

Ing. Michal Tölgyessy

Autoreferát dizertačnej práce

RIADENIE ROBOTICKÝCH SYSTÉMOV POMOCOU GEST

na získanie

akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe:

5.2.14 Automatizácia a riadenie

v študijnom odbore

Automatizácia a riadenie

Miesto a dátum: Bratislava, jún 2014

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA
V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Ing. Michal Tölgyessy

Autoreferát dizertačnej práce

RIADENIE ROBOTICKÝCH SYSTÉMOV POMOCOU GEST

na získanie

akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe:

5.2.14 Automatizácia a riadenie

v študijnom odbore

Automatizácia a riadenie

Miesto a dátum: Bratislava, jún 2014

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia na Ústave robotiky a kybernetiky Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ: **Ing. Michal Tölgyessy**
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky STU
Ústav robotiky a kybernetiky
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: **prof. Ing. Peter Hubinský, PhD.**
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky STU
Ústav robotiky a kybernetiky
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: **prof. Dr. Ing. Pavel Zemčík**
Vysoké učení technické v Brně
Fakulta informačních technologií
Ústav počítačové grafiky a multimédií
Božetěchova 2, Královo Pole, 61266, Brno, Česká republika

doc. Ing. Libor Hargaš, PhD.
Žilinská univerzita v Žiline
Elektrotechnická fakulta
Katedra mechatroniky a elektroniky
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná: 30. 6. 2014 o 10:00 h.

na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave, Ilkovičova 3, Bratislava, v miestnosti D424 pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce doktorandského štúdia vymenovanou predsedom spoločnej odborovej komisie 5–2–14 Automatizácia.

prof. RNDr. Gabriel Juhás, PhD.
dekan FEI STU

Obsah

1	Úvod.....	4
2	Návrh	4
2.1	Detekcia diskrétnych bodov v 3D priestore pomocou snímača Kinect	5
2.1.1	Výpočet 3D súradníc bodov hĺbkovej matice.....	7
2.2	Návrh algoritmu riadenia robota pomocou rúk	8
2.2.1	Rovina operátora	8
2.3	Návrh algoritmu riadenia robota ukázaním bodu v priestore	10
2.3.1	Princíp algoritmu.....	11
2.4	Návrh algoritmu na kooperatívne ovládanie skupiny robotov pomocou dlaní a prstov operátora	17
3	Implementácia a experimentálne overenie.....	20
3.1	Detekcia kĺbov operátora prostredníctvom snímača Kinect	20
3.2	Implementácia algoritmu riadenia robota pomocou rúk.....	21
3.3	Implementácia riadenia robota ukázaním bodu v priestore	22
3.4	Implementácia kooperatívneho ovládania skupiny robotov	23
3.4.1	Implementácia algoritmu pomocou metód spracovania obrazu.....	23
3.4.2	Overenie riešenia na multiagentovej úlohe.....	29
4	Záver	31
4.1	Prínosy práce	31
5	Použitá literatúra.....	32
6	Publikované práce autora	35

1 Úvod

Komunikácia človeka s počítačom prešla od vzniku prvých digitálnych systémov rozsiahlym vývojom. Existuje množstvo vstupno-výstupných zariadení, z ktorých mnohé sa už nepoužívajú a stále vznikajú nové. Každý bežný užívateľ PC denne používa myš, klávesnicu na zadávanie príkazov počítaču a monitor či reproduktory na získanie spätnej väzby o priebehu požadovaných operácií a výsledkoch vykonaných úloh. Pri vývoji nových foriem takejto komunikácie je veľký dôraz na rýchlosť a komfort. Dnes je bežnou súčasťou digitálnych zariadení dotykový displej, čím potreba myši či klávesnice odpadáva. Taktiež sa v praxi objavujú systémy schopné rozpoznať ľudskú reč a vykonávať príkazy bez potreby fyzického styku používateľa s akýmkoľvek vstupným zariadením. Aj keď klávesnica určite tak skoro nezanikne, trend je jasný – odbremeniť používateľa od zbytočnej námahy a umožniť mu, aby sa rozhraním stal on sám. Schopnosť komunikovať s počítačovým systémom len pomocou hlasu, pohybu alebo gestikulácie je predmetom mnohých vývojárskych tímov v oblasti vedy, výskumu, a samozrejme, aj komerčných projektov. Tento trend sa premieta aj do oblasti robotiky. Automatizované a robotické systémy prenikajú stále viac do domácností, verejného sektora, poľnohospodárstva, vojenského priemyslu i zdravotníctva, a preto sa zvyšujú nároky na prirodzenú komunikáciu s týmito systémami. Dôvod je zrejмый. Je príjemnejšie vysávaču len hlasom oznámiť, ktoré miestnosti má povysávať a nechať ho autonómne činnosť vykonať ako všetko manuálne odpracovať. Podobne, je príjemnejšie na televízor jednoducho zamávať a pohybom ruky zvoliť požadovanú stanicu ako hľadať diaľkový ovládač a dopracovať sa k výsledku stláčaním tlačidiel. V tme pri pozieraní celovečerného filmu je to dokonca praktickejšie.

Dizertačná práca poskytuje východiská pre návrh a implementáciu komplexných metód komunikácie s mobilnými robotmi bez použitia fyzických vstupných zariadení. Primárnym komunikačným rozhraním sú ruky, teda ľudská gestikulácia. Výsledkom výskumu autora je návrh, implementácia a experimentálne overenie troch samostatných vlastných algoritmov na komunikáciu človeka s robotom, resp. so skupinou robotov.

2 Návrh

V kapitole je opísaný návrh troch vlastných algoritmov na riadenie robotických systémov pomocou gest. Všetky tri vychádzajú z aktuálnych trendov a sú založené na 3D snímaní priestoru pomocou snímača Kinect. Na úvod je potrebné zdôrazniť, aká je situácia v oblasti výskumu a vývoja, a aký prínos je v problematike vôbec možný dosiahnuť. Pred niekoľkými desiatkami rokov bola oblasť vizuálnych systémov predmetom výskumu pomerne úzkeho kruhu špecialistov, ktorí mali prístup k hardvéru, softvéru a potrebným vedomostiam, materiálom, knihám, algoritmom. Dnes je situácia podľa názoru autora dizertačnej práce diametrálne odlišná. Vďaka obrovskému rozmachu elektroniky, radikálnemu zvyšovaniu výkonu a znižovaniu cien má väčšina obyvateľstva v moderných vyspelých štátoch bežne prístup k digitálnym kamerám, fotoaparátom a výkonným počítačom. Súčasťou každého bežného mobilného telefónu je digitálny fotoaparát s vysokým rozlíšením. Vďaka internetu má prístup k vedomostiam a knižniciam pre prácu s vizuálnymi systémami takmer ktokoľvek. Ďalším faktorom je, že aplikácie so zameraním na vizuálne systémy sú komerčne zaujímavé, a preto súkromné spoločnosti investujú energiu a kapitál do vlastných

výskumných tímov orientujúcich sa na túto oblasť. V rámci rozpočtu a rozsahu doktorandského štúdia nie je na akademickej pôde možné takémuto komerčnému výskumu konkurovať. Taktiež je zrejme, že firmy teoretický základ svojich algoritmov a riešení nezverejnia a v rámci akademickeho výskumu ich tak zahrnúť možné nie je.

Z uvedeného vyplýva, že je ťažké objektívne a komplexne popísať stav súčasnej problematiky v oblasti, na ktorú je táto dizertačná práca zameraná. Navrhované metódy riešia problematiku interakcie človeka s mobilným robotom, pričom vývoj bol zameraný na oblasti, ktorým v akademickej, komerčnej a hobby sfére aktuálne chýba dostatočný priestor.

2.1 Detekcia diskretných bodov v 3D priestore pomocou snímača Kinect

Z hľadiska aktuálnych trendov v oblasti 3D videnia, robotiky, softvérovej podpory a rôznorodej a rozsiahlej komunity bol pre návrh a realizáciu algoritmov zvolený snímač Kinect. Táto kapitola detailne popisuje jeho mechanizmy fungovania a matematický aparát na získanie 3D súradníc bodov hĺbkového obrazu v metrickom systéme. Je dôležité podotknúť, že neexistuje žiaden formálny dokument detailne popisujúci parametre a technológiu snímača. Väčšina následne uvedených informácií teda čerpá z experimentov rôznych výskumníkov, teoretických konceptov platiacich pre vizuálne systémy všeobecne, ako aj z patentov spoločnosti PrimeSense, ktorá Kinect vyvinula.

Základný vnútorný mechanizmus fungovania Kinect-u je [49] [50] [51] [52] [53]:

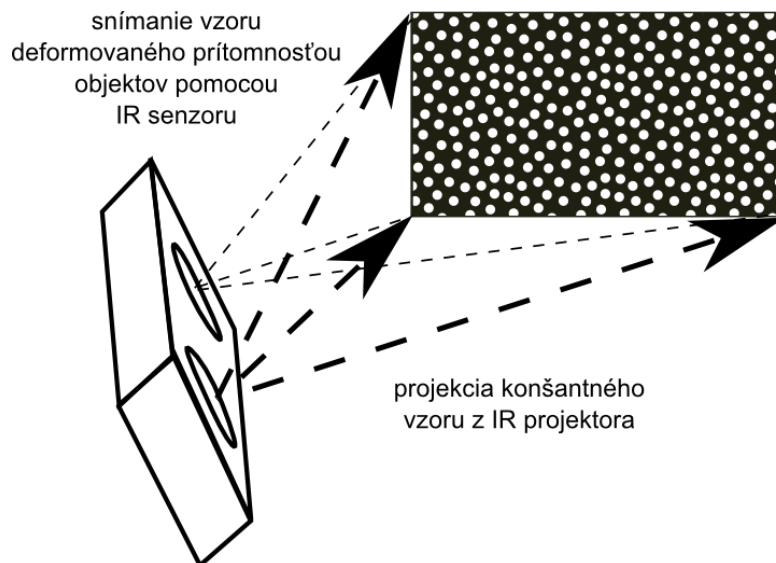
- IR projektor vysiela **konštantný** vzor svetelných bodov (v literatúre nazývaný aj štruktúrované svetlo) do priestoru pred snímačom (Obr. 1).
- Vzor je deformovaný prítomnosťou objektov v priestore, deformácie je však možné zaznamenať len snímaním z uhla, IR senzor je preto umiestnený 7,5 cm od projektora (Obr. 2).
- IR senzor sníma deformovaný vzor, pričom dochádza k disparite (posunu pixelov projektovaného voči nasnímanému vzoru).
- Štandardnými metódami triangulácie sa vypočíta vzdialenosť každého z pixelov od snímača.



Obr. 1. Reálna ukážka vzoru v IR spektre

Z patentu firmy PrimeSense je zrejme, že štruktúrované svetlo sa generuje optickou radiáciou IR svetla cez mriežku (v patente označovanú *single transparency*), ktorá prepustí len lúče tvoriace

vzor. Zjednodušene je teda možné princíp fungovania prirovnať napr. k bežnej baterke, ktorou človek svieti na papier, ktorý obsahuje diery. Na stene za papierom sa teda objaví len vzor tvorený dierkami. V patente sa taktiež uvádza, že 3D pozícia bodu sa vypočíta trianguláciou na základe horizontálneho posunu bodov (disparita), pričom kľúčové je porovnanie aktuálneho IR obrazu s referenčným vzorom, ktorý bol nasnímaný zo známej vzdialenosti. Snímanie je realizované CMOS senzorom, pred ktorým je umiestnený pásmový filter, ktorý prepustí len IR žiarenie s vlnovou dĺžkou, na ktorej vysielajú projektor. Použitý senzor je Aptina MT9M001 s rozlíšením 1280x1024 pixelov, ktoré zabezpečuje potrebnú redundanciu, aby konečná matica s rozlíšením 640x480 pixelov obsahovala čo najviac platných dát.



Obr. 2. Technológia snímania hĺbky Kinect-om

Nevýhodou použitej technológie je vznik „tieňov“ na ľavých hranách objektov. Ide o pixely v hĺbkovej matici, pre ktoré nie je definovaná hĺbka. Dôvodom je, že projektovaný vzor sa nedostane za objekt a IR senzor vplyvom posunutia je schopný takto zatienené plochy snímať. Keďže však absentuje vzor, snímač nie je schopný vypočítať disparitu, a teda ani hĺbku v danej oblasti.

Kinect taktiež nevie určiť hĺbku plôch, na ktoré dopadá priame slnečné svetlo. Je to spôsobené interferenciou s IR zložkami slnečných lúčov, ktoré presvetlia projektovaný vzor. Snímač teda nie je za denného svetla možné použiť vo vonkajšom prostredí.

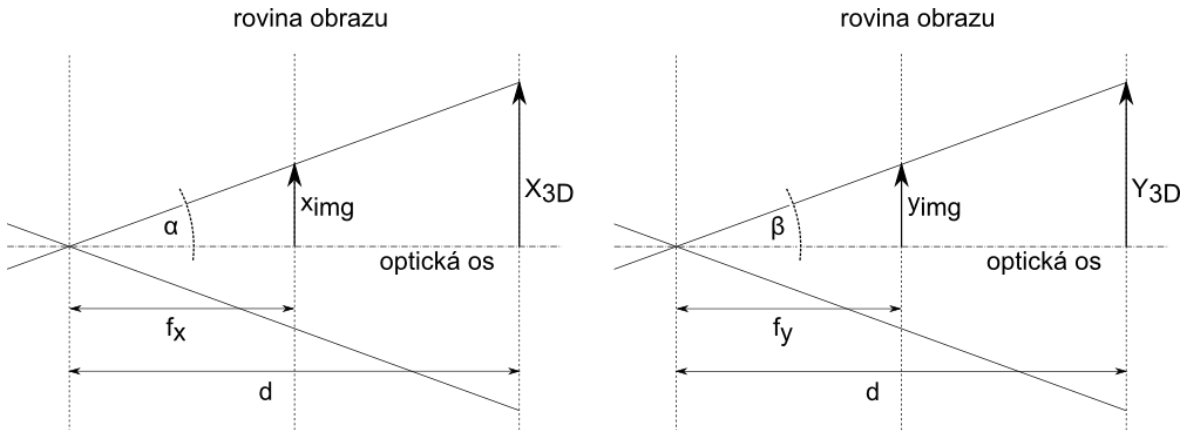
Dôležitým faktom je tiež, že hĺbkové údaje z Kinect-u nereprezentujú vzdialenosť od projektora, ale vzdialenosť od roviny snímača.

Súhrn dôležitých vlastností snímača Kinect:

- Rozlíšenie hĺbkového obrazu je 640x480 pixelov, vhodnou kalibráciou s RGB kamerou je možné získať RGBD maticu 640x480.
- Maximálna pracovná rýchlosť je 30 fps.
- Snímanie hĺbky nefunguje pri priamom kontakte so slnečným svetlom, Kinect teda nie je možné spoľahlivo použiť vo vonkajšom prostredí.
- Relatívne presné hĺbkové dáta je možné získať približne do 7 – 8 metrov.

