

Avtomatizacija namiznega nogometa

Matevž Bošnjak, Andrej Zdešar, Simon Tomažič, Goran Andonovski, Gregor Klančar,
Sašo Blažič, Igor Škrjanc

Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani
E-pošta: matevz.bosnak@fe.uni-lj.si

Table football automation

We present a project for automation of a table football game that enables competitions with mixed (computer or human) players on each side. The system relies on a pair of overhead cameras to capture the image of the playing field and decode the position of all playing rods and the position of the ball. Our approach skips the slow standard camera image rectification methods and for the purpose of playing rods tracking extracts the expected pixel positions from the camera directly. Moreover, we present an approach to improving the resolution of an optical Gray code encoder by using the phase data captured in the camera image. Actuation of the rods is implemented using modular drive units consisting of linear-rotary axes, designed to be attached to any of the rods. The goal of the project is a development of an eye-catching system for promotion of studies at the Faculty of Electrical engineering, as well as a learning platform that is used during the laboratory exercises covered by the Laboratory of Control Systems and Cybernetics.

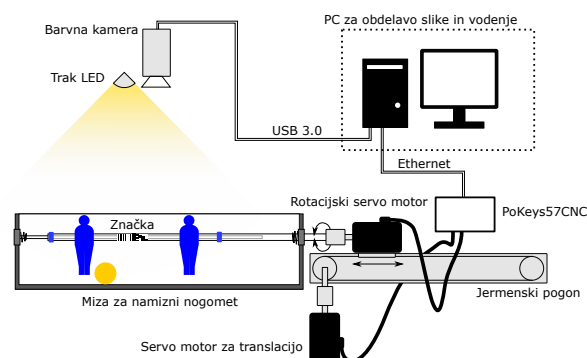
1 Uvod

V sklopu internih projektov FE za izboljšanje kakovosti pedagoškega procesa in promocije IPP&P 2019 smo v Laboratoriju za avtomatiko in kibernetiko predlagali projekt avtomatizacije namiznega nogometa. Projekt predstavlja izdelavo laboratorijske naprave, ki bo lahko uporabljena tako za promocijo študija elektrotehnike, kot tudi za pedagoške namene (npr. izvedbe laboratorijskih vaj [1], izvedbe študentskih tekmovanj v sklopu izven kurikularnih dejavnosti ipd.).

Namen projekta je nadgradnja standardne mize za namizni nogomet z vsemi potrebnimi komponentami za izvedbo različnih načinov igre. V nasprotju s podobnimi projekti [2],[3],[4] želimo ponuditi tudi možnost igre z mešanimi ekipami, kjer bodo člani ekipe morali pripraviti algoritme za računalniškega tekmovalca ter hkrati izuriti enega izmed svojih človeških članov. Osnovo pri naši implementaciji predstavlja sistem kamer nad igriščem, ki omogoča hkratno sledenje žogi in položajev igralcev, ter modularni pogonski sistem, ki ga bomo lahko namestili na katero koli igralno palico.

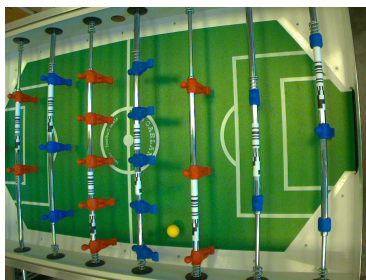
2 Zasnova sistema

Avtomatizirana miza za namizni nogomet je sestavljena iz senzorskega, pogonskega in procesorskega sistema (slika 1). Za uspešno delovanje je potrebno razpoznati položaj in smer premikanja žoge, položaje ter rotacije vseh igralnih palic ter po ustreznem algoritmu voditi krmiljene igralne palice. Osnovna ideja je bila razvoj prilagodljivega sistema, ki nam bo omogočal avtomatizirano vodenje do 4 poljubnih igralnih palic. Predstavljena rešitev je zato zasnovana modularno – senzorski in procesorski sistem je nameščen fiksno nad in pod igralno mizo, pogonski sistem pa je mogoče namestiti na poljubno izbrana mesta. Tovrsten pristop omogoča izvedbo kibernetike igre namiznega nogometa človek proti računalniku ter igre mešanih ekip, torej ekip človeka in računalnika proti drugi takšni mešani ekipi.



