

Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Ing. Peter Pászto

Autoreferát dizertačnej práce

NAVIGÁCIA MOBILNÉHO ROBOTY VIZUÁLNYM SYSTÉMOM

Na získanie akademického titulu
philosophiae doctor

v doktorandskom študijnom programe
5.2.14 Automatizácia a riadenie

Bratislava 2012

Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Ing. Peter Pászto

Autoreferát dizertačnej práce

NAVIGÁCIA MOBILNÉHO ROBOTY VIZUÁLNYM SYSTÉMOM

Na získanie akademického titulu
philosophiae doctor

v doktorandskom študijnom programe
5.2.14 Automatizácia a riadenie

Bratislava 2012

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Ústave riadenia a priemyselnej informatiky Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ: **Ing. Peter Pászto**

Ústav riadenia a priemyselnej informatiky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ilkovičova 3
812 19 Bratislava

Školiteľ: **prof. Ing. Peter Hubinský, PhD.**

Ústav riadenia a priemyselnej informatiky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ilkovičova 3
812 19 Bratislava

Oponenti: **prof. Ing. Alexander Gmitterko, CSc., TU Košice**
doc. Ing. Libor Hargaš, PhD., ŽU Žilina

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa o h
v

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

Názov

Navigácia mobilného robota vizuálnym systémom

Anotácia

Cieľom práce je vytvoriť aplikáciu na navigáciu mobilnej robotickej platformy iRobot Create pomocou vizuálneho systému. V práci je navrhnutý univerzálny algoritmus na detekciu kruhových značiek pri meniacich sa svetelných podmienkach (ktoré môžu nastať pri samotnom pohybe mobilného robota alebo jeho prácou v rôznych miestnostiach). Navigačná aplikácia dokáže určiť relatívnu polohu medzi detegovanými značkami a mobilným robotom použitím jedinej kamery, pričom je pre ňu známy iba reálny polomer značiek v priestore. Okrem určenia polohy aplikácia určuje aj farbu značiek, ktoré pre mobilný robot znamenajú povel o spôsobe ich obchádzania (z ľavej alebo z pravej strany alebo zastavenie). Aplikácia plánuje pohyb mobilného robota na základe týchto povelov s prioritou vzhľadom na najbližšiu značku a berie do úvahy aj prípadné prekážky. Prekážky deteguje laserovým skenerom a cestu mobilného robota plánuje tak, aby splnil cieľ daný farbou značky a zároveň obišiel prekážku. Navigácia mobilného robota prebieha v reálnom čase.

Title

Mobile robot navigation using a visual system

Annotation

The aim of this work is to develop an application for navigation of the iRobot Create mobile robot platform using visual system. An universal algorithm for circle marks detection in changing light conditions (which can occur during the mobile robot movement or while working in different environments) was designed. The developed application is able to determine the relative position between the mobile robot and the detected marks using only one camera while only the real radius of the circular mark in the environment is known. The application is also determining the colors of the detected marks while these colors are representing the commands for the mobile robot about the way of their bypassing (from the left or right side or stopping). The application is planning the mobile robot movements based on the meanings of these commands taking the highest priority on the nearest mark considering the possible obstacles. The obstacles are detected using a laser scanner and the mobile robot's path is planned the way to meet the goal determined by the color of the mark while also bypassing the obstacle. The navigation process is in real-time.

Obsah

1	Úvod	5
1.1	Ciele dizertačnej práce	5
1.2	Tézy dizertačnej práce	6
2	Súčasný stav riešenej problematiky	6
3	Úvod do spracovania obrazu	7
3.1	Digitalizácia obrazu	7
3.2	Predspracovanie obrazu	7
3.2.1	Histogram	7
3.2.2	Konvolúcia	8
3.3	Detekcia hrán	8
3.3.1	Laplaceov operátor	10
3.3.2	LoG operátor (Laplacian of Gaussian)	11
3.3.3	Cannyho detektor	11
4	Úvod do riadenia mobilných robotov	12
4.1	Plánovanie cesty mobilného robota	13
4.1.1	Globálne metódy plánovania cesty	13
4.1.2	Lokálne metódy plánovania cesty	14
4.2	Senzorický subsystém robota	14
4.2.1	Ultrazvukový senzor	14
4.2.2	Laserový senzor	14
5	Analýza a riešenie problému	15
5.1	Algoritmus riadenia mobilného robota	16
5.1.1	Detekcia značiek	17
5.1.2	Princíp Houghovej transformácie	18
5.1.3	Určenie vzájomnej polohy mobilného robota a detegovanej značky ...	19
5.1.4	Plánovanie cesty mobilného robota	26
6	Záver	30

1 Úvod

Práca sa zaoberá navigáciou mobilného robota iRobot Create pomocou vizuálneho systému. Snahou je využiť vizuálnu informáciu v čo najväčšej miere tak, aby bolo nutné pridať iba minimálne množstvo doplnkových snímačov, pričom na kvalitu vizuálneho systému (rozlíšenie, frekvencia) sa nekladú veľké nároky. Na prácu by mal postačovať ľubovoľný bežne dostupný vizuálny systém pripojiteľný na počítač cez USB rozhranie (napr. web kamera).