2.1.1 Výpočet 3D súradníc bodov hĺbkovej matice

Hĺbkový údaj d , ktorý je výstupnou hodnotou zo snímača, udáva vzdialenosť roviny žiadaného bodu od roviny snímača. Bod je ďalej špecifikovaný súradnicou x a y v dvojrozmernej matici (hĺbkový obraz s rozlíšením 640x480 pixelov), čiže sa jedná o projekciu z 3D priestoru do 2D. Vzťahy na výpočet reálnych súradníc hľadaných bodov vyplývajú z dierkového modelu hĺbkovej kamery (Obr. 3), ktorý je analogický k štandardnému dierkovému modelu bežnej RGB kamery.



Obr. 3. Dierkový model hĺbkovej kamery

Reálne súradnice X_{3D} , Y_{3D} a Z_{3D} sa vypočítajú použitím goniometrických rovníc:

$$\tan \alpha = \frac{x_{img}}{f_x} = \frac{X_{3D}}{d} \Rightarrow X_{3D} = \frac{x_{img}}{f_x} \cdot d \quad (1)$$

kde x_{img} je x -ová súradnica požadovaného pixela v matici hĺbkového obrazu, f_x je ohnisková vzdialenosť pre os y , d je vzdialenosť roviny požadovaného bodu od roviny v počiatku súradnej sústavy

$$\tan \beta = \frac{y_{img}}{f_y} = \frac{Y_{3D}}{d} \Rightarrow Y_{3D} = \frac{y_{img}}{f_y} \cdot d \quad (2)$$

kde y_{img} je y -ová súradnica požadovaného pixela v matici hĺbkového obrazu, f_y je ohnisková vzdialenosť pre os x

$$Z_{3D} = d \quad (3)$$

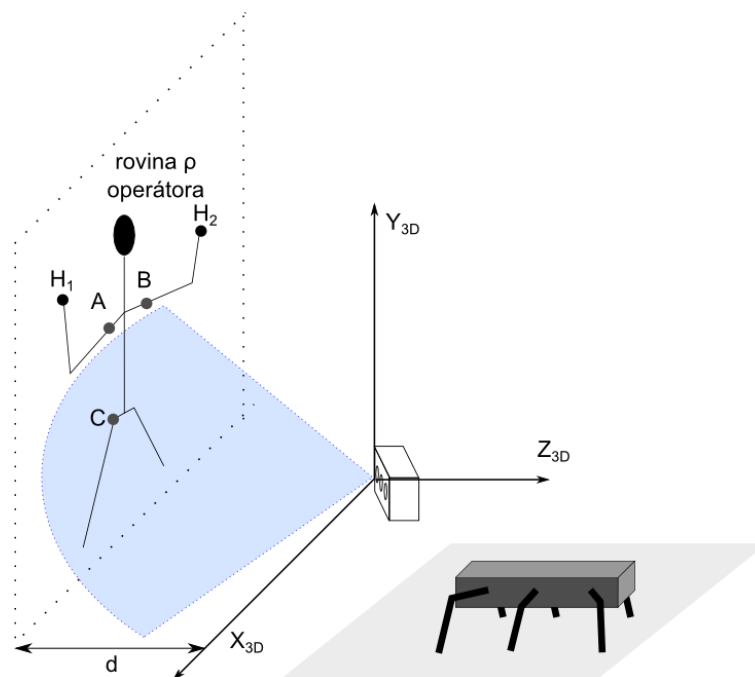
2.2 Návrh algoritmu riadenia robota pomocou rúk

Základným východiskom algoritmu je riadenie robota ľudským operátorom za pomoci oboch rúk. Zo získaných informácií sa generujú jednoduché povely pre robot, ktorý ich prijíma bezdrôtovo a vykonáva zodpovedajúci pohyb v priestore.

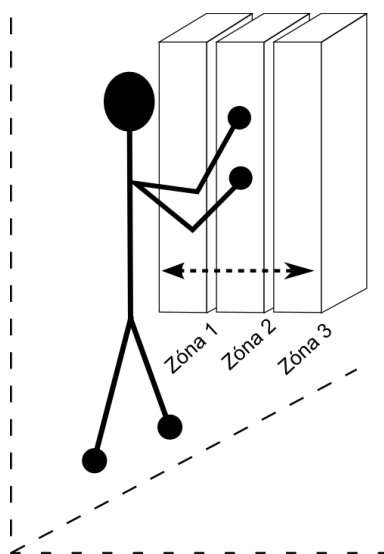
2.2.1 Rovina operátora

Jadrom algoritmu je výpočet roviny operátora v trojrozmernom priestore a lokalizácia relatívnej polohy rúk voči nej. Vo všeobecnosti je rovina definovaná tromi ľubovoľnými bodmi ležiacimi v nej, v tomto konkrétnom prípade sú to tri ľudské kĺby spĺňajúce určité kritériá. Pri riadení robota by sa ich vzájomná poloha nemala meniť, resp. meniť len minimálne, mali by určovať dobrú referenčnú rovinu voči pozícii rúk pred operátorom a mali by byť od seba dostatočne vzdialené, aby ich prípadné vychýlenie malo minimálne účinky. Takéto kritéria spĺňajú napr. ramenné kĺby v kombinácii s jedným z bedrových kĺbov. Ak operátor stojí a nie je vo výraznom predklone je rovina nimi určená pomerne presnou reprezentáciou roviny trupu. Ilustrácia získania tejto roviny ρ operátora, ktorý riadi 6-nohý robot je na Obr. 4. Pred operátorom sú definované 3 zóny, pásma rovín rovnobežných s jeho rovinou, pričom Zóna 1 odpovedá pokojovej pozícii (Obr. 5). Každá zóna je definovaná intervalom vzdialeností od roviny ρ . Gestá, ktorými operátor riadi robot sú identifikované na základe prítomnosti rúk v jednotlivých zónach:

- STOP – pravica aj ľavica v Zóne 2
- ROTÁCIA VPRAVO – pravica v Zóne 1, ľavica v Zóne 3
- ROTÁCIA VĽAVO – pravica v Zóne 3, ľavica v Zóne 1
- POHYB DOPREDU – pravica aj ľavica v Zóne 3
- POHYB DOZADU – pravica aj ľavica v Zóne 1



Obr. 4. Získanie roviny operátora riadiaceho 6-nohý robot z 3D súradníc kĺbov



Obr. 5. Zavedenie zón relatívnych voči rovine operátora

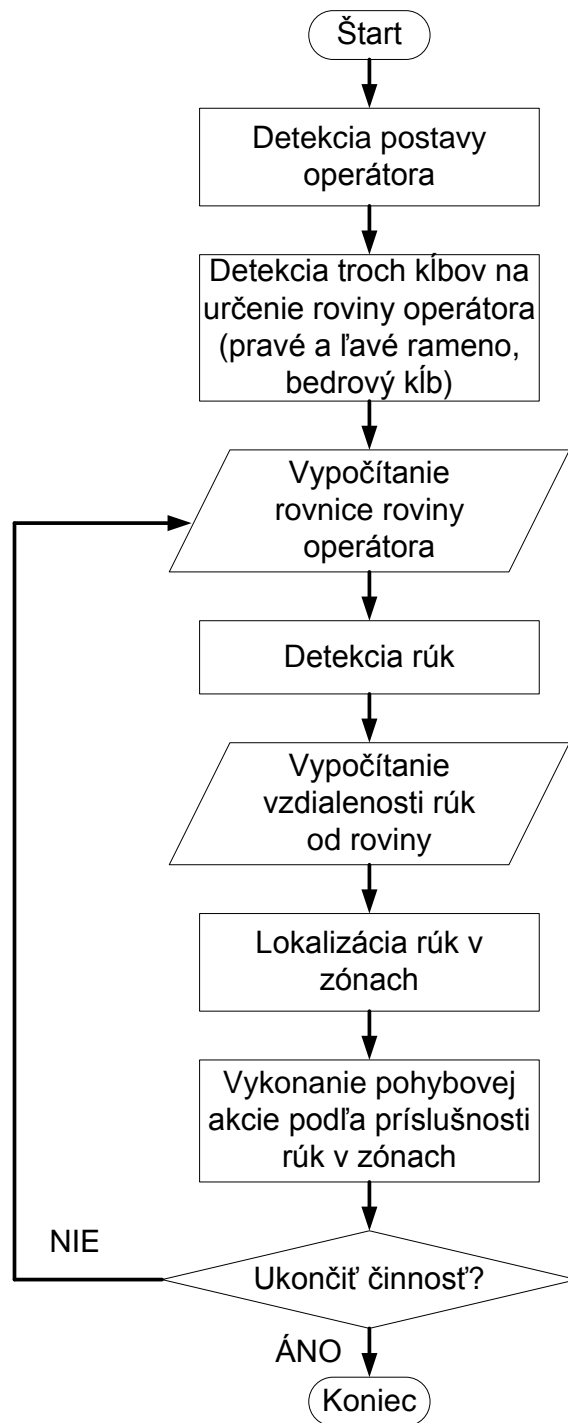
Na získanie konkrétnej zóny, v ktorej sa ruka aktuálne nachádza, je nutné vykonať tieto kroky:

1. Získať vektory \mathbf{AB} a \mathbf{AC} z bodov kĺbov operátora
2. Vypočítať normálový vektor \mathbf{n} žiadanej roviny z vektorového súčinu $\mathbf{AB} \times \mathbf{AC}$
3. Získať parametre všeobecnej rovnice roviny ρ operátora $ax + by + cz + d = 0$ dosadením vektora \mathbf{n} (parameter d sa vypočíta dosadením jedného z bodov kĺbov operátora)
4. Vzďialenosť ruky od roviny operátora sa vypočíta zo vzťahu:

$$D(H, \rho) = \frac{ax_H + by_H + cz_H + d}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (4)$$

*kde $D(H, \rho)$ je výsledná vzdialenosť ruky od roviny ρ ,
 x_H, y_H, z_H sú súradnice ruky v 3D priestore s počiatkom
v snímači Kinect, a, b, c, a d sú koeficienty roviny operátora*

Algoritmus riadenia je uvedený na Obr. 6.



Obr. 6. Vývojový diagram riadenia robota po zavedení použitia roviny operátora

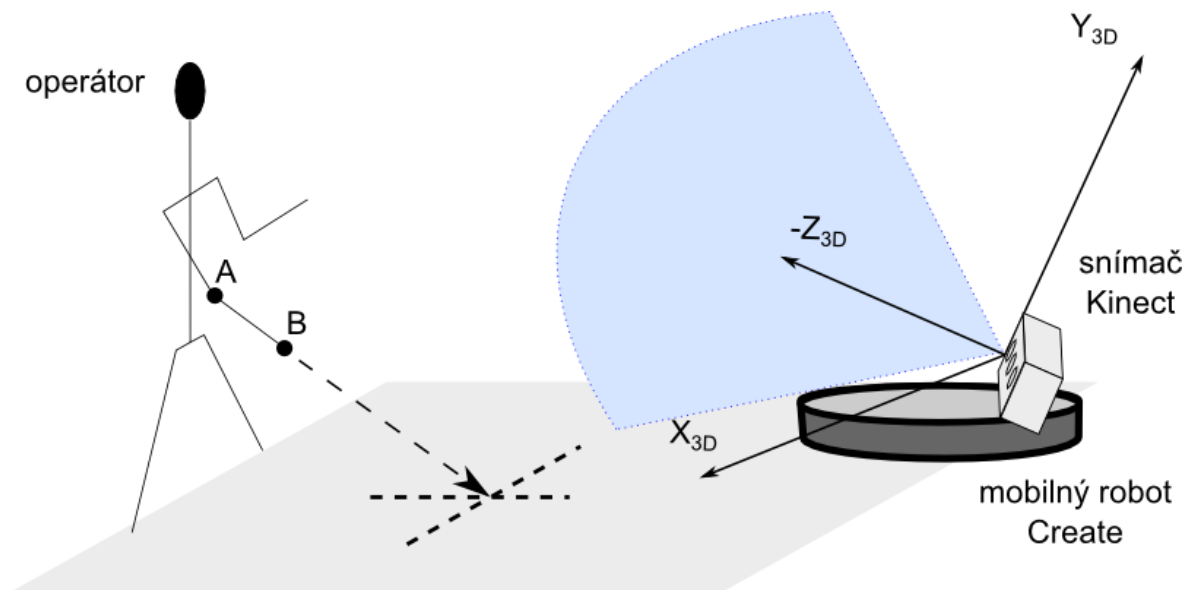
2.3 Návrh algoritmu riadenia robota ukázaním bodu v priestore

V metóde popísanej v predchádzajúcej kapitole je komunikácia človeka s robotom nepriama. Nezáleží na ich vzájomnej pozícii a snímač Kinect nie je súčasťou senzorického systému robota. Snímač je umiestnený staticky tak, aby čo najlepšie snímal operátora a príkazy generované na základe gest supľujú štandardné vstupno-výstupné rozhrania ako klávesnica, myš či *joystick*. V tejto kapitole je uvedený návrh algoritmu, ktorého jadrom je priama interakcia človeka s riadeným robotickým systémom. Kinect je umiestnený na robote, je teda súčasťou jeho senzorického vybavenia. Robot sníma operátora priamo a na ich relatívnej pozícii záleží.

2.3.1 Princíp algoritmu

Ľudské telo je z geometrického hľadiska súborom úsečiek umiestnených v trojrozmernom priestore reálneho sveta. Navrhnutý algoritmus využíva úsečku tvorenú zápästím a lakťom operátora. Vzájomná vzdialenosť týchto dvoch kĺbov je konštantná a vytvorením pomyselnej polpriamky predĺžením úsečky vzniká nástroj na ukazovanie objektov v 3D priestore. Ukázanie je z tohto hľadiska definované ako prienik polpriamky s iným bodom v bezprostrednom okolí, resp. prienik s okrajom prvého objektu, ktorý pretne. Vo vzťahu k robotu je podstatné definovať vhodný počiatok trojrozmernej súradnej sústavy, v ktorej je priamku možné analyticky popísať. Pre tento účel je ideálnym bodom snímač Kinect, a teda všetky objekty v priestore, ako aj samotný operátor budú definované relatívne voči pozícii robota, ktorý svojím pohybom počiatok vzťažnej sústavy premiestňuje.

Základom algoritmu je, že človek ukáže robotu miesto v priestore, kam sa má premiestniť (Obr. 7). Spoločná platforma je pre nich podlaha, na ktorej sa nachádzajú. Z geometrického hľadiska je to rovina definovaná v 3D priestore. Výška robota je konštantná, a tak isto aj pozícia snímača Kinect voči jeho ťažisku. Podlahu je teda možné definovať pomocou analytickej geometrie. Pozícia, kam sa má robot premiestniť sa získa ako prienik polpriamky, ktorá vznikne predĺžením ruky operátora, s rovinou podlahy.