Slika 1: Zasnova sistema

Sistem za strojni vid predstavlja osnovni senzorski sistem za zajem podatkov o položaju ter orientaciji igralnih palic in položaju žoge [5]. Nad igriščem sta nameščeni dve kameri proizvajalca Basler z ločljivostjo 1,6 milijona točk. Širok kot ($53,2^\circ$) uporabljenih leč omogoča pokritje celotnega igrišča že z eno kamero, vendar sta dve kameri uporabljeni za izboljšanje delovanja zaradi pogostega prekrivanja žoge s strani igralnih palic ali igralcev (slika ene od kamer je prikazana na sliki 2). Obdelava slike se izvaja na osebnem računalniku, celoten sistem pa omogoča zajem slik s frekvenco do 200 slik na sekundo. Neodvisnost delovanja sistema za zajem slike od ambientalne svetlobe je zagotovljena z umetno osvetlitvijo v obliki traku LED nad igriščem.

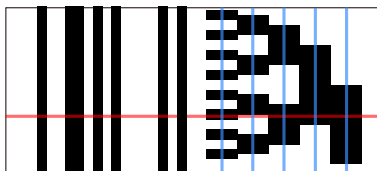


Slika 2: Slika zajeta z eno od kamer

Pogonski sistem je sestavljen iz krmilnika PoKeys57CNC, linearnega ter rotacijskega pogona. Linearni pogon je izveden s pomočjo jermensko gnane linearno pomične osi, rotacijski pogon pa uporablja direkten sklop osi servo motorja na igralno palico preko potisnega ležaja in adapterja za ročaj palice.

2.1 Detekcija položajev igralcev

Za uspešno izvajanje naprednejših strategij igre pri namiznem nogometu je potrebno poznati položaje vseh posameznih figur igralcev – poznati je potrebno linearne položaje ter rotacije vseh 8 igralnih palic. Namesto fizičnih senzorjev smo se odločili za uporabo barvne kamere, kot predlagajo avtorji v [6]. V ta namen smo vse palice opremili z značkami, ki omogočajo sledenje po obeh prostorskih stopnjah. Značka (slika 3) je sestavljena iz dveh delov, črtna koda na levi ter zapis s 5-bitno Grayevo kodo na desni. Pri zajemu slike igrišča s kamero pride zaradi upo-

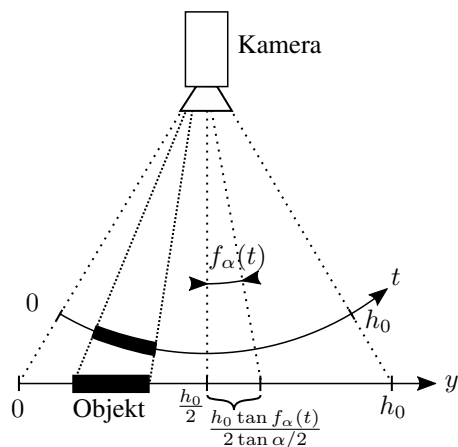


Slika 3: Grafika značke z označenim nizom točk L_m (rdeča vodoravna črta) in področji za vzorčenje Grayeve kode (presečišče modrih in rdečih črt)

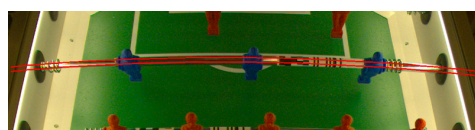
rabe širokokotne leče na kameri do sodčkastih popačenj v sliki[7] – ravne črte so tako preslikane v krivulje na sliki. Da se izognemo časovno potratni operaciji odpravljanja popačenj na celotni zajeti sliki, iz slike izluščimo le točke, ki pripadajo igralni palici. Za vsako od palic z indeksom palice m uporabimo preslikavo

$$g_m \left(\left[\frac{h_0}{2} \left(1 + \frac{\tan f_\alpha(t)}{\tan \alpha/2} \right) \right] \right) \leftarrow I_o [x_m(t), t], \quad (1)$$

kjer z $x_m(t) = a_m \cdot t^2 + b_m \cdot t + c_m$ opišemo krivuljo, ki ustreza obliki popačene slike ravne palice. Parameter t uporabimo za glavno spremenljivko preslikave, ki označuje točko na loku v popačeni sliki). h_0 ustreza vertikalni ločljivosti zajete slike, $\alpha = 53,2^\circ$ vidnemu kotu kamere, s funkcijo $f_\alpha(t) = \frac{t-h_0/2}{h_0} \cdot \alpha$ pa preslikamo spremenljivko t v kotni prostor kamere (slika 4). Parametre a_m , b_m in c_m določimo za vsako palico posebej v postopku kalibracije sistema pred uporabo.



