

# Primena senzora tipa Kinect u snimanju trajektorija zglobova šake

Sofija Spasojević, Branko Karan

**Apstrakt**—Rad prikazuje jedan pristup u merenju 3D pozicija karakterističnih zglobova ljudske šake korišćenjem senzora tipa Kinect, kao jeftine alternative skupim vizuelnim sistemima. Navedene su osnovne karakteristike ovog senzora i ukratko je opisan kalibracioni model i način integracije parametara kalibracije u proces izračunavanja 3D koordinata izabranih tačaka u prostoru. Analizirana je ostvarena tačnost u merenju 3D koordinata zglobova duž primera trajektorije hvatanja cilindra. Analiza je sprovedena posmatranjem devijacija izmerenih dužina pojedinih segmenata prstiju. Uočene su značajne razlike grešaka merenja u zavisnosti od pozicije zgloba na šaci.

**Cljučne reči**—Senzor Kinect; trajektorije zglobova šake; tačnost 3D senzora.

## I. UVOD

Razvoj tehnika za snimanje pokreta ljudske šake je kontinualno u fokusu interesovanja inženjera i istraživača iz oblasti robotike, posebno onih orijentisanih ka humanoidnoj robotici. Rastuća zainteresovanost za ovaj problem potiče od dva povezana, ali pritom različita zadatka: programiranje trajektorije i upravljanje robotskom šakom (hvatanje objekata, fina manipulacija) i prepoznavanje gestova. Sa stanovišta implementacije sistema za prikupljanje podataka, glavna razlika između ove dve aplikacije je u željenom nivou tačnosti: prva obično nameće uslov strogo preciznih 3D merenja, dok su kod druge zahtevi za tačnošću relaksiraniji. Još jedna važna razlika može da se napravi sa stanovišta potrebnog nivoa detalja u vezi sa brojem praćenih tačaka ljudske šake. Aplikacije planiranja trajektorije često zahtevaju veoma jednostavne modele šake: u ekstremnom slučaju za realizaciju robotske trajektorije dovoljno je da sistem za snimanje pokreta prati samo položaj predmeta koji se drži ljudskom šakom. S druge strane, u zadacima prepoznavanja pokreta šake, potreban broj tačaka za praćenje se povećava, jer se često zahteva praćenje kretanja prstiju ili čak kretanje pojedinih segmenata prstiju.

U obe oblasti primene, snimanje pokreta šake se vrši pretežno pomoću preciznih vizuelnih sistema, koji obično uključuju dve ili više industrijskih kamera visokih performansi i set specijalnih markera precizno postavljenih na

izabranim pozicijama tj. na zglobovima prstiju šake čije se kretanje prati [1]. Glavni nedostatak ovakvih sistema je skupa oprema. Pored toga, neki od markera mogu da ne budu vidljivi u nekim delovima snimanja kretanja. Ovaj problem se obično rešava ili povećanjem broja kamera kako bi se snimanje vršilo iz više različitih pozicija ili softverski, proširivanjem algoritma očitavanja podataka uvođenjem dodatnih pretpostavki o mogućem položaju nevidljivih markera. Nešto jeftinije rešenje je primena tzv. senzorskih rukavica koje mogu biti napravljene korišćenjem različitih tehnologija i mogu imati različite nivoe tačnosti [2]. Međutim, sistemi koji se oslanjaju na upotrebu senzorskih rukavica zahtevaju čestu rekalkibraciju senzora, što može samo po sebi da predstavlja problem i usporava proces snimanja. Osim toga, za kalibraciju senzora često je neophodno korišćenje vizuelnog sistema.

U ovom radu, akcenat je na istraživanju koje ispituje opravdanost korišćenja jeftinijih tehnika praćenja trajektorija zglobova ljudske šake. Istraživanje sa nadovezuje na razvoj i upravljanje Pupinovom veštačkom šakom (Sl. 1) u cilju ispitivanja njenih karakteristika i mogućnosti primene.



