

Primena linearnog niza fotodetektora kod optičkih pseudoslučajnih pozicionih enkodera

Ivana Randelović, Dragan Denić, Goran Miljković i Aleksandar Jocić

Apstrakt—Precizno i pouzdano merenje ugaone pozicije je zahtev mnogih savremenim pokretnih sistema u industriji i drugim oblastima. Pseudoslučajni optički apsolutni enkoderi nude dobru rezoluciju, ali i pouzdanost i fleksibilnost u radu. U radu se analizira primena linearnog niza fotodetektora za paralelno očitavanje pseudoslučajnog koda pri čemu se dobija pravi apsolutni enkoder, koji za razliku od klasičnog ima jednu kodnu traku nezavisno od rezolucije. Razmatraju se karakteristike primenjenog senzora kao i ograničenja njegove primene za očitavanje pseudoslučajnog koda. Kako bi se izbegle greške prilikom projektovanja diska enkodera predlaže se metoda njegove provere nakon projektovanja bazirana na obradi slike. Takođe, moguća je i provera kvaliteta diska nakon njegove realizacije.

Ključne reči—Pseudoslučajni pozicioni enkoder, merenje pozicije, paralelno očitavanje pseudoslučajnog koda, integrisani linearni niz fotodetektora.

I. UVOD

Pseudoslučajni optički enkoderi predstavljaju dobro rešenje za precizno i pouzdano merenje ugaone pozicije u različitim pokretnim sistemima u industriji, računarskim periferijama, antenama, kamerama, itd. Na tržištu se mogu naći kao obrtni i linearni pozicioni enkoderi visokih rezolucija. Pseudoslučajni pozicioni enkoderi, kao poseban tip apsolutnih enkodera, imaju manji broj kodnih traka, manji broj optičkih čitača, bolju pouzdanost i fleksibilnost. Pri samoj realizaciji pseudoslučajnog enkodera, obrtnog ili linearnog, potrebno je naneti pseudoslučajni binarni kod na disk ili traku enkodera i izvršiti odabir optičkog čitača, zatim definisati način očitavanja pseudoslučajnog koda [1], razmotriti metode skeniranja koda [2] kao i metode konverzije pseudoslučajnog u prirodni kod [3]. Dodatni kvalitet pseudoslučajnih enkodera koji im daje i veliku prednost u odnosu na klasične kodere, jeste detekcija grešaka očitavanja koda. Korisniku se pruža dodatna informacija koja potvrđuje ispravnost informacije o poziciji sistema.

Pseudoslučajni apsolutni enkoderi imaju jednu kodnu traku sa pseudoslučajnom binarnom sekvencom, koja se može očitavati serijski i paralelno. Prilikom određivanja ugaone pozicije kod pseudoslučajnih apsolutnih enkodera se koristi

Ivana Randelović – Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: ivana.randjelovic@elfak.ni.ac.rs).

Dragan Denić – Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: dragan.denic@elfak.ni.ac.rs).

Goran Miljković – Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: goran.miljkovic@elfak.ni.ac.rs).

Aleksandar Jocić – Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: aleksandar.jocic@elfak.ni.ac.rs).

„osobina prozora“ pseudoslučajne sekvence rezolucije n , pri čemu kada se očitaju n susednih bitova; oni predstavljaju jedinstvenu kodnu reč iz koje se može dobiti informacija o poziciji. Kodne reči su raspoređene longitudinalno, pri čemu prvih $(n-1)$ bita tekuće kodne reči su identični sa poslednjih $(n-1)$ bita prethodne kodne reči. Tačnije, dve susedne kodne reči razlikuju se u samo jednom bitu. Pseudoslučajna binarna sekvenca maksimalne dužine 2^n-1 se može generisati primenom pomeračkog registra od n -flip flopova i odgovarajuće povratne sprege. Ovako generisana pseudoslučajna binarna sekvenca sadrži 2^n-1 različitih kodnih reči dužine n . Da bi se očitao pseudoslučajni binarni kod može se koristiti jedan ili dva detektora, a da se kodna reč formira u pomeračkom registru, ili se može koristiti linearni niz n detektora pri čemu se paralelno očitavaju svih n bitova u svakom trenutku [4, 5].