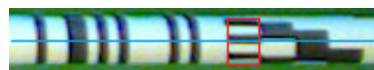
Slika 4: Compensation for the distance variation between tracked object and the camera



Slika 5: Območje palice

S preslikavo podano z enačbo (1) za vsako igralno palico pridemo do niza točk L_m , ki ga nato najprej filtriramo s pasovno prepustnim filtrom ter uporabimo za iskanje linearnega položaja palice. Položaj je določen s položajem maksimuma križno-korelacijske funkcije med binarno kodo značke (zaporedje 1001101010000101) ter niza zajetih točk L_m .

S pomočjo poznanega linearnega položaja palice se nato osredotočimo na merjenje rotacije igralne palice. Na podlagi vrednosti točk v nizu točk L_m na mestih, ki ustrezajo posameznim bitom Grayeve kode (na sliki 3 označenimi z vertikalnimi modrimi črtami), določimo kodiran zapis kota. Prednost kodiranega zapisa v Grayevi kodi je v Hammingovi razdalji 1 med zaporednimi zapisi kotov – šum pri določanju vrednosti posameznih bitov v kodnem zapisu (te so lahko slabo določene na meji med svetlim in temnim poljem) je tako omejen le na najmanjši bit v končnem zapisu kota.

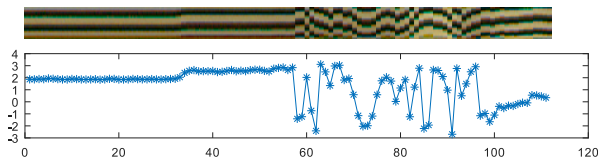


Slika 6: Območje za izračun faze

Z uporabo zapisa kota s 5-bitno Grayevo kodo lahko dosežemo ločljivost po kotu približno 11° , kar ne omogoča dovolj natančne igre. Ločljivost zato izboljšamo z uporabo interpolacije nad podatki zadnjega (najmanjšega) bita kodnega zapisa. Na zajeti sliki izberemo dodatne vzorce D_m v prečni smeri (vzdolž obsega značke na igralni palici, kot je prikazano na sliki 6) ter izračunamo fazo vzorca ϕ_m kot

$$\phi_m = \arctan \frac{\sum_{i=-N_p}^{N_p} D_m(i) \cdot \sin 2\pi i / \hat{T}}{\sum_{i=-N_p}^{N_p} D_m(i) \cdot \cos 2\pi i / \hat{T}}, \quad (2)$$

kjer je N_p število uporabljenih vzorcev, \hat{T} pa pričakovana perioda kodnega zapisa zadnjega bita kode. Dobljena vrednost faze glede na zasuk palice je ilustrirana na sliki 7. Ker perioda kodnega zapisa zadnjega bita ustreza raz-



Slika 7: Časovni potek vzorca v sliki (zgoraj) z izračunano fazo (spodaj).

dalji 4 v zapisu rotacije oz. kotu 45° , lahko zadnja dva bita v dekodiranem zapisu rotacije α_m zamenjamo z ustrezno transformirano vrednostjo faze ϕ_m .

1. ϕ_m zamaknemo za ϕ_{offset} glede na izhodišče Grayeve kode ter preskaliramo, da dosežemo periodo 4: $\phi'_m = \frac{4}{2\pi} [\phi_m - \phi_{offset}]$,
2. odstranimo 2 bita iz dekodiranega zapisa kota α_m s pomočjo binarne IN operacije z masko $b11100$, $\alpha'_m = \alpha_m \text{ IN } b11100$,
3. vrednost $j \in \mathbb{Z}$ določimo tako, da se vrednost izraza $\phi'_m + \alpha'_m + 4j - \alpha_m$ nahaja na intervalu $[-2, 2]$,
4. končno vrednost kota $\theta_m \in [0, 32) \cap \mathbb{R}$ izračunamo z $\theta_m = \phi'_m + \alpha'_m + 4j$.

Končna ločljivost, ki jo lahko dosežemo s predlagano metodo, je vezana na nivo šuma v zajetem signalu, ta pa je ocenjen s standardno deviacijo zajetih podatkov. Pri dobri osvetlitvi z nameščenim trakom LED smo tako dosegli natančnost $0,7^\circ$ po kotu ter $0,6 - 0,8$ mm po translaciji palici (odvisno od položaja palice v sliki). Za isto ločljivost z uporabo Grayeve kode bi potrebovali kodni zapis z 9 biti. Ker trenutna postavitev kamere omogoča zanesljivo zaznavanje in dekodiranje le 6 bitov, smo izboljšali ločljivost meritve po kotu za faktor 8.

