1], medtem ko drugi del vpliva na hitrost izpadanja las po lestvici, ki smo jo definirali zgoraj [2.7].

- G - Genetika (vpliv na plešavost)
- K - Kajenje (vpliv na plešavost)
- S - Stes (vpliv na plešavost)
- S_t - Starost (vpliv na plešavost)
- P - Prehrana (vpliv na plešavost)
- T - Testosteron (vpliv na plešavost)
- M - Genetika (vpliv na hitrost izpadanja)

4 Problem merljivosti

V našem modelu uporabljamo že obstoječo lestvico [1], kateri smo dodali svojo lastno lestvico [2.7]. Ker gre za brezdimenzijsko lestvico, predlagam enoto PP, ki označuje predvidevanje plešavosti. Končna lestvica ima izhod v območju od 11 do 37.

Izhod modela	Opis
11 PP	Stopnja plešavosti 1 in normalno izpadanje las
15 PP	Stopnja plešavosti 5 in normalno izpadanje las
25 PP	Stopnja plešavosti 5 in hitrejše izpadanje las
37 PP	Stopnja plešavosti 7 in zelo hitro izpadanje las

Slika 3: Primer izhoda modela

5 Vplivne veličine

Na izhod našega modela lahko vpliva več dejavnikov, med katerimi so bolezni, terapije ali okužbe lasišča. Te okužbe se lahko pojavijo zaradi prekomerne uporabe različnih stilizacijskih izdelkov ali pomanjkanja higiene lasišča. Napačne meritve so možne v primeru nenatančnega merjenja lasišča [2], kjer ima lokacija meritve pomembno vlogo.

V našem modelu predpostavljamo, da je opazovana oseba zdrava in polnoletna. Če ima opazovana oseba zdravstvene težave, lahko to vpliva na krvne raziskave, potrebne za meritve testosterona, vitaminov in mineralov. Poleg tega se lahko pojavijo pojavi kratkotrajne izgube lasišča, katerih vzrok ni natančno znan. To bi lahko vplivalo na meritve lasišča in prineslo napačen rezultat iz modela.

6 Merilna negotovost

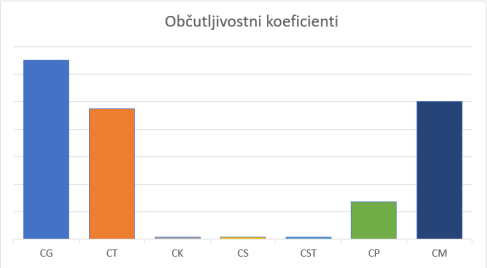
Negotovost lastnosti merjenja je odvisna od negotovosti posameznih komponent v matematičnem modelu. Občutljivostne koeficiente c_n dobimo iz parcialnega odvoda P_P po posamezni vplivni veličini $c_n = \frac{\partial P_P}{\partial X_n}$ (∂X_n so vplivne veličine).

Največjo negotovost opazimo pri genetskem vplivu, kar je bilo pričakovano. To je posledica omejenega razumevanja vpliva genetike na plešavost, zaradi česar imamo v modelu poenostavljen genetski vpliv in s tem višjo negotovost.

Druga največja negotovost se pojavlja pri meritvah testosterona. Negotovost je višja zaradi kompleksnosti meritve testosterona. Čeprav bi bila meritev DHT hormona bolj primerna, je nismo uporabili, ker pri njej ne moremo upoštevati faktorja starosti. Poleg tega je težje zagotoviti natančno meritev zaradi dnevnega nihanja testosterona.

Naslednja največja negotovost se pojavi pri meritvah lasišča. To negotovost bi lahko zmanjšali z uporabo boljšega merilnika, vendar smo zaradi uporabe obstoječe baze podatkov ta merilnik ohranili. Če bi ustvarili novo bazo podatkov, bi lahko izbrali drug merilnik in s tem zmanjšali negotovost.

Negotovosti pri kajenju, stresu in starosti so minimalne ali nič. Pri stresu ohranjamo majhno negotovost zaradi morebitne napake v vprašalniku, pri kajenju in starosti pa negotovosti ni.



Slika 4: Občutljivostni koeficenti

Slika 5: Prispevki ocenjene negotovost

7 Popolni merilni rezultat

Popoln merilni rezultat se pridobi z upoštevanjem izmerjene vrednosti iz matematičnega modela (P_P) in standardne merilne negotovosti ($u(P_P)$). Za določen primer dobimo rezultat:

$$P_P = 25\text{PP} \pm 1,63\text{PP} \tag{17}$$

Opazimo, da je naša standardna merilna negotovost visoka, kar smo pričakovali. Negotovost je velika, saj po Norwood lestvici [1] lahko dobimo razliko za dve stopnji plešavosti.

8 Študija izvedljivosti

V primeru izvedbe te ideje bi bil prvi korak zmanjšanje negotovosti genetike, saj je njen vpliv na naš model velik, prav tako pa tudi negotovost. Naš merilnik bi moral biti zmožen meriti krvni obtok, stres in lasišče. Potrebne bi bile dodatne raziskave za ugotovitev dodatnih vplivov na plešavost in natančnejše predvidevanje le-te.

9 Interdisciplinarnost

Pri reševanju našega problema bi sodelovali strokovnjaki iz naslednjih ved: Genetika za raziskovanje genetskih vplivov na plešavost, psihologija za določitev nivojev stresa oz. sestavo vprašalnikov, dermatologija za meritve lasišča in medicina za krvne raziskave, ki so potrebne za meritve testosterona, vitaminov in mineralov.

10 Zaključek

Ugotavljamo, da je ključnega pomena zmanjšanje negotovosti genetskega vpliva za izboljšanje natančnosti našega modela. S sodelovanjem s strokovnjaki iz različnih ved, vključno z genetiko, psihologijo, dermatologijo in medicino, bi lahko oblikovali celovit pristop k raziskavam in nadgradnji modela. Razvoj preciznejših merilnih metod, ki zajemajo krvne parametre, lasišče in stres, bi dodatno zmanjšal negotovost ter izboljšal predvidevanje plešavosti. Z uporabo teh pristopov bi lahko presegli obstoječo Norwood lestvico in ustvarili bolj zanesljiv model za oceno stopnje plešavosti ter učinkovito izvajanje preventivnih ukrepov. Nadaljevanje trenda raziskav lahko privede do boljšega razumevanja vzrokov za plešavost. Glede na široko razširjenost te težave bi uspešen razvoj tega modela lahko imel velik poslovni potencial.

Literatura

[1] F. Liu, M.A. Hamer, S. Heilmann, C. Herold, S. Moebus, A. Hofman, A.G. Uitterlinden, M.M. Nothen, C.M. Duijn, T.EC. Nijsten, M. Kayser, *Prediction of male-pattern baldness from genotypes*, European Jurnal of Human Genetics, 2016.

[2] N. Goncharov, G. Katsya, A. Dobracheva, A. Nizhnik, G. Kolesnikova, V. Herbst, J. Westermann, *Diagnostic significance of free salivary testosterone measurement using a direct luminescence immunoassay in healthy men and in patients with disorders of androgenic status*, National Center of Endocrinology Moscow, 2009.

[3] R.D. Stanworth, T.H. Jones, *Testosterone for the aging male; current evidence and recommended practice*, Clinical Interventions in Aging, 2008 .

[4] Soorih Shaikh, Sarwan Shaikh, Sarees Shaikh, A.A. Shaikh, S.G. Saleem, *Prevalence of hair loss and stress as the cause;a cross-section study*, International Journal of Advanced Research, 2016.

[5] Y. Kavadya, V. Mysore, *Role of Smoking in Androgenetic Alopecia: A Systematic Review*, International Journal of Trichology, 2022 .

[6] H.M. Almohanna, A.A. Ahmed, J.P. Tsatalis, A. Tosti, *The Role of Vitamins and Minerals in Hair Loss: A Review*, Dermatology and Therapy, Adis, 2018.

[7] W.C. Chang, K.Y. Chen, S.Y. Chen, C.K. Hsu, C.C. Yang, *Mapping the hair density, thickness, and volume in normal and androgenetic alopecia subjects with the digital microscope*, Ministry of Science and Technology, Taiwan, 2022.

Merjenje lenobe

Aleksey Yudin
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: ay94523@student.uni-lj.si

Povzetek.
Koncept lenobe je znan vsakemu človeku. Ena najbolj znanih interpretacij je »nepripravljenost opravljati neprijetne naloge«. Pogosto so te naloge ključne vrste človekove dejavnosti: delo, študij, zdrav način življenja, vzgoja otrok itd. Sposobnost natančnega merjenja lenobe bo ljudem omogočila, da bolje razumejo razloge za pomanjkanje motivacije, izberejo pravo izobrazbo in poklic, urnike dela in počitka. Lenobo bomo merili s preverjanjem učinkovitosti rednih človekovih dejavnosti.

Ključne besede: lenoba, redna človeška dejavnost, časovna pokritost, možganska aktivnost.

Measuring laziness
The article presents an attempt to measure a known human quality based on data on the effectiveness of regular activities. Known to every person, the desire to postpone difficult or unpleasant tasks leads to negative consequences both for the individual and overall for society as a whole. Laziness is low efficiency in school, work, sports, family life, etc. The ability to analyze statistical data on laziness when performing various tasks, obtained as a result of measurements, will improve the quality of human life. This study proposes to measure the laziness coefficient separately for each regular task and physiological activity, if it is consciously controlled by the person. In most cases we are talking about daily processes.
For example, a static horizontal position is assessed as exceeding the sleep norm for a given person. The level of laziness when playing sports is measured through calorie consumption. Laziness manifested during work and study is measured comprehensively: calorie consumption plus the assessment of a teacher or employer. It should be borne in mind that the technique was developed only for the assessment of healthy people engaged in regular activities.
Keywords: laziness, regular human activity, time coverage, brain activity.

1 Uvod

Tradicionalni koncept lenobe v družbi ima negativno oceno: pomanjkanje želje po delu, ljubezen do brezdelja. Druga definicija lenobe je "potreba po varčevanju z energijo". Lenoba je človekova želja, da zavrne premagovanje težav, vztrajen odpor do napora volje. Lenobe ne smemo zamenjevati z naravno potrebo po počitku, pa tudi s simptomi nekaterih duševnih bolezni, kot so depresija, motnja pozornosti, motnja spanja, shizofrenija ipd. Psihologija razlaga lenobo kot pomanjkanje motivacije, pomanjkanje želje, da bi naredili kar koli, kar zahteva voljni napor, in, kar je najpomembneje, izkušnjo užitka od brezdelja.

Na podlagi navedenega smo se odločili, da lenobo merimo v odvisnosti od uspešnosti izpolnjevanja načrtovanih nalog. Skoraj vsak človek se ukvarja z rednimi dejavnostmi, ki se skoraj ne spreminjajo v obdobjih, kot so teden, mesec ali leto. Seveda se lahko v 10 letih zelo spremeni, vendar bomo upoštevali obdobja stabilnega življenja z občasnimi opravili, na primer: študij, delo, šport, vzgoja otrok itd. Lenobo bomo merili pri opravljanju načrtovanih dnevnih opravil, pod pogojem, da je oseba zdrava (npr. na podlagi mnenja osebnega zdravnika, ki mu ne bi pisal bolniškega staleža), ni pod vplivom alkohola in mamil, t.j. navaden povprečen človek.