U radu se predlaže očitavanje pseudoslučajnog binarnog koda primenom optičkog modula sa integrisanim nizom fotodetektora. Radi se o metodi paralelnog očitavanja koda primenom senzora TCD1254GFG kompanije Toshiba koja je objašnjena u prvom delu rada. U drugom delu rada su razmatrana ograničenja prilikom primene ovog senzora za očitavanje pseudoslučajnog koda kod optičkog obrtnog pseudoslučajnog enkodera. U trećem delu rada je predstavljen postupak provere ispravnosti projektovanja i iscertavanja pseudoslučajnih kodnih traka na tehničkom crtežu kao i provera samog diska nakon izrade a pre ugradnje.

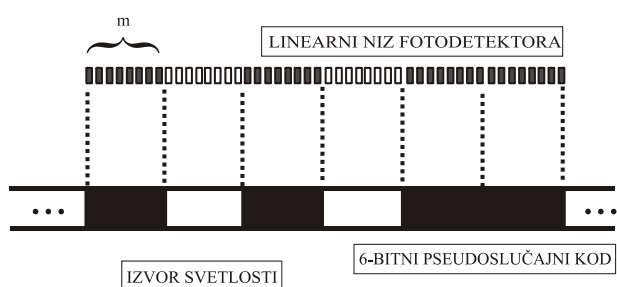
II. METODA PARALELNOG OČITAVANJA PSEUDOSLUČAJNOG BINARNOG KODA

Kako bi se realizovao apsolutni pseudoslučajni enkoder, koji ne bi zahtevao inicijalno kretanje prilikom startovanja [1], može se primeniti linearni niz fotodetektora za očitavanje pseudoslučajnog koda sa diska enkodera. Inicijalno kretanje pokretnog mernog sistema je potrebno kod pseudoslučajnog enkodera sa serijskim očitavanjem koda kako bi se formirala prva validna kodna reč nakon startovanja mernog sistema. Takođe, ukoliko dođe do prekida napajanja enkodera ili se detektuje greška u merenju pozicije potrebno je inicijalno kretanje radi formiranja pseudoslučajne kodne reči.

Metod paralelnog očitavanja pseudoslučajnog binarnog koda može se postići primenom CCD senzora sa linearnim nizom fotodetektora.

Na slici 1 prikazan je rad pseudoslučajnog apsolutnog enkodera primenom metode paralelnog očitavanja koda [6], pri čemu se jedne strane kodne trake nalazi izvor svetlosti dok je sa druge strane linearni niz fotodetektora. Kodna traka je

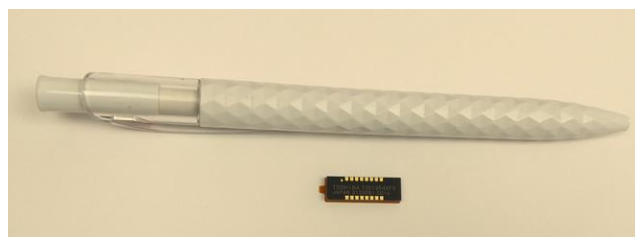
sastavljena od prozirnih i neprozirnih polja, širina svakog polja odnosno, pseudoslučajnog bita, veća je od širine fotoelemenata linearnog niza fotodetektora kako bi bilo moguće očitavati bitove pseudoslučajnog koda. Da bi se odredila apsolutna pozicija pseudoslučajnog enkodera neophodno je očitati n uzastopnih bitova sa pseudoslučajne kodne trake. Svaki pseudoslučajni bit očitava se sa kodne trake uz pomoć m fotodetektora. Primera radi, prikazan je 6-bitni pseudoslučajni binarni kod ...101011... i linearni niz fotodetektor gde je broj fotodetektora koji očitava jedan bit $m=8$. Nakon primene linearnog niza fotodetektora, sa pseudoslučajne kodne trake dobija se sledeći niz na izlazu sistema za očitavanje koda ..11111110000000011111111000000011111111111111111...