Sl. 1. CAD model Pupinove veštačke šake [3]

## II. POSTUPAK ODREĐIVANJA POZICIJA ZGLOBOVA

Kao alternativa skupim vizuelnim sistemima, za potrebe određivanja pozicija zglobova šake u 3D prostoru primenjen je Kinect uređaj (Sl. 2), razvijen od strane Microsofta [4]. Uređaj Kinect sastoji se od kamere u boji i dubinskog senzora (infracrveni projektor u kombinaciji sa infracrvenom kamerom). Iako je prvobitno bio namenjen komercijalnoj upotrebi u računarskim igrama u kombinaciji sa igračkom konzolom XBOX 360, zbog solidnih karakteristika i mnogobrojnih mogućnosti primene, ovaj uređaj je postao aktuelna tema i sastavni deo mnogih istraživanja u više različitih naučnih oblasti, a ostvaruje primenu i u konkretnim

Sofija Spasojević – Institut Mihajlo Pupin, Centar za robotiku, Volgina 15, 11060 Beograd, Srbija (e-mail: [sofija.spasojevic@pupin.rs](mailto:sofija.spasojevic@pupin.rs)).

Branko Karan – Institut tehničkih nauka Srpske akademije nauka i umetnosti, Knez Mihailova 35, 11001 Beograd, Srbija (e-mail: [branko.karan@itn.sanu.ac.rs](mailto:branko.karan@itn.sanu.ac.rs)).

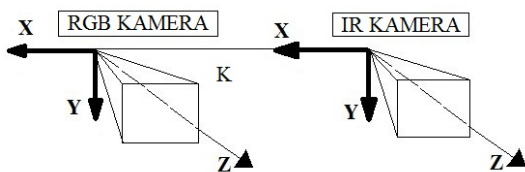
inženjerskim realizacijama i tehničkim rešenjima. Dostupnost više različitih besplatnih softverskih paketa, kao i jednostavna integracija, prenosivost i prilagodljivost, dodatno pospešuju opravdanost korišćenja Kinect uređaja.



Sl. 2. Kinect uređaj

Da bi se povećala tačnost Kinect-a, korišćeni su kalibrisani podaci. Urađena je zajednička kalibracija kamere u boji i infracrvene kamere. Rezultati kalibracije se dobijaju u formi unutrašnjih parametara za svaku od kamera ponaosob i spoljašnjih parametara koji opisuju relativnu transformaciju između kamere u boji i infracrvene kamere. Na osnovu ovih parametara formiran je kalibracioni model [5] kome je pridružen dubinski model [6, 7].

Kinect ima mogućnost generisanja tri toka podataka – (1) RGB tok, koji se dobija pomoću kamere u boji, (2) IR tok podataka, koji predstavlja sirovi, neobrađeni tok dobijen pomoću infracrvene kamere i (3) dubinski tok, koji predstavlja obrađeni IR tok unutar Kinect uređaja. Procesirana dubinska mapa sadrži informacije o udaljenosti tačaka od senzora, izražene u mm. Obzirom na orijentaciju koordinatnih sistema kamera Kinect-a (Sl. 3), ove vrednosti uz korekciju primenom dubinskog modela, ujedno predstavljaju i Z-koordinatu 3D tačkaka u prostoru. Dubinski model je formiran na osnovu analize stvarnih rastojanja u zavisnosti od rastojanja dobijenih pomoću Kinect senzora. Dobijena zavisnost je opisana parametrima, koji kroz odgovarajući model (1) koriguju generisana rastojanja u cilju povećanja tačnosti.



Sl. 3. Orijentacija koordinatnih sistema kamera Kinect-a

$$\frac{1}{Z_c} = \frac{1}{c_1 Z} + c_0 \quad (1)$$

U relaciji (1) Z je vrednost direktno generisana pomoću Kinect-a i očitana iz dubinske mape, dok je  $Z_c$  korigovana vrednost u skladu sa parametrima dubinskog modela. Za parametre  $c_0$  i  $c_1$  dobijene su sledeće vrednosti (2):

$$c_0 = 0.0016, \quad c_1 = 0.9908 \quad (2)$$

X i Y koordinate 3D tačke se određuju u dva koraka. Prvi korak je detekcija markera kojima su obeleženi zglobovi i njihove pozije (x, y) u RGB toku podataka (Sl. 4), a drugi korak je primena kalibracionih parametara u izračunavanju 3D koordinata prema relaciji (3).

