

# **ПОВЕЗИВАЊЕ РОБОТСКЕ И ЉУДСКЕ ШАКЕ CONNECTING ROBOTIC AND HUMAN HANDS**

**ВЕЉКО ИЋУШКИ    МИЛОШ МЕЋАВА    АЛЕКСЕЈ ГУДЕЉ**

3. и 4. разред Средње техничке школе Сомбор

**МЕНТОРИ**

**МАРИЈАНА БОГДАНОВИЋ**

дипл. инж. електротехнике, СТШ Сомбор

**ГОРАН ОПСЕНИЦА**

инж. електронике и телекомуникација, Bosch Србија

## **1. РЕЗИМЕ**

Овде иде текст резимеа. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

## 2. ПРИНЦИП РАДА И ПРАКТИЧНА РЕАЛИЗАЦИЈА

### 2. 1. Математички основи

*Модел „Киндерица”*.<sup>(1)</sup> Нек је  $x$  ортогонална пројекција врха прста на осу паралелну прсту када је опружен,  $\Delta l$  — промена дужине дела тетиве унутар прста,  $\phi_0$  — угао усека на прсту када је опружен, а  $\sigma_0 = \operatorname{tg} \frac{\phi_0}{2}$ . Врх прста роботске шаке креће се по закону (1).

$$\begin{aligned} x &= 2l (2\tau^3 + \tau^2 - \tau) \\ \tau &= \cos \left( \phi_0 - 2 \operatorname{arctg} \left( \sigma_0 - \frac{\Delta l}{6} \right) \right) \end{aligned} \quad (1)$$

*Тријангулација тачке*.<sup>(2)</sup> Нека је  $R$  тачка у простору коју две камере у сопственим координатним системима виде као  $r_1$  и  $r_2$ . Нек су „матрице камера”  $P_1$  и  $P_2$ . Знајући  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $P_1$  и  $P_2$ ,  $R$  се може наћи решавањем система једначина (2).

$$r_1 \times P_1 R = 0 \quad \wedge \quad r_2 \times P_2 R = 0 \quad (2)$$

*Сингуларна декомпозиција матрице*.<sup>(3)</sup> Свака матрица може се записати у облику производа матрица  $U \Sigma V^\dagger$ , где су  $U$  и  $V^\dagger$  ротације, а  $\Sigma$  — скалирање.

### 2. 2. Хардвер пројекта<sup>(4)</sup>

Пројекат је сегментован у две целине: систем  $\alpha$  и систем  $\omega$ . Систем  $\alpha$  бави се прихватањем и обрадом података, а систем  $\omega$  извршним делом пројекта.

Систем  $\alpha$  чине IBM-PC-компатибилан рачунар и две веб-камере постављене у хоризонталној равни, тако да су им сопствене  $x$  осе ортогоналне, а сопствене  $y$  осе паралелне. За потребе фиксирања положаја камера израђен је нарочит сталак од картона.

Електрична шема система  $\omega$  може се видети на слици . Чине га роботска шака, серво мотори и платформа Arduino Uno.

Роботска шака јесте главна компонента система  $\omega$ . Израђена је од обликованог комада шперплоче који чини основу шаке и комада баштенског црева који одговарају људским прстима. Управљање прстима врши се танким синтетичким канапима — тетивама. Сваки прст има две тетиве, тј. два степена слободе кретања. Тренутно је у употреби само једна тетива по прсту, па се прсти крећу с једним степеном слободе.

Серво мотори омогућавају регулисано повлачење тетива. Користе се серво мотори SG-5010 уграђени у подлактицу модела. За управљање моторима користи се микрокон-

тролерска платформа Arduino Uno, која генерише одговарајуће PWM сигнале. Мотори се, због велике укупне снаге, напајају лабораторијским напајањем.

### 2.3. Софтвер пројекта

Софтвер система  $\alpha$  чине програм за калибрацију камере, програм за анализу слике, програм за тријангулацију тачке, програм за одређивање управљачких бројева и програм за кодовање и слање порука систему  $\omega$ . Програмски код система  $\alpha$  писан је у програмском језику Python, помоћу библиотека `numpy`, `opencv` и `pyserial`. До тренутка писања рада нису завршени програм за анализу слике и програм за одређивање управљачких бројева.

Калибрација камере јесте операција којом се добија матрица  $K$ , која пројектује тачке простора у сопственом координатном систему камере на раван слике. Матрица  $P$ , потребна за тријангулацију тачака, јесте матрица  $K$  изражена у спољним координатама. За потребе калибрације користе се тест-слике шаховнице утврђених димензија. Калибрација камере врши се функцијом `calibrateCamera` библиотеке `opencv`, којој се прослеђују координате углова унутар шаховнице на свакој тест-слици (које се проналазе функцијом `findChessboardCorners` исте библиотеке), координате углова унутар шаховнице у њеном сопственом координатном систему и димензије тест-слика.

