

# Primena genetskog algoritma za učenje hodanja dvodimenzionalnog bipedalnog modela

---

*Cilj ovog rada su optimizacija i ispitivanje čovekovog kretanja projektovanog u ravni. U tu svrhu razvijena su dva dvodimenzionalna bipedalna modela različitog stepena složenosti, koja mogu da se kreću u fizički realnom okruženju. Za simuliranje kretanja korišćen je pristup po kome su momenti sila, koji kontrolišu kretanje delova tela, u svakom trenutku linearna kombinacija parametara trenutnog stanja u kojem se model nalazi. Model čoveka i simuliranje njegovog kretanja implementirani su u programskom jeziku Python, uz pomoć programskog paketa Pybox2d. Predstavljen je genetski algoritam sa ciljem postizanja stabilnog kretanja bipedalnog modela i za njegovu optimizaciju. Dobijeni su parametri koji opisuju stabilno kretanje čoveka, prosečne dužine koraka od 39 cm, u trajanju od 0.75 s.*

---

## Uvod

Stabilno kretanje modela čoveka i dvo-nožnih, humanoidnih robota i kontrolisanje njihovih pokreta je teško postići, zato što su to nestabilni sistemi sa velikim brojem stepeni slobode. Razvijene su različite metode za postizanje stabilnog kretanja humanoidnih robota kako za primenu u simuliranju kretanja, tako i za stvarne modele u laboratorijama. Razvoj humanoidnih robota je interesantan problem zbog njihove potencijalne primene u svakodnevnom životu, uključujući zamenu ljudi u fizički

napornim ili opasnim zanimanjima, uslužnim delatnostima i u zabavne svrhe.

Ljudsko hodanje se može posmatrati kao periodično smenjivanje trenutne dinamički stabilne faze, u kojoj su oba stopala na tlu, i dinamički nestabilne faze, kada je samo jedno stopalo na podlozi, dok se druga noga slobodno pomera u prostoru (Westervelt *et al.* 2007). U modelu u kome se čovek kreće u ravni, njegovo telo možemo posmatrati kao kinematički lanac sastavljen od torza i delova ekstremiteta. Veze između delova tela ostvaruju se zglobovima, koji omogućuju njihovo rotiranje. Kretanje tela se odvija u sagitalnoj ravni čoveka, u homogenom gravitacionom polju, koje deluje vertikalno naniže. Pritom, između čovekovog tela i podloge deluju sile trenja, dovoljno velike da nema proklizavanja čovekovih stopala po podlozi (Wang *et al.* 2012).

## Model

Simulacija je rađena u programskom jeziku Python. Korišćen je programski paket Pybox2d za simuliranje fizičkih zakona i vizuelni prikaz kretanja čoveka. Za prikaz čoveka razvijena su tri modela. Prva dva modela se sastoje od donjih ekstremiteta i torza (sa stopalima i bez njih), dok treći model pored navedenih delova tela ima i ruke i glavu. Za razvoj i optimizaciju čovekovog kretanja korišćen je genetski algoritam.

**Model čoveka bez stopalâ.** Najjednostavniji korišćeni model čoveka je model u kom se telo sastoji od torza i dve noge, koje su sa torzom pokretno spojene u kukovima. Svaka noga se sastoji iz dva dela, natkolenice i potkolenice, koje

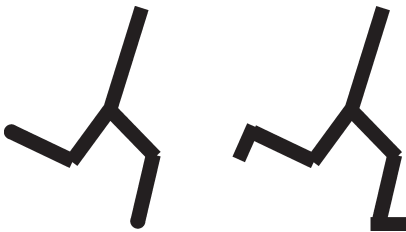
---

*Janko Šušteršič (1996), Kragujevac, Prvoslava Stojanovića 6/7, učenik 4. razreda Prve kragujevačke gimnazije*

*Maja Pantić (1996), Beograd, Kneza Miloša 81, učenica 4. razreda Matematičke gimnazije*

*MENTOR: Miroslav Bogdanović, Max Planck Institute for Intelligent Systems, Tübingen, Germany*

su pokretno spojene kolenom. Pritom, u svakom zglobu postoji ograničenje maksimalnog i minimalnog ugla koji spojeni delovi tela mogu da zaklapaju. Dakle, telo je predstavljeno otvorenim kinematičkim lancem koji se sastoji iz pet delova: torza, dve natkolenice i dve potkolenice. Pošto se na potkolenicu ne nastavljaju stopala, smatra se da su stopala predstavljena tačkom, što se postiže polukružnim dodacima na krajevima potkolenica. Ovakav model formiran je prvenstveno zbog pojednostavljenja problema kretanja.