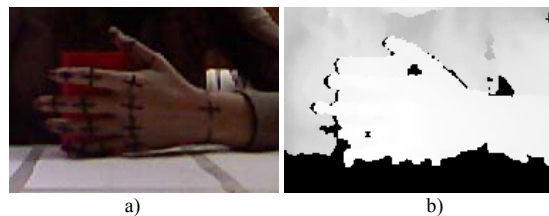
$$X = \frac{(x - c_{xRGB}) \cdot Z_c}{f_{xRGB}}$$

$$Y = \frac{(y - c_{yRGB}) \cdot Z_c}{f_{yRGB}} \quad (3)$$

U prethodnoj relaciji (x, y) je pozicija markera u RGB toku podataka, ( $c_{xRGB}, c_{yRGB}$ ) je pozicija principijalne tačke kamere u boji, dok ( $f_{xRGB}, f_{yRGB}$ ) predstavlja žižnu daljinu kamere u boji izraženu kroz jedinice horizontalnih i vertikalnih piksela.

Da bi se dobijene X i Y koordinate uspešno pridružile prethodno izdvojenoj Z koordinati, u cilju određivanja kompletne pozicije neke tačke u 3D prostoru, neophodno je sinhronizovati RGB i dubinski tok podataka, kako bi se svakoj poziciji u RGB toku pridružila tačna dubinska vrednost. Usled položaja kamera (Sl. 3), primenjuje se korekcija dubinskog toka do potpunog poklapanja sa RGB tokom podataka.

Bitna karakteristika dubinskih senzora je radni opseg i za razmatrani uređaj Kinect XBOX 360 on leži u granicama od 60 cm do 4 m. Tačnost senzora se menja sa rastojanjem, odnosno greška merenja se povećava sa porastom udaljenosti od senzora. Na osnovu ranije sprovedenih testova dobijena je greška u opsegu od 3 mm za najbliže objekte do 15 mm za objekte postavljene najdalje u okviru radnog opsega.



Sl. 4. RGB (a) i dubinska (b) slika šake sa markerima

### III. ANALIZIRANE TRAJEKTORIJE

3D koordinate zglobova snimane su tokom sekvence karakterističnog pokreta hvatanja cilindra (Sl. 4). Pokret je izabran u skladu sa jednim od mnogih zadataka koje bi veštačka šaka pričvršćena na robotsku ruku trebala da izvršava – hvatanje objekata različitih veličina i oblika.

Set praćenih zglobova obuhvata ukupno 22 karakteristične tačke na ljudskoj šaci (koren šake, zglobove i vrhove prstiju). Sve tačke od interesa prikazane su na Sl. 5.



Sl. 5. Praćeni zglobovi ljudske šake

U procesu određivanja 3D koordinata taćaka šake, najviše odstupanja primećeno je prilikom određivanja koordinata vrhova prstiju. Razlog tome je velika nepreciznost prilikom oćitavanja dubinskih vrednosti onih taćaka koje su bliske granici između dve površine sa velikom razlikom u vrednostima dubine. Kao posledica velikog gradijenta i neizbežnog šuma koji je prisutan naroćito na ivicama objekata, za taćke u ovim granićnim zonama smanjena je taćnost određivanja pozicije u 3D prostoru.

#### IV. ANALIZA TAĆNOSTI MERENJA

Dobar uvid u postignutu taćnost merenja dobija se izraćunavanjem devijacija izmerenih dućina segmenata između pojedinih zglobova tokom snimljenih trajektorija pokreta. U tom cilju, odabrano je pet razlićitih vremenskih trenutaka u kojima su merene dućine segmenata za kaćiprst i srednji prst. Ova dva prsta su odabrana iz razloga što su tokom celog trajanja sekvence pokreta svi markeri na ovim prstima bili vidljivi.

Sva merenja su izvršena u neposrednoj okolini poćetnog dela radnog opsega senzora, na udaljenosti od priblićno 70 do 80 cm kako bi se postigla što veća taćnost.

Podaci o merenjima i dobijenim rezultatima su prikazani u Tabelama I i II.