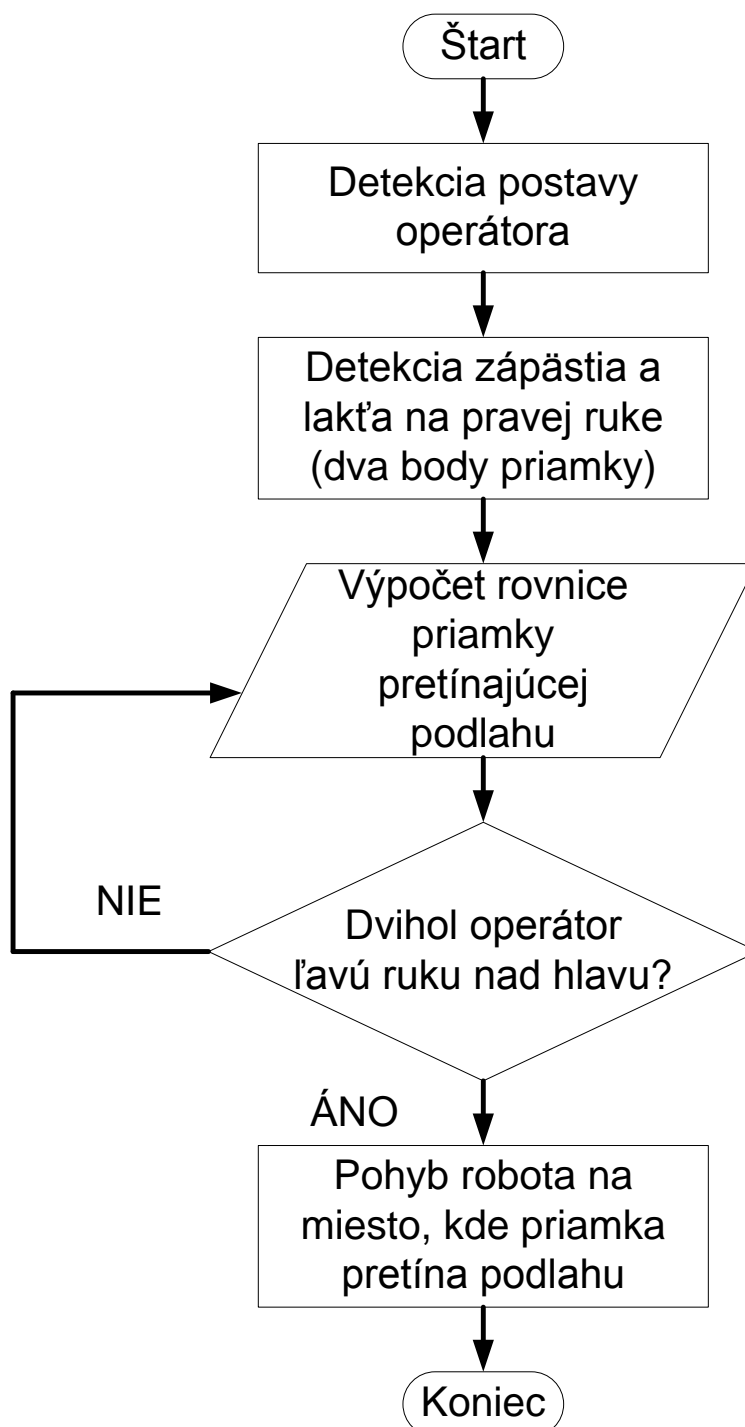


Obr. 7. Ľudský operátor ukazuje robotu, kam sa má premiestniť

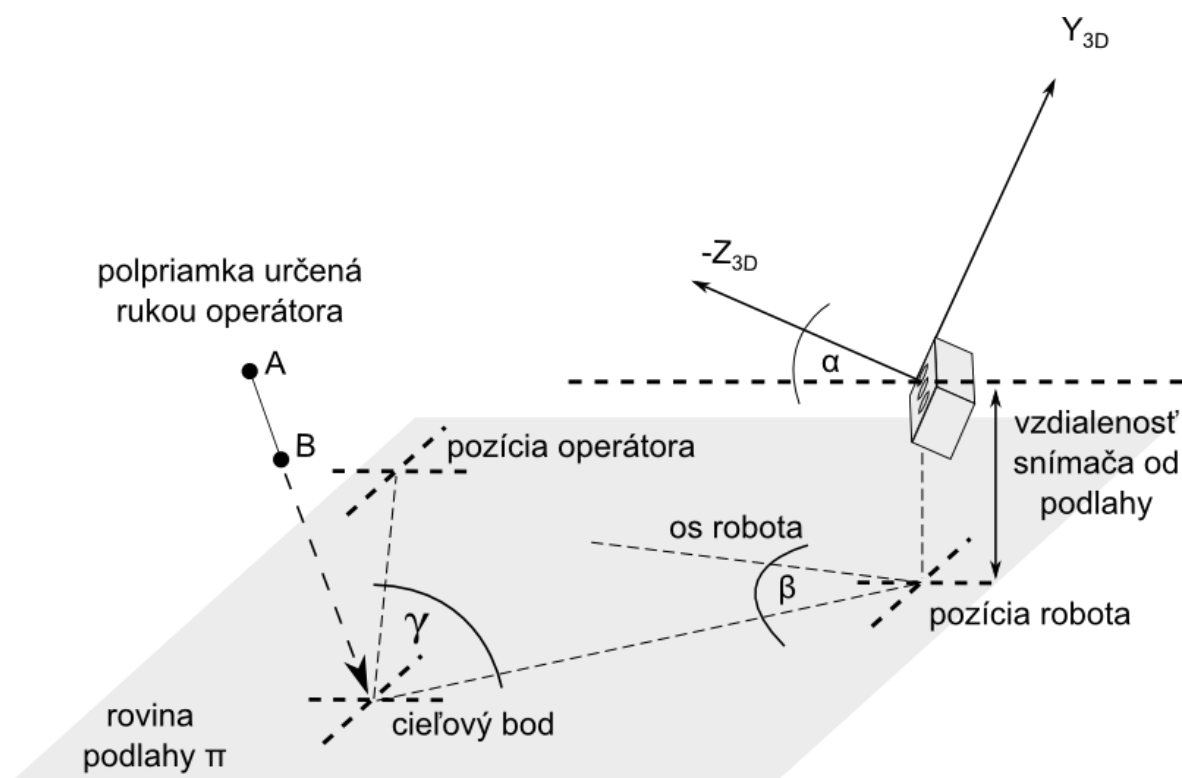
Po zosumarizovaní je možné popísať algoritmus týmito diskretnými krokmi:

1. Robot v obraze lokalizuje ľudského operátora
2. Deteguje sa pozícia ruky a vypočíta rovnicu priamky ňou určená
3. Vypočíta sa rovnicu roviny podlahy a bod prieniku tejto roviny s priamkou
4. Vypočíta sa uhol, o ktorý sa robot má otočiť a vzdialenosť, ktorú má k požadovanému bodu prejsť
5. Vypočíta sa uhol, o ktorý sa robot v cieľovom bode otočí tak, aby bol operátor opäť lokalizovateľný snímačom

Všeobecný vývojový diagram algoritmu je na Obr. 8.



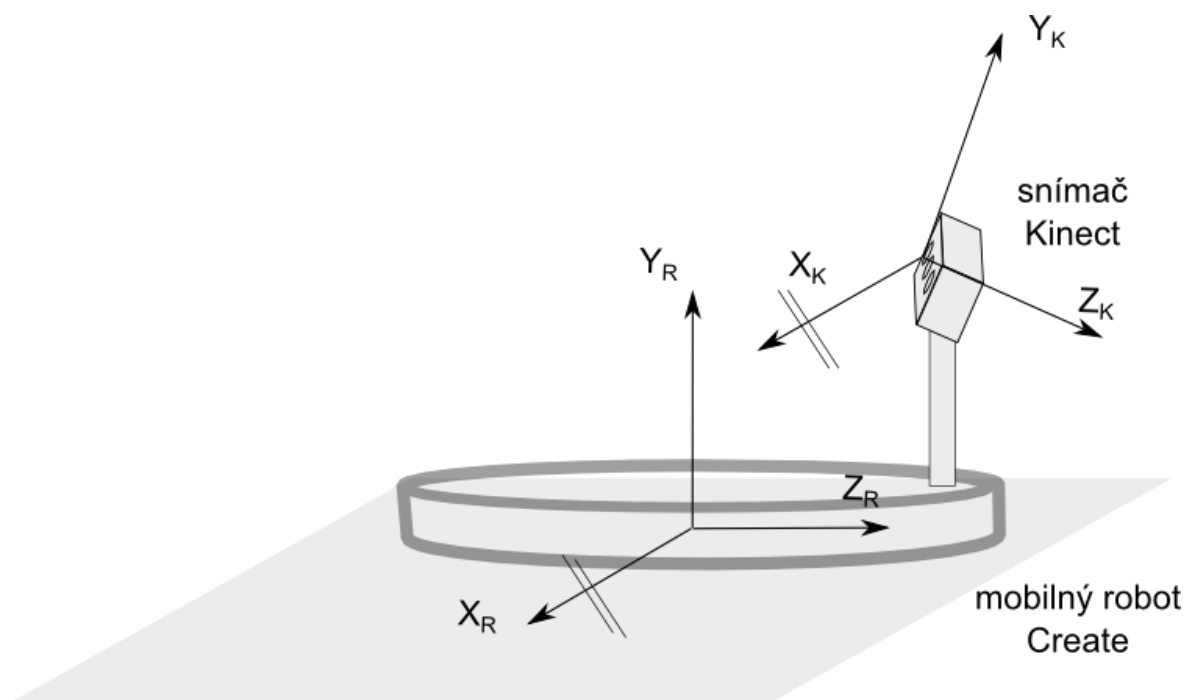
Obr. 8. Vývojový diagram algoritmu ukázania bodu v podlahe



Obr. 9. Extrakcia podstatných geometrických bodov

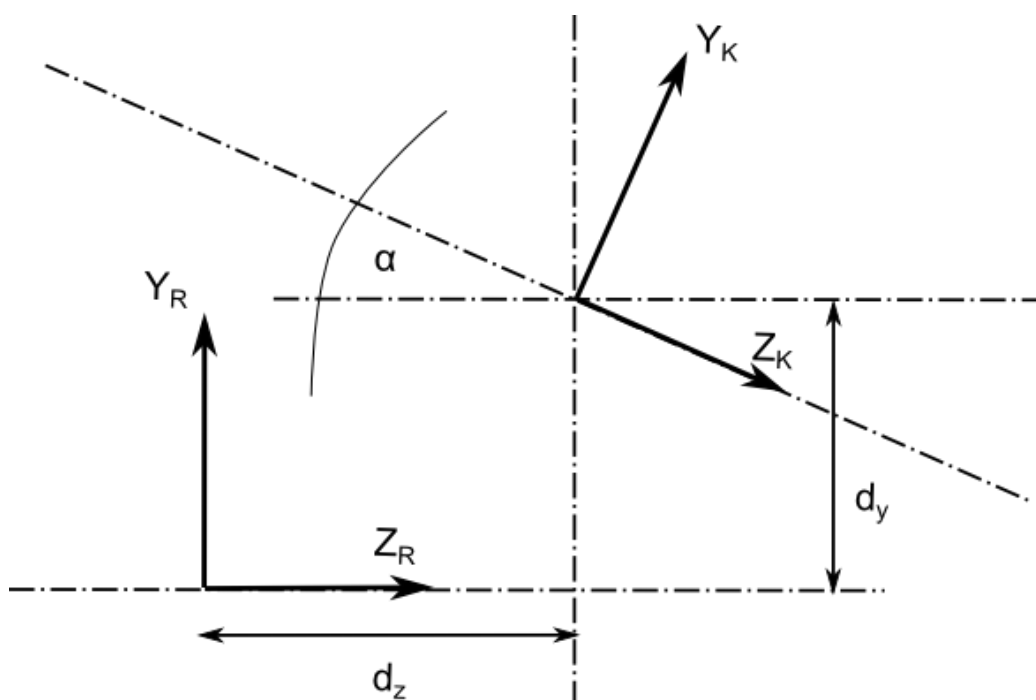
Na Obr. 9 sú extrahované podstatné geometrické aspekty pre matematický opis algoritmu. Rovina podlahy π je definovaná vzhľadom k počiatku súradnicovej sústavy v snímači Kinect. Na nej leží bod pozície operátora, bod aktuálnej pozície robota a cieľový bod, kam sa robot má premiestniť. Ten je určený prienikom polpriamky AB (body A a B sú lakeť a zápästie) s rovinou π . Robot sa musí otočiť o uhol β a prejsť po priamke do cieľového bodu. Aby spoľahlivo detegoval postavu operátora musí byť Kinect natočený o uhol α . Kinect je pripojený na robote, čiže počas celej operácie je od podlahy vzdialený o konštantu danú jeho fyzickou stavbou.

Z matematického hľadiska je k riešeniu úlohy možné použiť dva prístupy – umiestniť všetky vektory do súradnej sústavy snímača Kinect a pracovať s analytickým vyjadrením roviny podlahy alebo uvažovať dve súradné sústavy a použiť transformáciu medzi nimi. Z hľadiska implementácie a taktiež faktu, že snímač sa pri praktickej realizácii algoritmu nemusí nachádzať na rotačnej osi robota je vhodnejšie použiť prístup druhý. Na Obr. 10 je zobrazená súradná sústava robota, súradná sústava snímača Kinect a ich vzájomného vzťahu. Robot leží v rovine podlahy, os Z_R a X_R je teda rovnobežná z podlahou a os Y_R je na ňu kolmá. Obe sústavy sú ľavotočivé, čo je dané faktom, že Kinect pracuje v ľavotočivej sústave.



Obr. 10. Ilustrácia transformácie medzi súradnými sústavami

Keďže Kinect je pootočený len okolo osi x , os X_K aj X_R sú rovnobežné. Os Y_R a Z_R sú voči Y_K a Z_K rotované o uhol α . Vzájomnú transláciu sústav vyjadrujú posunutia d_z a d_y (Obr. 11). Posunutia vyplývajú z umiestnenia snímača na robote (na viacerých obrázkoch v tejto kapitole sú pre prehľadnosť zanedbané). V prípade, že by pri hardvérovej implementácii riešenia bol snímač umiestnený v strede robota, budú sa uvažovať ako nulové.



