

Stručni rad / Professional paper

Zoran Vrhovski <sup>(1)</sup>  
Goran Benkek <sup>(1)</sup>  
Krunoslav Husak <sup>(1)</sup>  
Krešimir Markota <sup>(1)</sup>

(1) Veleučilište u Bjelovaru,  
Trg Eugena Kvaternika 4,  
HR-43000 Bjelovar,  
[zvrhovski@vub.hr](mailto:zvrhovski@vub.hr)

Zaprimljeno / Received  
28. svibnja 2024. / 28 May 2024

Prihvaćeno / Accepted  
20. srpnja 2024. / 20 July 2024

Autor za korespondenciju /  
Corresponding author  
Zoran Vrhovski  
[zvrhovski@vub.hr](mailto:zvrhovski@vub.hr)



## Razvoj mehatroničkog sustava niske cijene za procjenu ravnoteže ljudskog tijela

**Sažetak:** U ovom radu opisan je razvoj mehatroničkog sustava niske cijene za procjenu ravnoteže ljudskog tijela. Mehatronički sustav sastoji se od ploče za mjerenje centra pritiska ljudskog tijela pomoću četiriju senzora sile, elektroničkog uređaja za prikupljanje podataka i komunikaciju s računalom koji je zasnovan na mikroupravljaču ATmega32U4 te računalne aplikacije koja služi za procjenu ravnoteže ljudskog tijela. Analizom mjerenja centra pritiska ljudskog tijela i njegova maksimalnog otklona tijekom mjerenja procjenjuje se ravnoteža ljudskog tijela. Razvijen je matematički model sustava i dan je detaljan opis razvijenog mehatroničkog sustava. Validacija mehatroničkog sustava za procjenu ravnoteže ljudskog tijela potvrđena je eksperimentalnim rezultatima.

**Ključne riječi:** centar pritiska, mehatronički sustav, ploča za mjerenje centra pritiska, ravnoteža ljudskog tijela, senzor sile

### 1. Uvod

Sposobnost ljudskog tijela da zadrži ravnotežu pri uspravnom stajanju osnovni je preduvjet za obavljanje dnevnih aktivnosti. Ova sposobnost može biti narušena kod starijih osoba [1], osoba s neurološkim poremećajem [2] i osoba s drugim vrstama poremećaja. Smanjena sposobnost održavanja ravnoteže ljudskog tijela narušava kvalitetu života i zahtijeva klinička ispitivanja i liječenje.

Proučavanje ravnoteže ljudskog tijela pri uspravnom stajanju najčešće se provodi mjerenjem centra pritiska (engl. *Center of Pressure (CoP)*) [1], [3] ili centra mase (engl. *Center of Mass*) ljudskog tijela [4]. CoP ljudskog tijela može se odrediti pomoću ploče za mjerenje CoP-a (engl. *force plate*) [5]. Ova ploča pomoću četiriju senzora sile koji su smješteni u kutovima ploče mjeri silu reakcije podloge na stopala ljudskog tijela. Hvatište rezultante sila reakcije podloge na stopala jest točka u 2D ravnini i predstavlja CoP ljudskog tijela. Promjena položaja CoP-a ljudskog tijela pri uspravnom i mirnom

stajanju generirana je posturalnim njihanjem (engl. *postural sway*). Snimanjem CoP-a ljudskog tijela tijekom zadanog vremena omogućuje se procjena ravnoteže ljudskog tijela. Vodeći je proizvođač komercijalnih ploča za mjerenje centra pritiska Kistler, a cijena uređaja kreće se i do 25.000,00 eura [6].

U ovom radu predlaže se mehatronički sustav niske cijene za procjenu ravnoteže ljudskog tijela koji je zasnovan na ploči za mjerenje CoP-a ljudskog tijela. Ovaj mehatronički sustav razvijen je modificiranjem sustava za upravljanje igrama zasnovan na pločama za mjerenje CoP-a ljudskog tijela koji je opisan u radu [7]. Mehatronički sustav za procjenu ravnoteže ljudskog tijela prijenosan je i kompaktan sustav s mogućnošću jednostavnog snimanja posturalnog njihanja i analize ravnoteže ljudskog tijela. Sastoji se od ploče za mjerenje CoP-a ljudskog tijela pomoću četiriju senzora sile, elektroničkog uređaja za prikupljanje podataka i komunikaciju s računalom te računalne aplikacije koja služi za određivanje ravnoteže ljudskog tijela. Procjena vrijednosti razvijenog mehatroničkog uređaja iznosi 2.000,00 eura.