Slika 1. Model čoveka bez stopala (levo) i sa stopalima (desno)

Figure 1. Humanoid model without feet (left) and with feet (right)

**Model čoveka sa stopalima.** Kao i u slučaju modela bez stopala, model čoveka sa stopalima je sačinjen od torza koji je pokretno spojen sa nogama. Noge se sastoje iz tri dela: potkolenice, natkolenice i stopala. Stopala su zglobnom vezom pokretno spojena sa potkolenicama. Ovakav model je približniji stvarnom izgledu ljudskog tela i komplikovaniji za analiziranje od prethodnog modela.

Dimenzije delova tela i odgovarajući granični uglovi u zglobovima prikazani su u tabelama 1 i 2.

Tabela 1. Dimenzije delova tela

Deo tela	Dužina [cm]	Širina [cm]	Relativna površinska gustina
torzo	80	10	6.90
natkolenica	46	10	3.05
potkolenica	46	10	1.00
stopalo	26	8	0.18

Tabela 2. Granični uglovi u zglobovima

Zglob	Minimalni ugao [rad]	Maksimalni ugao [rad]
kuk	-0.471	2.142
koleno	-2.984	0.000
članak	-1.414	0.571

**Model čoveka sa rukama.** Poslednji i naj-složeniji model je model kojem smo pored torza i nogu dodali i ruke (koje se sastoje iz dva dela), kao i glavu. Ovaj model je formiran da bismo proverili uticaj ruku na stabilnost sistema, kao i doprinos njihovog kretanja kretanju celog sistema. Dodatna pokretljivost modela postignuta je torzom koji se sastoji iz dva dela spojena zglobnom vezom, što omogućava njegovu savitljivost. Ovaj model nije proradio, konstruisali smo ga jer opisuje realnu sliku, i ostaje da se u daljem radu realizuje.

## Metod

Dva najzastupljenija metoda koja se koriste za kontrolu pokreta u simulacijama bipedalnog kretanja su metoda simuliranja mišića oprugama i metod momenata sila u zglobovima (Geijtenbeek *et al.* 2013). Prvi pristup opisuje fizički realno kretanje čoveka, dok se drugi odnosi na robotoliki kretanje, jer je u svakom trenutku u zglobu moguće primeniti bilo koji moment sile iz prethodno određenih granica. Ipak, u većini radova opredeljuje se za drugi model koji, zahvaljujući brzom i preciznom odgovoru na uslove iz spoljašnje sredine, optimizacijom češće daje rezultate koji se slažu sa realnim čovekovim hodom (Geijtenbeek *et al.* 2011). Iz tog razloga smo se u ovom radu opredelili za drugi model.

Momenti sila u zglobovima se u svakom trenutku vremena generišu kao linearna funkcija trenutnog stanja modela, što se postiže upotrebom matrice transformacije. Trenutno stanje modela opisano je uglovima i ugaonim brzinama u svakom od zglobova. Matricu transformacije čine realni brojevi uniformne raspodele iz određenog opsega, kojima se množi trenutno stanje modela, i kao rezultat se dobija niz momenata sila, kojima treba delovati u zglobovima u narednom trenutku. Na ovaj način postiže se konti-

nualna promena momenata sile tokom vremena, što odgovara realnom čovekovom kretanju.

## Genetski algoritam

Za formiranje i poboljšanje čovekovog hoda korišćen je genetski algoritam. Princip rada genetskog algoritma šematski je prikazan na slici 2.

Početu populaciju čine matrice transformacije, kojima množimo trenutno stanje čoveka. Dimenzije matrice transformacije, trenutnog stanja i momenata sile zavise od forme korišćenog modela čoveka, tj. od broja zglobova koje model ima.