2 Izbira metodike

Predlagana metodologija zahteva individualni pristop za vsako osebo. Vse se začne z ugotavljanjem, katera opravila oseba redno opravlja in katera od njih je morda lenoba. Prepoznati je treba tiste naloge, kjer je potrebna moč volje, saj je njeno pomanjkanje eden od znakov lenobe.
Za večino primerov bomo koncept lenobe obravnavali kot razmerje med dejansko porabljeno energijo ali možgansko aktivnostjo in načrtovano za določeno nalogo. Pri nekaterih nalogah, kot sta študij in delo, bomo dodali tudi zunanjo oceno rezultata (ocena učitelja ali delodajalca). Lenoba, ki se kaže v dolgotrajnem bivanju v postelji, bo ocenjena kot preseganje norme spanja za določeno osebo.
Za vsak proces (spanje, delo, študij itd.) je treba določiti osnovne parametre, s katerimi bomo nadalje primerjali rezultate meritev:
- norma spanja
- poraba kalorij pri delu
- poraba kalorij pri športu
- poraba kalorij s povečano aktivnostjo možganov
- sistem ocenjevanja uspešnosti pri delu in študiju

Recimo, da so za določeno osebo identificirani naslednji redni procesi, na podlagi katerih se bo merila lenoba:
Spanje, norma spanja za določeno osebo (ob upoštevanju starosti in narave dela) - 8 ur
Študij, 6 ur na dan (vključno z domačo nalogo), poraba kalorij pri visoki produktivnosti - 100 kcal / uro
Delo, 3 ure dnevno, poraba kalorij pri visoki produktivnosti – 150 kcal / uro
Šport, 1 ura dnevno 500 kcal/uro

Tako bomo v 18 urah ocenili manifestacijo lenobe.
Preostalih 6 ur (24 - 18) vključuje vse druge manjše naloge, ki jih ni mogoče oceniti, kot so pot od doma do šole ali službe, kuhanje, nakupovanje, sprostitev, zabava itd.
Očitno je tako ocenjevanje možno le ob delavnikih. Vikendi, prazniki, počitnice, počitnice se ne ocenjujejo.
Pomembno je upoštevati, da več kot je ocenjenih čamov na dan, natančnejši je ocenjeni rezultat.

3 Merjenec in merilna lestvica

LN - faktor lenobe, brezenotna veličina od 0 do 1

1 - največja lenoba
0 - popolna odsotnost lenobe
0,5 - optimalna vrednost

Pojasniti je treba, da ta tehnika določa optimalno vrednost na podlagi predpostavke, da mora biti oseba, ki vodi optimalen življenjski slog, zmerno lena. Povečana lenoba je vsekakor slaba, vendar povečana učinkovitost ni vedno dobra. Človek ni robot, ocenjevali ga bomo glede na ravnotežje med živahno dejavnostjo, ki zahteva moč volje, in prijetnimi procesi, ki prinašajo užitek.
Faktor lenobe 0,5 je torej zlata sredina, višja odstopanja od njega kažejo na povečano lenobo, manjša odstopanja pa na zmanjšano lenobo, kar lahko razumemo tudi kot povečano učinkovitost. Za živega človeka je razpon faktorja lenobe 0,2 – 0,8. LN > 0,8 - pomeni, da je oseba skoraj ves čas negibna in brez aktivne možganske aktivnosti, LN < 0,2 - stalna fizična ali duševna aktivnost, brez počitka.

Dodaten pomemben faktor je
Časovna pokritost = skupno število ur meritev / dolžina standardnega časovnega obdobja
Standardno časovno obdobje: 24ur, teden, mesec, leto
Časovna pokritost = 0.9 ali 0.5 je vekila razlika za analizo
V prvem primeru ocenimo skoraj ves človekov čas, v drugem pa le polovico. Očitno je, da višja kot je Časovna pokritost, popolnejšo sliko imamo.

4 Matematični model

Celotni faktor lenobe je sestavljen iz faktorjev, izračunanih za posamezne procese, na ta način je mogoče analizirati ne le lenobo na splošno za določeno osebo, ampak tudi v katerih konkretnih procesih se najbolj kaže.

Kot že zapisano v 2. odstavku Lenobo bomo merilo za 4 procese: spanje, študij, šport, delo

$$LN = LN_{span} + LN_{stud} + LN_{sport} + LN_{delo}$$

$$LN = K_{t_{span}} * F_{span} + K_{t_{stud}} * F_{stud} + K_{t_{sport}} * F_{sport} + K_{t_{delo}} * F_{delo}$$

F – faktor lenobe, nastavljen za vsak proces posebej

K_t – utežni koeficient sorazmeren s časom postopka

$$K_t = \frac{t_{dejavnosti}}{t_{obdobja}}$$

Spanje $F_{span} = 1 - 2^{-C_{span} * \frac{t_{horizont}}{t_{norma\ spanja}}}$, $C_{span} = 1$

Študij $F_{stud} = \frac{C_{stud_k} * 2^{-\frac{EE_{stud}}{EE_{norm.stud}}} + C_{stud_o} * (1 - 0{,}5 * \frac{Pov.ocena\ danes}{Opt.ocena})}{C_{stud_k} + C_{stud_o}}$

$C_{stud_k} = 1,\ C_{stud_o} = 0.7$

$$Pov.ocena\ danes = \frac{\sum_1^n ocene}{n}$$

$Opt.ocena = 8$ *(10 točkovna lestvica)*

Šport $F_{sport} = 2^{-\frac{EE_{sport}}{EE_{norm.sport}}}$

Delo $F_{delo} = \frac{C_{delo_k} * 2^{-\frac{EE_{delo}}{EE_{norm.delo}}} + C_{delo_o} * (1 - 0{,}5 * \frac{Pov.ocena\ danes}{Opt.ocena})}{C_{delo_k} + C_{delo_o}}$

$C_{delo_k} = 0.6,\ C_{delo_o} = 1$

$$Pov.ocena\ danes = \frac{\sum_1^n ocene}{n}$$

$Opt.ocena = 8$ *(10 točkovna lestvica)*

$$LN = \frac{t_{span}}{t_{obdobja}} * \left(1 - 2^{-C_{span} * \frac{t_{horizont}}{t_{norma\ spanja}}}\right) + \frac{t_{stud}}{t_{obdobja}} * \frac{C_{stud_k} * 2^{-\frac{EE_{stud}}{EE_{norm.stud}}} + C_{stud_o} * \left(1 - 0{,}5 * \frac{Pov.ocena\ danes}{Opt.ocena}\right)}{C_{stud_k} + C_{stud_o}} + \frac{t_{sport}}{t_{obdobja}} * 2^{-\frac{EE_{sport}}{EE_{norm.sport}}} + \frac{t_{delo}}{t_{obdobja}} * \frac{C_{delo_k} * 2^{-\frac{EE_{delo}}{EE_{norm.delo}}} + C_{delo_o} * (1 - 0{,}5 * \frac{Pov.ocena\ danes}{Opt.ocena})}{C_{delo_k} + C_{delo_o}}$$

5 Merilna negotovost

Skupna negotovost je odvisna od negotovosti pri merjenju faktorjev lenobe za posamezne procese, ki so med seboj neodvisni, zato uporabljamo naslednjo enačbo

$$u(LN) = \sqrt{c_{F_{span}}^2\, u^2(F_{span}) + c_{F_{stud}}^2\, u^2(F_{stud}) + c_{F_{sport}}^2\, u^2(F_{sport}) + c_{F_{delo}}^2\, u^2(F_{delo})}$$

Koeficienti občutljivosti, ki kažejo stopnjo vpliva posameznih negotovosti na končno izmerjeno vrednost

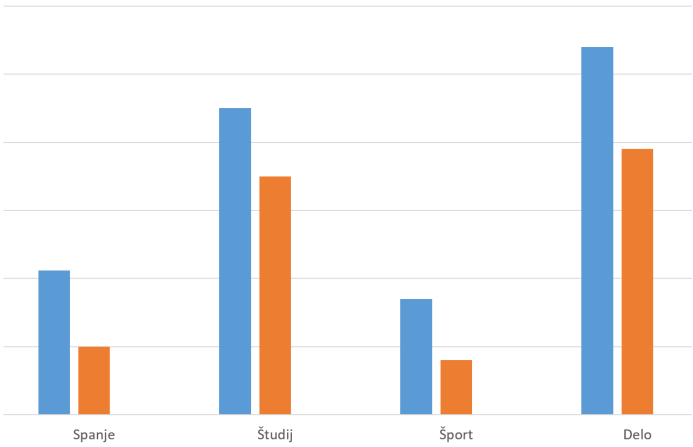
$$c_{F_{span}} = K_{t_{span}} \frac{\partial Y}{\partial F_{span}}$$

$$c_{F_{stud}} = K_{t_{stud}} \frac{\partial Y}{\partial F_{stud}}$$

$$c_{F_{sport}} = K_{t_{sport}} \frac{\partial Y}{\partial F_{sport}}$$

$$c_{F_{delo}} = K_{t_{delo}} \frac{\partial Y}{\partial F_{delo}}$$

Modre barve kažejo negotovosti, oranžne barve koeficiente občutljivosti



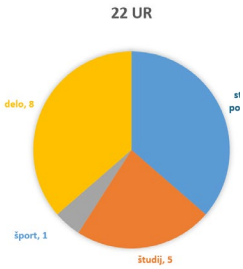
6 Popolni merilni rezultat

Pokažimo, kako lahko izgleda izmerjeni faktor lenobe za isto osebo v različnih primerih.
Ista oseba se lahko pri opravljanju rednih nalog izkaže na različne načine, od zelo lene do izjemno učinkovite.

LN = 0.5±0.25 k=2 p=95%

Časovna pokritost 0.92

Optimalno

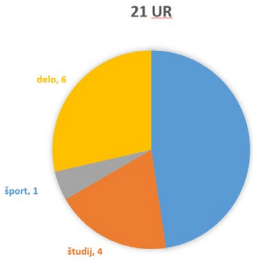


Vsi izmerjeni individualni faktorji lenobe za spanje, delo, študij in šport imajo optimalne vrednosti 0,5 in temu primerno je tudi skupni faktor lenobe enak 0,5.
To pomeni, da je oseba dobro razporedila svoj čas in energijo, je zelo učinkovita v vseh procesih in ne preživi več časa v statičnem vodoravnem položaju, kot je normalno za spanje.

LN = 0.58±0.25 k=2 p=95%

Časovna pokritost 0.88

povečana lenoba

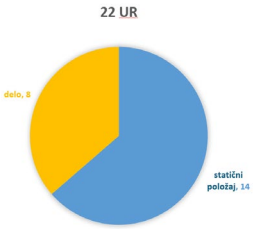


Človek je rahlo len, vse manj dela, manj se uči in nima zelo visokih ocen, len je tudi pri športu in rad poležava v postelji. Vredno je analizirati razloge za nizko motivacijo za šport, študij in delo.

LN = 0.72±0.25 k=2 p=95%

Časovna pokritost 0.92

visoka stopnja lenobe

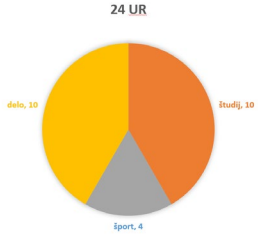


Zelo visoka lenoba, nevarna stopnja. Človek je večino časa v vodoravnem stanju, preostali čas dela, vendar neproduktivno, poraba kalorij pri delu je pod normalno, ocena vodje pa je nizka. Nujno je treba ukrepati.

LN = 0.26±0.25 k=2 p=95%

Časovna pokritost 1.0

lenobe ni



Neverjetno nizka stopnja lenobe za navadnega človeka, ves čas je aktiven, kaže visoke rezultate in ne počiva.

7 Vplivne veličine

Na rezultate merjenja vpliva več dejavnikov, ki otežijo postopek merjenja. Začetnega in končnega časa postopka ni vedno mogoče natančno določiti, saj lahko oseba večkrat preklaplja med opravili, na primer, ko dela domačo nalogo, ga bodo morali zamotiti gospodinjska opravila, otroci ali odgovor na službeni klic . Tako se bo ob skupnem času učenja, na primer 6 ur, dejansko učil 4 ali 5 ur, če bo to kombiniral z drugimi nalogami. Subjektivna ocena rezultatov študija ali dela, ki je odvisna od druge osebe (učitelja, šefa), prav tako povečuje merilno negotovost, vendar je ni mogoče ovrednotiti.