Програм за тријангулацију тачке решава систем једначина (2) применом сингуларне декомпозиције матрице, коју омогућава функција `svd` библиотеке `numpy`. Проблем тријангулације своди се на минимизацију  $|A\hat{R}|$  по  $\hat{R}$ , где је  $A$  матрица у зависности од  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $P_1$  и  $P_2$ . То се савладава узимањем за решење оне колоне матрице  $V$  која се (након транспонованја) множи најмањим бројем из (дијагоналне) матрице  $\Sigma$ , а то је по дефиницији крајња десна.

Програм за кодовање и слање порука кодује излаз програма за одређивање управљачких бројева у поруку облика  $\overline{A_1A_2A_3B_1B_2B_3C_1C_2C_3D_1D_2D_3E_1E_2E_3N}$ , где је  $A_i$  репрезентација у коду ASCII  $i$ -те цифре слева троцифрене декадне репрезентације броја  $A$ ,  $B_i$  — броја  $B$ , итд.  $N$  је знак кода ASCII за нови ред. Број  $A$  одговара палцу, број  $B$  кажипрсту итд. Добијену 128-битну поруку програм шаље USB комуникацијом систему  $\omega$  помоћу метода `write` класе `Serial` библиотеке `pyserial`, којој се као једини параметар прослеђује бинарна порука.

Софтвер система  $\omega$  писан је у програмском језику C++, помоћу хедера `Arduino.h`, и крајње је једноставан. Када Arduino прими поруку од система  $\alpha$  (детектује подизање заставице `available` класе `Serial`), чува је у ниску предвиђену за ту намену помоћу

метода `readString` класе `Serial`, цепа је на трословне сегменте и одбацује знак за нови ред. Трословне сегменте потом тумачи као декадне бројеве помоћу метода `toInt` класе `String` те на основу њих генерише PWM сигнале за серво моторе прстију.

### **3. РЕЗУЛТАТ**

Направљен је функционалан модел леве шаке користећи шперплочу, баштенско црево, синтетички канап и серво моторе.

Модел шаке повезан је на платформу `Arduino Uno` и постигнуто нумеричко управљање моторима.

Успешно је спрегнут `Arduino` са рачунаром USB комуникацијом. `Arduino` исправно тумачи шаблонске поруке послате са рачунара.

Склопљен је систем камера које дају слике спремне за обраду. Извршена је калибрација камера, чиме су одређене матрице камера потребне за тријангулацију тачке.

Урађена је тријангулација тачака на тест-примеру.

### **4. ЗАКЉУЧАК**

До тренутка писања рада, циљ пројекта није испуњен. Ипак, савладан је велики део изазова на том путу. Преостаје реализација анализе слика шаке и примена модела „Киндерица” на превођење координата прстију у управљачке сигнале.

План даљег рада подразумева пре свега сегментацију слике на основу боје, пројекцију прстију уз претпоставку да су опружени прсти паралелни сопственим *y* осама камера, фитовање модела „Киндерица” кроз мерења трајекторија прстију и примену фитоване функције на управљање прстима. Решавање тих проблема испуњава циљ пројекта. Након тога, рад се може побољшати увођењем технике издвајања обележја у анализу слике ради елиминације зависности од боје и анализом равни длана у циљу слободнијег постављања шаке пред камере. Проблем увођења другог степена слободе кретања прстију последњи је у низу будућих задатака.

### **5. ЗАХВАЛНИЦА**

Захваљујемо Денису Фаркашу, који је такође учествовао у изради пројекта, на залагању и помоћи. Захваљујемо нашим менторима, Маријани Богдановић и Горану Опсеници, на стручном навођењу ка циљу пројекта и издвојеном времену. Захваљујемо Средњој

техничкој школи на простору и материјалу за рад и свим нашим професорима који су имали разумевања за наше изостајање с наставе. Захваљујемо Милораду Недељкову на уступању веб-камера и Дејану Богдановићу за донацију серво мотора. Захваљујемо Лазару Добрићу на прослеђивању литературе за обраду слике применом техника машинског учења.

## 6. ЛИТЕРАТУРА И РЕФЕРЕНЦЕ

- <sup>(1)</sup>V. Iduški, M. Mećava, A. Gudelj, Model „Kinderica”, Povezivanje robotske i ljudske šake, Комбор, 2026.  
URL: <https://github.com/veljkoidjusk/povezivanjeRobotskeiLjudskeSake/blob/master/kinderica/kinderica.pdf>
- <sup>(2)</sup>R. Boomgaard, L. Dorst, Triangulation, Computer Vision, Universiteit van Amsterdam, Амстердам, 2021.  
URL: <https://staff.fnwi.uva.nl/r.vandenboomgaard/ComputerVision/LectureNotes/CV/StereoVision/triangulation.html>
- <sup>(3)</sup>M. Embree, Matrix Methods for Computational Modeling and Data Analysis, Virginia Tech, Блексбург, 2019. URL: <https://personal.math.vt.edu/embree/cmda3606/chapter6.pdf>
- <sup>(4)</sup>V. Iduški, M. Mećava, A. Gudelj, Hardver projekta, Povezivanje robotske i ljudske šake, Комбор, 2026.  
URL: <https://github.com/veljkoidjusk/povezivanjeRobotskeiLjudskeSake/blob/master/hardver/hardver.pdf>