Ovaj rad organiziran je na sljedeći način: kratki opis mehatroničkog sustava niske cijene za procjenu ravnoteže ljudskog tijela prikazan je u poglavlju 2. Poglavlje 3 prikazuje matematički model razvijenog mehatroničkog sustava. Razvijeni i izrađeni mehatronički sustav za procjenu ravnoteže ljudskog tijela prikazan je u poglavlju 4. Eksperimentalni rezultati dobiveni korištenjem mehatroničkog sustava za procjenu ravnoteže ljudskog tijela prikazani su u poglavlju 5. Kratki zaključak dan je u poglavlju 6.

## 2. Opis mehatroničkog sustava

S ciljem određivanja ravnoteže ljudskog tijela temeljem mjerenja CoP-a ljudskog tijela razvijen je sustav čija je blokovska shema prikazana na slici 2.1. Ovaj se sustav sastoji od ploče za mjerenje CoP-a ljudskog tijela, elektroničkog uređaja za prikupljanje podataka i komunikaciju s računalom te računalne aplikacije koja služi za određivanje ravnoteže ljudskog tijela.



Slika 2.1: Blokovska shema mehatroničkog sustava za procjenu ravnoteže ljudskog tijela

Ploča za mjerenje CoP-a ljudskog tijela sadrži četiri senzora sile koji su smješteni u kutovima ploče. Senzori sile omogućuju mjerenje CoP-a ljudskog tijela uslijed pomicanja centra mase ljudskog tijela. Elektronički uređaj za prikupljanje podataka i komunikaciju s računalom povezan je s četirima analognim sensorima sile te s računalom putem USB komunikacije. Prikupljanje podataka sa senzora sile provodi se pomoću četiriju analognih digitalnih pretvornika visoke rezolucije koji su povezani s mikroupravljačem ATmega32u4. Mjerene sile s četiriju senzora sile obrađuju se pomoću mikroupravljača ATmega32u4 i šalju u obliku podatkovnog okvira na računalo putem USB komunikacije. Računalna aplikacija za određivanje ravnoteže ljudskog tijela prima podatkovni okvir koji sadrži informacije o mjenim silama sa senzora sile, izračunava CoP ljudskog tijela te ga prezentira i pohranjuje u tekstualnu datoteku za kasniju analizu ravnoteže ljudskog tijela.

Mehatronički sustav za određivanje ravnoteže ljudskog tijela koristi se na sljedeći način: osoba objema nogama stane unutar okvira ploče za mjerenje CoP-a ljudskog tijela. Nakon toga, osobu se zamoli da zauzme uspravno i mirno držanje tijela. Pokreće se mjerenje CoP-a ljudskog tijela koje traje 10 sekundi. Rezultat mjerenja jesu maksimalna udaljenost CoP-a tijekom mjerenja od početnog CoP-a ljudskog tijela te trajektorija CoP-a ljudskog tijela temeljem koje se može procijeniti ravnoteža ljudskog tijela. Procjene ravnoteže ljudskog tijela mogu se provoditi na više načina: procjena mirnog držanja uz stajanje objema nogama na ploči za mjerenje CoP-a, uz stajanje na jednoj nozi na ploči za mjerenje CoP-a i uz stajanje objema nogama na ploči za mjerenje CoP-a i povezom na očima.