8 Študija izvedljivosti

Podrobni statistični podatki so koristni predvsem za človeka samega saj dajejo natančne povratne informacije in pomagajo pri razvoju in samouresničevanju

Poleg tega se lahko tehnologija uporablja na drugih področjih, povezanih s potrebo po razvoju določenih močnih lastnosti osebe ali za izbiro za pomembno vlogo osebe z že razvitimi potrebnimi lastnostmi:

- popravki pri vzgoji otrok
- pravilnejša izbira poklica (če je motivacija, bo LN manj)
- pri zaposlovanju, predvsem na vodilnih položajih in v nevarnih poklicih
- pri političnem delovanju, pri volitvah predsednikov, predsednikov strank itd.

Vse našteto bo imelo pozitiven gospodarski učinek na družbo

Obstaja etični problem, ker so obsežni osebni podatki lahko na voljo drugim ljudem in bi se teoretično lahko uporabili proti določeni osebi, zato je treba ta izdelek ustvariti v sodelovanju z odvetniki in zagovorniki človekovih pravic.

9 Interdisciplinarnost

Ker je najtežji del metode merjenja lenobe merjenje učinkovitosti reševanja intelektualnih problemov, potem za implementacijo metodologije je potrebno sodelovanje s specialisti s področja medicine in psihologije:

- raziskovanje možganske aktivnosti
- psihoanaliza
- psihiatrija

10 Zaključek

Danes je praktična uporaba tehnike omejena s sodobnimi tehnologijami in ne more biti razširjena. Glavna težava je določiti naravo nalog, ki zasedajo človeške možgane. Merjenje možganske aktivnosti samo na podlagi izračuna porabe kalorij je praktično nemogoča naloga, saj je nemogoče natančno izolirati porabo kalorij možganov od celotne porabe kalorij. Vsaj sodobni načini merjenja porabe kalorij, povezani z meritvami srčnega utripa in porabe kisika, tega problema ne rešijo. Druga resna težava je nezmožnost ločiti, s katerimi nalogami so možgani zaposleni, koristnimi ali ne. Poraba kalorij v možganih je enaka med intelektualnimi računalniškimi igrami, kjer morate reševati logične naloge, in pri reševanju nalog iz matematike. Vendar pa je že samo zamenjava matematike z računalniško igro ena od manifestacij lenobe.

Viri in literatura

[1] Wikipedia. Laziness
https://en.wikipedia.org/wiki/Laziness
[2] Harvard Medical School. Calories burned in 30 minutes for people of three different weights
https://www.health.harvard.edu/diet-and-weight-loss/calories-burned-in-30-minutes-for-people-of-three-different-weights(08.03.2021)
[3] Scientific American. Does Thinking Really Hard Burn More Calories?
https://www.scientificamerican.com/article/thinking-hard-calories/ (18.07.2012)
[4] Profit.co. Top 3 Rating Scales for Employee Performance Review
https://www.profit.co/blog/performance-management/top-3-rating-scales-for-employee-performance-review/

Nadležnost zvonjenja cerkvenih zvonov

Anamarija Hauptman
Fakulteta za elektrotehniko
Univrza v Ljubljani
Ljubljana, Slovenija
E-pošta: ah8405@student.uni-lj.si

***Povzetek*—V Sloveniji je že od nekdaj prisotna tradicija pritrkovanja. Poleg avtomatskega zvonjenja, je v marsikateri župniji aktivna tudi pritrkovalska skupina. Vedno pa se najdejo tudi ljudje, ki ne znajo ceniti te slovenske tradicije in jih zvonjenje cerkvenih zvonov moti. Zato smo želeli poiskati način, kako bi lahko izračunali nadležnost zvonjenja cerkvenih zvonov. Ker je nadležnost zelo subjektivna veličina, smo poskušali poiskati parametre, ki bi jih lahko določili na čim bolj fizikalen način. V članku predlagamo matematični model, s katerim lahko izračunamo nadležnost zvonjenja večih zvonov hkrati.**

***Ključne besede*—nadležnost hrupa, cerkveni zvonovi, hitra Fourierova transformacija**

I. Uvod

Slovenija je znana po tem, da se na skoraj vsakem griču nahaja cerkvica, vsaka izmed teh cerkva pa ima tudi zvonik in v njem vsaj en zvon. Ti zvonovi že mnogo let na vsakih 15 minut zvonijo uro. Ob večjih krščanskih praznikih ali pomembnejših župnijskih slovesnostih pa se v zvonikih zbirajo skupine pritrkovalcev, ki z igranjem različnih pritrkovalskih melodij ovekovečijo Gospodov dan. Zato se vse pogosteje dogaja, da tovrstni hrup moti okoliške prebivalce. V izogib nepotrebnim prepirom med duhovniki in ljudmi, ki jih zvonjenje moti, smo želeli določiti matematični model, s katerim bi lahko preverili, kako nadležno je zvonjenje cerkvenih zvonov v resnici.

II. Definicija lestvice

Za izračun nadležnosti zvonjenja cerkvenih zvonov nismo našli nobene že uveljavljene lestvice. Zato smo definirali novo, z vrednostmi med 0 in 1. Če je vrednost nadležnosti 0, to pomeni, da je zvonjenje popolnoma nenadležno, če pa je vrednost nadležnosti 1, je zvonjenje neskončno nadležno. Nadležnost zvonjenja cerkvenih zvonov označimo z grško črko upsilon, njena vrednost pa je brez enote.

III. Problem merljivosti

Nadležnost poljubne stvari je nekaj, kar je močno odvisno od posameznega človeka, zaradi česar je težko določiti objektivno oceno. Kadar govorimo o nadležnosti hrupa, se pogosto zgodi, da se ljudje, ki že dolgo živijo blizu izvora tega hrupa (npr.: železniška proga, kamnolom ...) nanj povsem navadijo in ga skoraj ne opazijo, med tem ko lahko enak hrup ljudi, ki so se v njegovo bližino priselili pred kratkim, močno moti. Poleg tega je nadležnost hrupa odvisna tudi od starosti osebe oz. od njenega sluha.

Ker na oceno nadležnosti zvonjenja cerkvenih zvonov vpliva ogromno nemerljivih parametrov, smo se v okviru našega matematičnega modela omejili le na tiste, ki se nam zdijo najpomembnejši, hkrati pa lahko do vrednosti nekaterih izmed njih pridemo na zelo matematično-fizikalni način.

IV. Identifikacija veličin

V večini primerov, ko slišimo bitje cerkvenih zvonov, slišimo več zvonov, ki se nahajajo v istem cerkvenem zvoniku. Zato moramo upoštevati vpliv vseh zvonov. Ker pa se le-ti med seboj razlikujejo v več parametrih, moramo obravnavati tudi vsak zvon posebej. Zato smo naš matematični model razdelil na dva dela: najprej izračunamo koeficient nadležnosti vsakega zvona posebej, v drugem delu pa na podlagi teh in še nekaterih drugih koeficientov nadležnost vseh zvonov v zvoniku hkrati.

A. Identifikacija veličin v povezavi z enim zvonom

1) Lastna frekvenca: Za izračun nadležnosti zvonjenja zvona na podlagi lastne frekvence, moramo najprej preračunati hitro Fourierovo transformacijo (*ang.* fast Fourier transform, FFT). Pri tem si lahko pomagamo z Matlab kodo, dostopno na [1]. Več o izračunu v poglavju V-A.

2) Material zvona: Večina cerkvenih zvonov je bronastih ali pa železnih. Velja, da je zvok, ki ga proizvajajo bronasti zvonovi mehkejši od zvoka, ki ga proizvajajo železni zvonovi.

B. Identifikacija veličin v povezavi z več zvonovi

1) Jakost zvoka: Najpomembnejša od vseh vplivnih veličin je jakost zvoka. Tudi če je na podlagi vseh ostalih veličin zvonjenje zvonov še tako nadležno, če bo jakost zelo nizka, se tega skoraj ne bo slišalo. Velja tudi obratno: če imajo zvonovi popolnoma nenadležen zvok in so zelo glasni, bo zaradi tega njihova nadležnost močno narasla. Jakost zvoka lahko izmerimo s pomočjo fonometra.

2) Sozvočje zvonov: Če zvoni več zvonov hkrati, je zaželjeno, da so njihove frekvence med seboj usklajene. Pri tem si pomagamo s FFT vsakega zvona posebej in tako določimo njihove glavne frekvence. Glavne frekvence vseh zvonov primerjamo med seboj tako, da glavno frekvenco enega primerjamo z večkratniki glavnih frekvenc vseh ostalih zvonov. Če je na primer glavna frekvenca enega točno dvakratnik glavne frekvence drugega zvona, potem ta dva zvonova igrata oktavo, kar je prijetno za poslušanje. Če pa frekvenca enega za le malo odstopa od dvakratnika frekvence drugega, se to sliši kot neuglašeno.

3) Trajanje zvonjenja: Pri izračunu nadležnosti zvonjenja moramo upoštevati tudi trajanje zvonjenja. Dlje kot zvonijo zvonovi, bolj bo to nadležno.

4) Verska pripadnost poslušalca: Ker govorimo o zvonjenju zvonov v zvonikih katoliških cerkev, moramo pri izračunu nadležnosti upoštevati tudi versko pripadnost poslušalca. V večini primerov se nad hrupom, ki ga povzročajo cerkveni zvonovi pritožujejo tisti ljudje, ki po veroizpovedi niso katoličani.

5) Melodija zvonjenja: Kljub temu, da je v zvonikih več zvonov, se včasih zgodi, da bije le en. V takšnih primerih je bitje vedno enakomerno, brez kakšnega zanimivega ritma. Domnevamo, da je takšno zvonjenje, ko bije le en zvon, v večini primerov bolj nadležno kot pa če bi več zvonov skupaj igralo neko melodijo.

V. Matematični model

Matematični model za izračun nadležnosti zvonjenja cerkvenih zvonov smo razdelili na dva dela (razlaga v poglavju IV):

a) nadležnost zvonjenja enega zvona,
b) nadležnost zvonjenja več zvonov hkrati.

