

Robotska sodelovalna aplikacija za igranje šaha

Ivan Reshkov, Peter Kmecl, Janez Podobnik, Matjaž Mihelj,
Marko Munih, Sebastjan Šlajpah

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana
E-pošta: ir8542@student.uni-lj.si, {peter.kmecl, janez.podobnik, matjaz.mihelj,
marko.munih, sebastjan.slajpah}@fe.uni-lj.si

Collaborative robotic chess-playing application

This paper describes the development of a collaborative chess-playing system that integrates robotic automation with an advanced chess engine. The setup features a uFactory xArm6 collaborative robot equipped with custom-designed soft fingers, a DGT electronic chessboard, and a DGT chess clock. The system interprets real-time board states and executes moves computed by the Stockfish engine. A reliable algorithm ensures precise move detection, and a user-friendly graphical interface facilitates intuitive interaction. Safety was evaluated through a risk analysis that included scenario testing using the PILZ PRMS measurement system to assess potential hazards. Additionally, the application includes a customized chess engine designed to emulate the playing style of Prof. Dr. Milan Vidmar. Experimental results demonstrate that the collaborative robotic cell operates safely and reliably, providing a high-quality and engaging chess-playing experience.

1 Uvod

Šah je ena najstarejših miselnih iger na svetu, ki se igra na šahovnici s 64 polji in 32 figurami. Igra temelji na strateškem premikanju figur z namenom matiranja nasprotnikovega kralja. Šah je danes predmet raziskav na področju umetne inteligence in teorije iger, kjer se preučujejo metode za iskanje optimalnih potez ter razvoj naprednih algoritmov. Avtomatizacija igre šaha sega v 18. stoletje, ko je Wolfgang von Kempelen izdelal stroj za igranje šaha, imenovan Mehanični Turek (angl. Mechanical Turk) [1], ki je bil sicer domišljena prevara, ker se je v omari pod šahovnico skrival človek, ki je vodil mehanizem.

Danes so na voljo šahovski programi (angl. chess engine), ki analizirajo tisoče potez in izberejo najboljšo. Šahovski program analizira položaje vseh figur na šahovnici ter ustvarja seznam različnih potez, ki bi lahko veljale za najmočnejše. Eden izmed najbolj znanih je šahovski program Stockfish (<https://stockfishchess.org/>). V [2] so opisani principi in algoritmi delovanja šahovskih programov.

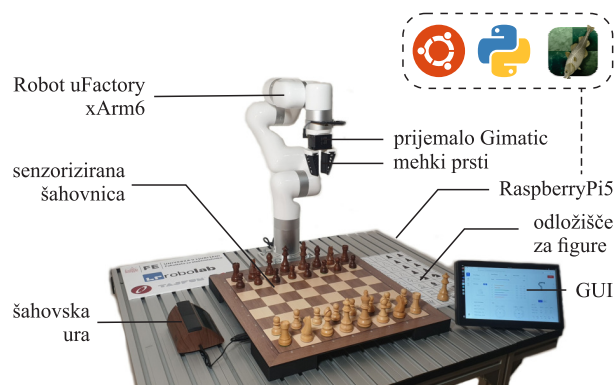
P. Kolosowski s sodelavci je razvil aplikacijo za igranje šaha, kjer lahko robot igra proti človeku ali drugemu robotu [3]. Stanje igre se spremlja z uporabo kamere, trenutno postavitev na šahovnici pa določijo z algoritmi računalniškega vida.

R. McIlroy-Young in sodelavci so predstavili razvoj personaliziranih modelov. Pri tem so uporabili javno dostopne partije s platforme Lichess ter šahovski program Maia Chess [4].

V tem člaku bomo predstavili razvoj robotske aplikacije za igranje šaha, ki uporabniku omogoča igranje proti robotu. Opisali bomo strojno in programsko opremo, algoritem za zaznavanje uporabnikovih potez, potek igre ter izvedli analizo varnosti aplikacije. Predstavili bomo tudi metodo razvoja personaliziranega modela na osnovi umetne inteligence.