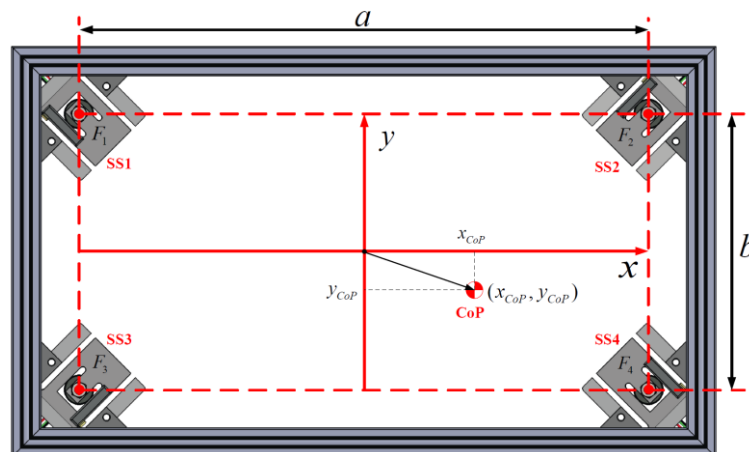
### 3. Matematički model sustava

CoP je točka u transverzalnoj ravnini ljudskog tijela (ravnina koja dijeli ljudsko tijelo na gornju i donju polovicu), a predstavlja rezultantu sila reakcije podloge na ljudska stopala. U ovom se radu za potrebe određivanja pozicije CoP-a ljudskog tijela koristi ploča za mjerenje CoP-a ljudskog tijela. Geometrija ploče za mjerenje CoP-a ljudskog tijela prikazana je na slici 3.1. Ploča je opremljena s četiri senzora sile koji su smješteni u kutovima ploče. Oznake senzora sile na slici 3.1 jesu  $SS_1$ ,  $SS_2$ ,  $SS_3$  i  $SS_4$ .

Koordinatni sustav ploče za mjerenje CoP-a ljudskog tijela smješten je u sredini ploče. Parametri ploče sa slike 3.1 jesu:

- $a$  – udaljenost između senzora sile duž osi  $x$
- $b$  – udaljenost između senzora sile duž osi  $y$

- $CoP$  – pozicija CoP-a ljudskog tijela u koordinatnom sustavu ploče za mjerenje CoP-a ljudskog tijela
- $x_{CoP}$  – pozicija CoP-a ljudskog tijela u koordinatnom sustavu ploče za mjerenje CoP-a ljudskog tijela duž osi  $x$
- $y_{CoP}$  – pozicija CoP-a ljudskog tijela u koordinatnom sustavu ploče za mjerenje CoP-a ljudskog tijela duž osi  $y$ .



Slika 3.1: Geometrija ploče za mjerenje CoP-a ljudskog tijela

Koordinate CoP-a ljudskog tijela mogu se izračunati prema relacijama (3.1) i (3.2) [3]:

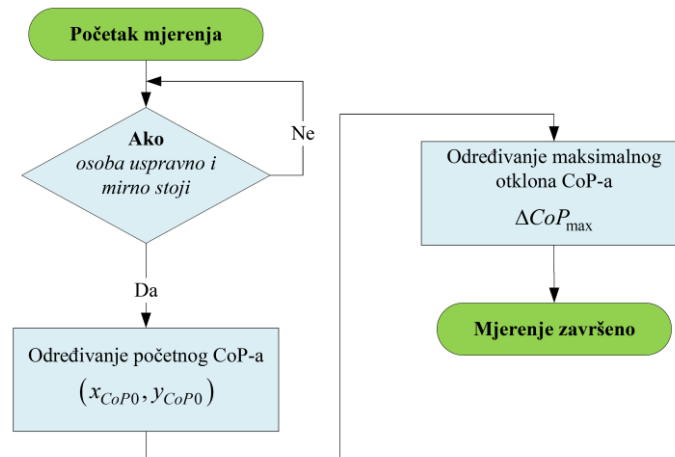
$$x_{CoP} = \frac{a}{2} \frac{F_2 + F_4 - (F_1 + F_3)}{F_1 + F_2 + F_3 + F_4} \quad (3.1)$$

$$y_{CoP} = \frac{b}{2} \frac{F_1 + F_2 - (F_3 + F_4)}{F_1 + F_2 + F_3 + F_4} \quad (3.2)$$

gdje su  $F_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) sile koje mjere senzori sile  $SS_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ). Procedura određivanja maksimalnog otklona CoP-a ljudskog tijela pri uspravnom i mirnom stajanju s ciljem procjene ravnoteže ljudskog tijela prikazana je na slici 3.2. Ova procedura vođena je od strane voditelja kliničkih ispitivanja. Osoba oboma stopalima staje na ploču za mjerenje CoP-a ljudskog tijela. Nakon toga voditelj kliničkih ispitivanja zamoli osobu da zadrži mirno i uspravno držanje te pokreće proces procjene ravnoteže ljudskog tijela koji traje 10 s. U trenutku  $t = 0$  s, sustav temeljem relacija (3.1) i (3.2) određuje početnu poziciju CoP-a ljudskog tijela  $x_{CoPo}$  i  $y_{CoPo}$ . Tijekom procjene koja traje 10 s, kontinuirano se izračunava maksimalni otklon CoP-a u transverzalnoj ravnini ljudskog tijela u odnosu na početnu poziciju CoP-a pomoću relacije (3.3).