A. Matematični model za en zvon

Matematični model nadležnosti zvonjenja enega zvona definiramo z naslednjim funkcijskim predpisom:

$$\upsilon_i = \frac{\upsilon_{in} + K_{im}}{2} \tag{1}$$

$$\upsilon_{in} = \sum_{k=1}^{3} \left(\frac{|f_{ik} - f_{ivg}|}{|f_{ig} - f_{ik}|} \right) \tag{2}$$

Pomen spremenljivk v enačbi (1):

- υ_i ... oznaka za nadležnost zvona z indeksom i
- υ_{in} ... nadležnost zvonjenja zvona z indeksom i zaradi popačenja (glej enačbo (2))
  - f_{ig} ... frekvenca najizrazitejšega (glavnega) vrha v FFT zvona i v enoti Hz
  - f_{ik} ... frekvenca k-tega najizrazitejšega vrha v FFT zvona i v enoti Hz
  - f_{ivg} ... najbližji večkratnik frekvence f_{ig} frekvenci f_{ik} v enoti Hz

  Iz FFT zvona odčitamo frekvence najvišjih 4 vrhov. Najvišji vrh predstavlja glavno frekvenco zvona. Izračunamo $2 * f_{ig}$ (oktava), $1,5 * f_{ig}$ (kvinta), $1,25 * f_{ig}$ (terca), $0,75 * f_{ig}$, $0,5 * f_{ig}$ ter $0,25 * f_{ig}$. Te vrednosti predstavljajo f_{ivg}. Med njimi poiščemo tiste, ki so najbližje frekvencam drugega, tretjega in četrtega vrha.
- K_{im} ... konstanta nadležnosti zaradi izbire materiala zvona z indeksom i
  Njeno vrednost določimo na podlagi tabele I.

material zvona	vrednost konstante K_{im}
bron	0,85
železo	1

TABELA I
Določitev vrednosti konstante K_{im}

B. Matematični model za več zvonov skupaj

Matematični model nadležnosti zvonjenja več zvonov hkrati definiramo z naslednjim funkcijskim predpisom:

$$\upsilon = \frac{\sqrt[4]{\frac{I}{110}} + \bar{\upsilon_i} + \upsilon_s + e^{-\frac{t}{2500}} + K_{vp} + K_{mz}}{6} \tag{3}$$

$$\bar{\upsilon_i} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \upsilon_i}{n} \tag{4}$$

$$\upsilon_s = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \left(\frac{|f_j - f_{vij}|}{|f_i - f_j|} \right)}{n \cdot (n-1)}, i \neq j \tag{5}$$

Pomen spremenljivk v enačbi (3):

- υ ... oznaka za nadležnost vseh zvonov skupaj
- I_i ... jakost zvoka v enoti dB
  Jakost zvoka zvona normiramo z vrednostjo 110 dB. To je jakost, ki lahko ob daljšem trajanju povzroči izgubo sluha [2].
- $\bar{\upsilon_i}$ ... povprečna nadležnost posameznih zvonov (izračunamo po enačbi (4))
- n ... število vseh zvonov
- υ_s ... nadležnost zvonjenja zvonov zaradi sozvočja (glej enačbo (5))
  - f_i ... glavna frekvenca zvona i
  - f_j ... glavna frekvenca zvona j
  - f_{vij} ... najbližji večkratnik frekvence f_i frekvenci f_j
- t ... čas trajanja zvonjenja v sekundah
- K_{vp} ... konstanta, ki povzame versko pripadnost poslušalca
  Njeno vrednost določimo s pomočjo tabele II.

poslušalec se identificira kot ...	vrednost konstante K_{vp}
... katoličan	0,6
... ateist	0,8
... pripadnik druge veroizpovedi	1

TABELA II
Določitev vrednosti konstante K_{vp}

- K_{mz} ... konstanta, ki povzame melodijo zvonjenja
  Njeno vrednost določimo s pomočjo tabele III.

melodija zvonjenja	vrednost konstante K_{mz}
enakomerno bitje enega zvona	1
enakomerno in izmenično bitje dveh zvonov	0,85
melodija večih zvonov	0,5

TABELA III
Določitev vrednosti konstante K_{mz}

VI. Negotovost merjene veličine

Skupno negotovost nadležnosti zvonjenja enega zvona izračunamo po naslednji formuli:

$$u_{\upsilon_i} = \sqrt{(c_{\upsilon_{in}} \cdot u(\upsilon_{in}))^2 + (c_{K_{im}} \cdot u(K_{im}))^2}, \tag{6}$$

negotovost nadležnosti zvonjenja večih zvonov hkrati pa po formuli:

$$u(\upsilon) = \sqrt{\begin{array}{r}(c_I \cdot u(I))^2 + (c_{\upsilon_i} \cdot u(\upsilon_i))^2 + \\ +(c_{\upsilon_s} \cdot u(\upsilon_s))^2 + (c_t \cdot u(t))^2 +, \\ +(c_{K_{vp}} \cdot u(K_{vp}))^2 + (c_{K_{mz}} \cdot u(K_{mz}))^2\end{array}} \quad (7)$$

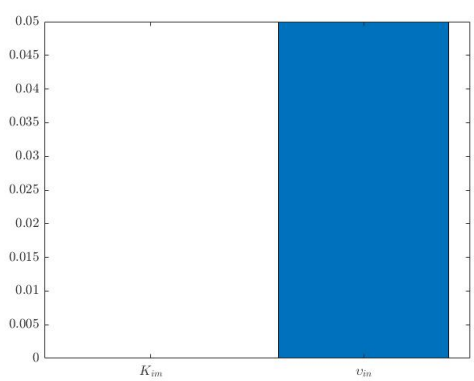
kjer vrednosti občutljivostnih koeficientov c_x izračunamo po naslednji enačbi:

$$c_x = \frac{\partial \upsilon}{\partial x} \quad (8)$$

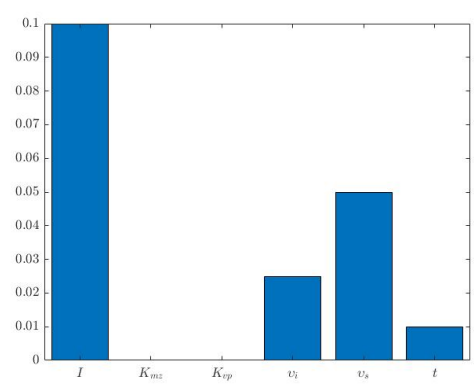
in nato spremenljivke v parcialnih odvodih nadomestimo s konkretnimi vrednostmi.

Negotovosti posameznih veličin pa imajo naslednje vrednosti (histograma na slikah 1 in 2):

- $c_{\upsilon_{in}} = 0,05$
- $c_{K_{im}} = 0$
- $c_I = 0,1$ dB
- $c_{\upsilon_i} = 0,05$
- $c_{\upsilon_s} = 0,05$
- $c_t = 0,01$ s
- $c_{K_{vp}} = 0$
- $c_{K_{mz}} = 0$



Slika 1. Histogram negotovosti posameznih veličin v povezavi z enim zvonom



Slika 2. Histogram negotovosti posameznih veličin v povezavi z več zvonovi

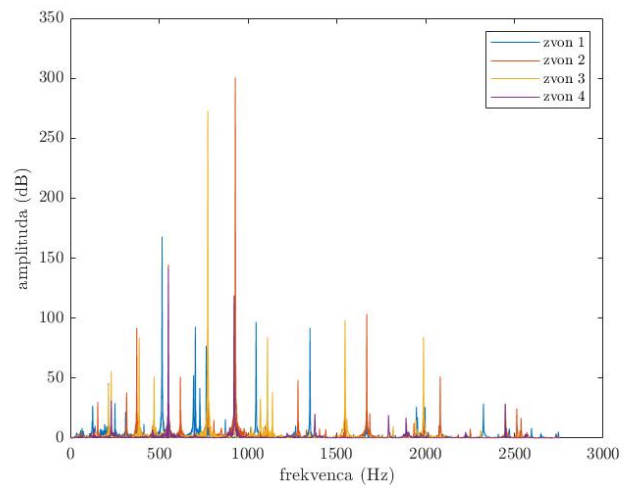
VII. Popolni merilni rezultat

Izvedli smo meritve na zvonovih ene izmed slovenskih cerkva in dobili naslednje podatke:

- $n = 4$
- $I = 64,0$ dB
- $t = 50,0$ s
- $K_{vp} = 0,6$
- $K_{mz} = 0,5$

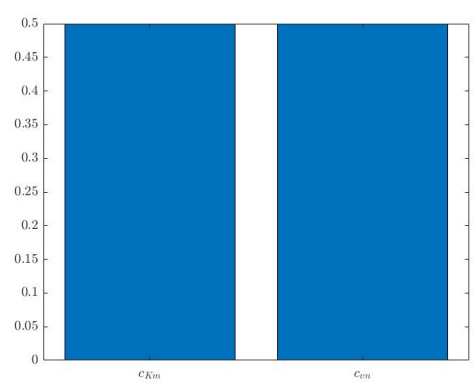
Na podlagi zvočnega posnetka smo najprej izračunali FFT (slika 3), iz česar smo določili nadležnost posameznih zvonov:

	zvon 1	zvon 2	zvon 3	zvon 4
K_{im}	0,85	0,85	0,85	1
f_{ig}	517 Hz	929 Hz	774 Hz	552 Hz
υ_i	0,6625	0,6514	0,5825	0,6401

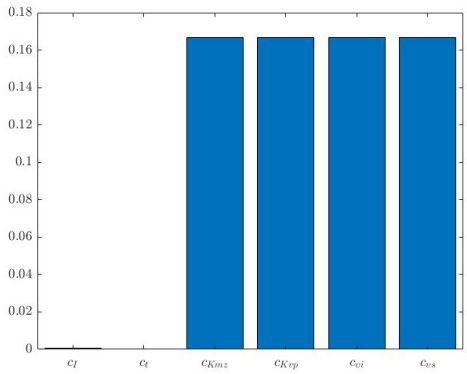


Slika 3. FFT zvonov za prvi primer

Izračunali smo tudi vrednosti občutljivostnih koeficientov za obravnavani primer (histograma na slikah 4 in 5).



Slika 4. Histogram vrednosti občutljivostnih koeficientov v povezavi z enim zvonom za prvi primer



Slika 5. Histogram vrednosti občutljivostnih koeficientov v povezavi z več zvonovi za prvi primer

Iz tega lahko zapišemo popolni merilni rezultat v naslednji obliki:

$$\upsilon = 0,6519 \pm 0,0093 \tag{9}$$

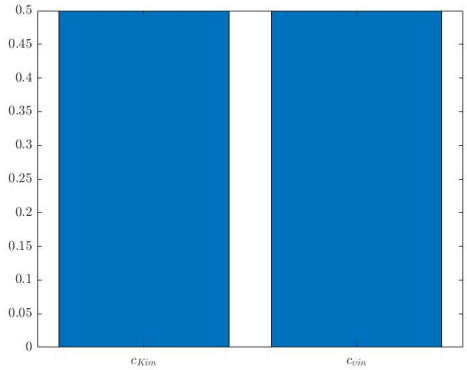
Meritve smo ponovili še za neko drugo cerkev, le da smo se tokrat povzpeli v zvonik. Dobili smo sledeče rezultate:

- $n = 3$
- $I = 98,0$ dB
- $t = 12,0$ s
- $K_{vp} = 0,6$
- $K_{mz} = 0,85$

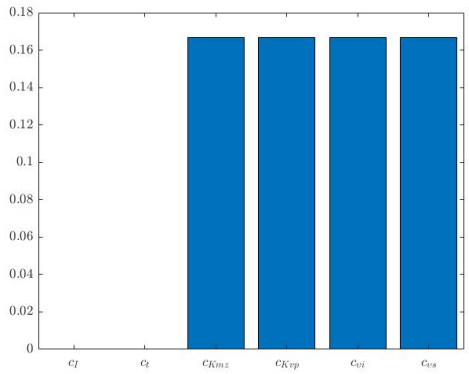
Ponovno smo na podlagi zvočnega posnetka izračunali prispevke posameznih zvonov:

	zvon 1	zvon 2	zvon 3
K_{im}	0,85	1	0,85
f_{ig}	480 Hz	215 Hz	349 Hz
υ_i	0,4991	0,5502	0,6512

Tudi za to meritev smo določili vrednosti občutljivostnih koeficientov (histograma na slikah 6 in 7).



Slika 6. Histogram vrednosti občutljivostnih koeficientov v povezavi z enim zvonom za drugi primer



Slika 7. Histogram vrednosti občutljivostnih koeficientov v povezavi z več zvonovi za drugi primer

Zopet lahko zapišemo popolni merilni rezultat v naslednji obliki:

$$\upsilon = 0,6923 \pm 0,0093 \tag{10}$$

Če primerjamo oba rezultata, lahko vidimo, da so bili zvonovi v drugem primeru bolj nadležni od zvonov v prvem primeru za približno $0,04$. Do tega pride kljub temu, da je bilo drugo zvonjenje časovno precej krajše od prvega, saj je bila v drugem primeru jakost zvoka zelo visoka.

VIII. Interdisciplinarnost

Pri izračunu nadležnosti zvonjenja cerkvenih zvonov poleg znanja iz področja metrologije potrebujemo še znanje iz teorije signalov (za izračun in analizo hitrih Fourierovih transformacij), glasbene teorije (pri izračunu nadležnosti zaradi lastne frekvence in sozvočja) ter znanje o pritrkovalstvu (vpiv materiala zvona, uglasitev).