2.2 Detekcija žoge

Detekcija žoge je eden pomembnejših postopkov za zanesljivo delovanje avtomatiziranega sistema namiznega nogometa. Čeprav je v literaturi zaslediti različne postavitve sistema za zajem slike, večina avtorjev uporablja pristop sledenja žoge od spodaj. To zahteva namestitev steklene igralne površine, ki pa žal vpliva na samo igro (moteči odboji za igralce, drugačen koeficient trenja žogice ipd.). Naš pristop za sledenje uporablja par kamer, nameščenih nad igrišče, s čimer se zagotovi redundanca meritve in zmanjša težava s prekrivanjem žoge s strani igralcev. Zaradi hitrih premikov in pogostih prekrivanj ne uporabljamo algoritmov sledenja, temveč le optimizirano detekcijo na podlagi filtriranja po barvi v prostoru HSV (uporabljena je bila rumena igralna žoga), postopkov erozije in dilatacije (za odstranitev morebitnega šuma), nato pa iskanje in filtriranje po konturah. Položaj žoge je na koncu določen na podlagi slikovnih momentov izbrane konture.

Izmerjen položaj žoge se nato filtrira z namenom ugotavljanja vektorja hitrosti žoge (ocenjevanje smeri in hitrosti). Sistem za detekcijo žoge je še v testno-razvojni fazi, a že deluje z eno od kamer ter omogoča sledenje položaja žoge s frekvenco 100 Hz.

3 Pogonski sistem

Kot je omenjeno v uvodu, je pogonski sistem zasnovan modularno, posamezna pogonska enota je namenjena premikanju igralne palice po linearni in rotacijski osi. Pogonske enote so pritrjene na aluminijasto ogrodje, ki je bilo nemoteče nameščeno na igralno mizo, sama igralna palica pa je na pogonsko enoto pritrjena preko adapterja, ki smo ga natisnili s 3-D tiskalnikom (slika 8). Adapter objame ročaj palice ter omogoča hitro pritrditev ali snemanje pogonske enote.



Slika 8: Pogonska enota in kamere z osvetlitvijo

3.1 Mehanska izvedba

Mehanska konstrukcija je sestavljena iz standardnih 45 mm industrijskih aluminijastih profilov ter plastičnih povezovalnih elementov, ki so bili natisnjeni na 3D tiskalniku. Linearen pomik je dosežen z uporabo igus jermenskega pogona, ki je nameščen navpično. Ker smo lahko pogonski servo motor namestili v navpični smeri, je izvedba pogonske enote kompaktna ter dovoljuje namestitev dveh pogonskih enot tudi na igralne palice, ki so narazen le 150 mm.

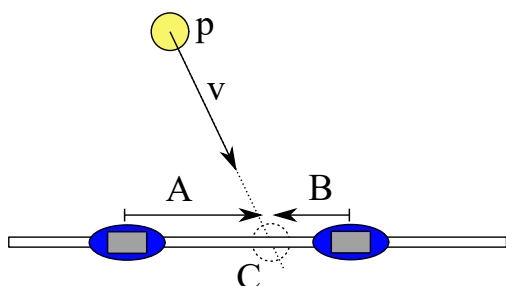
Pogonski servo motor za rotacijsko os je preko parkljaste sklopke in potisnega ležaja direktno sklopljen z adapterjem igralne palice ter omogoča prenos sile v aksialni smeri ter navora.

3.2 Sistem vodenja

Ker je treba v realnem času voditi 8 motorjev v položajnem načinu (4 pogonske enote, vsaka z linearno in rotacijsko osjo), smo izbrali krmilnik PoKeys57CNC. PoKeys57CNC omogoča krmiljenje motorjev s signali *korak/smer* (angl. *step/direction*) po trapeznem hitrostnem profilu, ki ga lahko sproti prilagajamo (spreminjanje položajne reference in hitrosti). Preko vodila USB ali Ethernet je krmilnik povezan na osebni računalnik, kjer se izvajajo analiza slike in algoritmi vodenja.

3.3 Algoritem branilca

Za namene testiranja in razvoja smo pogonsko enoto namestili na drugo igralno palico (obrambni igralec) ter implementirali enostaven algoritem branilca. Iz podatkov o trenutnem položaju in vektorju hitrosti žoge najprej ugotovimo presečišče med potjo žoge in linijo obrambnih figur (slika 9), ki predstavlja zeleni položaj obrambne figure (označen s C). Nato moramo na podlagi trenutnih položajev in omejitev pri premikanju izbrati s katero obrambno figuro bomo igrali (premika označena z A in B). Pri izbiri najprej upoštevamo omejitve ter izločimo figure, s katerimi ciljnega položaja ne moremo doseči, nato pa izberemo figuro, ki je že trenutno najbližje zelenemu položaju.