Úlohou mobilného robota bude autonómne prejsť dráhu vyznačenú kruhovými značkami rôznych farieb a zastaviť sa v okolí ďalšej kruhovej značky špecifickej farby, pričom farby značiek znamenajú pre robota povel obchádzať ich z pravej alebo z ľavej strany. Konkrétne farby značiek budú definované v práci, pretože ich výber môže ovplyvniť použité algoritmy spracovania obrazu (napr. používaný farebný model). Výber vhodných algoritmov taktiež ovplyvňuje aj tvar značiek. Preto bude v ďalších kapitolách popísaný aj dôvod výberu kruhových značiek pre účel vyznačenia dráhy robota.

Robot musí prejsť danú dráhu autonómne, tzn. musí byť schopný vyhýbať sa prekážkam. Je preto potrebné vybrať vhodný spôsob detekcie prekážok (zvážiť použitie doplnkového snímača).

Z uvedeného vyplýva, že práca je logicky delená do dvoch väčších tematických celkov: spracovanie obrazu a navigácia robota. Jeden z najrušivejších vplyvov na úspešnosť algoritmov spracovania obrazu je premenlivosť osvetlenia. Táto práca sa bude snažiť tento rušivý vplyv potlačiť čo najviac. Navigácia robota bude pozostávať z návrhu trajektórie robota, pričom sa budú brať do úvahy údaje získané vizuálnym systémom a prípadne prídavným snímačom tak, aby sa robot dostal na značkami určenú pozíciu a vyhol sa prípadným prekážkam.

1.1 Ciele dizertačnej práce

Ciele práce možno zhrnúť do nasledujúcich bodov:

- Detekcia značiek
 - Výber vhodného farebného modelu a metód spracovania obrazu, ktoré dokážu detegovať značky aj pri meniacich sa svetelných podmienkach
- Získanie geometrických údajov použiteľných na navigáciu mobilného robota (z viacerých rozpoznaných značiek)
- Plánovanie trajektórie mobilného robota
 - Plánovanie na základe geometrických údajov získaných spracovaním obrazu z vizuálneho systému
 - Plánovanie na základe údajov o prekážkach získaných z prídavného snímača
- Riadenie pohybu mobilného robota po určenej trajektórii
 - Rozdelenie trajektórie na úseky s prioritou pohybu k najbližšej značke
- Využitie priebežne získavaných informácií na upresňovanie tvaru trajektórie pohybu mobilného robota

1.2 Tézny dizertačnej práce

1. Analýza výberu farebného modelu a metód spracovania obrazu pre nastavenie univerzálneho farebného filtra na detekciu značiek pri meniacich sa svetelných podmienkach
2. Detekcia značiek v obraze snímanom kamerou robota
3. Určenie geometrických údajov slúžiacich na neskoršiu navigáciu mobilného robota z viacerých rozpoznaných značiek
4. Plánovanie trajektórie mobilného robota z údajov získaných z detegovaných značiek v obraze
5. Riadenie pohybu mobilného robota po určenej trajektórii, rozdelenie trajektórie na úseky s prioritou pohybu mobilného robota k najbližšej značke
6. Použitie priebežne získavaných informácií na upresňovanie trajektórie pohybu robota

2 Súčasný stav riešenej problematiky

Problematiku tejto práce je možné rozdeliť do dvoch častí: spracovanie obrazu a navigácia mobilného robota. Každá táto časť má svoj samostatný ale aj spoločný vývoj. Preto je táto problematika veľmi rozsiahla.

Nasledujúce kapitoly sa budú venovať úvodu do predstavených problematik samostatne. To znamená, že budú opísané základné algoritmy pre prácu s obrazom a základné možnosti navigácie mobilných robotov na báze niektorých senzorov.

V minulosti sa vizuálny systém v robotike využíval menej často, pretože algoritmy spracovania obrazu sú výpočtovo náročné a na dosiahnutie potrebného výsledku je potrebné kombinovať väčšie množstvo týchto algoritmov. To znemožňovalo použitie vizuálneho systému v reálnom čase. Preto vznikali iba aplikácie, pri ktorých sa neočakával okamžitý zásah mobilného robota na určitú zmenu stavu prostredia.