IX. Zaključek

Pogosto se srečujemo z ljudmi, ki se pritožujejo nad tem, da so cerkveni zvonovi preglasni ali pa da prepogosto zvonijo. Z izračunom nadležnosti na podlagi opisanega matematičnega modela bi odgovorni lahko preverili, ali so njihove pritožbe upravičene in po potrebi znižali jakost zvonjenja ali pa kako drugače zmanjšali vpliv zvonov na vsakdanje življenje okoliških prebivalcev.

Trenutno imajo konstante, uporabljene v modelu (K_{im}, K_{vp} in K_{mz}), le neke približne vrednosti. Za izboljšavo modela bi lahko njihove vrednosti korigirali na podlagi eksperimentov. K sodelovanju bi povabili večjo množico ljudi različnih verskih pripadnosti in starosti ter jih povprašali o njihovi oceni nadležnosti cerkvenih zvonov v različnih slovenskih krajih.

Literatura

[1] "github repozitorij nadležnost zvonjenja cerkvenih zvonov." Dosegljivo: https://github.com/anamahau/Nadleznost_zvonjenja_cerkvenih_zvonov. [Dostopano: 21. 12. 2023].

[2] "What noises cause hearing loss?." Dosegljivo: https://www.cdc.gov/nceh/hearing_loss/what_noises_cause_hearing_loss.html. [Dostopano: 22. 12. 2023].

Ali je mogoče objektivno izmeriti kakovost računalniške miške?

Boštjan Baras

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: bb1625@student.uni-lj.si@fe.uni-lj.si

Povzetek. V delu je predstavljen predlog za rešitev merilnega problema določanja kakovosti računalniške miške. Zaradi raznolikosti mišk njene kakovosti ni lahko določiti. Predlagana rešitev želi ob upoštevanju objektivnih parametrov miške čim bolj pravilno izmeriti njeno kakovost. Rešitev podaja oceno kakovosti računalniške miške na podlagi matematičnega modela.

Ključne besede: računalniška miška, kakovost, ergonomija

Objective measurement of quality of a computer mouse

A method for evaluating quality of computer mice is presented. Because of differences in mice, quality is difficult to determine. Presented solution takes into account objective parameters of a mouse and then tries to calculate its quality. The solution gives an estimate of quality of a computer mouse based on a mathematical model.

Keywords: computer mouse, quality, ergonomics

1 Uvod

1.1 Identifikacija problema

Danes je na trgu veliko število različnih računalniških mišk z različnimi lastnostmi in namenjenih različnim kupcem. Na podlagi parametrov računalniških mišk, ki so pogosto navedeni v specifikacijah mišk in ki jih je mogoče tudi izmeriti, želim čim bolj objektivno določiti kakovost računalniške miške in s tem kupcem olajšati izbiro pri nakupovanju. Kakovost računalniške miške se v mojem primeru nanaša na uporabniško izkušnjo med uporabo miške.

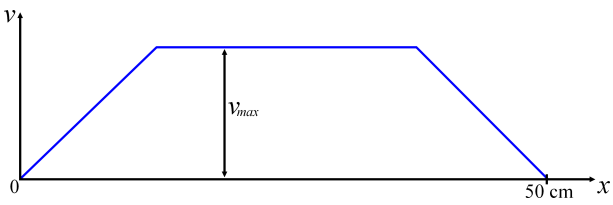
2 Kakovost računalniške miške

Kakovost računalniške miške je glavna veličina, ki jo želim izmeriti. Ker pa še ne poznamo takšnega merilnika za kakovost, oziroma neke naprave, ki bi kakovost miške lahko izmerila neposredno, jo bom poskušal izmeriti posredno preko različnih drugih veličin. Te veličine je mogoče neposredno izmeriti in jim določiti enote ter ovrednotiti rezultate. Za enoto kakovosti miške KRM, sem izbral ≫mis≪.

Na kakovost miške vplivajo maksimalna hitrost sledenja, frekvenca povezave, zakasnitve senzorja in gumbov, maksimalna ločljivost senzorja, število gumbov, velikost, masa, način povezovanja, koeficient lepenja, funkcionalnost kolesca, prisotnost dodatnega kolesca, naklon in preferenca med ergonomijo in vodljivostjo.

2.1 Maksimalna hitrost sledenja

Maksimalno hitrost sledenja računalniške miške bi izmeril z manipulatorjem SCARA. Manipulator ima 4 standardno določene prostostne stopnje in lahko miško premika po podlagi ter pri tem meri njeno hitrost. Manipulator bi miško premaknil po linearni trajektoriji za nekaj 10 cm, na sredini trajanja giba pa bi miška dosegla največjo hitrost. Po premiku bi preveril, če je miška gib pravilno izmerila. Hitrost bi povečeval dokler se ne bi pri izmerjeni trajektoriji miške začele pojavljati anomalije v obliki nezveznih skokov izmerjene pozicije ali pa miška ne bi merila spreminjanja pozicije v odvisnosti od časa. Enota za merjenje maksimalne



Slika 1: Primer spreminjanja hitrosti miške pri poskusu

hitrosti sledenja je m/s. Z večanjem maksimalne hitrosti sledenja se kakovost računalniške miške povečuje, vendar se prispevek približuje maksimalni vrednosti preko eksponentnega naraščanja, saj domnevam, da absurdno velike hitrosti sledenja (> 5 m/s) ne vplivajo na kakovost računalniške miške.

2.2 Frekvenca povezave

Frekvenco povezave računalniške miške v Hz je najlažje izmeriti preko za to namenjenih spletnih strani ali računalniških aplikacij. Podobno kot pri maksimalni hitrosti sledenja se tudi pri večanju frekvence prispevek h kakovosti približuje maksimalni vrednosti, zato je tudi frekvenca v modelu modelirana z eksponentnim naraščanjem. Domnevam, da frekvence nad 500 Hz ne vplivajo na kakovost računalniške miške.

2.3 Zakasnitve

Zakasnitve računalniške miške delimo na zakasnitve pri pritisku gumbov in na zakasnitve senzorja, ki meri pomike miške. Vse zakasnitve so podane v ms. Zakasnitev gumba bi izmeril z aktuatorjem, ki bi pritisnil na glavni gumb (levi klik) miške. Aktuator bi bil opremljen

s senzorjem sile, s katerim bi natančno določil čas pritiska. Nato bi izmeril čas, kdaj računalnik prejme podatek iz miške o pritisku gumba. Razlika med tema dvema časoma je enaka zakasnitvi pritiska gumba. Zakasnitev senzorja bi izmeril z manipulatorjem SCARA, ki bi naredil linearni gib miške, pri tem pa bi meril tri različne zakasnitve med referenčno pozicijo miške izmerjene preko manipulatorja in meritve senzorja. Prva zakasnitev je zakasnitev pri začetku giba, druga je na polovici giba in tretja je na koncu giba. Večanje zakasnitev gumbov in senzorja negativno vpliva na kakovost računalniške miške.

2.4 Maksimalna ločljivost senzorja

Ločljivost senzorja, ki meri pomike računalniške miške, bi meril s manipulatorjem SCARA. Ločljivost senzorja je namreč podana kot število točk, ki jih senzor razloči na določeni razdalji. Ločljivost je v matematičnem modelu podana v cm^{-1} oz. v številu prepoznanih točk na centimeter. Kakovost računalniške miške logaritemsko narašča z večanjem maksimalne ločljivosti senzorja, saj so zelo velike ločljivosti senzorja (> 2500 cm^{-1}) uporabne le za zaslone zelo velikih ločljivosti (8K in več) in za druge nevsakdanje aplikacije.

2.5 Število gumbov

Število gumbov računalniške miške bi izmeril s štetjem le teh. Pri štetju upoštevamo vse gumbe računalniške miške, razen tistih, ki se nanašajo na kolesce miške. Z večanjem števila gumbov miška pridobiva na kakovosti, saj je z večanjem števila gumbov bolj funkcionalna, vendar ima vsaka dodatna tipka vedno manjši prispevek h kakovosti in se zato število gumbov v modelu pojavi v naravnem logaritmu. Ker naravni logaritem nima primerne karakteristike za manjše število gumbov (od 1 do 4), je pomnožen s kubično racionalno funkcijo.

2.6 Velikost miške

Ker je na trgu veliko število računalniških mišk z zelo različnimi oblikami, bi bilo zelo težko opisati velikost miške na podlagi njenih dimenzij. Velikost bi zato empirično izmeril z eksperimentom, pri katerem bi sodelovalo čim večje število ljudi z dlanmi različnih velikosti. Vsak udeleženec bi prijel računalniško miško in se odločil, če se mu zdi ustrezne velikosti, prevelika ali premajhna. Velikost rok populacije bi izmeril z merjenjem razdalje med začetkom dlani in vrhom sredinca, ko je dlan popolnoma iztegnjena. Na podlagi odgovorov populacije in velikosti njihovih dlani bi določili velikost računalniške miške. Proizvajalci pogosto navedejo velikost miške z oznakami small (majhna), medium (srednja) in large (velika). Za pretvorbo oznak v centimetre bom uporabil vodilo podjetja Logitech, kjer je prej omenjena razdalja za majhno miško enaka 16,75 cm, za srednjo 18,25 cm in za veliko 19,75 cm [1].

2.7 Masa miške

Maso računalniške miške bi izmeril s tehtnico. Z večanjem mase je miško težje voditi po želeni trajektoriji, zato negativno vpliva na kakovost računalniške miške.

2.8 Povezljivost

Povezljivost je način povezave med miško in računalnikom. V modelu je povezljivost zapisana s spremenljivko P, ki je odvisna od dejavnikov zapisanih v spodnji enačbi. Če je miška žična, je parameter $X = 1$, sicer je $X = 1,1$. Za brezžične miške, ki se ne morejo polniti brezžično med delovanjem, je treba izmeriti čas delovanja baterije T_{bat}. Tega bi izmeril tako, da bi baterijo napolnil na 100 %, nato pa bi manipulator SCARA s krožnimi gibi premikal miško po podlagi tako, da bi bila miška ves čas obremenjena. Če se miška med uporabo lahko polni brezžično, ali pa je povezana žično, gre $T_{bat} \to \infty$. Večji kot je P, bolj kakovostna je računalniška miška.

$$P = \frac{X \cdot {T_{Bat}}^3}{{T_{Bat}}^3 + 447\ \mathrm{s}^3} \cdot \left(1 - \frac{1}{2\ \mathrm{s}^{-1/3} \cdot \sqrt[3]{T_{Bat}}}\right)$$

2.9 Koeficient lepenja

Koeficient lepenja bi podal glede na lastnosti materialov računalniške miške na ključnih mestih, kjer je uporabnik s svojo dlanjo ter prsti z njo v kontaktu. Koeficient bi ocenil preko tabele, kjer so zapisane vrednosti koeficienta glede na material, ki je pretežno uporabljen na ključnih mestih miške.

Tabela 1: Koeficient lepenja računalniške miške

Uporabljeni material	Koeficient lepenja
Gladka plastika	0,97
Hrapava plastika	1
Gladka guma	1,03
Hrapava guma	1,05

2.10 Kolesce

Večina računalniških mišk ima med obema glavnima gumboma kolesce za drsanje. Na običajni miški s kolescem je kolesce mogoče vrteti in ga pritisniti. Poleg tega nekatere miške omogočajo spreminjanje konfiguracije kolesca tako, da se lahko vrti prosto ali pa po korakih. Dodana vrednost kolesca je lahko tudi bočno pritiskanje kolesca oz. nagibanje kolesca v levo ali desno. Koeficient prispevka kolesca h kakovosti računalniške miške je prikazan v tabeli, pri čemer večanje koeficienta povečuje kakovost računalniške miške.

2.11 Dodatno kolesce

Nekatere miške imajo poleg navadnega kolesca med obema glavnima gumboma dodatno kolesce tudi ob strani miške, ki ga je mogoče uporabljati s palcem na dlani. Če je dodatno kolesce na miški prisotno, je vrednost koeficienta enaka 1, sicer je enaka 0,97.