Sl. 1. Očitavanje pseudoslučajnog koda primenom metode paralelnog očitavanja koda

Rezolucija i tačnost očitavanja pseudoslučajnog koda zavise od karakteristika linearnog niza fotodetektora. Najvažniji parametri senzorskog modula sa linearnim nizom fotodetektora su: razmak između fotodetektora, broj fotodetektora, veličina fotodetektora, tip fotodetektora, napon napajanja, dodatne zaštite na primer u vidu elektronskog zatvarača ("electronic shutter") koji izlazni napon održava konstantnim bez obzira na varijacije intenziteta svetlosti. Kompanije kao što su iC-Haus GmbH [7], Hamamatsu company [8], Sensors Unlimited [9], Taos [10], Toshiba [11] samo su neki od proizvođača komercijalnih linearnih nizova fotodetektora. sa različitim širinama fotoosetljivog elementa koji su reda 400 μm , 100 μm , 50 μm , 25 μm , itd.

U radu se koristi optički modul TCD1254GFG kompanije Toshiba (slika 2), koji sadrži 2500 fotodetektora, dimenzije fotodetektora su 5,25 μm \times 64 μm sa razmakom između fotodetektora 5,25 μm . Može se uočiti i da je sama dimenzija optičkog modula svega 13,371 mm.



Sl. 2 Fotografija optičkog modula Toshiba TCD1254GFG

III. ANALIZA PRIPREME LINEARNOG NIZA FOTODETEKTORA KOD PSEUDOSLUČAJNIH ABSOLUTNIH ENKODERA

Optički modul Toshiba TCD1254GFG sa 2500 foto elemenata može raditi na frekvencijama od -4 MHz, vreme jednog očitavanja svih piksela senzora je 10 ms. Vrednost napona napajanja senzorskog modula iznosi 4 V.

Analiziraće se primena prethodno opisanog senzora, linearnog niza fotodetektora, za očitavanje pseudoslučajnog koda različite rezolucije. Najpre se senzor koristi za očitavanje 16-bitnog pseudoslučajnog koda, pri čemu se svaki bit očitava sa 8 fotodetektora (piksela), slika 3a. Za očitavanje ovog koda iz senzora bi se koristio sledeći broj piksela

$$16 \text{ bita} \times 8 \text{ piksela} = 128 \text{ piksela}$$

Zatim, ako se koristi za očitavanje 8-bitnog pseudoslučajnog koda, pri čemu se svaki bit očitava sa 64 piksela, broj upotrebljenih piksela iz senzora iznosi, slika 4b:

$$8 \text{ bita} \times 64 \text{ piksela} = 512 \text{ piksela}$$

Potreban prečnik diska enkodera koji bi bio odgovarajući za očitavanje pseudoslučajnog koda definisane rezolucije prethodno predstavljеним senzorom bi bio:

a) za slučaj 16-bitnog koda dužine $2^{16} - 1 = 65535$ bita

$$5.25 \mu\text{m} \times 8 \text{ piksela} \times 65535 \text{ bita} = 2 r_{16} \pi$$

$$2 r_{16} = 876.582 \text{ mm}$$

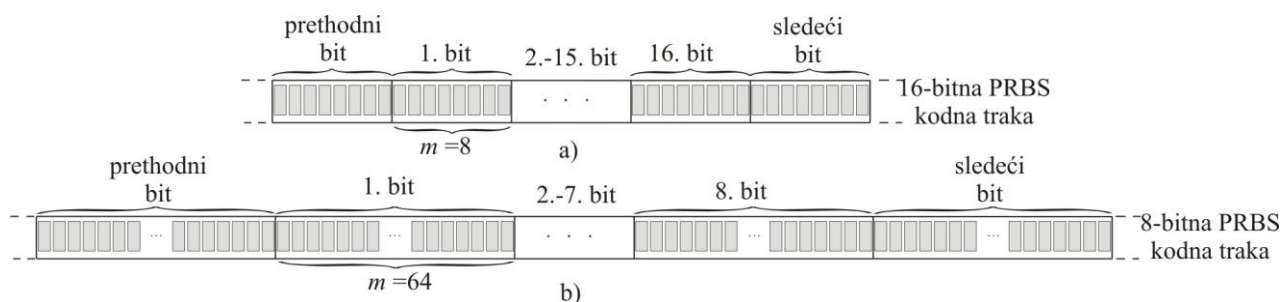
Može se uočiti da je prečnik diska suviše veliki za praktičnu primenu.

b) za slučaj 8-bitnog koda dužine $2^8 - 1 = 255$ bita

$$5.25 \mu\text{m} \times 64 \text{ piksela} \times 255 \text{ bits} = 2 r_8 \pi$$

$$2 r_8 = 27.286 \text{ mm}$$

Sada je prečnik diska enkodera pogodan za praktičnu primenu.