2 Robotska celica

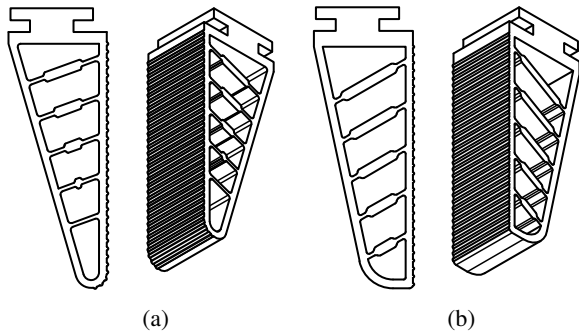
Robotsko celico sestavljajo robot, prijemalo, elektronska šahovnica, šahovska ura, mikroračunalnik RaspberryPi5 in zaslon na dotik. Programska oprema vključuje operacijski sistem Ubuntu 24.04.2 LTS, šahovski program Stockfish 3.28.0 ter programski jezik Python 3.13.3, v katerem je bila razvita celotna aplikacija. Sestavni deli robotske celice so prikazani na sliki 1.



Slika 1: Sestavni deli robotske celice za igranje šaha.

Sodelujoči robot uFactory xArm6 (www.ufactory.cc) ima 6 prostostnih stopenj, nosilnost 5 kg, in doseg 700 mm. Ponovljivost robota je $\pm 0,1$ mm, tehta 12,2 kg, njegova maksimalna linearna hitrost vrha pa je 1 m/s. Robot je opremljen z električnim prijemalom Gimatic MPLM1630.

Za namen naše naloge smo z uporabo 3D-tiskalnika izdelali mehke prste robotskega prijemala, ki delujejo po principu "fin-ray" [5]. Prsti imajo dve glavni prednosti: a) izboljššan oprijem šahovskih figur, saj se prilagodijo



Slika 2: Mehki prsti za manipulacijo šahovskih figur: (a) tip A in (b) tip B

obliki posamezne figure med prijemom in b) zagotavlja varnosti pri morebitnem trku robota z uporabnikovo roko, šahovsko ploščo ali figuro, saj se prsti ob trku upognejo in s tem preprečijo nastanek poškodb. Preizkusili smo dve različici mehkih prstov. Prva različica je imela izrazitejšo koničasto obliko vrha (tip A), druga pa bolj zaobljeno obliko z izrazitejšim prijemom z vrhom prstov (tip B, slika 2). Za primerjavo med mehкими in togimi prsti smo iz PLA izdelali tudi toge prste tipa A.

Uporabljali smo elektronsko šahovnico proizvajalca DGT (Digital Game Technology) [6]. Šahovnica je opremljena s senzorji, ki zaznavajo prisotnost figur na posameznih poljih. Vsaka figura ima vgrajen pasivni magnetni identifikator, ki omogoča prepoznavo tipa in barvo figure. Šahovnica je povezana z mikroračunalnikom RaspberryPi5 prek serijske povezave. Poleg šahovnice smo uporabljali tudi šahovsko uro DGT, ki je bila povezana s šahovnico.