$$\Delta CoP_{max} = \max\left(\sqrt{(x_{CoP} - x_{CoP0})^2 + (y_{CoP} - y_{CoP0})^2}\right) \quad (3.3)$$

Novo koordinate CoP-a  $x_{CoP}$  i  $y_{CoP}$  određuju se jednom u 100 ms (10 uzoraka u sekundi). Nakon što završi procjena ravnoteže ljudskog tijela koja traje 10 s, rezultat procjene jest maksimalni otklon CoP-a  $\Delta CoP_{max}$  tijekom procjene u odnosu na početnu poziciju CoP-a  $x_{CoP0}$  i  $y_{CoP0}$ . Rezultate procjene ravnoteže ljudskog tijela analiziraju specijalisti u ovom području.



Slika 3.2: Procedura određivanja maksimalnog otklona CoP-a ljudskog tijela pri uspravnom i mirnom stajanju

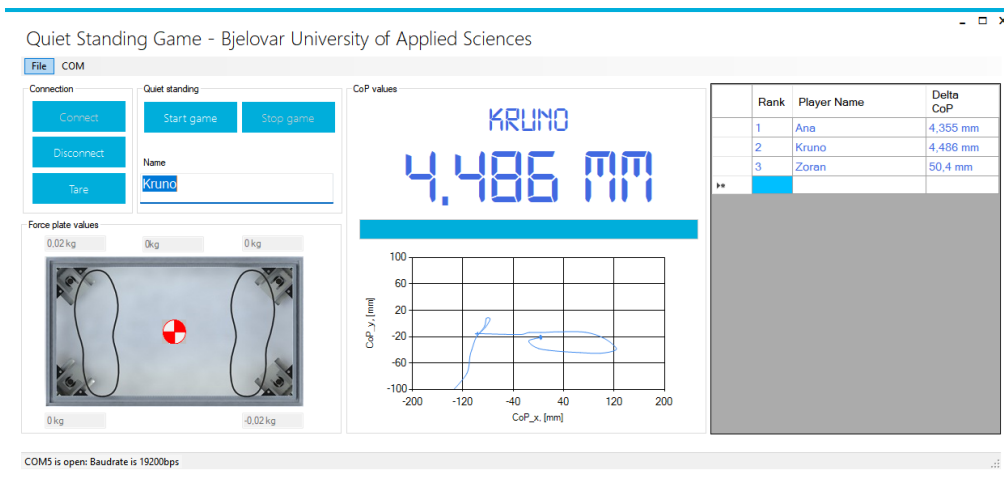
#### 4. Dizajn mehatroničkog sustava

Razvijeni i izrađeni mehatronički sustav za procjenu ravnoteže ljudskog tijela prikazan je na slici 4.2. Na slici osoba za koju se provodi procjena ravnoteže ljudskog tijela objema nogama stoji na ploči za mjerenje CoP-a ljudskog tijela. Ploča za mjerenje CoP-a ljudskog tijela povezana je s elektroničkim uređajem za prikupljanje podataka i komunikaciju s računalom. Ovaj je uređaj USB kabelom povezan s računalom na kojem je pokrenuta računalna aplikacija za procjenu ravnoteže ljudskog tijela.



Slika 4.1: Mehatrički sustav za procjenu ravnoteže ljudskog tijela

Mehanički dizajn ploče za mjerenje CoP-a ljudskog tijela i elektronički dizajn elektroničkog uređaja za prikupljanje podataka i komunikaciju s računalom detaljno su opisani u radu [7]. U odnosu na sustav za upravljanje igrama koji je opisan u radu [7], za potrebe procjene ravnoteže ljudskog tijela izrađena je nova računalna aplikacija koja obrađuje i prikazuje mjerene podatke s ploče za mjerenje CoP-a ljudskog tijela. Grafičko korisničko sučelje računalne aplikacije za procjenu ravnoteže ljudskog tijela prikazano je na slici 4.2. Računalna aplikacija izrađena je u programskom jeziku C# i .Net programskom okviru.