Obr. 11. Transformácia medzi sústavou robota a snímača

Na prevod vektorov zo sústavy snímača do sústavy robota je použitá homogénna transformácia, ktorej translačná a rotačná matica sú:

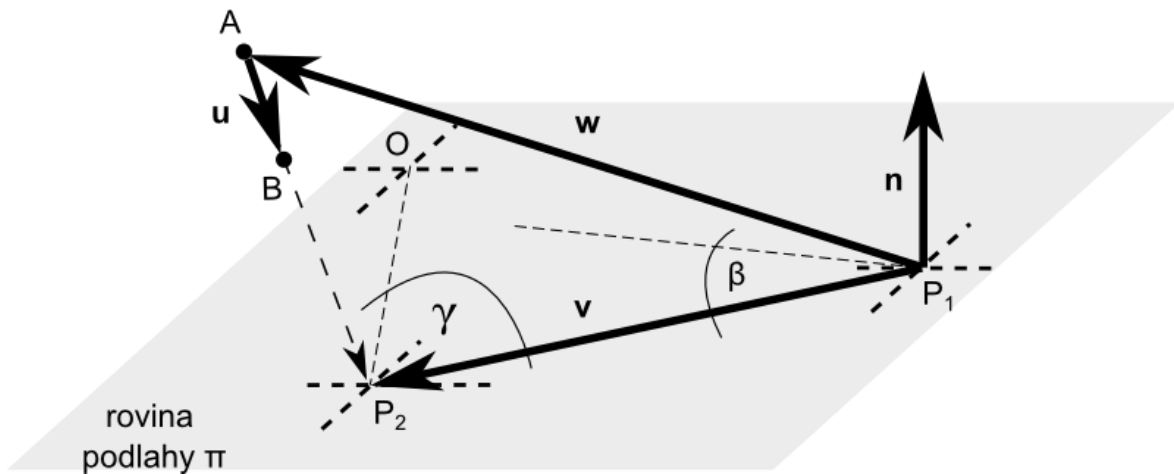
$$M_{KR} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Prevod ľubovoľného vektora do sústavy robota je daný vzťahom:

$$\begin{pmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \\ 1 \end{pmatrix} = M_{KR} \cdot \begin{pmatrix} X_K \\ Y_K \\ Z_K \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & d_y \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_K \\ Y_K \\ Z_K \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Inverzná transformácia sa vypočíta vynásobením požadovaného vektora v súradniciach robota maticou inverznou k matici homogénnej transformácie M_{KR} :

$$\begin{pmatrix} X_K \\ Y_K \\ Z_K \\ 1 \end{pmatrix} = INV(M_{KR}) \cdot \begin{pmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \\ 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$



Obr. 12. Vektorový opis algoritmu

Matematický opis algoritmu vychádza z analytickej geometrie a vektorovej algebry. Všetky výpočty sa vykonávajú v súradnom systéme robota, údaje získané zo snímača sa teda transformujú pomocou vzťahov uvedených vyššie. Z Obr. 12 vyplýva, že treba nájsť vektor \mathbf{v} , ktorý je definovaný bodmi P_1 a P_2 . Vektor \mathbf{n} je ľubovoľný normálový vektor roviny π , napríklad:

$$\mathbf{n} = (0, 100, 0) \quad (8)$$

Bod P_1 má súradnice:

$$P_1 = (0, 0, 0) \quad (9)$$

Vektor \mathbf{w} sa získa odčítaním vektora súradníc bodu P_1 od bodu A , ktorý reprezentuje lakeť operátora:

$$\mathbf{w} = A - P_1 \quad (10)$$

Vektor \mathbf{u} sa získa odčítaním vektora súradníc bodu A od B (bod B je zápästie operátora):

$$\mathbf{u} = B - A \quad (11)$$

Vektor \mathbf{v} sa vypočíta ako vektorový súčet vektorov \mathbf{w} a \mathbf{u} , vektor \mathbf{u} však treba predĺžiť vynásobením skalárom s :

$$\mathbf{v} = \mathbf{w} + \mathbf{u} \cdot s \quad (12)$$

Skalár s sa vypočíta zo vzťahu, ktorý vyplýva z geometrického významu skalárneho súčinu. V prípade, že dva vektory sú na seba kolmé, je ich skalárny súčin rovný 0, súčin hľadaného vektora \mathbf{v} a normálového vektora roviny π teda musí spĺňať túto podmienku. Upravením sa s vypočíta nasledovne:

$$\begin{aligned} \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} &= 0 \\ \mathbf{n} \cdot (\mathbf{w} + s \cdot \mathbf{u}) &= 0 \\ \mathbf{n} \cdot \mathbf{w} + \mathbf{n} \cdot s \cdot \mathbf{u} &= 0 \\ s &= -\frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{w}}{\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}} \end{aligned} \quad (13)$$

Uhol β sa vypočíta ako uhol vektora \mathbf{v} a ľubovoľného vektora \mathbf{o} ležiaceho v rovine podlahy na osi robota:

$$\begin{aligned} \mathbf{o} &= (0, 0, -300) \\ \beta &= \cos^{-1} \frac{\mathbf{o} \cdot \mathbf{v}}{|\mathbf{o}| \cdot |\mathbf{v}|} \end{aligned} \quad (14)$$

V bode P_2 sa robot pootočí tak, aby os robota smerovala na operátora a zvierala s vektorom $-\mathbf{v}$ uhol γ . Ten sa vypočíta na základe vlastností vektorového súčtu, pričom bod \mathbf{O} reprezentuje priemet operátora do roviny podlahy. (Uhol γ je uvedený pre lepšiu názornosť, robot sa v skutočnosti rotuje o $\gamma-180^\circ$, keďže v momente prízjazdu do bodu P_2 je orientácia osi totožná s orientáciou vektora \mathbf{v} .)

$$\cos \gamma = \frac{-\mathbf{v} \cdot (-\mathbf{O} + \mathbf{v})}{|-\mathbf{v}| \cdot |-\mathbf{O} + \mathbf{v}|} \quad (15)$$

Z hľadiska implementácie pohybu sa teda dá správanie robota zjednodušiť na tri kroky:

1. Robot sa pootočí o uhol β
2. Robot prejde po priamke smerom dopredu dráhu dĺžky $|v|$
3. Robot sa otočí o uhol $\gamma-180^\circ$ späť na operátora, aby mu mohol zadávať nové príkazy

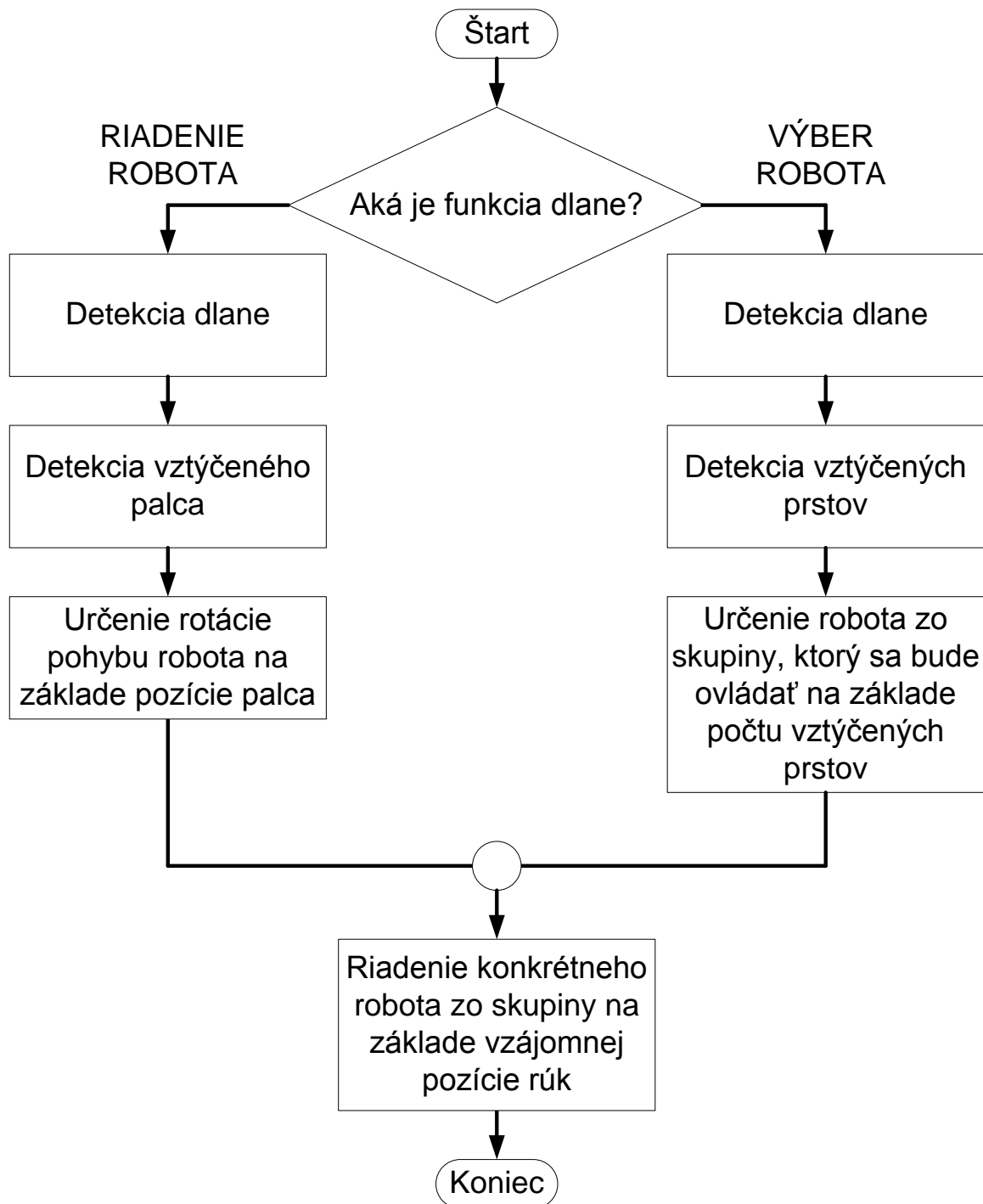
2.4 Návrh algoritmu na kooperatívne ovládanie skupiny robotov pomocou dlaní a prstov operátora

Tretí navrhovaný algoritmus nevyužíva pozíciu operátorových kĺbov, ale len surové hĺbkové dáta zo snímača. Nadväzuje na aktuálny výskum vo svete. Ten prešiel v oblasti spracovania gest vývojom, kde v prvých fázach dominovalo používanie značiek, rukavíc a iných foriem zvýraznenia rúk a prstov. Takto bolo vo farebnom RGB obraze možné spoľahlivejšie detegovať hľadané črty. Neskôr sa výskumníci snažili eliminovať ich používanie, aby vyvinuli pohodlnejšie a intuitívnejšie algoritmy zavedením detekcie pokožky. S takýmto prístupom sa však spájajú problémy dané rôznymi odtieňmi pokožky a taktiež jej podobnosťou s inými objektmi v priestore okolo operátora. Aktuálny výskum v akademickej aj komerčnej sfére je zameraný predovšetkým na riešenia využívajúce hĺbkové snímanie, ktoré eliminuje mnoho spomínaných problémov. Algoritmus popísaný v tejto kapitole nadväzuje na metódy iných výskumníkov uvedené v dizertačnej práci. Je inšpirovaný viacerými detailmi. Veľký prínos je v použití hĺbkovej kamery namiesto RGB kamery, čo zabezpečuje jeho vysokú robustnosť. Prínos je taktiež v samotnej aplikačnej oblasti metódy, autor práce sa zatiaľ nestretol s algoritmom, ktorý by sa venoval riadeniu skupiny robotov pomocou gest jedným operátorom.

Na rozdiel od predošlých návrhov, kde bol snímaný celý človek na operátorskom pracovisku alebo priamo snímačom umiestneným na mobilnom robote, v tomto návrhu sú snímané len ruky operátora v tesnej blízkosti snímača Kinect. Každá z nich má špecifickú funkciu – jedna ruka slúži na identifikovanie konkrétneho robota zo skupiny, ktorým operátor aktuálne manipuluje, druhá ruka riadi jeho pohyb (čiže musí byť schopná špecifikovať minimálne diskkrétne príkazy pohybu dopredu, dozadu a rotácie). Prvotný popis algoritmu je teda takýto:

1. Pravá ruka operátora špecifikuje počtom zdvihnutých prstov index robota z množiny, ktorý sa bude aktuálne ovládať (ostatné roboty zostávajú nečinné)
2. Ľavá ruka riadi konkrétne pohyby ovládaného robota

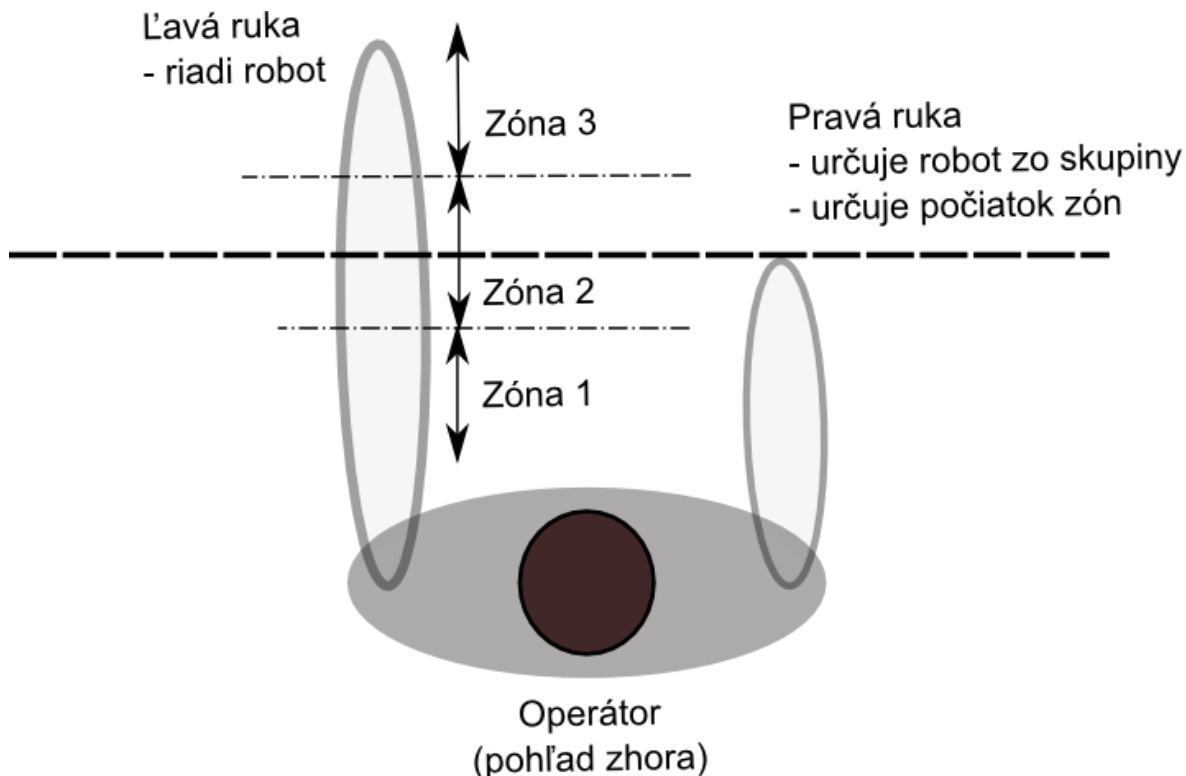
Vývojový diagram je na Obr. 13.