3 Potek igre

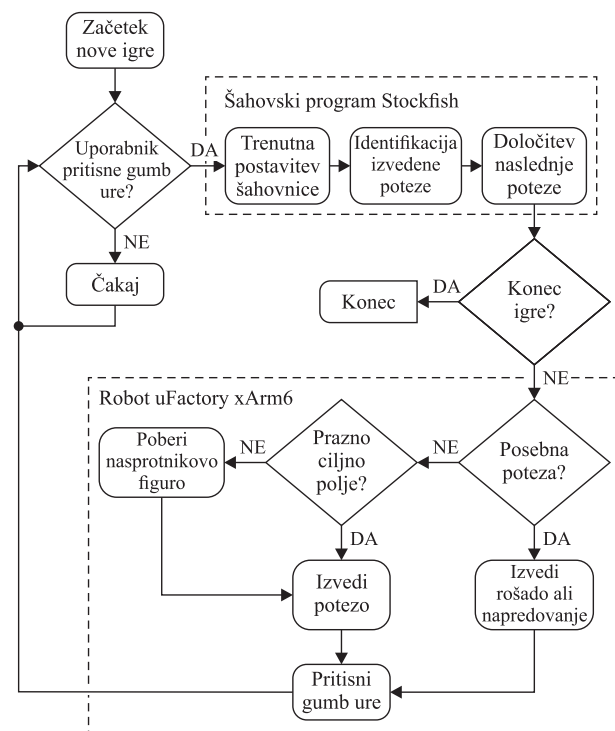
Igra poteka tako, da uporabnik na grafičnem uporabniškem vmesniku najprej izbere gumb "Nova igra", nato postavi figure v začetni položaj pri čemer mu sistem preko grafičnega vmesnika nakazuje pravilno postavitve šahovskih figur. Ko so vse figure na pravih mestih lahko uporabnik izbere gumb "Začni igro". Robot takrat ponastavi šahovsko uro, nato pa uporabnik izvede svojo prvo potezo in pritisne gumb na uri. S tem se aktivira programski del, ki ga izvaja robot. Ko robot konča s svojo potezo, ponovno pritisne gumb na šahovski uri in s tem preda potezo uporabniku.

Elektronska šahovnica sporoča stanje plošče, zadnjo spremembo in stanje šahovske ure kot bitna sporočila. Ta sporočila je treba dekodirati v obliki popolne algebraične notacije (angl. Full Algebraic Notation) in poslati šahovskemu programu Stockfish.

Šahovski program Stockfish uporablja kombinacijo treh ključnih pristopov za iskanje najboljše šahovske poteze: minimax algoritem, alpha-beta obrezovanje in zmogljivo statično ocenjevalno funkcijo za analizo šahovskih položajev [7]. Statična funkcija temelji na NNUE nevronske mrežah in hevrstiki, vendar zaradi kompleksnosti igre ni zadostna, zato Stockfish napoveduje prihodnje poteze in gradi drevo možnih izidov z izmeničnim oce-

njevanjem potez obeh igralcev. Alpha-beta obrezovanje omogoča učinkovitejše iskanje tako, da iz iskalnega drevesa izloči tiste veje, ki glede na trenutno znane ocene ne morejo vplivati na končno odločitev, s čimer bistveno poveča hitrost iskanja optimalnih potez.

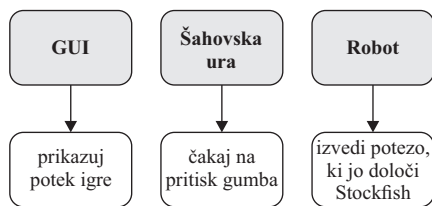
Za večjo robustnost naš algoritem temelji na dvojnem preverjanju zaznave premikov. Najprej preberemo zadnjo spremembo, ki jo pošlje šahovnica, pri čemer je lahko zaznanih več premikov hkrati zaradi različnih situacij. Poleg tega pridobimo trenutno stanje plošče in ga primerjamo s predhodnim stanjem. Na podlagi teh informacij določimo uporabnikov premik in ga v algebraični notaciji (npr. "d2d4") pošljemo programu Stockfish, ki izračuna najboljšo potezo. Optimalna poteza se nato posreduje robotu, ki na podlagi znane lege šahovnice izvede ustrezen premik figure na šahovnici. Če ciljno polje ni prazno, najprej odstrani nasprotnikovo figuro. Robot ima implementirane tudi posebne poteze, kot sta rošada, napredovanje ali *en passant*. Po končanem gibu robot pritisne gumb šahovske ure. Celoten potek je prikazan na sliki 3.



Slika 3: Diagram poteka algoritma šahovske igre.