V súčasnosti rozvojom výpočtovej techniky a knižníc spracovania obrazu sa využitie vizuálnych systémov dostáva do popredia. Moderné mobilné roboty sú na ich báze schopné orientovať sa v priestore bez potreby použitia iných doplnkových snímačov.

Príkladmi moderných aplikácií vizuálnych systémov sú roboty sledujúce určité objekty (lopty, tváre, alebo objekty určené farbou, príp. tvarom), alebo automobily detegujúce chodcov a dopravné značky v reálnom čase, prístroje schopné nájsť chodník a tak pomáhať v pohybe nevidiacim ľuďom, atď.

Moderné trendy v oblasti navigácie mobilných robotov sú založené na rôznych metódach navigácie využívajúce moderné snímače, ktoré v dnešnej dobe dosahujú vysoké presnosti, pričom sa im zmenšujú rozmery (hmotnosti) a ceny. Mobilné roboty tak môžu byť vybavené väčším množstvom snímačov. Medzi najčastejšie využívané senzory patria napr. ultrazvukový alebo laserový senzor, ale aj GPS, gyroskop, atď.

Na základe týchto snímačov sa rozvíjajú rôzne metódy plánovania cesty mobilných robotov, niektoré z nich budú v krátkosti uvedené aj v tejto práci.

3 Úvod do spracovania obrazu

Techniky spracovania digitálneho obrazu je možné rozdeliť na: snímanie (digitalizácia), predspracovanie, segmentáciu a rozpoznanie [3]. Každá z menovaných kategórií upravuje vstupný obraz na výstupný pomocou rôznych operácií.

3.1 Digitalizácia obrazu

Digitalizácia obrazu je prechod od spojitej k diskretnej funkcii, tzn. analógový signál z kamery sa transformuje na digitálny obraz. Tento proces sa odohráva v dvoch nezávislých krokoch, ktoré sú kvantovanie a vzorkovanie.

Vzorkovaním spojitej funkcie $f(x, y)$ sa rozumie odoberanie hodnôt (vzoriek) v rovnakých časových intervaloch. Spojitý obraz sa rozdelí na N riadkov a M stĺpcov. Prienik riadku a stĺpca tvorí obrazový bod. Jednému vzorkovaciemu bodu odpovedá v digitálnom obraze jeden obrazový element (pixel). Proces vzorkovania teda určuje definičný obor obrazovej funkcie.

Princípom kvantovania je diskretizácia oboru hodnôt obrazovej funkcie. Obor hodnôt funkcie sa rozdelí na intervaly, ku ktorým je potom pridelená jediná, zástupná hodnota. Podľa spôsobu rozdelenia kvantovacej veličiny hovoríme o uniformnom alebo neuniformnom kvantovaní. Uniformné kvantovanie používa konštantnú dĺžku intervalu, kým neuniformné kvantovanie premenlivú dĺžku intervalu. Na výber zástupnej hodnoty môžeme použiť rôzne techniky. Obvykle sa používa priemer hodnôt z celého intervalu, váhovaný priemer, medián, priemer z hodnôt na okraji intervalu.

3.2 Predspracovanie obrazu

Táto časť zahŕňa techniky ako sú napríklad ekvalizácia a normalizácia histogramu, bodové jasové transformácie, konvolúciu alebo aplikáciu vyhladzovacích a hranových filtrov.

3.2.1 Histogram

Histogram poskytuje predstavu o rozdelení jasových úrovní v digitálnom obraze [4]. Histogram jasu $h_f(z_i), i = 0, \dots, L-1$ je vektor h s počtom zložiek rovným počtu jasových úrovní L . Hodnota každej zložky odpovedá počtu bodov príslušného jasu v obraze. Histogram sa často zobrazuje ako stĺpcový diagram.

Pre optimálne zvýšenie kontrastu monochromatického obrazu sa veľmi často používa ekvalizácia histogramu. V ekvalizovanom histograme obrazu po transformácii jasovej stupnice sú jednotlivé jasové zložky zastúpené zhruba v rovnakom počte. Ekvalizácia zvýši kontrast pre úrovne jasu blízko maximálnemu histogramu a zníži kontrast blízko minimálnemu histogramu.