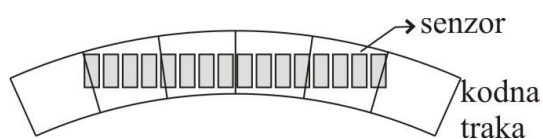


Slika 3. Paralelno očitavanje pseudoslučajnih kodova različite rezolucije

Može se zaključiti da je sa povećanjem rezolucije pseudoslučajnog koda potreban veći prečnik diska enkodera, potrebno je naći kompromisno rešenje između broja fotodetektora koji će se koristiti za očitavanje jednog bita i rezolucije pseudoslučajnog koda.

Princip merenja ugaone pozicije kod ovako projektovanih pseudoslučajnih absolutnih enkodera je baziran na određivanju grube pozicije koja ima istu rezoluciju kao pseudoslučajna binarna sekvenca, kao i na povećanju rezolucije merenjem fine pozicije na osnovu očitavanja istog bita pseudoslučajnog koda sa m susednih fotodetektora. Definiše se kodna reč koja predstavlja nultu poziciju enkodera prilikom njegovog montiranja na osovinu motora. Očitava se izlaz senzora, linearnog niza fotodetektora, ukoliko se dobije ista sekvenca nula i jedinica, ponavlja se očitavanje zato što nije bilo kretanja. Zatim se vrši detekcija redoslednih brojeva fotodetektora koji definišu prelaze između nizova nula i jedinica. Broj fotodetektora m linearnog niza fotodetektora kojim se očitava jedan bit pseudoslučajnog koda je definisan prilikom projektovanja enkodera. Broj očitanih uzastopnih nula ili jedinica po jednom bitu koda na izlazu senzora će varirati u industrijskim uslovima rada enkodera od definisanog broja. Analizom sekvence nula i jedinica u izlaznom signalu, na osnovu redoslednih brojeva, definišu se granice bita i određuje se fina pozicija. Ako nema skoka fine pozicije od vrednosti 0 do vrednosti $(m-1)$ i obrnuto, daje se informacija o tekućoj poziciji. Kada se javi skok fine pozicije određuje se smer rotacije i rekonstruiše se kodna reč, a zatim se konvertuje iz pseudoslučajnog u prirodni kod. Očitavanje jednog bita pseudoslučajne binarne sekvence sa m fotodetektora je iskorišćen za povećanje rezolucije merenja ugaone pozicije u odnosu na samu rezoluciju pseudoslučajne binarne sekvence.

Pseudoslučajni absolutni enkoder je složena opto-elektromehanička komponenta koja je u industriji pod različitim spoljašnjim negativnim uticajima. Neki od izvora grešaka su ekscentricitet i eliptičnost diska enkodera, zaprljanje kodne trake, neprecizno odštampana kodna traka, vibracije, temperatura, itd. Zakrivljenje kodne trake i nejednako osvetljenje fotodetektora na ivicama kodnih bitova može takođe doprineti greškama očitavanja koda, slika 4.



Sl. 4. Izvor greške očitavanja koda

IV. PROVERA ISPRAVNOSTI PSEUDOSLUČAJNOG KODA DISKA POZICIONOG ENKODERA

Fizička realizacija diska pozicionog enkodera podrazumeva niz postupaka pri kojima je moguće uneti greške, koje dalje mogu dovesti do nefunkcionalnosti krajnjeg uređaja. Greške mogu biti unete u fazi iscrtanja pseudoslučajnih traka u softveru za generisanje grafičkih prikaza, ali i u fazama

fizičke izrade diska.