Obr. 13. Vývojový diagram kooperatívneho riadenia skupiny robotov

Základným rozdielom algoritmu kooperatívneho ovládania skupiny robotov oproti druhým dvom navrhovaným algoritmom je, že operátor musí svoju pozornosť deliť medzi viaceré roboty a taktiež mu na samotné riadenie pohybu zostáva len jedna ruka. Druhá určuje, ktorý robot zo skupiny sa má aktuálne pohybovať. Ovládanie jednou rukou musí byť dostatočne robustné a zároveň čo najintuitívnejšie. Z tohto hľadiska je vhodné využiť pozíciu palca. Pri zvislo umiestnenej ruke je palec možné ľahko presunúť z jednej strany dlane na druhú rotáciou ruky, čo spolu so situáciou, keď je palec stiahnutý k ostatným prstom dáva tri stavy. Tri stavy však na ovládanie robota nepostačujú, preto je do algoritmu zavedené aj spracovanie vzájomnej hĺbkovej pozície pravej

a ľavej ruky (Obr. 14). Kombinovaním pozícií oboch rúk v priestore je možné plynule prechádzať medzi zónami. Výsledkom je 9 stavov, v ktorých sa môže ľavá ruka nachádzať. Keďže pravá ruka dokáže indexovať až 5 robotov, výsledný počet kombinácií je až 45. Kombinácia gest a priradených typov pohybu je v tabuľke na Obr. 15.



Obr. 14. Zavedenie vzájomnej pozície ľavej a pravej ruky

Pozícia palca ľavej ruky	Zóna ľavej ruky	Index robota	Typ pohybu
Vľavo	3	1-5	Cirkulárny pohyb vľavo dopredu
Vpravo	3	1-5	Cirkulárny pohyb vpravo dopredu
V strede	3	1-5	Pohyb dopredu
Vľavo	2	1-5	Rotácia vľavo
Vpravo	2	1-5	Rotácia vpravo
V strede	2	1-5	Zastavenie
Vľavo	1	1-5	Cirkulárny pohyb vľavo dozadu
Vpravo	1	1-5	Cirkulárny pohyb vpravo dozadu
V strede	1	1-5	Pohyb dozadu

Obr. 15. Tabuľka možných pohybov robota

Pomocou navrhnutého algoritmu je operátor schopný paralelne ovládať 5 robotov v danej kooperatívnej úlohe. Paralelizácia je samozrejme zdanlivá. V každom čase riadi len jeden robot, no v prípade multiagentového systému s čiastočnou autonómiou je dobrým prostriedkom na realizáciu zložitejších úloh. Operátor môže robot priviesť na konkrétne miesto, kde ho nechá vykonávať autonómnu činnosť a následne riadi iný robot. Algoritmus je tiež vhodný na úlohy, kde je nutné veľmi rýchlo striedať ovládanie robotov, ktoré vykonávajú spoločnú úlohu v rovnakej lokalite.

3 Implementácia a experimentálne overenie

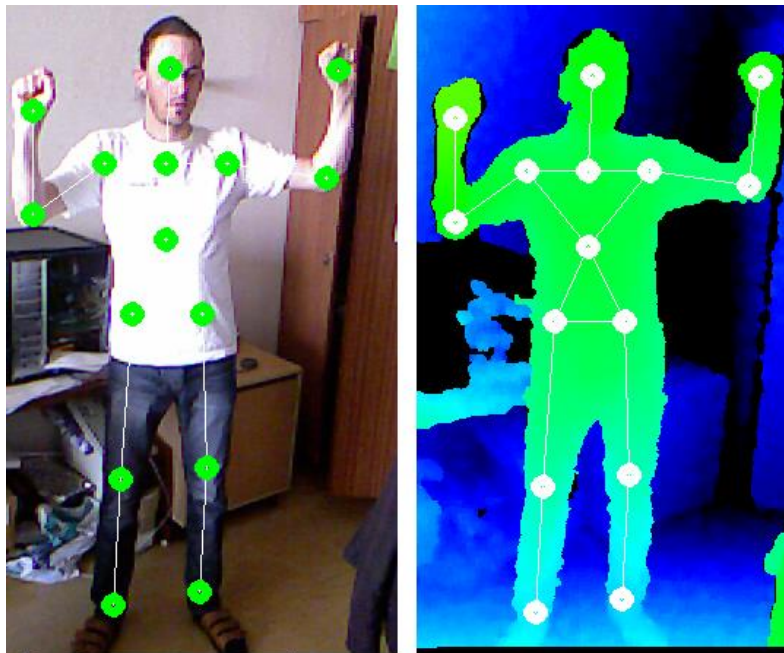
3.1 Detekcia kĺbov operátora prostredníctvom snímača Kinect

Základom implementácie prvých dvoch navrhnutých algoritmov je detekcia kĺbov ľudského operátora v 3D priestore pred snímačom. Táto problematika nie je predmetom výskumu uvedeného v práci, z aplikačného hľadiska sa teda jedná len o softvérovú platformu, ktorá musí spĺňať požadované kritériá.

Prvé komerčné použitie snímača Kinect bolo v hernom priemysle, kde sa identifikácia pohybu postáv využíva na ovládanie hier určených pre konzolu Xbox360. Na vývoji algoritmu, ktorý používa táto konzola sa podieľal aj senior výskumník Jamie Shotton, s ktorým autor práce komunikoval prostredníctvom emailu. Algoritmus je založený na klasifikácii častí ľudského tela z hĺbkového obrazu bez potreby analýzy súvislého video toku. Detekcia je vykonávaná klasifikátorom, ktorý je natrénovaný na veľkej množine syntetických hĺbkových dát ľudských postáv rôznych tvarov a veľkostí. Teoreticky je schopný bežať na 200 fps, no je obmedzený reálnou rýchlosťou hĺbkových senzorov (Kinect funguje na 30 fps).

Keďže celý systém je postavený na operačnom systéme Linux, použitý bol binárny softvérový modul NITE od spoločnosti PrimeSense, ktorý je súčasťou OpenNI. Žiaľ, žiadne implementačné detaily tohto softvérového riešenia nie sú k dispozícii, čo bolo potvrdené aj emailovou komunikáciou autora so spoločnosťou (kontaktná osoba – Liza Roumani, Developer Relations).

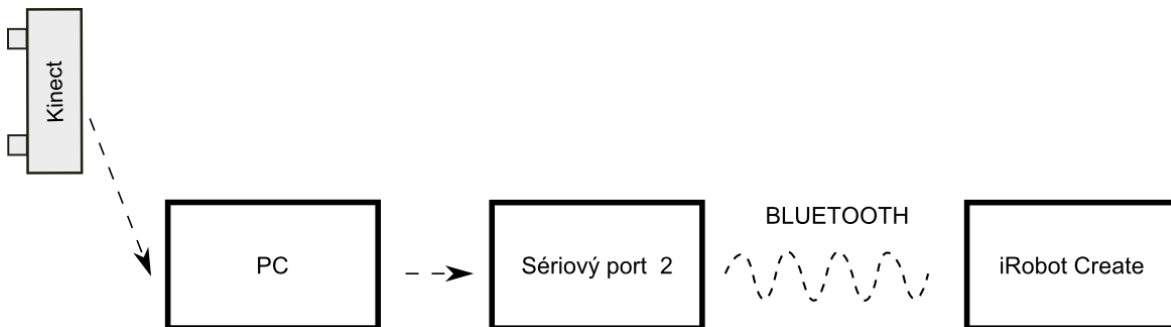
Aj Microsoft aj PrimeSense autorovi potvrdili, že používajú vzájomne rozličné riešenia. Matematický návrh algoritmov uvedených v tejto práci je však od implementácie detekcie kĺbov nezávislý, v budúcnosti je teda možné aplikovať uvedené riešenia aj na iné platformy. Ilustrácia detekcie kĺbov prostredníctvom NITE je na Obr. 16.



Obr. 16. Detekcia kĺbov človeka pomocou modulu NITE

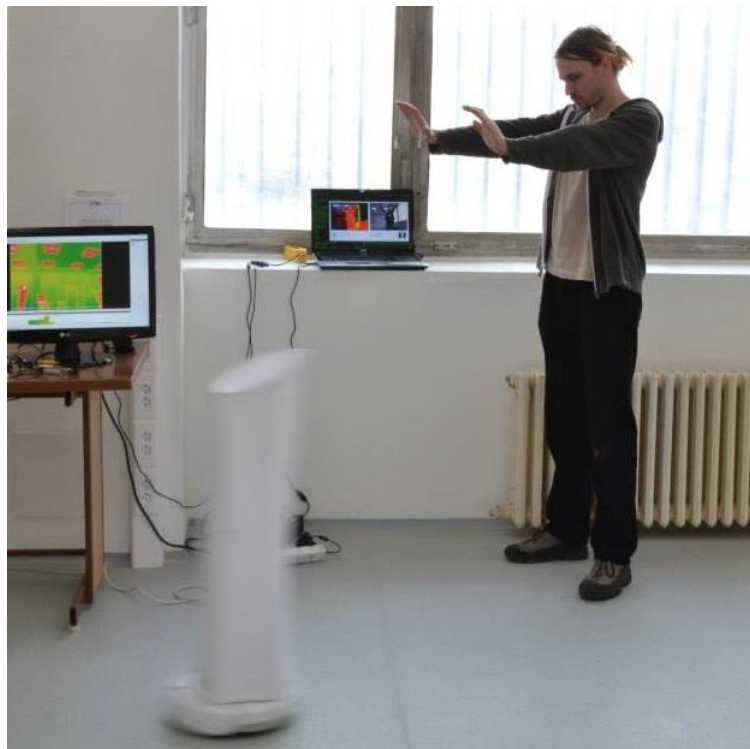
3.2 Implementácia algoritmu riadenia robota pomocou rúk

Prvý z trojice algoritmov je z hľadiska implementácie najjednoduchší. Hardvérový návrh architektúry systému pre experiment je na Obr. 17.



Obr. 17. HW architektúra experimentu

Snímač Kinect deteguje operátora a polohu jeho kĺbov. Podľa matematických vzorcov uvedených v návrhu sa vypočíta rovina operátora. Stred zóny 2 bol určený empiricky na 25 cm a šírka zón na 20 cm. Ak sa teda ruky, resp. zápästia, operátora nachádzajú od 15 do 35 cm od trupu, sú v zóne 2. Ak sú bližšie k trupu, sú v zóne 1, ak ďalej, tak sú v zóne 3. Povelý vypočítané na základe pozície rúk sa periodicky posielajú na sériový port, ktorý je priamym rozhraním k bezdrôtovej komunikácii podľa štandardu Bluetooth. Povelý spracúva robot a vykonáva odpovedajúce pohybové akcie. Jedná sa o jednosmernú komunikáciu bez spätnej väzby. Kinect teda supluje rozhrania ako klávesnica alebo *joystick*. Implementácia bola v praxi veľa krát využívaná na riadenie cukríkového robota a korigovanie jeho pohybu medzi ľuďmi (Obr. 18). Robot bol skonštruovaný na ÚRK FEI STU v spolupráci s FA STU na báze podvozku iRobot Create.



Obr. 18. Riadenie mobilného robota pomocou rúk

3.3 Implementácia riadenia robota ukázaním bodu v priestore

Algoritmus opísaný v tejto kapitole je jediný, kde robot vystupuje ako plne autonómna jednotka (samozrejme, len z hľadiska určitej malej sady požiadaviek). Snímač Kinect nie je umiestnený na konštantnom mieste pred operátorom ako externé rozhranie medzi riadiacim počítačom a robotom, ale je priamou súčasťou samostatnej robotической platformy. Spolu s robotom teda dynamicky mení svoju polohu.

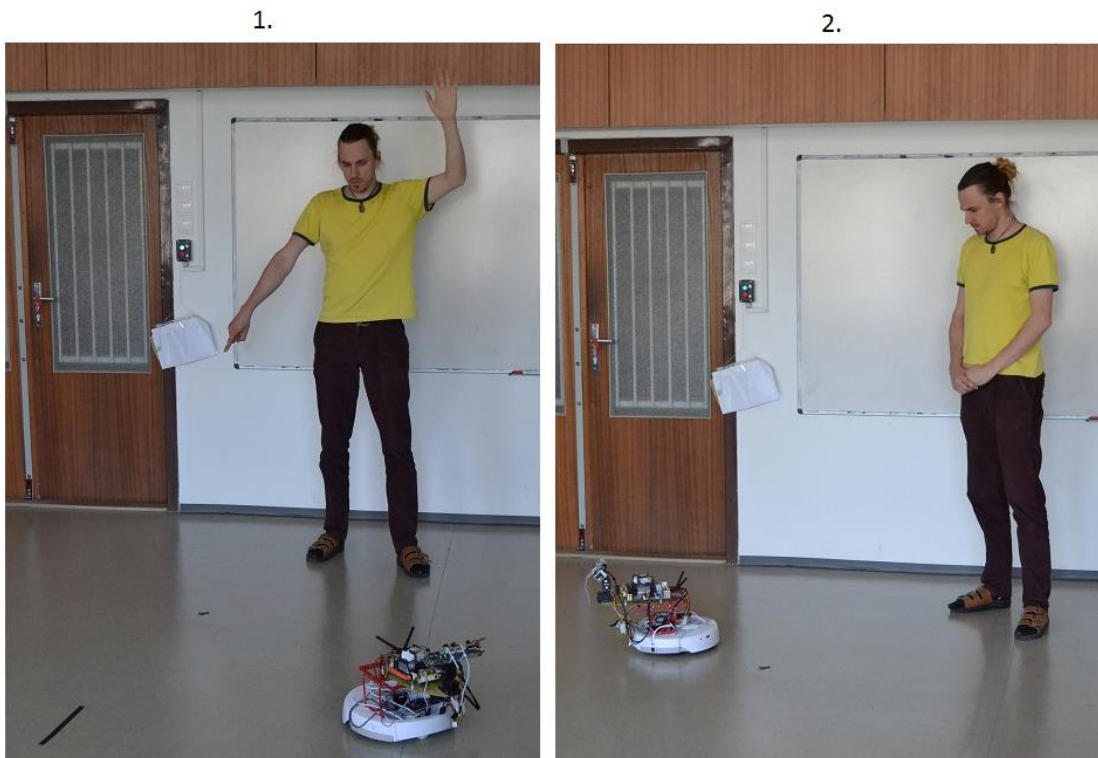
Súčasťou robota, na ktorom boli vykonané experimenty je:

- Podvozok iRobot Create
- Riadiace PC prepojené s robotom pomocou sériovej linky
- Kinect umiestnený na vežičke s dvomi stupňami voľnosti

Transformačná matica medzi sústavou snímača a robota po dosadení reálnych údajov je:

$$M_{KR} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-30^\circ) & -\sin(-30^\circ) & 0,3 \\ 0 & \sin(-30^\circ) & \cos(-30^\circ) & 0,2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

Experiment prebiehal v laboratórnom prostredí. Operátor sa staval do rôznych pozícií pred robot, ukázal na bod v podlahe a dal robotu povel začať presun (Obr. 19). Robot vykonal rotáciu na mieste, priamočiarym pohybom sa dostal na daný bod a následne sa otočil späť k operátorovi. Všetky hodnoty sa vypočítali v ešte pred začatím presunu. Informácie o rotácii a odometrii sa získavajú zo snímačov robota.