Zaradi kompleksnosti programa je le-ta sestavljen iz treh niti, ki so predstavljene na sliki 4. Glavna nit predstavlja grafični uporabniški vmesnik, ki teče ves čas v ozadju. Druga nit skrbi za spremljanje stanja gumba na šahovski uri, medtem ko tretja nit upravlja premikanje robota. Večnitnost je ključna, saj mora program izvajati več nalog hkrati, brez prekinitev ali motenj med njimi. Vse niti tečejo na mikroračunalniku z uporabo asinhronnega programiranja v Pythonu (asincio).

Za enostavno rokovanje z robotsko celico smo razvili grafični uporabniški vmesnik (slika 5), ki ima preprosto in pregledno zasnovo. Prikazuje trenutno stanje na elektronski šahovnici ter vključuje gumba "Nova igra" in



Slika 4: Prikaz treh niti programa, ki zajemajo grafični uporabniški vmesnik, šahovsko uro, in robota, ki izvaja poteze, ki jih določi šahovski program Stockfish.

“Začni igro”. Prvi omogoča pripravo nove igre, drugi pa sproži igro s ponastavitvijo šahovske ure. Uporabnik lahko z drsnikom nastavi težavnost šahovskega programa Stockfish, gumb “Nova uganka” pa omogoča začetek igre z naključno postavitvijo figur, ki jo predlaga program.



Slika 5: Grafični uporabniški vmesnik robotske aplikacije za igranje šaha.

4 Razvoj personaliziranega šahovskega modela

V tem poglavju opisujemo razvoj personaliziranega modela umetne inteligence, ki omogoča igranje šaha v slogu določene osebe. Osredotočamo se na prof. dr. Milana Vidmarja, prvega slovenskega šahovskega velemejstra [8].

Cilj je razviti model umetne inteligence, ki uporabniku omogoča igranje proti virtualni različici prof. Vidmarja. Za ta namen uporabljamo šahovski program Maia, trenutno enega najbolj “človeških” šahovskih programov. Že obstoječo različico Maia smo naučili in prilagodili (angl. fine-tuning). Takšen način učenja imenujemo prenos znanja (angl. transfer learning) [4]. Model smo poskusili naučiti le na podlagi partij prof. Vidmarja, pri čemer pa imamo na voljo le okoli 600 njegovih odigranih iger, kar je premalo za uspešno učenje modela.

Model smo tako naučili na partijah njegovih sodobnikov, učiteljev ter igralcev s podobnim slogom igre. Pri tem smo uporabili približno 4000 izbranih partij. Naučeni model bomo preizkusili na partijah prof. Vidmarja, s čimer bomo ocenili uspešnost posnemanja njegovega sloga igre. Šahovski model se bo učil napovedovati naslednje poteze v danem stanju partije. Na podlagi teh napovedi bomo ocenili, kako podobna je poteza modela tisti, ki bi jo izvedel prof. Vidmar. V [4] so dosegli približno

60 % podobnost med naučenim modelom umetne inteligence in dejanskim igralcem, kar velja za enega najboljših rezultatov na tem področju. Doseg te ravni podobnosti tako pomeni dobro naučen model.