Slika 9: Pokrivanje predvidenega položaja žoge

Algoritem ima nato dve dodatni stanji, t.j. umik in napad. Če žogo zaznamo za linijo obrambnih figur, le-te umaknemo za bolj učinkovit napad iz zadnjih vrst. V primeru, da žogo z obrambno figuro ustavimo in ju poravnamo, izvedemo napad, ki je sestavljen iz zamaha in udarca. Za doseg želenih hitrosti figure ob udarcu ob žogo, moramo figure najprej umakniti, nato pa jo pospeševati po trapeznem profilu proti žogi. S kompaktnimi servo motorji za pogon rotacijske osi tako dosežemo hitrosti žoge, ki tudi presegajo hitrosti človeških igralcev (izmerjene hitrosti žoge okoli 10 m/s). V prihodnjih nadgradnjah bomo algoritemski pristop poskusili nadomestiti z nevronskimi mrežami[8].

4 Varnostni sistem

Zaradi kopice računalniško vodenih premičnih delov v področju igralne površine smo se za zagotavljanje varnosti pri uporabi naprave odločili za namestitev varnostne zaveske Sick miniTwin4 nad igralno površino. V primeru poseganja v igralno področje ali preko pritiska na gumb za zaustavitev sistema preko kontaktorjev za enosmerno napetost izklopimo napajanje servo motorjev. Logika varnostnega krmiljenja je implementirana v programirljivem Sick Flexisoft varnostnem releju.

Dodatne varnostne ukrepe smo upoštevali tudi pri razvoju pogonskih enot, ki bodo zaprte s prozornim pokrovom, ter pri izbiri same mize za namizni nogomet. Izbrana miza ima teleskopske igralne palice, ki ne posegajo v prostor nasprotnikov.

5 Zaključek

Čeprav je predstavljen projekt še v razvojni fazi, prejemo predvsem pozitivne odzive testnih uporabnikov. Zavedamo pa se, da je sama izvedba senzorskega in pogonskega sistema le majhen del na poti do naprave, ki bo omogočala zanimivo igro tudi bolj večšim igralcem namiznega nogometa. Pri izbiri samih komponent smo stremeli k izenačevanju zmogljivosti človeškega igralca, vendar bo na končni rezultat vplivalo predvsem pravilno delovanje implementiranih algoritmov.

6 Zahvala

Zahvaljujemo se Fakulteti za elektrotehniko, Univerze v Ljubljani, za financiranje projekta v sklopu internih projektov FE za izboljšanje kakovosti pedagoškega procesa in promocije – IPP&P 2019. Zahvaljujemo se tudi industrijskim 'partnerjem', ki so podprli izvedbo projekta:

Inea RBT d.o.o. (alu konstrukcija)
igus (Hennlich d.o.o.) (jermenski pogon)
PoLabs d.o.o. (krmilnik PoKeys57CNC)
IKU d.o.o. (DC kontaktor)
SICK d.o.o. (varnostna zavesa, varnostni rele)
FOBMARK d.o.o. (LED osvetlitev)

Literatura

- [1] A. Zdešar, S. Blažič, and G. Klančar, "Engineering Education in Wheeled Mobile Robotics," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, pp. 12173–12178, jul 2017.
- [2] E. Guenat, C. Picard, R. Serigado, and B. Ulrich, "Automatic Foosball - Concurrent engineering project," tech. rep., 2012.
- [3] R. Janssen, J. De Best, and R. Van De Molengraft, "Real-time ball tracking in a semi-automated foosball table," in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 5949 LNAI, pp. 128–139, Springer, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [4] P. Riden, "It's only a game: Robots defeat humans on foosball playing field - New Atlas - Robotics," <https://newatlas.com/epfl-robot-table-soccer-foosball/44863/> [Accessed 2020-06-15]," 2016.
- [5] M. Bošnjak and G. Klančar, "Fast and Reliable Alternative to Encoder-Based Measurements of Multiple 2-DOF Rotary-Linear Transformable Objects Using a Network of Image Sensors with Application to Table Football," *Sensors*, vol. 20, p. 3552, jun 2020.
- [6] A. Zdešar, I. Škrjanc, and G. Klančar, "Visual Trajectory-Tracking Model-Based Control for Mobile Robots," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, p. 323, sep 2013.
- [7] G. Klančar, M. Kristan, and R. Karba, "Wide-angle camera distortions and non-uniform illumination in mobile robot tracking," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 46, pp. 125–133, feb 2004.
- [8] G. Cerne and I. Škrjanc, "Initial study on evolving state space neural networks (eSSNN)," in *2018 IEEE International Conference on Evolving and Adaptive Intelligent Systems, EAIS 2018*, pp. 1–8, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., jun 2018.