Slika 4.2: Grafičko korisničko sučelje računalne aplikacije za procjenu ravnoteže ljudskog tijela

Funkcionalnost računalne aplikacije za procjenu ravnoteže ljudskog tijela ostvaruje se sljedećim tipkama:

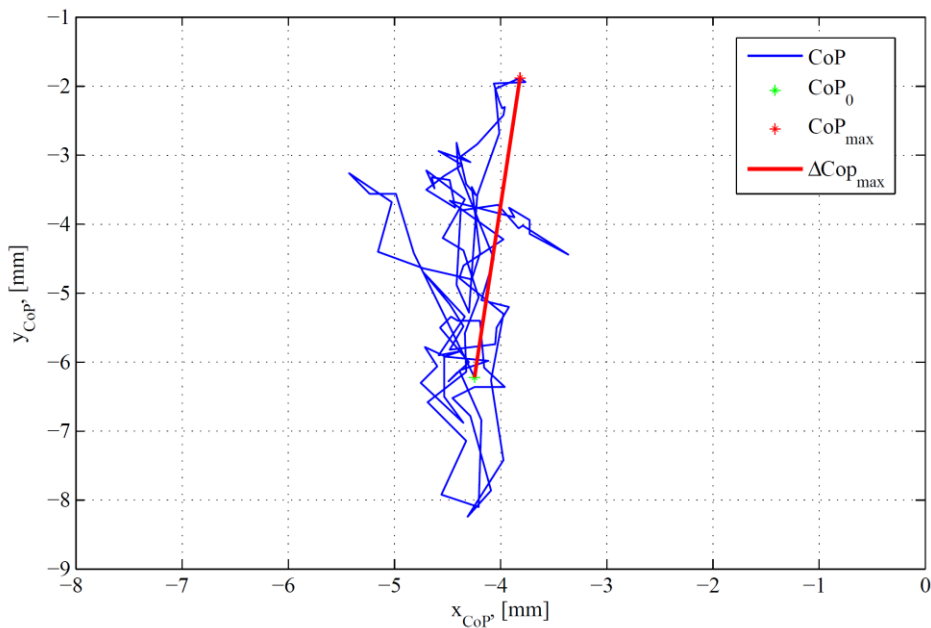
- **Connect** – povezivanje računala s elektroničkim uređajem za prikupljanje podataka i komunikaciju s računalom

- *Disconnect* – prekid veze računala s elektroničkim uređajem za prikupljanje podataka i komunikaciju s računalom
- *Tare* – tariranje svih četiriju senzora sile na ploči za mjerenje CoP-a ljudskog tijela
- *Start* – pokretanje procesa procjene ravnoteže ljudskog tijela koji traje 10 s
- *Stop* – zaustavljanje procesa procjene ravnoteže ljudskog tijela.

Grafičko korisničko sučelje prikazuje masu osobe te položaj CoP-a u odjeljku *Force plate values* cijelo vrijeme ako je računalo povezano s elektroničkim uređajem za prikupljanje podataka i komunikaciju s računalom. U središnjem dijelu grafičkog korisničkog sučelja prikazanog na slici 4.2 prikazuje se ime osobe za koju se provodi procjena ravnoteže ljudskog tijela te maksimalni otklon CoP-a  $\Delta CoP_{max}$ . Također, tijekom procesa procjene ravnoteže ljudskog tijela prikazuje se trajektorija CoP-a ljudskog tijela. Nakon što postupak procjene ravnoteže ljudskog tijela završi, računalna aplikacija u tekstualnu datoteku pohranjuje rezultate mjerenja kako bi se mogla napraviti naknadna analiza podataka. U lijevom dijelu grafičkog korisničkog sučelja prikazanog na slici 4.2 nalazi se tablica u kojoj su rangirane osobe nad kojima je provedena procjena ravnoteže ljudskog tijela s obzirom na maksimalni otklon CoP-a  $\Delta CoP_{max}$ .