Tabela 2: Koeficient prispevka kolesca

Kolesce	Koeficient
Brez kolesca	0,97
Kolesce z navpičnim pritiskom brez spreminjanja konfiguracije	1
Kolesce z navpičnim pritiskom s spreminjanjem konfiguracije	1,02
Kolesce z navpičnim in bočnim pritiskom brez spreminjanja konfiguracije	1,03
Kolesce z navpičnim in bočnim pritiskom s spreminjanjem konfiguracije	1,05

2.12 Naklon

Naklon računalniške miške bi izmeril preko njenega CAD modela. Naklon miške je definiran na pravokotni projekciji miške na ravnino, ki je pravokotna na tla in na vektor premikanja miške, pri kateri senzor zazna pomike samo v smeri naprej / nazaj (pomik kazalca samo gor in dol na monitorju). Nato na robu projekcije določimo dve točki v širini obeh glavnih gumbov (levi in desni klik), oziroma v širini glavnega gumba, če je ta samo eden. Točki povežemo z daljico in nato odmerimo kot med daljico in tlemi. Izmerjeni kot predstavlja naklon računalniške miške. Večji naklon miške je boljši za ergonomijo miške, manjši naklon pa je boljši za vodljivost miške.

Slika 2: Primeri določanja naklona računalniške miške.

2.13 Preferenca med ergonomijo in vodljivostjo

Ergonomija in vodljivost računalniške miške sta dva pojma, ki si med seboj nasprotujeta. Ergonomske miške imajo ponavadi velik naklon, vendar je takšno miško težje hitro voditi. Nasprotno imajo miške namenjene za profesionalno igranje računalniških iger zelo majhen naklon, kar pripomore k njeni vodljivosti, vendar take miške niso učinkovite iz ergonomskega vidika. Poleg tega za vodljivost miške pozitivno vpliva čim manjša masa miške, medtem ko masa na ergonomijo miške nima vpliva. Da model poda najbolj pravilen rezultat za kakovost računalniške miške glede na uporabnikove zahteve, mora uporabnik podati parameter, ki podaja razmerje med želeno ergonomijo in vodljivostjo miške. Če je parameter enak 0, se v izračunu upošteva samo ergonomija miške, če je enak 1 se upošteva samo vodljivost miške, za vrednosti med 0 in 1 pa se proporcionalno upoštevata oba prispevka.

3 Problem merljivosti

Merilni rezultati KRM so razporejeni po racionalni lestvici, ki je na spodnji meji omejena z 0 mis, zgoraj pa ni omejena. Če je rezultat KRM enak 0, naprave ni mogoče uporabljati kot računalniška miška. Druga točka, ki je na lestvici določena je 100 mis. Takrat ima miška takšne parametre, ki so trenutno na trgu računalniških mišk najboljši. Ker se zavedam, da tehnologija ves čas napreduje, bi trenutno izbrane najboljše parametre fiksiral, da se definicija 100 mis ne bi spreminjala.

4 Matematični model

Matematični model bom sestavil iz 17 merljivih parametrov. Spodaj so zapisani omenjeni parametri:

- P ... Povezljivost [],
- K_{lep} ... Koeficient lepenja [],
- W ... Kolesce [],
- S ... Dodatno kolesce [],
- Q_S ... Maksimalna ločljivost senzorja [1/cm],
- v ... Maksimalna hitrost sledenja [m/s],
- f_P ... Frekvenca povezave [Hz],
- t_S ... Čas zakasnitve senzorja ob začetku giba [ms],
- t_H ... Čas zakasnitve senzorja na sredini giba [ms],
- t_E ... Čas zakasnitve senzorja ob koncu giba [ms],
- t_G ... Čas zakasnitve gumbov [ms],
- N_G ... Število gumbov [],
- L_D ...Dolžina dlani [cm],
- L_M ... Priporočljiva dolžina dlani za miško [cm],
- ϕ ... Naklon miške [rad],
- m ... Masa miške [g],
- PEV ... Preferenca med ergonomijo in vodljivostjo [].

Enačba matematičnega modela se glasi:

$$
\begin{aligned}
KRM = {} & 0,1518 \text{ mis} \cdot P \cdot K_{lep} \cdot W \cdot S \cdot \\
& \cdot \ln(10^7 \text{ cm}^{-1} \cdot Q_S + 1) \cdot \\
& \cdot \frac{(1 - \exp(-\frac{v}{0,5 \text{ m/s}})) \cdot (1 - \exp(-\frac{f_s}{25 \text{ Hz}}))}{1 + 2 \cdot 10^{-4} \text{ 1/s}^2 \cdot ((t_S \cdot t_H \cdot t_E)^{2/3} + t_G^2)} \cdot \\
& \cdot \frac{{N_G}^3 \cdot \ln(24,3 \cdot 10^9 \cdot N_G + 1)}{(1 + 10^{-2} \cdot (L_D - L_M)^2) \cdot ({N_G}^3 + 1,25)} \cdot \\
& \cdot \Bigg[0,8 + 1,371 \text{ g}^{1/2} \cdot PEV \cdot \frac{0,1 + 0,9 \cdot \cos(\phi)}{\sqrt{m}} + \\
& + 0,2 \cdot (1 - PEV) \cdot (0,4 + 0,6 \cdot \sin \phi) \Bigg]
\end{aligned}
$$

Koeficiente členov enačbe (0,5 m/s, 25 Hz, ...) sem določil tako, da je model ustrezal predpostavkam iz poglavja 3. Koeficiente sem nato optimiziral, da se je model pravilno obnašal ob spreminjanju parametrov.

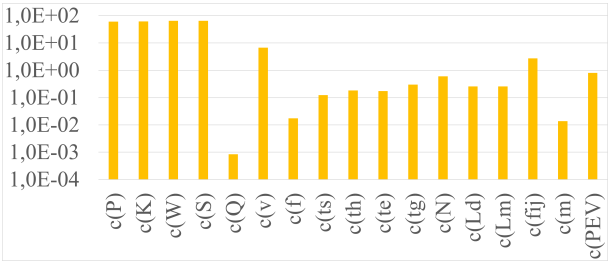
5 Vplivne veličine

Merjenje kakovosti računalniške miške je podvrženo vplivnim veličinam, ki jih v matematičnem modelu ne

upoštevam. Če bi izmerili vse parametre dvema miškama istega modela, bi vseeno dobili drugačna rezultata zaradi toleranc pri izdelavi mišk. Pri merjenju naklona miške je kljub natančnem opisu poteka merjena, zaradi velike raznolikosti računalniških mišk, še vedno nekaj prostora za subjektivnost pri interpretaciji meritve. Največja vplivna veličina je subjektivna percepcija kakovosti uporabnika. Trenje med miško in podlago je najbolj odvisno od parametrov podlage, vendar je od uporabnika odvisno kakšno podlago si izbere. Podobno ne moremo vedno objektivno trditi, da je ena oblika računalniške miške boljša od neke druge oblike. Poleg tega na percepcijo nekaterih uporabnikov močno vpliva tudi ime znamke miške, čeprav to objektivno nima nobenega vpliva.

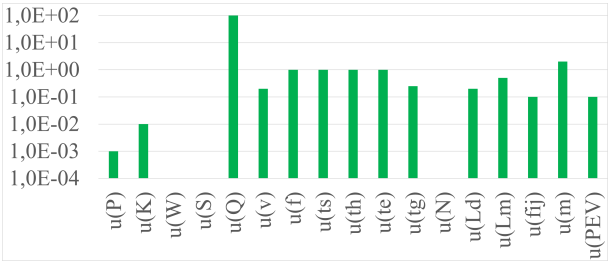
6 Negotovost merjene veličine

Negotovost kakovosti računalniške miške KRM je odvisna od negotovosti neposredno merjenih veličin. Skupna negotovost se izračuna preko formule $u(KRM) = \sqrt{\sum_i (C(i)u(i))^2}$, kjer je i neposredno merjena veličina, $u(i)$ njena negotovost in $C(i)$ občutljivostni koeficient. Koeficienti $C(i)$ se izračunajo po formuli $C(i) = |\frac{\partial KRM}{\partial i}|$ in so prikazani na sliki 3.



Slika 3: Histogram občutljivostnih koeficientov

Negotovosti so prikazane na sliki 4.



Slika 4: Histogram negotovosti neposredno merjenih veličin

Negotovosti parametrov W, S in N_G so enake 0, saj gre v prvih dveh primerih samo za identifikacijo in v zadnjem primeru za štetje gumbov. Negotovosti zakasnitev sem ocenil iz standardne deviacije in števila meritev pri metodah, ki so danes v uporabi [2]. Parametri Q_S, v_S in f_P med delovanjem miške niso konstantni, zato ima njihov raztros največji vpliv na njihovo negotovost, ki sem jo moral oceniti. Negotovost PEV sem ocenil na podlagi predpostavke, da se uporabniki ne znajo povsem natančno odločiti, ali jim je bolj pomembna vodljivost ali ergonomija miške. Negotovosti preostalih veličin so posledica merilne metode, ki sem jo pridobil iz specifikacij uporabljene merilne naprave ali pa sem jo ocenil na podlagi pričakovanega vpliva merilca na meritev.

Vsi izračuni so bili narejeni na podlagi parametrov računalniške miške MX Master 3S podjetja Logitech.

7 Popolni merilni rezultat

Spodnja enačba podaja popolni merilni rezultat pri merjenju kakovosti računalniške miške MX Master 3S, pri čemer je podana razširjena negotovost z ravnjo zaupanja 95 % ($k = 2$) in K označuje korekcijo.

$$KRM = (64,3 \text{ mis} - K) \pm 3,1 \text{ mis}$$

8 Študija izvedljivosti

Ker je večino meritev mogoče izvesti z manipulatorjem SCARA, bi svojo rešitev ponujal v obliki robotske celice. Rešitev bi bila najbolj zanimiva za proizvajalce in trgovce računalniških mišk. Proizvajalci bi lahko na podlagi rezultata KRM izdelali boljše produkte, ki bi jih tudi lažje tržili potencialnim kupcem. Trgovci bi lahko preko svojih meritev preverjali obljube proizvajalcev in bi lahko lažje svetovali kupcem. Predlagani merilni sistem bi bil tudi prvi korak k standardizaciji kakovosti računalniške miške.

9 Interdisciplinarnost

Pri merjenju priporočljive dolžine dlani za računalniško miško bi sodelovala statistika in ergonomija, saj bi najprej statistiki iz pridobljenih podatkov udeležencev statistično določili velikost miške, ergonomi pa bi nato še iz svojega zornega kota rezultat korigirali. Za vse ostale meritve je zadolžena elektrotehnika, saj gre za merjenje časa, frekvence, razdalje, kota in mase.

10 Zaključek

V sklopu seminarske naloge sem določil novo posredno merjeno veličino KRM in novo enoto za merjenje kakovosti računalniške miške mis. Zapisal sem matematični model, ki povezuje KRM z vsemi neposredno merljivimi veličinami in predstavil ostale vplivne veličine. Na primeru sem pokazal negotovosti in občutljivostne koeficiente neposredno merjenih veličin ter popolni merilni rezultat. Prikazal sem vizijo, kako bi takšno rešitev lahko uporabili v praksi in navedel vede, ki sodelujejo.