Za ocenjivanje kvaliteta jedinke korišćene su kombinacije različitih parametara čovekovog stanja tokom kretanja, kao što su visina centra mase torza, linijska brzina, nagib torza u odnosu na vertikalnu i pređeno rastojanje tokom kretanja. Na osnovu dobijenih ocena jedinke u okviru jedne generacije se sortiraju po kvalitetu, od čega zavisi njihovo učešće u formiranju nove generacije.

Najslabije ocenjene jedinke ne učestvuju u rekombinacijama. Takođe, obezbeđeno je čuvanje najboljih jedinki, kako bi se dobre osobine sigurno prenale u narednu generaciju. Sve ostale jedinke formiraju se rekombinacijom dveju nasumično izabranih jedinki, izuzev odbačenih. Rekombinacija se vrši tako što se jedinke, tj. matrice transformacije, preseku na nekoj koloni i nova jedinka nastane spajanjem prvih  $i$  kolona prve jedinke i preostalih kolona druge jedinke, gde je sa  $i$  označena kolona kod koje je došlo do preseka matrice.

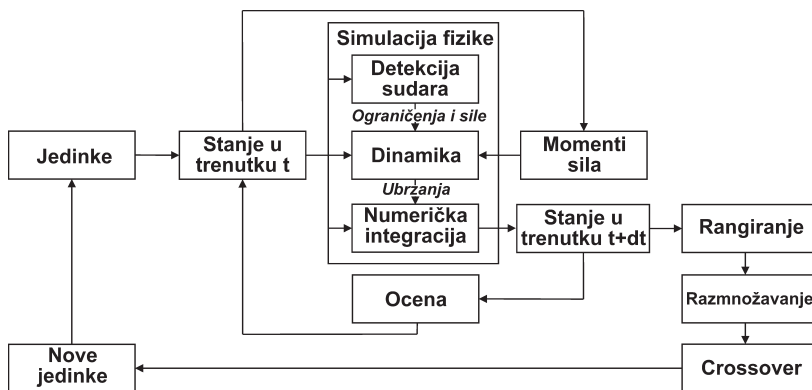
Osim rekombinacija, na nastanak novih jedinki utiču i mutacije. Mutacija se može desiti na nekom elementu novodobijene jedinke nakon rekombinacije, tako što se postojeći broj u matrici zameni brojem koji se od tog razlikuje za vrednost iz zadatog opsega.

## Rezultati i diskusija

Upravno kretanje je postignuto za prva dva modela čoveka – model bez stopala i model sa stopalima.

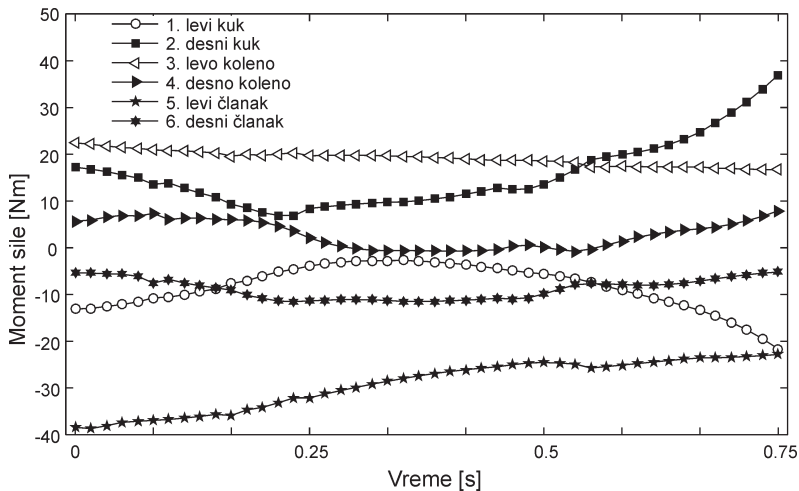
Pri formiranju čovekovog kretanja za opis trenutnog stanja osim matrica ugaonih brzina i uglova u zglobovima korišćena je i matrica koju čine samo uglovi u zglobovima tokom kretanja. Pošto se u toku jednog vremenskog koraka delovanjem momenata sile u zglobovima uglovi mogu promeniti samo za male vrednosti (što ne važi za ugaone brzine), u slučaju kada su razmatrani samo uglovi, postignuto kretanje je bilo više periodično, nego kada su u matrici stanja bile uključene i ugaone brzine.