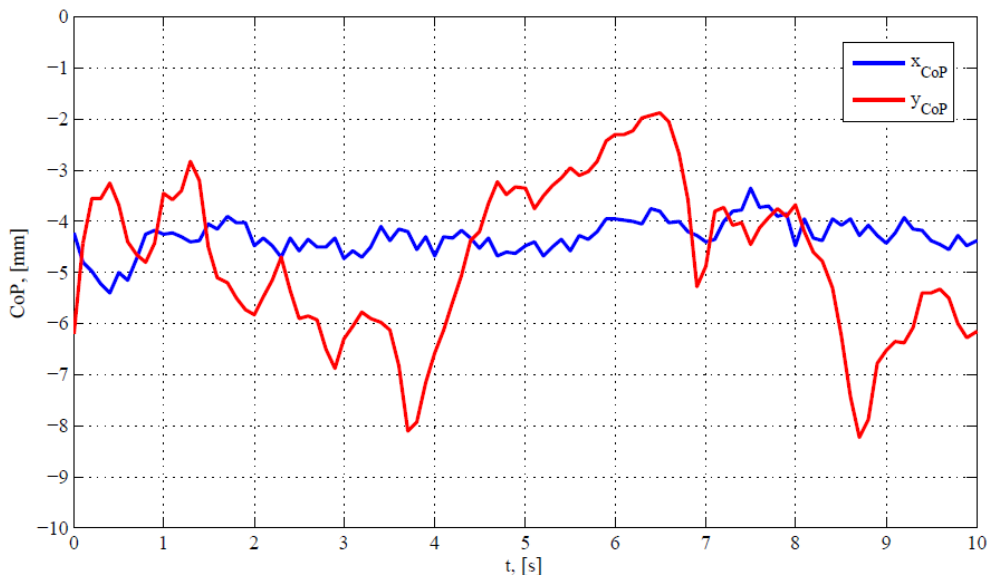
## 5. Eksperimentalni rezultati

Cilj provedbe eksperimenta jest validacija razvijenog mehatroničkog sustava za procjenu ravnoteže ljudskog tijela. Eksperiment je proveden nad ispitanikom (autorom članka) uz njegovu prethodnu suglasnost. Ispitanik je sa svojim lijevim i desnim stopalom stao na ploču za mjerenje CoP-a ljudskog tijela (slika 4.1) te je zamoljen da mirno i uspravno stoji sljedećih 10 s tijekom provođenja procjene ravnoteže ljudskog tijela. Na slici 5.1 plavom je bojom prikazana trajektorija CoP-a ispitanika u koordinatnom sustavu ploče za mjerenje CoP-a ljudskog tijela. Zelena točka prikazuje početnu poziciju CoP-a ljudskog tijela ( $x_{CoPo} = -4,234$  mm;  $y_{CoPo} = -6,222$  mm), a crvena točka prikazuje točku kod koje se dogodio maksimalni otklon CoP-a ljudskog tijela u odnosu na početno stanje ( $x_{CoPmax} = -3,817$  mm;  $y_{CoPm} = -1,887$  mm). Crvena dužina koja spaja ove dvije točke predstavlja maksimalni otklon CoP-a ljudskog tijela  $\Delta CoP_{max}$  tijekom procjene. Za ispitanika na slici 5.1 maksimalni otklon  $\Delta CoP_{max}$  iznosio je 4,486 mm, sukladno relaciji (3.3). Trajektorija na slici 5.1 daje uvid u posturalno njihanje ispitanika pri zadržavanju ravnoteže, što je korisna informacija vezana uz procjenu ravnoteže ljudskog tijela.



Slika 5.1: Trajektorija CoP-a tijekom procjene ravnoteže ljudskog tijela

Na slici 5.2 prikazane su koordinate CoP-a  $x_{CoP}$  i  $y_{CoP}$  tijekom procjene ravnoteže ljudskog tijela. Prema ovom prikazu mjerenih rezultata razvidno je da je posturalno njihanje izraženije duž osi  $y$  (naprijed – nazad), nego duž osi  $x$  (lijevo – desno).



Slika 5.2: Koordinate CoP-a  $x_{CoP}$  i  $y_{CoP}$  tijekom procjene ravnoteže ljudskog tijela

Testiranje mehatroničkog sustava za procjenu ravnoteže ljudskog tijela prikazano je i videom na *YouTube* kanalu [8]. Video prikazuje cijeli proces procjene ravnoteže ljudskog tijela te konačni rezultat procjene.