Literatura

[1] "Not One Size Fits All," *https://www.logitech.com/en-eu/ergo/mouse-hand-size.html*, accesed: 14.1.2024

[2] "Logitech MX Master 3S Mouse Review," *https://www.rtings.com/mouse/reviews/logitech/mx-master-3s*, accesed: 14.1.2024

Merjenje Težavnosti Naloge 6 DOF Robotskega Manipulatorja

Dan Lorbek Ivančič

Fakulteta za Elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Slovenija
E-mail: dl0586@student.uni-lj.si

Povzetek. Problematika merjenja kompleksnosti projektov je že nekaj let tema mnogih raziskav, saj si mnoga podjetja želijo imeti povratno informacijo o težavnosti danih nalog, ker jim to omogoča povečanje produktivnosti in bolj optimalno porabo finančnih sredstev. Posledično je bilo na to temo opravljenih že število raziskav, a se v nasprotju z našo, nobena ne osredotoča na specifična območja industrije. V tem članku smo zato razvili matematični model za določanje kompleksnosti naloge šest stopenjskih robotskih rok iz petih enostavno določljivih parametrov, izračunali negotovost take meritve in ponudili praktično implementacijo naše ideje.

Abstract. The issue of measuring the complexity of projects has been the subject of numerous studies for several years, as many companies aspire to receive feedback on the difficulty of assigned tasks. This enables them to increase productivity and optimize the use of financial resources. Consequently, several studies have been conducted on this topic, but unlike ours, none focus on specific areas of the industry. In this article, we have developed a mathematical model for determining the complexity of tasks for six-degree-of-freedom robotic arms based on five easily identifiable parameters. We have calculated the uncertainty of such measurements and provided a practical implementation of our idea.

1 Uvod

Robotika že nekaj desetletji igra pomembno vlogo v industriji. Z razvojem novih tehnologij v zadnjih nekaj letih, pa postajajo tudi robotski manipulatorji vse bolj sofisticirani in zmožni opravljanja nalog tudi iz mnogih drugih področji izven proizvodne industrije npr. v kmetijstvu, medicini, izvenzemeljskih aplikacijah ipd., vsako od katerih se iz leta v leto sooča z vse zahtevnejšimi izzivi. Ko pa se roboti preusmerjajo od izvajanja preprostih, ponavljajočih se nalog k bolj zapletenim operacijam, postaja razumevanje in merjenje kompleksnosti teh nalog ključnega pomena. Zmožnost kvantificiranja kompleksnosti robotske naloge ne pomaga le pri merjenju in ocenjevanju robotskih sistemov, temveč prinaša tudi možnost načrtovanja učinkovitejših algoritmov vodenja, optimizacijo izkoriščanja virov in izboljšanje zmogljivosti celotnega sistema. Poleg tega se je z leti pokazalo, da si podjetja želijo imeti povratno informacijo o kompleksnosti posameznih nalog znotraj njihovega celotnega procesa, kot so že raziskali avtorji v [1] , saj jim to omogoča bolj efektivno porabo finančnih sredstev.

Posledično obstaja že nekaj raziskav iz področja merjenja kompleksnosti projektov. Avtorji v [2] so predlagali meritev imenovano "Generalized Complexity Index" (GCI), ki na podlagi treh vhodnih parametrov (številčnost, raznolikost in povezanost) določi kompleksnost nekega splošnega industrijskega projekta. Podobne raziskave so opravili tudi avtorji v [3] , vendar se vsi zgoraj omenjeni članki osredotočajo na merjenje kompleksnosti projektov v splošnem kar sicer omogoča aplikacijo na veliko različnih nalogah vendar manjšo natančnost znotraj posamezne, saj je sam sistem merjenja splošen in ni prilagojen na določen tip naloge. Naš prispevek bi se zato osredotočal zgolj na naloge, ki jih opravljajo 6 stopenjski robotski manipulatorji, kar bi v teoriji omogočilo zelo natančno oceno težavnosti tega tipa nalog.

1.1 Opis Problema

V tem članku si prizadevamo raziskati in vzpostaviti celoten proces in matematični model za ocenjevanje kompleksnosti robotskih nalog na podlagi merjenja različnih veličin, ki najbolj vplivajo na težavnost izvedbe dane naloge, kot so dolžina opravljene trajektorije, celotna poraba energije, število potrebnih senzorjev, delež neoviranega delovnega prostora ter zahtevane tolerance vsake točke v nalogi. Za vsako od zgoraj navedenih veličin bomo raziskali tako problem njene merljivosti, kot tudi negotovost vsake meritve. Na koncu bomo opravili tudi študijo izvedljivosti, torej koliko uresničljiv bi bil naš postopek za merjenje težavnosti na dejanski robotski nalogi.

2 Metodologija

Različnih nalog, ki jih rešujemo s pomočjo 6 stopenjskih robotskih manipulatorjev je v praksi mnogo, njihova težavnost pa je lahko odvisna od velikega nabora različnih dejavnikov, ki se lahko močno razlikujejo od primera do primera. V naši raziskavi smo zato skušali identificirati le tiste, ki so prisotni in se jih da pomeriti pri vsaki mogoči nalogi robota ter po našem mnenju najbolj prispevajo k težavnosti le-te. Po obsežnih raziskavah smo sestavili matematični model iz spodaj predstavljenih petih vplivnih veličin, ki skupaj najbolje opišejo dano robotsko nalogo v smislu njene kompleksnosti.

2.1 Identifikacija Veličin

Prva od vplivnih veličin je **skupna poraba električne energije** W_t, od začetka do konca izvajanja naloge. Ideja za upoštevanje te veličine se nahaja v temu, da robot za lažje naloge, ki zahtevajo manj in krajše gibe porabi manj energije kot za kompleksnejše naloge, kjer je potrebnih veliko več daljših in kompleksnejših gibov. Poleg tega, je pri zahtevnejših nalogah bolj verjetno, da bo robot tekom opravljanja naloge moral bolj pogosto pospeševati oziroma zavirati, npr. za izmikanje morebitnim oviram na svoji poti, kar pomeni dodatno obremenjevanje njegovih motorjev torej višjo porabo energije. Posledično bi lahko dejali, da je naloga robota linearno odvisna od celotne porabe energije, torej $n - krat$ višja poraba energije bi pomenila $n - krat$ težjo nalogo. V primeru, da je celotna poraba energije enaka nič, bi to pomenilo, da za opravljanje naloge, robotu ni potrebno prižgati niti enega motorja, torej bi težavnost take naloge bila tudi enaka nič.

Naslednja veličina, ki zagotovo vpliva na kompleksnost naloge je **število potrebnih senzorjev** N. Gre za celoštevilsko vrednost, večjo ali enako nič, ki govori o temu, koliko senzorjev je nujno potrebnih za uspešno opravljanje dane naloge. K tej veličini ne spadajo vsi morebitni senzorji, ki so uporabljeni zgolj z namenom lažje izvedbe te naloge, vendar zanjo niso nujno potrebni. Primer tega bi bila uporaba merilnika sile za lažjo detekcijo kdaj je robot uspešno prijel nek objekt, vendar pa ta merilnik ni nujno potreben za opravljanje te akcije. Nasprotni primer bi bila kamera, uporabljena z namenom detektiranja objektov z uporabo računalniškega vida, kar bi nato omogočilo robotu pobiranje detektiranega objekta, saj je iz kamere prejel povratno informacijo o njegovi legi v prostoru. Brez uporabe kamere te naloge nebi bilo možno opraviti, saj robot nebi imel dovolj informacij.

Med pomembne dejavnike pri načrtovanju naloge sodi tudi delovni prostor robota. Ta se razlikuje od modela do modela in je odvisen od fizičnih dimenzij ter tipa posameznih segmentov (rotacijski ali translacijski). V praksi pa najdemo le redke primere nalog, kjer je na voljo celoten delovni prostor robota, saj se mnogokrat znotraj njega nahajajo ostali objekti na primer razni senzorji, konstrukcije, tekoči trakovi, drugi roboti in podobno, kar dodatno otežuje izvedbo dane naloge, saj moramo pri načrtovanju le-te paziti, da nebi prišlo do trkov manipulatorja z okolico. Zaradi tega smo se kot enega izmed parametrov za izračun kompleksnosti robotske naloge odločili upoštevati tudi **delež prostega oziroma neoviranega delovnega prostora**. To je število v procentih, izračunano po formuli 1, ki predstavlja razmerje med celotnim delovnim prostorom in prostorom, ki je na voljo med izvajanjem naloge.

$$S = \frac{V_{cel} - V_{oviran}}{V_{cel}} \tag{1}$$

Kjer V_{cel} predstavlja volumen celotnega delovnega prostora robota, kar najdemo v podatkovnih listih za posamezen model, V_{oviran} pa popisuje volumen vseh objektov, ki se nahajajo znotraj tega prostora tekom izvajanja naloge. Pomanjkljivost te metrike je, da se V_{oviran} lahko spreminja s časom med izvajanjem naloge, saj lahko vsebuje tudi druge robote, ki se premikajo ven in not iz delovnega prostora obravnavanega robota oziroma ostale podobne dejavnike. Ker bi pa dinamično spreminjanje oviranega volumna bilo izjemno težko v splošnem popisati z enačbami, smo to zanemarili oziroma upoštevali le srednjo vrednost vseh volumnov, ki se lahko nahajajo znotraj delovnega prostora v danem trenutku.

Težje naloge se od lažjih razlikujejo med drugim tudi po poti, ki jo mora opraviti vrh manipulatorja med izvajanjem. Zato v našem modelu upoštevamo tudi **dolžino trajektorije** l. Med načrtovanjem dane naloge za robota, moramo s funkcijo predpisati neko trajektorijo po kateri želimo, da se vrh prijemala premika. To navadno dobimo tako, da predpišemo nekaj točk skozi katere se mora robot premakniti, nato pa med njimi naredimo takšno ali drugačno interpolacijo. S tem dobimo parametrično podano enačbo krivulje v prostoru, katere dolžino je mogoče izračunati z integralom, podanim v enačbi 2, od začetnega do končnega časa. Tudi odvisnost od dolžine trajektorije je ocenjena kot linearna, saj se zdi nekako logično, da če mora robot opraviti 2× daljšo pot, bo tudi težavnost naloge 2× višja in po istem premisleku kot pri porabi energije, velja tudi tukaj, da če je dolžina trajektorije enaka 0, ima tudi kompleksnost naloge takšno vrednost. Morebitna pomanjkljivost tega parametra je v tem, da v izračunu dolžine trajektorije upoštevamo le spreminjanje pozicije, ne pa tudi orientacije vrha robota. To pa pomeni, da če imamo dva primera v katerih vrh opravi isto pot, vendar se v prvem med tem še vrti okoli ene izmed osi, v drugem pa ne, bosta dolžini obeh trajektorij vseeno enaki. To pa ni tak problem, saj je dodatno spreminjanje orientacije, torej dodatno vrtenje motorja, že upoštevano v skupni porabi energije.

$$l = \int_{t_0}^{t_n} \sqrt{\dot{x}(t)^2 + \dot{y}(t)^2 + \dot{z}(t)^2}\, dt \tag{2}$$

Zadnja od veličin, ki vplivajo na težavnost robotske naloge pa so **zahtevane tolerance vsake točke v nalogi** Δp. V tej veličini je vsebovan zmnožek tako pozicijskih kot orientacijskih toleranc, kot prikazuje enačba 3. Tu mora biti zmnožek in ne vsota, saj so najmanjše tolerance tiste, ki najbolj otežijo nalogo in v primeru, da bi toleranca za y bila zelo majhna, za x in z pa zelo velika, bi to za y lahko zanemarili v primerjavi z ostalima dvema, ampak v resnici je ravno ta najbolj pomembna, saj ji je najtežje ugoditi. V produktu pa zelo majhnih števil ne smemo zanemariti, saj imajo velik vpliv na skupen rezultat. Ker pa je število faktorjev v produktu odvisno od števila točk n, bi tudi enota veličina tako bila odvisna od števila točk. Zato v enačbi nastopa še koren reda 3n, ki zagotovi, da je enota te veličine vedno le milimeter na prvo potenco. Maksimalna vrednost pozicijske tolerance za vsako dano os, je omejena z delovnim prostorom robota in ima vedno neko končno vrednost. Maksimalna orientacijska toleranca pa je omejena na 2π in to v primeru, ko je za neko točko vseeno s kakšno orientacijo okoli te osi pridemo vanjo. Primer bi bil varjenje, kjer sta potrebni natančni orientaciji le okoli dveh osi.

$$\Delta p = \sqrt[3n]{\prod_{i=1}^{n} \Delta x_i \Delta y_i \Delta y_i \Delta \alpha_i \Delta \beta_i \Delta \gamma_i} \tag{3}$$

3 Matematični Model

Formula, za izračun kompleksnosti robotske naloge je v popolni obliki podana kot prikazuje spodnja enačba.

$$ETC = \frac{W_t \int_{t_0}^{t_n} \sqrt{\dot{x}(t)^2 + \dot{y}(t)^2 + \dot{z}(t)^2}\, dt (N+1)}{\sqrt[3n]{\prod_{i=1}^{n} \Delta x_i \Delta y_i \Delta y_i \Delta \alpha_i \Delta \beta_i \Delta \gamma_i} \frac{S}{100}} \tag{4}$$

V skrajšani obliki pa se enačba glasi:

$$ETC = \frac{W_t l (N+1)}{\Delta p \frac{S}{100}} \tag{5}$$

Kjer ETC stoji za $Estimated\, Task\, Complexity$.