5 Analiza varnosti aplikacije

Sodelujoči robot xArm6 ima že vgrajene varnostne mehanizme, ki zagotavljajo ustrezen varen odziv robotske roke v primeru nepričakovanega trka med robotom in uporabnikom. Z izvedeno analizo tveganja smo identificirali potencialno nevarno situacijo pri trku med prsti prijemala in uporabnikovo roko v zraku (prehodni kontakt) in ukleščenjem uporabnikove roke med prsti prijemala in šahovnico (kvazistatičen kontakt). Za zagotavljanje varnosti smo izvedli analizo sil in pritiskov. Pri tem smo uporabili merilni sistem PILZ PRMS, ki vsebuje senzor sile in občutljive filme za merjenje pritiska, dinamika roke pa je ponazorjena s kombinacijo vzmeti in silikonskega diska. Merilni sistem PRMS smo postavili v tako lego, da posnema lego uporabnikove roke med igranjem šaha. Meritve so bile opravljene za območje hrbtni strani dominantne roke – D, pri tem smo uporabili kombinacijo vzmeti $k = 75 \text{ N/mm}$ in silikonskim diskom debeline 7 mm s trdoto 70 ShA. Vsaka meritev je bila izvedena trikrat, pri čemer smo upoštevali največje izmerjene vrednosti sil in pritiskov. Maksimalna dovoljena sila in pritisk pri trku z vrhno stranjo dominantne dlani, določena v standardu ISO/TS 15066:2016, znaša 140 N in 200 N/cm^2 za statičen trk in 280 N ter 400 N/cm^2 za prehodni trk. Rezultati meritev so podani v tabeli 1.

Tabela 1: Maksimalne izmerjene sile in pritiski obeh različic mehkih prstov (PT – prehodni trk, ST – statičen trk)

Prst	Sila – PT	Sila – ST	Pritisk
Togi tip A	329 N	330 N	$>1200 \text{ N/cm}^2$
Mehki tip A	101 N	41 N	614 N/cm^2
Mehki tip B	72 N	64 N	148 N/cm^2
mejna vrednost			
ISO/TS 15066	200 N	140 N	200 N/cm^2

Prsti tipa A so zaradi svoje izrazite konične oblike primerni za manipulacijo šahovskih figur tudi v primeru, če le-te niso postavljene natančno na sredino polja. Analiza pri statičnem in prehodnem trku je pokazala, da togi prsti tipa A presežejo mejne vrednosti tako sile kot tudi pritiska in kot taki predstavljajo varnostno tveganje v primeru trka. V nasprotju s togimi prsti, mehki prsti tipa A ustrezajo predpisanim mejam sil, zaradi relativno majhne kontaktne površine prstov pa presežejo mejo pritiska 200 N/cm^2 . Mehki prsti tipa B ravno tako ne presežejo mejnih vrednosti sil pri statičnem in prehodnem trku. Zaradi povečane kontaktne površine mehki prsti tipa B tudi ne presežejo mejne vrednosti pritiska. Z meritvami smo tako potrdili, da mehki prsti tipa B ustrezajo varnostnim zahtevam in omogočajo varno interakcijo z uporabnikom.

6 Razprava

Predstavljena robotska celica omogoča igranje šaha med uporabnikom in robotom (slika 6). Robotski sistem za igranje šaha, predstavljenim v [3], uporablja računalniški vid za zaznavo figur in premikov. Taka zasnova zahteva dodatno strojno opremo (kamere, osvetlitev) in je občutljiva na zunanje motnje, predvsem na spremembo osvetlitve. Delna rešitev je dovolj močna umetna osvetlitev, ki presvetli zunanje vplive, je pa taka osvetlitev lahko moteča za uporabnika in prispeva k negativni igralni izkušnji. V našem primeru senzorizirana šahovska plošča ponovno delo in poveča stabilnost sistema, saj zanesljivo detektira in sporoča pravilno stanje plošče in vse spremembe. Bistveno pa je pravilno dekodiranje teh sporočil v obliko, ki je razumljiva za šahovski program Stockfish.

Algoritem, ki smo ga razvili za dvojno preverjanje sporočil plošče, omogoča robustno določanje premikov uporabnika. Preverja se tako sprememba, ki jo plošča pošlje, kot tudi sprememba, ki smo jo izračunali med trenutnim in prejšnjim stanjem plošče. Dodali smo tudi posebne premike, kot so rošada, napredovanje kmeta in *en passant*. Fizična šahovska ura prispeva k bolj pristnemu občutku igre, večnitna zasnova programa pa omogoča nemoten in pravičen potek celotne igre.