Obr. 19. Experiment v laboratórnom prostredí

Vykonaných bolo 10 rôznych meraní, kde robot prešiel vzdialenosti od 50 cm do 3,5 metra. Merala sa odchýlka želanej polohy stredu robota po dojazde od reálnej a chybový uhol, o ktorý bola os robota natočená mimo operátora. Z meraní vyplýva, že odchýlka stredu po dojazde sa pohybuje v rozmedzí od 5 do 40 cm a odchýlka rotácie od 2 do 8 stupňov. Takéto výsledky sú veľmi priaznivé, pretože zdrojov nepresností je veľmi veľa, a navyše požadovanú výslednú polohu nie je možné presne určiť, pretože operátor nevie jasne posúdiť, kde priamke tvorená jeho zápästím a laktom pretína podlahu. Na spresnenie odhadu bolo použité laserové ukazovadlo, no ani ono nie je úplne presné nakoľko bod dopadu svetla je daný aj rotáciou zápästia. Z tohto pohľadu má teda väčšiu výpovednú hodnotu o chybovosti natočenie, ktoré sa vykonáva vždy absolútne vzhľadom na pozíciu operátora.

3.4 Implementácia kooperatívneho ovládania skupiny robotov

Prvým krokom k realizácii navrhnutého algoritmu bola úspešná implementácia navrhnutých postupov pomocou snímača Kinect a knižníc na spracovanie obrazu. Niektoré jednoduché teoretické koncepty boli v praxi ťažšie realizovateľné, a preto bolo nutné navrhnuť filtračné algoritmy na elimináciu chybovosti. Po úspešnej implementácii a overení riešenia na softvérovej úrovni prišlo na rad nasadenie na reálne robotické platformy. Následne bola navrhnutá konkrétna kooperatívna úloha simulujúca reálny problém a v laboratórnom prostredí taktiež úspešne zrealizovaná a následne zdokumentovaná.

3.4.1 Implementácia algoritmu pomocou metód spracovania obrazu

V prvom rade je dôležité si uvedomiť, že základným médiom medzi operátorom a robotmi je snímač Kinect, ktorý sa nenachádza na žiadnom z robotov, ale je vhodne umiestnený pred sediacim alebo stojacim človekom. Ten následne vystrie ruky k snímaču. Je teda potrebné z obrazu odstrániť všetko okrem týchto rúk. Na segmentáciu sa využilo prahovanie na základe hĺbky, ktorá bola pri dospelom jedincovi empiricky stanovená na 1,2 metra. Výsledkom sú dva veľké segmenty odpovedajúce dlaniam a predlaktiam.

Keďže segmentácia prebieha nad obrazom tvoreným odtieňmi šedej, ktoré reprezentujú vzdialenosť od snímača je potrebné vykonať binárne:

$$f_2(i, j) = \begin{cases} 0 & \text{ak } f_1(i, j) = 0 \\ 1 & \text{ak } f_1(i, j) > 0 \end{cases} \quad (17)$$

kde $f_1(i, j)$ je pôvodný obraz v odtieňoch šedej, $f_2(i, j)$ je binárny obraz, kde 0 reprezentuje čiernu a 1 bielu farbu

Keďže v zvolenom rozsahu (do 1,2 m od snímača) sa okrem rúk operátora môžu náhodne vyskytnúť rôzne iné malé objekty, po lokalizácii kontúr a výpočte ich plochy (Greenov teorém) sa ponechajú len dve najväčšie.

Na základe ich horizontálnej pozície v obraze sa deteguje pravá a ľavá ruka operátora. Detekcia pozície prebehne porovnaním y-ovej súradnice stredov kontúr S_1 a S_2 , ktoré sa vypočítajú podľa:

$$S = [s_x, s_y],$$

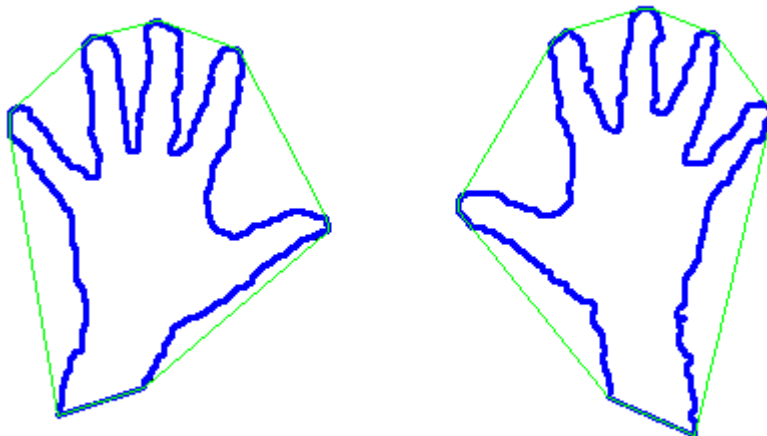
$$s_x = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} x_i}{n}, s_y = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} y_i}{n} \quad (18)$$

kde n je počet bodov v kontúre, x_i je x -ová súradnica i -teho pixela v kontúre a y_i je y -ová súradnica

Aby sa pracovalo len s relevantnou časťou ruky (prítomnosť predlaktia, lakťa a ramena v obraze sú zbytočné, resp. prekážkou) lokalizuje sa v kontúre najbližší bod k snímaču a všetky body v kontúre vzdialenejšie od tohto bodu o viac ako 13 cm sa ďalej neuvažujú:

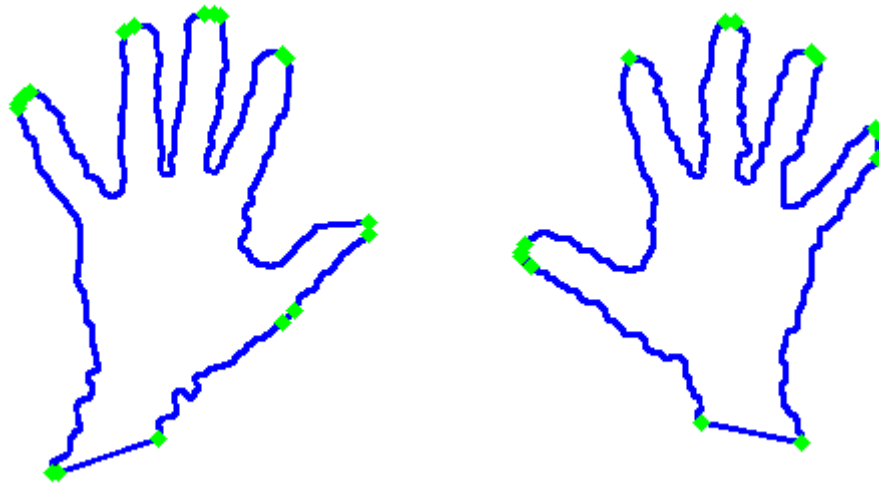
$$H_2 = \{H_1(i), \quad \forall i, \text{kde } d(H_1(i)) < d_{min} + 13 \text{ cm}\} \quad (19)$$

kde H_1 je množina bodov pôvodnej kontúry, H_2 je nová kontúra, d je hĺbka daného bodu kontúry, d_{min} je hĺbka bodu najbližšie k snímaču



Obr. 20. Preloženie kontúr mnohouholníkom

Na Obr. 20 sú kontúry rúk po preložení mnohouholníkom. Na prvý pohľad sa zdá, že každý má 7 vrcholov, no po vykreslení jednotlivých vrcholov samostatne (Obr. 21) je evidentné, že pri zakončeníach prstov ich vzniká podstatne viac. Preto bol navrhnutý a implementovaný filtračný algoritmus, ktorý zo skupiny vrcholov v danej oblasti vyberie len jeden.



Obr. 21. Reálny počet vrcholov mnohouholníka

Filtračný algoritmus prebieha v týchto krokoch:

1. Zo všetkých vrcholov mnohouholníka sa lokalizuje približný stred $S = [s_x, s_y]$ podľa:

$$s_x = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} x_i}{n}, s_y = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} y_i}{n} \quad (20)$$

kde n je počet bodov vrcholov, x_i je x -ová súradnica i -teho vrchola a y_i je jeho y -ová súradnica

2. Pre každý vrchol sa vypočíta Euklidovská vzdialenosť od stredu S :

$$e(i) = \sqrt{(v(i)_x - s_x)^2 + (v(i)_y - s_y)^2} \quad (21)$$

kde $e(i)$ je Euklidovská vzdialenosť i -teho vrchola, $v(i)$ je i -ty vrchol

3. Vrcholy sú rozdelené do samostatných množín na základe dvoch kritérií. Vrchol musí byť dostatočne blízko svojich susedov v množine a tiež musí byť v približne rovnakej vzdialenosti od stredu S ako jeho susedia. Obe kritériá boli empiricky stanovené na 20 pixelov:

$$M_k(j) = v(i), \quad \text{ak } e(i) - e(i-1) < 20$$

$$\bigwedge \sqrt{(v(i)_x - v(i-1)_x)^2 + (v(i)_y - v(i-1)_y)^2} < 20 \quad (22)$$

kde M_k je k -ta množina vrcholov, $e(i)$ a $e(i-1)$ sú Euklidovské vzdialenosti za sebou idúcich vrcholov $v(i)$ a $v(i-1)$

4. V každej množine vrcholov sa vyhľadá ten s najväčšou vzdialenosťou od stredu S :

$$v_f(k) = \max(M_k)$$

kde $v_f(k)$ je k -ty vrchol po filtrácii, $\max()$ je funkcia, ktorá (23)
vráti najväčšiu $e(i)$ vrcholov z množiny M_k

Účinnosť algoritmu je v praxi 99,9%, vzhľadom na to, že v rozsiahlych testovacích procedúrach a praktickom nasadení po odladení nedochádzalo k žiadnym falošným detekciám v oblasti jedného končeka prsta.

Aby bolo možné úspešne detegovať vztýčené prsty, bolo potrebné implementovať spoľahlivý algoritmus na detekciu dlaní pomocou vpísanej kružnice. Základom je nájsť vhodných kandidátov na jej stred. Uvažovať každý bod vo vnútri kontúry sa ukázalo ako výpočtovo enormne náročný proces, preto bolo potrebné nájsť vhodné kritéria na redukciu množiny potenciálnych stredov. Za východiskový bod sa zvolil približný stred preloženého mnohouholníka a stred vpísanej kružnice sa následne hľadal v jeho okolí podľa algoritmu:

1. Určí sa predbežný stred $S_p = [s_x, s_y]$ z vrcholov:

$$s_x = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} x_i}{n}, s_y = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} y_i}{n} \quad (24)$$

2. Určí sa množina bodov M_s v okolí S_p :

$$M_s(k) = [i, j],$$

$$\text{ak } i \in \langle s_x - 35, s_x + 35 \rangle \bigwedge j \in \langle s_y - 35, s_y + 35 \rangle \quad (25)$$

3. Pre každý prvok množiny M_s sa nájde najmenšia Euklidovská vzdialenosť od kontúry:

$$E_{\min}(k) = \min(\sqrt{(M_s(k)_x - c(i)_x)^2 + (M_s(k)_y - c(i)_y)^2})$$

kde $c(i)$ je kontúra, $E_{\min}(k)$ je najmenšia Euklidovská (26)
vzdialenosť ku kontúre pre k -ty prvok množiny M_s

4. Konečný stred najväčšej novej vpísanej kružnice a jej polomer je daný:

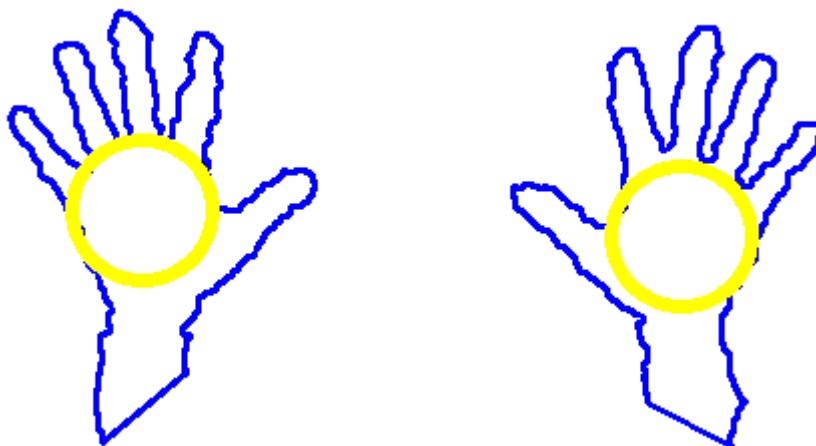
$$r = \max(E_{\min})$$

$$S = M_s(l)$$

kde l je index prvku $\max(E_{\min})$ (27)

Okolie predbežného stredu S_p bolo skusmo určené na 35 pixelov, no vyhľadávanie najmenšej vzdialenosti pre každý bod kontúry sa stále ukázalo ako príliš výpočtovo náročné. Preto sa v časti 3 algoritmu v praxi neporovnáva s každým bodom kontúry $c(i)$, ale len s každým 12-tym, čím sa výrazne zvýšila efektívnosť výpočtov. Nevýhodou je, že nájdená kružnica nie je vždy vpísaná, ale

môže siahať za okraje dlaní. Pri testovaní sa to však neukázalo ako problém, a túto odchýlku detekcie bolo možné zanedbať.