Tako poraba električne energije, kot tudi dolžina trajektorije nastopata z linearno odvisnostjo, kot že opisano v prejšnjem poglavju. Premo sorazmerno pa je tudi število senzorjev, saj če naloga zahteva več senzorjev je tudi tolikokrat bolj kompleksna. Ta člen pa nastopa kot $N + 1$, saj je število potrebnih senzorjev seveda lahko tudi enako nič, a bo naloga vseeno lahko imela neko neničelno težavnost. V tem primeru ta člen postane enak ena in izgubi vpliv.

Z obratno sorazmernostjo pa nastopajo tolerance vsake točke, saj manjše oziroma bolj natančne tolerance kot zahtevamo, težja bo naloga. In več točk v nalogi, ki ima majhne tolerance, toliko manjši bo celoten produkt in tolikokrat težja bo naloga. Z obratno sorazmernostjo pa nastopa tudi delež prostega delovnega prostora, saj manj prostora kot imamo na voljo, težje bo načrtati nalogo za robota, ker moramo upoštevati več objektov katerim se mora izmikati med izvajanjem.

3.1 Definicija Lestvice

Za ovrednotenje težavnosti robotske naloge, smo določili racionalno, pozitivno semidefinitno lestvico. Začne se pri vrednosti nič, kar pomeni da je težavnost nič oziroma naloga je najlažja možna (v praksi pa noben smiselen primer naloge nima take vrednosti). Zgornja meja lestvice pa ni definirana, oziroma je ta enaka neskončno in v primeru da veličina doseže to vrednost, bi to pomenilo, da naloge v taki obliki fizično ni mogoče realizirati.

4 Negotovost Merjene Veličine

Negotovost težavnosti robotske naloge ETC je odvisna od posameznih negotovost merjenih veličin, ki nastopajo v matematičnem modelu. Izračunamo jo kot geometrijsko vsoto vseh negotovosti in njihovih občutljivostnih koeficientov, kot prikazuje enačba 6.

$$u(ETC) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (c_i u_i)^2} \tag{6}$$

Kjer posamezne občutljivostne koeficiente c_i izračunamo s parcialnim odvajanjem matematičnega modela po vsaki veličini. Tej nam povedo, kako močno je merjena veličina odvisna od posamezne vplivne veličine. Za naš primer dobimo po odvajanju sledeče formule.

$$\begin{aligned}
c_{W_t} &= \frac{\partial ETC}{\partial W_t} = \frac{l(N+1)}{\Delta p \frac{S}{100}} \\
c_l &= \frac{\partial ETC}{\partial l} = \frac{W_t (N+1)}{\Delta p \frac{S}{100}} \\
c_N &= \frac{\partial ETC}{\partial N} = \frac{W_t l}{\Delta p \frac{S}{100}} \\
c_{\Delta p} &= \frac{\partial ETC}{\partial \Delta p} = -\frac{W_t l (N+1)}{(\Delta p)^2 \frac{S}{100}} \\
c_S &= \frac{\partial ETC}{\partial S} = -\frac{W_t l (N+1)}{\Delta p \frac{S^2}{100}}
\end{aligned} \tag{7}$$

4.1 Negotovosti Posameznih Veličin

Ko smo določili formule za posamezne občutljivostne koeficiente, moramo določiti še negotovost vsake veličine, ki nastopa v matematičnem modelu. Torej kako natančno znamo meriti vsako od nastopajočih veličin.

Negotovost porabe energije je odvisna od negotovosti uporabljenega merilnika električne energije. V našem primeru smo izbrali merilnik razreda ena, ki ima negotovost podano kot $\pm 0,4\%$ izmerjene vrednosti, kot predstavljeno v [4].

Pri določanju negotovosti dolžine trajektorije, smo upoštevali kako natančno lahko robot sledi le-tej. Za njeno določitev smo upoštevali podatek o ponovljivosti robota in to vrednost množili z dva, saj lahko robot v najslabšem primeru zgreši začetno in končno točko za to razdaljo, kar bi pomenilo odstopanje od predpisane poti ravno za dvakratno vrednost ponovljivosti. V praksi se izkaže, da vrednosti ponovljivosti, ki jih merimo v milimetrih, predstavljajo zgolj majhen procent celotne dolžine trajektorije, ki pa jo navadno merimo v metrih.

Po podobnem premisleku kot v prejšnji točki, smo tudi negotovost toleranc vsake točke določili na podlagi podatka o ponovljivosti robota, saj lahko predpisane tolerance robot doseže le na to vrednost natančno. Negotovost smo nato določili iz najmanj ugodnega primera, torej ko robot zgreši predpisano točko za maksimalno vrednost po vsaki od treh pozicijskih osi x, y in z. Odstopanje dejanske točke od predpisane je nato enako razdalji med njima, ki jo v prostoru lahko izračunamo kot geometrijsko vsoto odstopanj po vsaki od treh osi, torej vseh treh vrednosti ponovljivosti, kot prikazuje enačba 8. Negotovost na koncu še množimo z dva, s čimer **aproksimativno** upoštevamo še negotovost po orientaciji, saj lahko točko zgreši tudi po kotu.

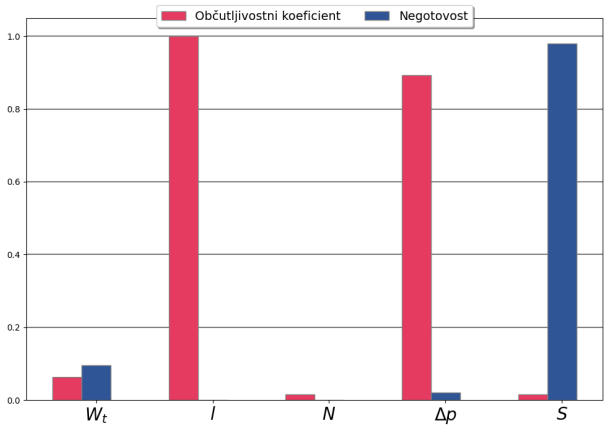
$$u(\Delta p) = 2\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \tag{8}$$

Negotovost za delež prostega delovnega prostora smo arbitrarno določili na 1 % izmerjene vrednosti. V praksi lahko to veličino merimo dosti bolj oziroma dosti manj

natančno, odvisno od tega ali se volumen zasedenega prostora med izvajanjem naloge spreminja ali ne.

Število senzorjev v nalogi pa negotovosti nima, saj je to veličino zmeraj mogoče točno določiti.

Dobljene negotovosti in izračunane občutljivostne koeficiente za vsako veličino, normirane na največjega, predstavlja histogram na sliki 1. Iz njega lahko opazimo, da dolžina trajektorije in zahtevane tolerance vsake točke najbolj prispevata k težavnosti naloge, hkrati pa sta njuni negotovosti zelo majhni, torej ju znamo zelo natančno meriti. V nasprotnem primeru, pa ima delež prostega delovnega prostora največjo negotovost, saj je ta parameter tudi najtežje oceniti, a k skupni veličini prispeva le malo. Posledično bi ta parameter morda lahko opustili in s tem dobili natančnejši rezultat.



Slika 1: Histogram občutljivostnih koeficientov in negotovosti vplivnih veličin.

5 Popolni Merilni Rezultat

Za ponazoritev uporabe našega modela v praksi, smo si zamislili dva primera možnih robotskih nalog in izračunali njuno težavnost. Prvi primer predstavlja lahko nalogo, kjer mora robot zgolj pobrati nek objekt iz znanega mesta A in ga odložiti na znano mesto B. Poraba energije za tako nalogo je ocenjena na 24 kJ, dolžina poti bi lahko bila 1,5 m, produkt vseh toleranc 1,68 mm, delež prostega delovnega prostora 98 %, število senzorjev pa je nič. Popolni merilni rezultat take naloge z razširjeno negotovostjo pri faktorju razširitve dva in stopnji zaupanja 95 %, je sledeč.

$$ETC = (21,87 \pm 0,72)\frac{\text{kJ m}}{\text{mm rad}}, k = 2, p = 95\%$$

V primeru težje naloge, pa mora robot priviti štiri vijake na štiri neznana mesta. Ker so mesta neznana potrebuje vsaj en senzor za jih detektirati, torej $N = 1$. Ostali parametri in merilni rezultat so sledeči: $W_t = 144$ kJ, $l = 1$ m, $\Delta p = 0,233$ mm in $S = 80$ %.

$$ETC = (1550 \pm 280)\frac{\text{kJ m}}{\text{mm rad}}, k = 2, p = 95\%$$

Opazimo, da ima težavnost naloge v drugem primeru bistveno višjo vrednost kot v prvem, saj gre za mnogo težjo nalogo. Pri izračunu obeh negotovosti smo upoštevali podatke iz podatkovnega lista robota Motoman MH5 [5].

6 Študija Izvedljivosti

Merilnik težavnosti robotske naloge, bi se v praksi lahko realiziralo v obliki naprave, ilustrirane na sliki 2, ki preko štirih priključkov meri porabo električne energije, ostale parametre, potrebne za izračun matematičnega modela pa vnese uporabnik preko grafičnega vmesnika na LCD zaslonu naprave. Pritisk na zgornji rdeč gumb pa bi nato inicializiral računanje kompleksnosti naloge. Izvedba v taki obliki bi bila izjemno preprosta za uporabo, saj mora uporabnik vnesti le parametre, ki jih v vsakem primeru mora poznati ali določiti za svojo nalogo.

Slika 2: Naprava za merjenje težavnosti robotske naloge.

7 Zaključek

Z našo raziskavo smo pokazali, da lahko preko merjenja relativno enostavno merljivih parametrov z zadovoljivo natančnostjo določimo zahtevnost naloge 6 stopenjske robotske roke. Ta informacija je neprecenljivega pomena za razvijalce kakršnihkoli antropomorfnih robotskih sistemov, saj lahko z njeno pomočjo mnogo lažje identificiramo področja izboljšave in optimiziramo izvajanje nalog.

Literatura

[1] G. Frizelle in Y. Suhov, "The measurement of complexity in production and other commercial systems," *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 464, no. 2098, str. 2649–2668, 2008.

[2] M. A. Jacobs, "Complexity: Toward an empirical measure," *Technovation*, vol. 33, no. 4, str. 111–118, 2013.

[3] S. J. B. J. Calinescu A., Efstathiou J., "Applying and assessing two methods for measuring complexity in manufacturing," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 49, no. 7, 1998.

[4] R. Günther, *What is Measurement Uncertainty?* Dostopno na https://clouglobal.com/what-is-measurement-uncertainty/, 2020.

[5] Yaskawa Motoman Robotics, *MH5/MH5L*, 6 2011.