Za simuliranje kretanja modela sa stopalima korišćene su dve modifikacije genetskog algoritma. U prvom slučaju populaciju su činile matrice transformacije, tako da je za generisanje svakog pojedinačnog kretanja korišćena samo po jedna od njih. Pošto kretanje čoveka čini periodično smenjivanje faza oslonaca čoveka na levu i desnu nogu sa trenutnom fazom dvostrukog oslonca, u drugoj verziji algoritma optimizacija je uzimala u obzir dve matrice transformacije koje se periodično smenjuju.



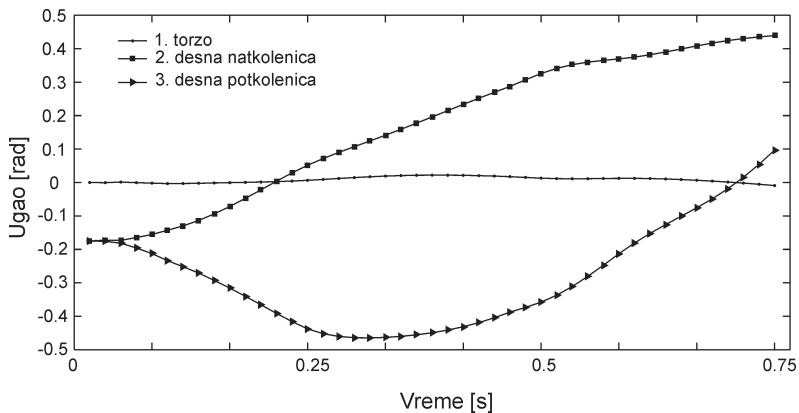
Slika 2. Šematski prikaz genetskog algoritma

Figure 2. Schematic view of the genetic algorithm



Slika 3.  
Grafik zavisnosti intenziteta momenta sila u zglobovima od vremena

Figure 3.  
Plot of torque intensities in joints versus time  
1 – left hip  
2 – right hip  
3 – left knee  
4 – right knee  
5 – left ankle  
6 – right ankle



Slika 4.  
Grafik zavisnosti ugla delova desne noge u odnosu na vertikalu od vremena

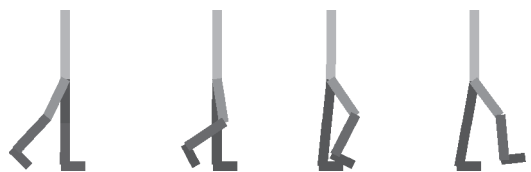
Figure 4.  
Plot of angles between parts of right leg and vertical axis versus time  
1 – torso  
2 – right thigh  
3 – right tibia

Korišćenjem jedne matrice transformacije postignuto je kretanje u trajanju od samo jednog koraka. U slučaju periodičnog smenjivanja dve matrice generisano je nešto stabilnije kretanje. Za prosečnu dužinu koraka dobijena je vrednost 0.387 m, u trajanju od 0.75 s (slika 5), što se slaže sa rezultatima drugih istraživanja (Capi *et al.* 2001). Na slici 3 prikazana je zavisnost intenziteta momenata sila koje deluju na zglobove od vremena, koja je dovela do stabilnog kretanja. Na slici 4 dat je grafički prikaz ugla pod kojim se nalaze delovi desne noge čoveka u odnosu na vertikalu u zavisnosti od vremena tokom jednog koraka.

Prikaz jednog perioda kretanja modela sa stopalima dobijenog simulacijom dat je na slici 5.

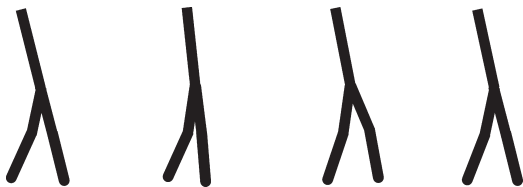
Uspravno kretanje modela bez stopala postignuto je korišćenjem samo pojedinačnih matrica transformacija, bez upotrebe njihovih perio-

dičnih smenjivanja. Za funkciju ocene uzimani su u obzir uspravan položaj torza i pomeranje modela ka napred, kao i postizanje pojedinačnih faza hoda, tj. faze kada se oslanja samo na jednu nogu i kada je obema nogama na zemlji. Na ovaj



Slika 5. Grafički prikaz dobijenog čovekovog koraka sa stopalima

Figure 5. Graphical illustration of obtained results for the model with feet



Slika 6. Grafički prikaz dobijenog čovekovog koraka bez stopala

Figure 6. Graphical illustration of obtained results for the model without feet

način generisano je stabilno kretanje u trajanju od oko deset koraka. Odgovarajući prikaz dobijen simulacijom dat je na slici 6.