Personalizirani šahovski programi predstavljajo napredno šahovsko izkušnjo. Z razvojem lastnega šahovskega programa na osnovi iger prof. dr. Milana Vidmarja želimo prenesti izkušnjo igranja proti prvemu slovenskemu šahovskemu vele mojstru tudi na naš sistem.

Za varnost robotske celice delno poskrbi že varna zasnova same robotske roke, dodatno pa je varnost nadgrajena z implementacijo mehkih prstov za manipulacijo šahovskih figur. Analiza sil in pritiskov pri statičnem in prehodnem trku je pokazala, da so prsti ustrezni in ne presejajo mejnih vrednosti določenih v ISO/TS 15066:2016.

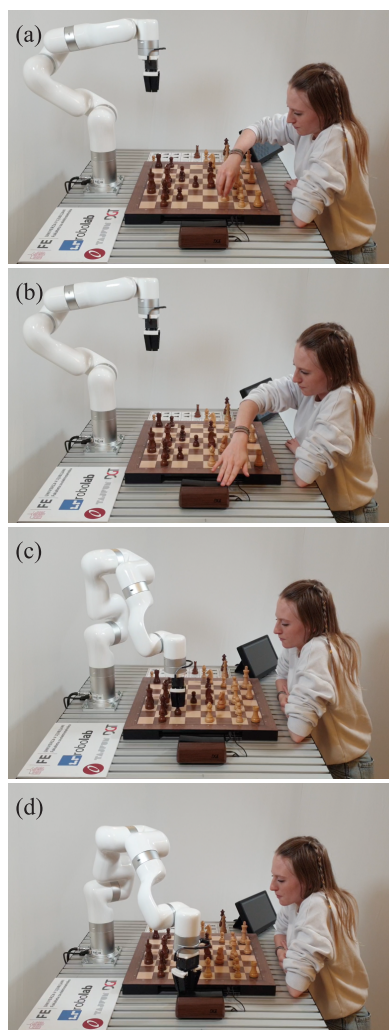
Razvita aplikacija za igranje šaha omogoča interakcijo med uporabnikom in robotom, pri čemer se uporablja napredna sensorika in logika. Rezultati so pokazali, da sistem deluje varno in zanesljivo ter predstavlja pozitivno igralno izkušnjo.

Zahvala

To raziskovalno delo so delno financirali Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (številka programa P2-0228), Tajfun Planina d.o.o. in UL FE.

Literatura

- [1] E. Stephens, "The Mechanical Turk: A short history of 'artificial artificial intelligence'," *Cultural Studies*, vol. 37, no. 1, pp. 65–87, 2023.
- [2] P. Bijl and A. Phi Tiet, "Exploring modern chess engine architectures," 2021.
- [3] P. Kołosowski, A. Wolniakowski, and K. Miatliuk, "Collaborative robot system for playing chess," in *2020 International Conference Mechatronic Systems and Materials (MSM)*, 2020, pp. 1–6.



Slika 6: Igranje šaha med robotom in uporabnikom: (a) uporabnik izvede svojo potezo, (b) uporabnik pritisne gumb šahovske ure in preda potezo robotu, (c) robot izvede svojo potezo, (d) robot pritisne gumb šahovske ure in preda potezo uporabniku.

- [4] R. McIlroy-Young, R. Wang, S. Sen, J. M. Kleinberg, and A. Anderson, "Learning personalized models of human behavior in chess," *CoRR*, vol. abs/2008.10086, 2020. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2008.10086>
- [5] D. Zhifeng and L. Miao, "Learning optimal fin-ray finger design for soft grasping," in *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 7 - 2020, 2021.
- [6] DGT, "DGT Electronic Chess Boards," 2019.
- [7] M. Hamzah, "Game theory: How Stockfish mastered chess," <https://blogs.cornell.edu/info2040/2022/09/30/game-theory-how-stockfish-mastered-chess/>, 2022, (dostop: januar, 2025).
- [8] M. Vidmar, *Pol stoletja ob šahovnici*. Državna založba Slovenije, 1951.