## 6. Zaključak

U ovom je radu opisan razvijeni mehatronički sustav niske cijene za procjenu ravnoteže ljudskog tijela. Procjena ravnoteže ljudskog tijela provodi se tijekom mjerenjem CoP-a ljudskog tijela u trajanju od 10 s. Razvijen je i izrađen mehatronički sustav koji se sastoji od sljedećih dijelova: ploče za mjerenje CoP-a pomoću četiriju senzora sile, elektroničkog uređaja za prikupljanje podataka i komunikaciju s računalom te računalne aplikacije koja služi za procjenu ravnoteže ljudskog tijela. Elektronički uređaj prikuplja i obrađuje mjerene sile s četiriju senzora sile te ih USB komunikacijom prosljeđuje na računalo. Računalna aplikacija obrađuje primljene podatke i prikazuje ih u obliku trajektorije CoP-a ljudskog tijela i maksimalnog otklona CoP-a ljudskog tijela tijekom procjene ravnoteže ljudskog tijela. Temeljem navedenih podataka specijalist iz područja ravnoteže ljudskog tijela može napraviti procjenu ravnoteže ljudskog tijela. Izveden je matematički model mehatroničkog sustava kojim se određuje CoP ljudskog tijela i maksimalni otklon CoP-a ljudskog tijela tijekom procjene ravnoteže ljudskog tijela. Eksperimentalno je prikazan rad mehatroničkog sustava tijekom procesa procjene ravnoteže ljudskog tijela na ispitaniku. U odnosu na komercijalne uređaje za procjenu ravnoteže ljudskog tijela, razvijeni mehatronički sustav višestruko je niže cijene.

## 7. Popis literature

1. Cotton, S., Vanoncini, M., Fraisse, P., Ramdani, N., Demircan, E., Murray, A. P., & Keller, T. (2011). Estimation of the centre of mass from motion capture and force plate recordings: A study on the elderly. *Applied Bionics and Biomechanics*, 8(1), 67–84. <https://doi.org/10.3233/abb-2011-0006>
2. Nonnekes, Jorik, et al. "Neurological disorders of gait, balance and posture: A sign-based approach." *Nature Reviews Neurology*, vol. 14, no. 3, 29 Jan. 2018, pp. 183–189, <https://doi.org/10.1038/nrneurol.2017.178>
3. Huang, C., Sue, P., Abbod, M. F., Jiang, B. C., & Shieh, J. (2013). Measuring center of pressure signals to quantify human balance using multivariate multiscale entropy by designing a force platform. *Sensors*, 13(8), 10151–10166. <https://doi.org/10.3390/s130810151>
4. Lafond, D., Duarte, M., & François, P. (2004). Comparison of three methods to estimate the center of mass during balance assessment. *Journal of Biomechanics*, 37(9), 1421–1426. [https://doi.org/10.1016/s0021-9290\(03\)00251-3](https://doi.org/10.1016/s0021-9290(03)00251-3)
5. Zhu, Y. (2017). Design and validation of a Low-Cost portable device to quantify postural stability. *Sensors*, 17(3), 619. <https://doi.org/10.3390/s17030619>
6. Karlsson, Annica, and Gunilla Frykberg. "Correlations between force plate measures for assessment of balance." *Clinical Biomechanics*, vol. 15, no. 5, June 2000, pp. 365–369, [https://doi.org/10.1016/s0268-0033\(99\)00096-0](https://doi.org/10.1016/s0268-0033(99)00096-0).

7. Vrhovski, Zoran, et al. "Development and validation of a system for game control based on a force plate." *Applied Sciences*, vol. 13, no. 21, 27 Oct. 2023, p. 11753, <https://doi.org/10.3390/app132111753>
8. Vrhovski, Z. (27. svibnja 2024.). Razvoj mehatroničkog sustava niske cijene za procjenu ravnoteže ljudskog tijela [Video]. YouTube. <https://youtu.be/Zfypfc3evoY?si=OoYFXcgGIX8CRM72>

## DEVELOPMENT OF A LOW-COST MECHATRONIC SYSTEM FOR EVALUATING HUMAN BALANCE

**Abstract:** *This paper provides a description of the development of a low-cost mechatronic system for evaluating human balance. The mechatronic system consists of a force plate for measuring the center of pressure of the human body using four force sensors, an electronic device for data collection and communication with a computer based on the ATmega32U4 microcontroller, and a computer application used for assessing human body balance. By analysing the measurements of the center of pressure of the human body and its maximum deviation during measurement, the balance of the human body is evaluated. A mathematical model of the system was developed, and a detailed description of the developed mechatronic system has been provided. The validation of the mechatronic system for assessing human body balance was confirmed by experimental results.*

**Keywords:** *center of pressure, mechatronic system, force plate, human balance, force sensor*