TABELA I  
IZMERENE DUĆINE SEGMENTA ZA KAĆIPRST

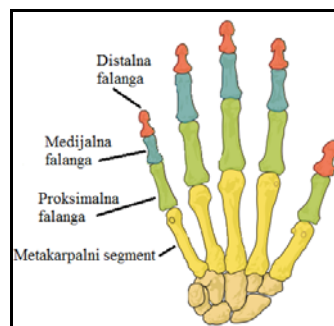
	KAĆIPRST			
	MS	PF	MF	DF
Av [cm]	8.99	4.34	2.71	2.42
Md [mm]	1.89	2.57	5.93	6.02
Ad [mm]	0.75	1.32	3.45	3.90
Ad [%]	0.84	3.04	12.70	16.11

TABELA II  
IZMERENE DUĆINE SEGMENTA ZA SREDNJI PRST

	SREDNJI PRST			
	MS	PF	MF	DF
Av [cm]	8.91	4.88	2.75	2.67
Md [mm]	1.08	2.26	4.14	8.65
Ad [mm]	0.49	1.59	1.83	3.77
Ad [%]	0.55	3.27	6.65	14.09

U navedenim tabelama, Av je srednja vrednost dućine svih izmerenih segmenata, Md je maksimalno odstupanje od srednje vrednosti, a Ad je srednje odstupanje.

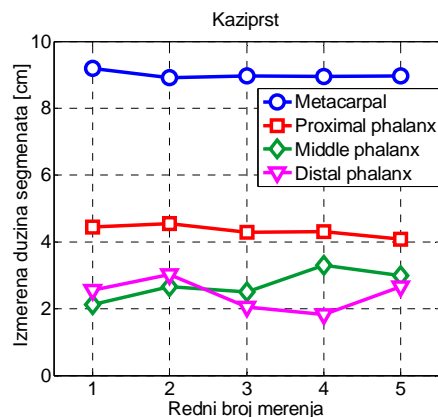
Segmenti prstiju u tabelama oznaćeni su skraćenicama: MS – metakarpalni segment, PF – proksimalna falanga, MF – medijalna falanga, DF – distalna falanga (Sl. 6).



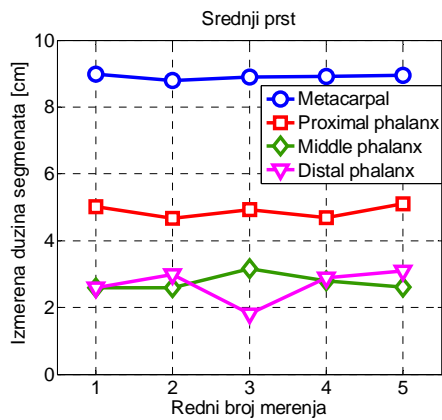
Sl. 6. Oznaćavanje segmenata prstiju

Na osnovu dobijenih rezultata moćze se zakljućiti da taćnost merenja opada idući od korena šake prema vrhovima prstiju. Veoma dobra taćnost postignuta je kod zglobova koji su locirani u centralnom delu šake. Dobijena odstupanja dućine segmenata oko ovih zglobova su oko 3% i manje. 3D pozicije taćaka na vrhovima prstiju su dobijene sa mnogo većim greškanama u odnosu na pozicije centralnih zglobova, zbog ćega odstupanja dućine završnih segmenata prstiju idu i do 16%. Razlog znaćajno manje taćnosti u slućaju pozicije vrhova prstiju potiće od prisustva šuma i velikog gradijenta u okolini ivica između površina koje imaju velike razlike u vrednostima dispartiteta, kao što je ranije pomenuto.

Na donjim graficima (Sl. 7 i Sl. 8) prikazane su varijacije izmerenih dućina segmenata kaćiprsta i srednjeg prsta duć rasmatrane trajektorije.



Sl. 7. Odstupanja izmerenih dućina segmenata kaćiprsta



Sl. 8. Odstupanja izmerenih dužina segmenata srednjeg prsta

Prikazani grafici pokazuju izuzetno mala odstupanja u merenjima dužine dva segmenta koja su najbliža korenu šake. Nasuprot tome, odstupanja izmerenih dužina segmenata se značajno povećavaju u slučaju preostala dva segmenta koja su locirana u neposrednoj okolini vrhova prstiju.

#### V. ZAKLJUČAK

Robotska šaka, razvijena po ugledu na ljudsku, može da se ugradi kao deo industrijskog, servisnog ili medicinskog robota. Ona takođe može i da postane deo ljudskog tela u jednom naprednom protetičkom uređaju.