Obr. 22. Nájdenie stredu a vykreslenie najväčšej možnej vpísanej kružnice

Posledným krokom pri detekcii gest je z informácií o vpísanej kružnici a vrcholoch preloženého mnohoúhelníka rozhodnúť, ktoré body sú skutočne prstami operátora. **Prvá podmienka** je daná strmosťou zakrivenia kontúry v danom bode. Implementácia spočíva vo vytvorení dvoch vektorov s počiatkom vo vrchole a koncovým bodom v bodoch kontúry naľavo a napravo v postačujúcej vzdialenosti (Obr. 23). Táto bola experimentálne určená ako 25 pixelov. Uhol sa vypočíta zo skalárneho súčinu:

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{\mathbf{w} \cdot \mathbf{v}}{|\mathbf{w}| \cdot |\mathbf{v}|} \quad (28)$$

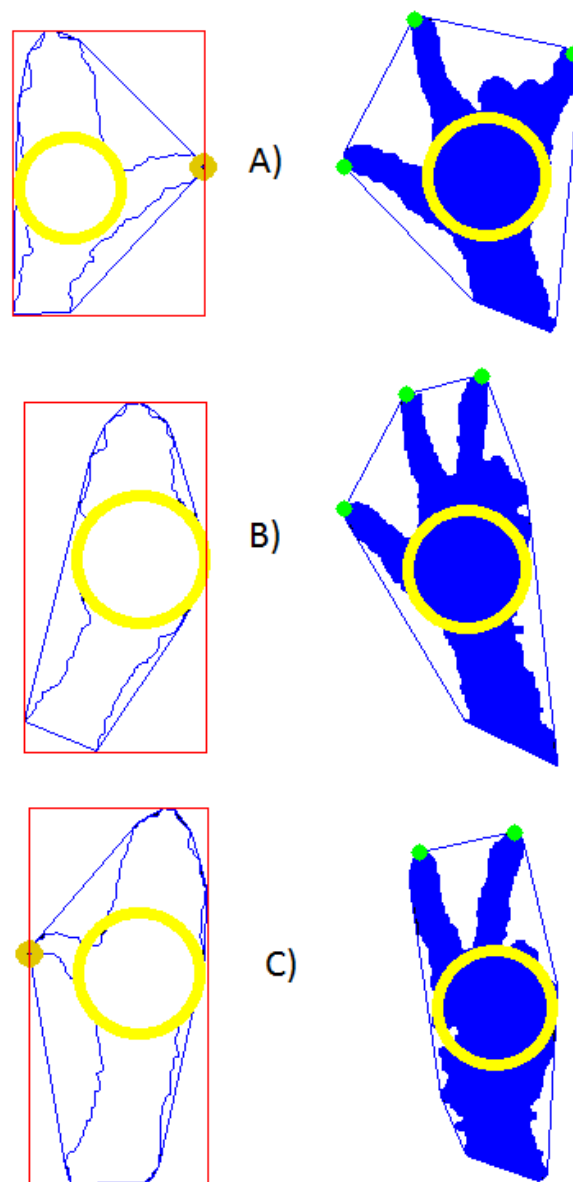


Obr. 23. Uhol vektorov v bode potenciálneho prsta

Maximálna vhodná veľkosť uhla α sa v experimentoch pohybovala od 65 – 100 stupňov. **Druhou podmienkou** je prítomnosť potenciálneho prsta v blízkosti dlane. Uvažujú sa len body, ktoré sa nachádzajú vedľa dlane alebo nad dlaňou (vpísaná kružnica), aby sa predišlo falošným detekciám v oblasti predlaktia. Ruka ovládajúca robot a ruka určujúca index robota majú trochu odlišné ostatné podmienky, preto sú všetky parametre oboch rúk zhrnuté v tabuľke na Obr. 24.

Parameter	Ľavá ruka (ovláda robot)	Pravá ruka (index ovládaného robota)
Počet hľadaných prstov	0-1 (palec)	0 – 5 (všetky prsty)
Max. uhol vektorov w, v na detekciu	80°	100°
Prítomnosť prstov pod dlaňou	Nie	Nie
Prítomnosť prstov nad dlaňou	Nie	Áno
Prítomnosť prstov vedľa dlane	Áno	Áno
Vzdialenosť prsta od dlane	Min. 1,6 krát r	Min. 1,5 krát polomer r

Obr. 24. Tabuľka podmienok detekcie prstov



Obr. 25. Výsledná detekcia gest oboch rúk

Na Obr. 25 je ukážka troch kombinácií gest pravej a ľavej ruky. Ich význam je okrem spracovania obrazu podľa implementovaných algoritmov daný aj vzájomnou vzdialenosťou dlaní na osi Z snímača Kinect, čiže rozdielom ich hĺbky v priestore.

V závislosti od tohto parametra môže mať teda každé gesto tri rôzne významy:

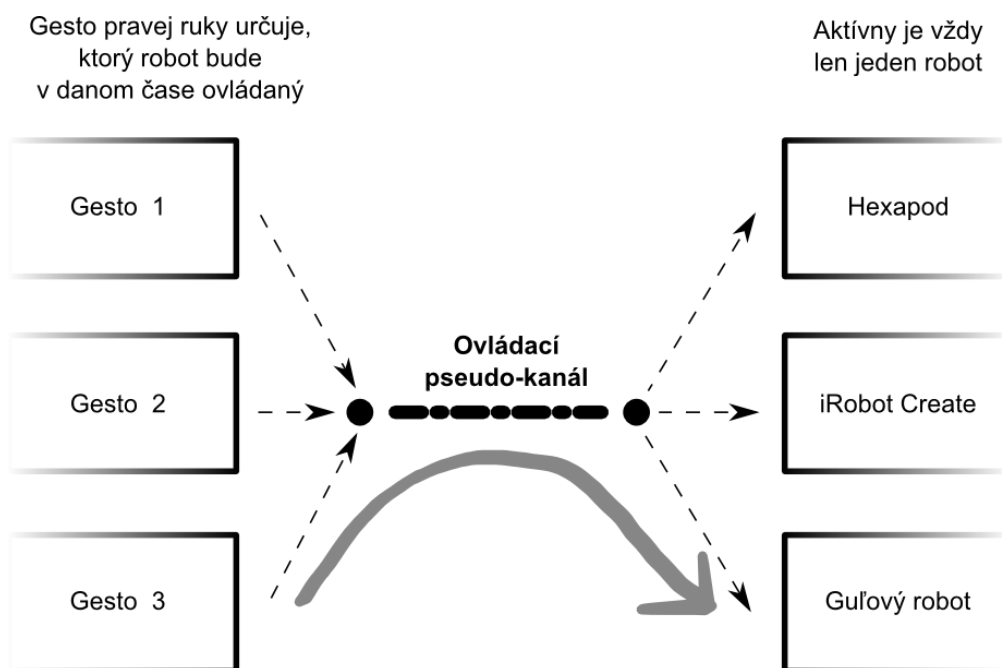
- A) Riadi sa robot č. 3 zo skupiny a rotuje sa doprava namieste (alebo ide doprava). Ak je ovládacia ruka pred pravou, ide robot cirkulárne vpravo dopredu, ak je za ňou, ide cirkulárne vpravo dozadu.
- B) Riadi sa robot č. 3 zo skupiny a stojí na mieste. Ak je ovládacia ruka pred pravou, ide robot priamo dopredu, ak je za ňou, ide dozadu.
- C) Riadi sa robot č. 2 zo skupiny a rotuje sa doľava namieste (alebo ide doľava). Ak je ovládacia ruka pred pravou, ide robot cirkulárne vľavo dopredu, ak je za ňou, ide cirkulárne vľavo dozadu.

3.4.2 Overenie riešenia na multiagentovej úlohe

Po dôkladnom softvérovom otestovaní implementácie bol algoritmus nasadený na tri reálne robotické platformy:

- Hexapod – 6-nohý robot
- iRobot Create – 2-kolesový diferenciálny podvozok
- Gul'ový robot – robot, presúvajúci sa pomocou zmeny polohy závažia vo vnútri gule, ktorý bol navrhnutý a skonštruovaný Ing. Chovancom na ÚRK FEI STU

Z hľadiska architektúry experimentálneho systému bol zavedený termín *Ovládací pseudo-kanál*. Týmto kanálom sa myslí virtuálne spojenie medzi operátorom a robotmi. Na strane operátora slúžia gestá pravej ruky ako multiplexor, ktorý kanálom aktivuje v danom čase práve jedno spojenie operátor - robot. Na druhej strane komunikácie možno hovoriť o virtuálnom demultiplexore, ktorý prepojí operátora so žiadaným robotom. Komunikácia je jednosmerná, operátor získava spätnú väzbu očným kontaktom, prípadne z externého vizuálneho systému, ak sa roboty nachádzajú mimo jeho fyzického dosahu.



Obr. 26. Architektúra systému multiagentového experimentu

Z hardvérového hľadiska boli všetky roboty bezdrôtovo pripojené k jednému počítaču pomocou Xbee alebo Bluetooth technológie. Z pohľadu softvérovej implementácie komunikačného rozhrania sa jedná o bežné sériové porty so štandardnými prenosovými rýchlosťami. Operátor pri ovládaní stojí alebo sedí pred snímačom Kinect, z ktorého výstupu sa využívajú len hĺbkové dáta (RGB obraz netreba). Spracúvajú sa implementovanými algoritmami, ktorých výstupom je kontinuálny tok pohybových inštrukcií pre roboty vysielaný na jednotlivé porty. Je dôležité podotknúť, že práve neriadeným robotom sa periodicky vysielajú inštrukcie stáť, resp. sú schopné v danom čase vykonávať nejakú autonómnu činnosť.

Nad popísanou architektúrou bol navrhnutý jednoduchý abstraktný model multiagentového experimentu – ťaženie nerastného bohatstva:

- Guľový robot – predstavuje prieskumný robot schopný detegovať ložisko nerastu pod vrstvou horniny
- iRobot Create – predstavuje robot schopný kopat' a odstrániť horninu
- Hexapod – predstavuje ťažný robot schopný dolovať nerast a odvieť ho na základňu

Výhodou takéhoto multiagentového systému voči jednému multifunkčnému robotu je možnosť paralelizácie úloh. Zatiaľ čo prieskumný robot hľadá ďalšie ložiská, robot kopáč pripravuje novú baňu a ťažný robot môže medzitým odvážať predtým získané nerasty na základňu. Experiment bol úspešne zrealizovaný. Pri dodržaní určitých zásad ovládania bola detekcia gest s úspešnosťou 99,9% pričom systém stíhal vyhodnocovať 20-23 fps, čo je postačujúci počet snímkov za sekundu. Operátor bol schopný využívať množinu všetkých deviatich pohybových príkazov na to, aby dopravil roboty na požadované miesto. V aktuálnej implementácii experimentu práve neovládané roboty žiadnu autonómnu činnosť nevykonávali, no v budúcnosti je vo výskume možné pokračovať aj týmto smerom.



Obr. 27. Ukážka laboratórneho pracoviska, kde bol realizovaný experiment

4 Záver

V predkladanej dizertačnej práci sú zosumarizované existujúce modely medziľudskej komunikácie pomocou gest z bežnej praxe, ako napríklad námorná signalizácia, komunikácia potápačov, vojakov či reč nepočujúcich. Tiež sú v práci popísané základy vizuálnych systémov, pretože spracovanie obrazu je pre reprezentáciu gest v digitálnych systémoch kľúčovým odvetvím. Analýza existujúcich riešení slúži ako prehľad výsledkov iných výskumníkov a inšpirácia k vlastnému. Návrh autorových algoritmov je inšpirovaný uvedenými teoretickými informáciami ako aj vedomosťami o stave odvetvia, ktoré si priebežne doplňoval z komerčných aj vedeckých zdrojov. V práci sú navrhnuté tri samostatné originálne algoritmy na komunikáciu ľudského operátora pomocou gest s robotickým systémom alebo viacerými systémami, pričom každý z návrhov je koncipovaný z inej perspektívy. Každý z uvedených algoritmov sa podarilo úspešne implementovať, aplikovať na roboty a následne experimentálne overiť.

4.1 Prínosy práce

Základným prínosom práce je využitie hĺbkového snímania na reprezentáciu 3D obrazu a spracovanie pohybu operátora. V súčasnej dobe sa jedná o trend, ktorý má svoje miesto vo výskumnej sfére, hernom priemysle, interaktívnych marketingových technológiách a postupne si získava svoju pozíciu aj v automatizácii. V minulosti sa na detekciu gest používali prevažne RGB kamery, pričom vývoj postupne prešiel od používania rukavíc a rôznych značiek k snímaniu rúk bez akejkoľvek prídavnej hmoty na uľahčenie detekcie. So snímaním pokožky je však spojených viacero problémov, ktoré sú v práci popísané. Použitie hĺbkového snímania mnohým týmto problémom predchádza a radikálne zvyšuje robustnosť detekcie rúk. Toto je výrazným pokrokom voči uvedeným metódam iných výskumníkov. Použitie technológie snímania a spracovania pohybu rúk na komunikáciu s robotickými systémami držia krok s paralelne prebiehajúcim výskumom všade vo svete. Jedným z hlavných prínosov prvého algoritmu (kapitola 2.2) je matematický koncept detekcie roviny operátora. Ak je ľudská bytosť považovaná za súbor trojrozmerných objektov v 3D priestore, je výhodné analyzovať ich vzájomnú polohu. Pri vzpriamenej pozícii sa poloha ramien a bedier mení len obmedzene, preto je možné ľudský trup považovať za geometricky vyjadrenú rovinu. Pozícia všetkých ostatných súčastí ľudského tela sa potom dá definovať vzdialenosťou od tejto roviny. Ak operátor v procese riadenia robota mení voči snímaču (počiatok 3D sústavy) svoju polohu, ale pozícia rúk voči definovanej rovine sa nemení, proces riadenia zostáva nenarušený.

Prínosom algoritmu riadenia robota ukázaním bodu v priestore (kapitola 2.3) je navrhnutý matematický aparát a aplikácia vektorovej algebry na danú problematiku. Ďalším prínosom je dosiahnutá miera autonómie, ktorú robot má. Je nezávislý od akýchkoľvek bezdrôtových technológií a vyššieho riadenia z centrálného PC. Všetky potrebné výpočty a snímanie sa dejú priamo na robote. Prínosom je aj aplikácia snímača Kinect na robot a z nej vyplývajúce využitie homogénnej transformácie medzi sústavou snímača a podvozku iRobot Create. Za prínos možno taktiež považovať definíciu cieľového bodu robota pomocou prieniku roviny podlahy a priamky vytvorenej predĺžením úsečky danej rukou operátora. Autor sa s podobným prístupom ku komunikácii človek – robot v publikáciách nestretol.

Veľkým prínosom tretieho algoritmu (kapitola 3) je samotná idea kooperácie robotov pod dohľadom jedného ľudského operátora a realizácia tejto kooperácie pomocou gestikulácie. Prínosom je tiež navrhnutý spôsob indexácie robotov pravou rukou a definícia pohybových akcií len pomocou ľavej dlane. Dôležitým prínosom je využitie vzájomnej hĺbkovej pozície rúk, ktoré umožňuje miesto troch základných pohybových akcií využívať trojnásobok. Prínosom je tiež maximálny počet riadených systémov – operátor môže kooperatívne ovládať skupinu až piatich robotov (príp. šiestich, ak by sa ako samostatný index uvažovala aj zovretá dľaň).

Nemalým prínosom prvého a tretieho algoritmu je dynamika gest. Väčšina konceptov z uvedených existujúcich riešení je založená na statických gestách, pretože jedna RGB kamera z technologického hľadiska umožňuje detegovať len zmenu polohy ruky v 2D priestore. Použitie hĺbkového rozmeru prináša možnosť detekcie plynulého pohybu rúk spredu dozadu a opačne. Takéto riadenie je intuitívnejšie a viac kopíruje samotné pohybové akcie ovládaných robotov.

Prínosom všetkých troch návrhov je platformová nezávislosť. Matematické koncepty sú aplikovateľné na akýkoľvek hĺbkový snímač pod ktorýmkoľvek operačným systémom. Čím presnejšie snímače a čím väčšie rozlíšenie bude trh ponúkať, tým lepšie výsledky bude možné dosiahnuť. Toto platí aj pre detekciu kĺbov operátora, ktorá je zabezpečovaná modulom NITE – presnejšia detekcia postavy zlepšuje efektivitu implementácie.