## Zaključak

U radu su generisana i ispitivana uspravna kretanja dvodimenzionalnih modela čoveka u fizički realnom okruženju. Za simuliranje kretanja čoveka i implementaciju fizike korišćeni su programski jezik Python i programski paket Py-box2d.

Predstavljen je metod generisanja kretanja pomoću momenata sila u zglobovima. Za optimizaciju kretanja korišćen je genetski algoritam. Uspravno kretanje postignuto je za model sa stopalima i model koji nema stopala. Zaključeno je da je dobijeno kretanje periodičnije kada se za opisivanje trenutnog stanja modela koriste samo uglovi u zglobovima nego kada su u razmatranje uključene i ugaone brzine.

Postignuto je stabilno kretanje modela bez stopala. Kretanje modela sa stopalima je stabilnije ako se za njegovo generisanje koriste dve naizmjenične funkcije transformacije, nego kada se koristi samo jedna matrica. Dobijena prosečna dužina koraka vrednosti 0.387 m je u skladu sa rezultatima iz literature (Capi *et al.* 2001).

Za poboljšanje kretanja oba modela moglo bi se koristiti više periodičnih matrica transformacije, koje bi generisale određene poddelove koraka, umesto da generišu kretanje u celini. Stabilnost modela sa stopalima bi mogla biti postignuta upotrebom ZMP kriterijuma u okviru ocenjivanja jedinki.

Dalji rad bi se mogao proširiti na učenje hoda uz stepenice ili po neravnoj podlozi ili podlozi

koja se kreće, ili razmatranjem drugih metoda za optimizaciju čovekovog hoda i upoređivanjem dobijenih rezultata.

**Zahvalnost.** Zahvaljujemo se mentoru Miroslavu Bogdanoviću, kao i saradniku na programu fizike ISP Marku Kuzmanoviću, studentu master akademskih studija na Fizičkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, na pruženoj pomoći i sugestijama prilikom izrade ovog projekta.

## Literatura

Capi G., Nasu Y., Barolli L., Mitobe K., Takeda K. 2001. Application of Genetic Algorithms for biped robot gait synthesis optimization during walking and going up-stairs. *Advanced Robotics*, **15** (6): 675.

Geijtenbeek T., Pronost N., Egges A., Overmars M. H. 2011. Interactive Character Animation using Simulated Physics. *Eurographics – state of the art report*, **2**

Geijtenbeek T., van de Panne M., van der Stappen F. 2013. Flexible Muscle-Based Locomotion for Bipedal Creatures. *ACM Transactions on Graphics*, **32** (6): 206.

Wang J. M., Hamner S. R., Delp S. L., Koltun V. 2012. Optimizing Locomotion Controllers Using Biologically-Based Actuators and Objectives. *ACM Transactions on Graphics*, **31** (4): 25.

Westervelt E. R., Grizzle J. W., Chevallereau C., Choi J. H., Morris B. 2007. *Feedback control of dynamic bipedal robot locomotion*. London: Taylor & Francis

---

*Janko Šušteršič and Maja Pantić*

## Application of Genetic Algorithm for 2D Biped Model Walking Optimization

The purpose of this paper was the optimization and examination of human walking in a plane projection. For this purpose we created two two-dimensional biped models with different degrees of complexity, both able to move in a physics-based environment. The controls of the movements were simulated using an approach in which the torques in the joints of the model, at any time, were a linear combination of the current state parameters of the whole model. The programming language Python and Pybox2d library were used for visualization and physics-based simulation of the humanoid model. The genetic algorithm was used in order to achieve and optimize stable walking of the biped model. Parameters describing the interaction of body-parts which led to a stable stroll were obtained. The average step length was 39 cm in a period of 0.75 seconds. 