Prilikom izrade crteža, pseudoslučajna sekvenca bitova se interpretira tamnim (neprozirnim) (logička nula) i svetlim (prozirnim) (logička jedinica) poljima. S obzirom na to da pseudoslučajna sekvenca može imati veliku dužinu (npr. 1024, što odgovara rezoluciji od 10 bita), i da operater manuelno popunjava predviđena polja, postoji velika mogućnost pogrešnog unosa vrednosti bita. Ne postoji mogućnost automatskog (programiranog) iscrtanja pseudoslučajnih sekvenci "nula" i "jedinica" u *vector graphics* formatu. Eventualna greška u ovoj fazi, koja bi bez provere bila otkrivena tek nakon ugradnje diska u uređaj, dovela bi do nepotrebnih troškova izrade diska kao i gubitka vremena. Kako postoji velika verovatnoća pojave greške u ovoj fazi izrade diska, neophodno je izvršiti pouzdanu proveru njegove ispravnosti.

Faza fizičke izrade diska podrazumeva niz aktivnosti kao što su izrada filma, fotolitografiju i ecovanje. Izrada filma se vrši tehnologijom koja poržava rezoluciju od 60 μm . U fotolitografskom postupku nejasne konture tamnih i svetlih polja, mogu nastati u slučaju nepravilnog postavljanja folije filma sa crtežom kodnih traka na pločicu diska (potrebno je da strana filma na kojoj je štampa bude uz površinu pločice pri osvetljavanju UV zracima kako ne bi došlo do rasipanja UV zraka na ivicama tamnih polja i pojave nejasnih kontura na samom disku). Nakon fotolitografije vrši se ecovanje. Usled nepreciznosti ovih postupaka može doći do promene dimenzija tamnih i svetlih polja, gubitka oštine ivica polja, kao i njihovog pomeranja, usled čega kasnije pri korišćenju diska može doći do očitavanja pogrešne informacije. Zato se predlaže pouzdana provera ispravnosti diska i nakon ove faze.

Disk 10-bitnog ($n = 10$) pseudoslučajnog enkodera sadrži 3 koncentrične trake, slika 5. Spoljna traka je inkrementalna traka dužine $2^{n+1} = 2048$ bita (naizmenično poredanih "nula" i "jedinica"). Dve unutrašnje trake su pseudoslučajne trake dužine $2^n = 1024$ bita.



Sl. 5. Izgled dela diska pseudoslučajnog pozicionog enkodera

Za pouzdanu proveru ispravnosti iscrtanih pseudoslučajnih traka iskorišćena je mogućnost da se slika tj. fajl u *bitmap* formatu, u programu MATLAB [12] može jednoznačno predstaviti matricom čiji elementi nose informaciju o

pikselima slike. Dimenzije matrice odgovaraju dimenzijama slike izražene u broju piksela. *Bitmap* fajl mora biti pripremljen u *grayscale* modu, što za posledicu ima predstavljanje piksela, tj. elemenata matrice, celim brojevima u opsegu [0, 255]. Elementi matrice (slike) mogu biti predstavljeni samo vrednostima 0 i 1, ali zbog vizuelizacije potreban je i "sivi" piksel, odnosno, zadržan je dati opseg. Vrednošću 0 predstavlja se potpuno crni piksel, vrednošću 255 predstavlja se potpuno beli piksel, dok se vrednošću 128 predstavlja sivi piksel.

Potrebno je poznavati koordinate centra diska enkodera (X_0, Y_0), kao i poluprečnike koncentričnih kružnica kojima su ograničene kodne trake. Predviđeno je inicijalno softversko određivanje ovih parametara.

Analiza *bitmap* fajla crteža kodnih traka, predstavljenih matricom na prethodno opisani način, vrši se očitavanjem vrednosti piksela po kružnoj putanji određenog poluprečnika sa centrom u (X_0, Y_0). S tim u vezi, analiza se svodi na ispitivanje elemenata matrice primenom polarnih koordinata (r, φ). Ceo krug (360°) se deli na $P=100 \cdot 2^{n+1}$ ravnomerno raspoređenih tačaka sa polarnim koordinatama (r, φ_i) $i=1, \dots, P$. Zatim se polarne koordinate transformišu u Dekartove koordinate (x_i, y_i) u kojima se ispituje vrednost elementa matrice. Može se uočiti da je za rezoluciju uzorkovanja uzet ugao koji je 100 puta manji od ugla koji na disku zauzima „bit“ sa najmanjom ugaonom širinom (u ovom slučaju „bit“ na inkrementalnoj traci). Ovako određena rezolucija uzorkovanja obezbeđuje pouzdanu detekciju prelaza između bitova na inkrementalnoj traci.