Za ďalšie prínosy tejto práce možno považovať využitie výsledkov autora na propagáciu robotiky v rámci rôznych osvetových akcií, výstav, či exkurzií pre základné a stredné školy. Prínosom je tiež vôbec samotné zavedenie RGB-D senzorov do výskumných a pedagogických aktivít na ÚRK FEI STU a sprístupnenie týchto technológií ďalším generáciám študentov a výskumníkov.

5 Použitá literatúra

- [1] HRONBERG, A. a kol.: Handbook of Machine Vision. Weinheim : Wiley-VCH, 2006
- [2] PANÁK, J. a kol.: Polygrafické minimum. Bratislava : TypoSet, 2000
- [3] ŠONKA, M. – HLAVÁČ, V. – BOYLE, R.: Image Processing, Analysis and Machine Vision. Pacific Grove : Brooks/Cole Publishing Company. 1999
- [4] Flag semaphore. www.anbg.gov.au , [cit. 4.9.2013]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web): <http://www.anbg.gov.au/flags/semaphore.html>
- [5] The Wig Wag. signal150.army.mil, [cit. 19.5.2011]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web): http://signal150.army.mil/00_wig_wag.html
- [6] The Birth of the Signal Corps. www.history.army.mil, [cit. 19.5.2011]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web): http://www.history.army.mil/books/30-17/S_1.htm#p5
- [7] Boys Life On Sending WIGWAG code. www.cranburyscouts.org, [cit. 19.5.2011]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web): <http://www.cranburyscouts.org/WigWagBL.htm>
- [8] Fingerspelling Information and Resources. www.fingerspellingalphabet.com, [cit. 5.9.2013]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web): <http://www.fingerspellingalphabet.com/>
- [9] Bede's Latin Hand Alphabet. www.medieval-baltic.us, [cit. 19.5.2011]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web): <http://www.medieval-baltic.us/latinbede.pdf>
- [10] John Bulwer. www.acsu.buffalo.edu, [cit. 4.9.2013]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web): http://www.acsu.buffalo.edu/~duchan/new_history/early_modern/bulwer.html
- [11] Slovenská prstová abeceda. www.nepocujuci.sk, [cit. 19.5.2011]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web): <http://www.nepocujuci.sk/jazyk.htm>

- [12] Langley flying school. www.langleyflyingschool.com, [cit. 4.9.2013]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web): <http://www.langleyflyingschool.com/Pages/CPGS%20Flight%20Operations.html>
- [13] Slovník termínov a definícií NATO. entia.sk, 2008, [cit. 19.5.2011]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web): http://entia.sk/public/files/slovník_def_nato.pdf
- [14] Visual Aids Handbook. www.caa.co.uk, 2007, [cit. 19.5.2011]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web): <http://www.caa.co.uk/docs/33/CAP637.PDF>
- [15] SUZUKI, S. – ABE, K.: Topological Structural Analysis of Digitized Binary Images by Border Following : Computer Vision, Graphics, and Image Processing 30, 1985
- [16] Posunková reč sa v regiónoch líši, iná je v Košiciach a iná v Bratislave. www.nepocujuci.sk, [cit. 20.5.2011]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web): <http://www.nepocujuci.sk/jazyk/sprava.jpg>
- [17] Počúť očami. www.nepocujuci.sk, 1999, [cit. 20.5.2011]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web): <http://www.nepocujuci.sk/jazyk/pocutocami.pdf>
- [18] Posunkový jazyk. www.nepocujuci.sk, 2001, [cit. 20.5.2011]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web): http://www.nepocujuci.sk/jazyk/jazykovykurz_rodicia.pdf
- [19] ŠONKA, M. – HLAVÁČ, V.: Počítačové vidění. Praha : Grada, 1992
- [20] VEZHNEVETS, V. - SAZONOV, V. – ANDREEVA, A.: A Survey on Pixel-Based Skin Color Detection Techniques. Moscow : Moscow State University, 2003
- [21] MANIGANDAN, M. – JACKIN M.: Wireless Vision Based Mobile Robot Control Using Hand Gesture Recognition Through Perceptual Color Space : IEEE ACE, 2010
- [22] BURANDE, Chetan A. – TUGNAYAT, Raju M. – CHOUDHARY, Nitin K.: Advanced Recognition Techniques for Human Computer Interaction : IEEE ICACE, 2010
- [23] PASCHALAKIS, S. – GIANI A. – HERNANDEZ-MARIN S.: Low-cost Accurate Skin Detection using Color and Pseudo-Morphological Features : IEEE ICCE, 2011
- [24] ASANTERABI, M. – ÖZGÜR E. – ÇETIN M.: A Fast Algorithm for Vision-based Hand Gesture Recognition for Robot Control : IEEE, 2006
- [25] VAN DEN BERGH, M. – KOLLER-MEIER E. – BOSCHÉ F.: Haarlet-based Hand Gesture Recognition for 3D Interaction : IEEE, 2009
- [26] HU, C. – WANG X. – MANDAL M. – MENG M. – LI D.: Efficient Face And Gesture Recognition Techniques for Robot Control : IEEE CCGEI, 2003
- [27] JIANG, Z. – WU Z. – YAO M.: Skin Detection on Images with Color Deviation : IEEE, 2008
- [28] VAN DEN BERGH, M. – VAN GOOL L.: Combining RGB and ToF Cameras for Real-time 3D Hand Gesture Interaction : IEEE, 2010
- [29] KOČESKI, S. - KOČESKA, N.: Vision-based Gesture Recognition for Human-Computer Interaction and Mobile Robot's Freight Ramp Control : Proceedings of the ITI 2010 32nd Int. Conf. on Information Technology Interfaces, 2010
- [30] LAL RAHEJA, J. - SHYAM, R. – KUMAR U. – BHANU PRASAD P.: Real-Time Robotic Hand Control Using Hand Gestures : Second International Conference on Machine Learning and Computing IEEE, 2010
- [31] RAO, V. S. - MAHANTA, C.: Gesture Based Robot Control : IEEE, 2006
- [32] CORRADINI, A. - GROSS, H.: Camera-based Gesture Recognition for Robot Control : IEEE, 2000
- [31] LEMENTEC, J. - BAJCSY, P.: Recognition of Arm Gestures Using Multiple Orientation Sensors: Gesture Classification : IEEE, 2004
- [32] IBA, S. - VANDE WEGHE, J. M. – PAREDI, CH. J. J. - KHOSLA, P. K.: An Architecture for Gesture-Based Control of Mobile Robots : Proceedings of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1999
- [33] LU, J. - JIANG, W. – HAMAJIMA, K.: A Gesture Model and Its Applications in Risk

Assessment for Misrecognition : Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Biometrics, 2006

[34] KATO, H. - KATO, T.: A Marker-Less Augmented Reality Based on Fast Fingertip Detection for Smart Phones : Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Consumer Electronics, 2011

[35] Inside the race to hack the Kinect. www.newscientist.com, [cit. 30.5.2011]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web): <http://www.newscientist.com/article/dn19762-inside-the-race-to-hack-the-kinect.html?page=1>

[36] DIY Kinect Hacking. ladyada.net, [cit. 30.5.2011]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web): <http://ladyada.net/learn/diykinect/>

[37] User:Marcan. openkinect.org, [cit. 30.5.2011]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web): <http://openkinect.org/wiki/User:Marcan>

[38] We Have a Winner. www.adafruit.com, [cit. 30.5.2011]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web): <http://www.adafruit.com/blog/2010/11/10/we-have-a-winner-open-kinect-drivers-released-winner-will-use-3k-for-more-hacking-plus-an-additional-2k-goes-to-the-eff/>

[39] Open Kinect. openkinect.org, [cit. 30.5.2011]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web): http://openkinect.org/wiki/Main_Page

[40] The Bilibot Project. www.bilibot.com, [cit. 30.5.2011]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web): <http://www.bilibot.com/>

[41] Bilibot: Open Source Kinect Based Affordable Robot Platform. kinecthacks.net, [cit. 30.5.2011]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web): <http://kinecthacks.net/bilibot-open-source-kinect-based-affordable-robot-platform/>

[42] Top 10 Robotic Kinect Hacks. spectrum.ieee.org, [cit. 30.5.2011]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web): <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/diy/top-10-robotic-kinect-hacks>

[43] How Microsoft Kinect Works. electronics.howstuffworks.com, [cit. 30.5.2011]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web): <http://electronics.howstuffworks.com/microsoft-kinect2.htm>

[44] TACHI, S.: Telexistence. Singapore : World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2010

[45] Kinect: The company behind the tech explains how it works. www.joystiq.com, [cit. 30.5.2011]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web):

<http://www.joystiq.com/2010/06/19/kinect-how-it-works-from-the-company-behind-the-tech/>

[46] Time-of-Flight Cameras. www.metrilus.de, [cit. 31.5.2011]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web): <http://www.metrilus.de/range-imaging/time-of-flight-cameras/>

[47] DepthSense DS311. www.softkinetic.com, [cit. 31.5.2011]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web):

http://www.softkinetic.com/Portals/0/Download/SK_datasheet_DepthSense_311_V1.pdf

[48] SR4000 Data Sheet. www.datvision.com, [cit. 31.5.2011]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web):

http://www.datvision.com/files/images/SR4000_Data_Sheet%20nov%202010.pdf

[49] FREEDMAN et. al.: Depth Mapping Using Projected Patterns : United States Patent Application Publication, 13.5.2010

[50] Kinect Pattern Uncovered. azttm.wordpress.com, [cit. 4.4.2014]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web):

<http://azttm.wordpress.com/2011/04/03/kinect-pattern-uncovered/>

[51] KLUG B.: Microsoft Kinect: The AnandTech Review. www.anandtech.com, [cit. 4.4.2014]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web):

<http://www.anandtech.com/show/4057/microsoft-kinect-the-anandtech-review/2>

[52] Kinect Operation. wiki.ros.org, [cit. 4.4.2014]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web): http://wiki.ros.org/kinect_calibration/technical

[53] ANDERSEN, M. R. – JENSEN, T. – LISOUSKI, P. – MORTENSEN, A. K. – HANSEN, M. K. – GREGERSEN, T. – AHRENDT, P.: Kinect Depth Sensor Evaluation for Computer Vision Applications : Aarhus University, 2012

[54] Marshalling signals. www.airquestaviation.com, [cit. 4.9.2013]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web):

http://www.airquestaviation.com/media/pdf/5_Complete_Marshalling_Signals_List.pdf

[55] Obrázky k leteckej navigácii. upload.wikimedia.org, [cit. 4.9.2013]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web): <http://upload.wikimedia.org>

[56] Scuba diving. yogadproudtraveler.blogspot.sk, [cit. 5.9.2013]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web): <http://yogadproudtraveler.blogspot.sk/2012/09/scuba-diving-talikud-island-davao-city.html>

[57] Standardized Hand Signals For C.R.E. Operations. www.lefande.com/hands.html, [cit. 5.9.2013]. Dostupné na webovskej stránke (world wide web):

<http://www.lefande.com/hands.html>

[58] SKLANSKY J.: Finding the Convex Hull of a Simple Polygon : PRL, 1982

6 Publikované práce autora

ADE Vedecké práce v zahraničných nekarentovaných časopisoch

Duchoň, František - Pászto, Peter - Dekan, Martin - Tölgyessy, Michal – Foltin, Martin:

Automatizovaná inšpekcia chýbajúcich skrutiek na montážnej linke pomocou vizuálneho systému.

In: Automa. - ISSN 1210-9592. - Roč. 20, č. 5 (2014), s. 37-42

ADF Vedecké práce v domácich nekarentovaných časopisoch

Dekan, Martin - Vitko, Anton - Tölgyessy, Michal - Babinec, Andrej: Globálna navigácia pre mobilný robot.

In: EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie. - ISSN 1335-2547. - Roč. 18, č. 4 (2012), s. 28-29

Tölgyessy, Michal - Hubinský, Peter: Robot Control Using Hand Gesture Recognition Overview.

In: ATP Journal plus. - ISSN 1336-5010. - č. 1 : Systémy automatického riadenia (2011), s. 40-44

ADM Vedecké práce v zahraničných časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS

Pászto, Peter - Klúčik, Marian - Chovanec, Ľuboš - Tölgyessy, Michal - Hanzel, Jaroslav - Khanh, Duong Quang - Hubinský, Peter: Object Relative Position Estimation Based on Hough Transform Using One Camera.

In: International Journal of Imaging and Robotics. - ISSN 2231-525X. - Vol. 13, Iss. 2 (2014), s. 1-11

Tölgyessy, Michal - Chovanec, Ľuboš - Pászto, Peter - Hubinský, Peter: A Plane Based Real-Time Algorithm for Controlling a Semi-Autonomous Robot with Hand Gestures Using the Kinect.

In: International Journal of Imaging and Robotics. - ISSN 2231-525X. - Vol. 13, Iss. 2 (2014), s. 126-133

AED Vedecké práce v domácich recenzovaných vedeckých zborníkoch, monografiách

Tölgyessy, Michal - Hubinský, Peter: Advantages of the Kinect Sensor in Robotics Education.
In: Selected Topics in Modelling and Control Vol. 8. - Bratislava : Slovak University of
Technology Press, 2012. - ISBN 978-80-227-3840-8. - S. 136-139

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

Duchoň, František - Hubinský, Peter - Hanzel, Jaroslav - Babinec, Andrej - Tölgyessy, Michal:
Intelligent Vehicles as the Robotic Applications.

In: Procedia Engineering. - ISSN 1877-7058. - Vol. 48 : Modelling of Mechanical and
Mechatronics Systems. 5th International Conference. Zemplínska Šírava, Slovakia, November 6- 8,
2012 (2012), s. 105-114

Tölgyessy, Michal - Hubinský, Peter - Rodina, Jozef: Controlling a Hexapod Robotic System with
Hand Gestures Using a Depth Camera.

In: Mezinárodní Masarykova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2012 (MMK
2012) : Sborník příspěvku z mezinárodní vědecké konference; 10.-14.prosince 2012, Hradec
Králové. - Hradec Králové : Magnanimitas, 2012. - ISBN 978-80-905243-3-0. - S. 3318-3323

Tölgyessy, Michal - Hubinský, Peter: The Kinect Sensor in Robotics Education.

In: Robotics in Education 2011 : 2nd International Conference. Vienna, Austria, 15-16 August
2011. - Vienna : INNOC, 2011. - ISBN 978-3-200-02273-7. - S. 143-146

BDF Odborné práce v domácich nekarentovaných časopisoch

Tölgyessy, Michal: KINECT, hacknutý snímač v mobilnej robotike.

(<http://www.posterus.sk/?p=10623>)

In: Posterus [elektronický zdroj]. - ISSN 1338-0087. - Vol. 4, Iss. 5 (2011)

Tölgyessy, Michal: Line Follower - robot nasledujúci čiaru. (<http://www.posterus.sk/?p=13956>)

In: Posterus [elektronický zdroj]. - ISSN 1338-0087. - Vol. 5, Iss. 10 (2012), online [9] s.