U zavisnosti od oblasti primene, robotska šaka može da ostvaruje različite zadatke koji zahtevaju različite nivoe tačnosti, robusnosti i tolerancije prema greškama. U fabričkim postrojenjima, kod zadataka usko vezanih za konkretne delove nekog industrijskog procesa, moguće funkcije veštačke šake se odnose na pokrete hvatanja i premeštanja određenih predmeta. Industrijske aplikacije zahtevaju određen nivo tačnosti uz postojanje izvesne tolerancije u pogledu grešaka. S druge strane, korišćenje robotske šake u oblasti medicine zahteva izuzetno visok nivo preciznosti i mogućnost eventualnih grešaka se mora svesti na minimum.

Imajući u vidu svu raznovrsnost mogućih primena, veoma je teško realizovati sistem upravljanja koji će pružiti istovremeno svestranost i performanse porediva s biološkim sistemima. Zbog toga, važan aspekt realizacije sistema upravljanja robotskom šakom, a posebno šakom dizajniranom po ugledu na ljudsku šaku, predstavlja preuzimanje i implementacija bioloških veština hvatanja i manipulacije radnim predmetima.

U ovom radu prikazani su početni koraci u eksperimentima akvizicije čovekovih veština korišćenjem vizuelnog 3D senzora.

Krajnji cilj ovih eksperimenata je razvoj metoda za prikupljanje informacija o ljudskim veštinama i njihovo mapiranje u veštački uređaj.

Opisano istraživanje zasnovano je na upotrebi jeftinog Kinect uređaja. Ovaj senzor je pokazao zadovoljavajuću tačnost u praćenju trajektorija proksimalnih zglobova prstiju šake. Istovremeno, pokazana tačnost u praćenju distalnih zglobova je znatno manja i verovatno nedovoljna za aplikacije u kojima se javlja potreba za snimanjem trajektorija tokom fine manipulacije objektima u radnom prostoru. S druge strane, u problemima prepoznavanja pokreta i gestova šake, s obzirom na relaksirane zahteve za tačnošću, Kinect se može uspešno primeniti kao alternativa skupim sistemima kamera.

#### ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva za nauku Republike Srbije u okviru projekata III44008 i TR35003 i delimično od strane projekta "CARE – robotics" podržanog od SNSF SCOPES IP programa u okviru IZ74Z0\_137361/1.

#### LITERATURA

- [1] A. Erol, G. Bebis, M. Nicolescu, R.D. Boyle, and X. Twombly, "Vision-based hand pose estimation: A review," *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 108, No. 1-2, October 2007, pp. 52-73.
- [2] L. Dipietro, A. Sabatini, and P. Dario, "A survey of glove-based systems and their applications," *IEEE Trans. Syst., Man, and Cyber. C*, Vol. 38, No. 4, July 2008, pp. 461-482.
- [3] A. Rodic, B. Miloradovic, S. Popic, S. Spasojevic, B. Karan, "Contribution to Development of Modular Compliant Anthropomorphic Robot Hand", in book "New Trends in Medical and Service Robots - Theory and Integrated Applications", Ed. Doina Pisla et al., Springer monograph series "Mechanisms and Machine Science", to appear 2013.
- [4] Kinect for windows, <http://www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows/> (accessed 26.03.2012)
- [5] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol. 22, No. 11, 2000, pp. 1330-1334.
- [6] K. Khoshelham and S. O. Elberink, "Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications," *Sensors*, Vol. 12, 2012, pp. 1437-1454.
- [7] B. Karan, "Calibration of depth measurement model for Kinect-type 3D vision sensors," 21st Int. Conf. Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, Plzen, 2013.

#### ABSTRACT

This paper presents one approach for measurement of 3D positions of characteristic joints of human hand using a Kinect-type sensor as a low-cost alternative to expensive visual systems. Main properties of the sensor are indicated and a brief description of the calibration model and integration of calibration parameters in the process of calculating the 3D coordinates of selected points in space is given. Achieved accuracy in measurement of 3D coordinates of joints along sample cylinder grasping trajectory was analysed. The analysis was conducted by observing deviations in measured lengths of finger segments. Significant differences in measurement errors were found for different joints, depending on their position on the hand.

#### Application of Kinect-type sensor in acquisition of hand joint trajectories

Sofija Spasojević, Branko Karan