Na slici 5. prikazan je detalj traka enkodera. Pri detektovanom prelazu kod inkrementalne trake, za isti ugao na kome je detektovan prelaz φ_i očitava se piksel - element matrice na polupečnicima koji odgovaraju sredinama pseudoslučajnih traka. Očitani pikseli svih traka su na slici 5. predstavljeni sivom bojom. U zavisnosti od vrednosti elementa matrice ustanovljava se da li bit pseudoslučajne trake nosi informaciju o logičkoj nuli ili logičkoj jedinici. Ove vrednosti se pamte u posebnim nizovima u programu. Nakon očitavanja svih bitova pseudoslučajnih traka, sadržaj ovih nizova se poredi sa tačnim pseudoslučajnim kodom koji se učitava preko ulaznog fajla i određuje da li postoji greška u njenoj poziciji.

IV. ZAKLJUČAK

U radu se predlaže očitavanje pseudoslučajnog binarnog koda primenom optičkog modula sa integrisanim nizom fotodetektora primenom metode paralelnog očitavanja koda. Razmatrana su ograničenja prilikom primene senzora TCD1254GFG kompanije Toshiba za očitavanje pseudoslučajnog koda kod optičkog obrtnog pseudoslučajnog enkodera. Analizirani su parametri kao što su prečnik diska i rezolucija enkodera u cilju nalaženja kompromisnog rešenja. Istaknuti su i neki od izvora grešaka u samoj realizaciji enkodera. Dat je i postupak provere ispravnosti projektovanja i iscertavanja pseudoslučajnih kodnih traka na tehničkom

crtežu kao i provera samog diska nakon izrade pre same ugradnje. U cilju daljeg razvoja predloženog rešenja potrebno je ispitati mogućnost primene drugih softverskih paketa koji bi doveli do ovakvih rezultata.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. (Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada NIO u 2022. godini, evidencioni broj 451-03-68/2022-14/200102).

LITERATURA

- [1] M. Arsić, D. Denić, "New pseudorandom code reading method applied to position encoders", *Electronics Letters*, vol.29, pp. 893-894, 1993.
- [2] D. Denić, G. Miljković, "Code reading synchronization method for pseudorandom position encoders", *Sensors and Actuators A-Phys.* vol. 150, pp. 188-191, 2009.
- [3] D. Denić, I. Stojković, "Pseudorandom/natural code converter with parallel feedback logic configuration", *Electronics Letters*, vol. 46, pp. 921-922, 2010.
- [4] J.T.M. Stevenson and J.R. Jordan, "Absolute position measurement using optical detection of code patterns", *J. Phys E. Sci. Instrum.* 21, pp. 1140-1145, 1988.
- [5] H. Khalifallah, E.M. Petriu, F.C.A. Groen, "Visual position recovery for an automated guided vehicle", *IEEE Trans. Instrument and Measurement*, vol. 41, no. 6, pp. 906-910, 1992.
- [6] D. Denić, I. Randelović, M. Rančić: "High-resolution pseudorandom encoder with parallel code reading", *Electronics and electrical engineering* Nr 7(56), Kaunas, Litvania, pp. 9-14, 2004.
- [7] www.ichaus.com
- [8] www.hamamatsu.com
- [9] www.sensorsinc.com
- [10] www.taosinc.com
- [11] www.toshiba.com
- [12] www.mathworks.com

ABSTRACT

Accurately and reliable measurement of angular position is a requirement of many modern moveable systems in industry and other fields. Pseudorandom optical absolute encoders offer good resolution as well as reliability and flexibility in operation. The paper analyses the application the linear array of photodetectors for parallel pseudorandom code reading to obtain a true absolute encoder, which, unlike the classical one, has one code track regardless of resolution. The characteristics of the applied sensor are considered, as well as the limitations of its application for pseudorandom code reading. In order to avoid errors when designing the encoder disk, a method of its verification after design based on image processing is proposed. Also, it is possible to check the quality of the disk after its realization.

Application of linear array of photodetectors in optical pseudorandom position encoders

Ivana Randelović, Dragan Denić, Goran Miljković i Aleksandar Jocić