Histogram vstupného obrazu môžeme označiť ako $H(p)$ a jeho jasová stupnica je $p = \langle p_0, p_k \rangle$. Cieľom ekvalizácie je nájsť monotónnu transformáciu jasovej stupnice $q = T(p)$, aby výsledný histogram $G(q)$ bol rovnomerný pre celý výstupný interval jasov $q = \langle q_0, q_k \rangle$. Z požiadavky na monotónnosť zobrazenia T vyplýva:

$$\sum_{i=0}^k G(q_i) = \sum_{i=0}^k H(p_i) \quad (3.1)$$

Hľadaná transformácia jasovej stupnice je (v prípade, že obraz má N riadkov a N stĺpcov):

$$q = T(p) = \frac{q_k - q_0}{N^2} \int_{p_0}^p H(s) ds + q_0 \quad (3.2)$$

Integrál v rovnici (3.2) sa nazýva kumulatívny histogram. Pre digitálne obrazy je aproximovaný sumou. Diskrétna aproximácia transformácie jasovej stupnice (3.2) je:

$$q = T(p) = \frac{q_k - q_0}{N^2} \sum_{i=p_0}^p H(i) + q_0 \quad (3.3)$$

Normalizácia histogramu je ďalšou možnosťou na dosiahnutie lepšej kvality obrazu. Histogram sa rozťahne na novú jasovú stupnicu $\langle q_0, q_k \rangle$ použitím transformácie:

$$q = T(p) = (p - p_0) \frac{q_k - q_0}{p_k - p_0} + q_0 \quad (3.4)$$

3.2.2 Konvolúcia

Konvolúcia je metóda, ktorá systematicky prechádza celý obraz a na výpočet novej hodnoty bodu využíva malé okolie O reprezentatívneho bodu. Táto hodnota je zapísaná do nového obrazu. Diskrétna konvolúcia má tvar:

$$g(x, y) = \sum_{(m,n) \in O} h(x-m, y-n) f(m, n) \quad (3.5)$$

kde f je obrazová funkcia pôvodného obrazu, g je obrazová funkcia nového obrazu, h sa nazýva konvolučná maska alebo konvolučné jadro, h udáva koeficienty jednotlivých bodov v okolí O . Najčastejšie sa používajú obdĺžnikové masky s nepárnym počtom riadkov a stĺpcov, pretože v tom prípade môže reprezentatívny bod ležať v strede masky.

Transformácie v lokálnom okolí bodu sa delia na vyhladzovanie a ostrenie. Metódy vyhladzovania sa snažia potlačiť šum, ale rozostrejujú hrany. Naopak metódy ostrenia slúžia na detekciu hrán a čiar, ale zosilňujú šum.

3.3 Detekcia hrán

Medzi metódy segmentácie obrazu patria aj metódy detekcie hrán. Tieto metódy v obraze ponechajú len informáciu o hranách, všetky ostatné informácie sa z obrazu odstránia.

Sú založené na vyhodnocovaní rozdielu v hodnotách úrovne jasu, ktoré možno pozorovať v obraze pri prechode z pozadia na objekt alebo medzi dvoma rôznymi typmi objektov [5]. To znamená, že skúmaním množiny susedných bodov obrazu je možné nájsť hrany a ich spojením sa dajú získať hranice oblastí. Hrany medzi

oblasťami predstavujú určitú nespojitosť, najčastejšie v hodnote jasú, farby alebo textúry.

Ak sa signál v riadku obrazu uvažuje ako funkcia $f(x)$, tak sa pomocou derivácie dajú nájsť také body v riadku, v ktorých sa signál náhle mení. Prvá derivácia funkcie nadobúda nenulové hodnoty v miestach, kde signál mení svoju hodnotu. Tam, kde signál nemení svoju hodnotu, je prvá derivácia nulová. Prvá derivácia nadobúda maximum v bode, kde dochádza k výraznej zmene jasú. Druhá derivácia zas nadobúda nenulovú hodnotu tam, kde sa mení prvá derivácia. Prvá derivácia je teda použiteľná na detekciu hrany v obraze a druhá je vhodná na určenie typu prechodu (t.j. či ide o prechod z tmavšej oblasti do svetlejšej alebo naopak).

Jednoduchý postup určenia hranových bodov je taký, že sa najprv vypočíta $|f'(x)|$ z funkcie $f(x)$ a následne sa výsledok porovná s prahovou hodnotou. Len ak je hodnota $|f'(x)|$ väčšia ako zvolená prahová hodnota, obrazový bod sa považuje za súčasť hrany. Je však obťažné zvoliť optimálnu prahovú hodnotu. Pri veľmi vysokej prahovej hodnote dochádza k strate menej významných hrán, pretože sa kandidátmi na hranu stávajú len tie body, v ktorých sa $f(x)$ mení veľmi rýchlo.

Pri práci s obrazom sa však pracuje s dvojrozmernou funkciou $f(x, y)$. Na vyšetrenie priebehu dvojrozmernej funkcie možno použiť gradient. Gradient $\nabla f(x, y)$ funkcie $f(x, y)$ v bode (x, y) je vektor so zložkami $\frac{\partial f(x, y)}{\partial x}$ v smere osi x a $\frac{\partial f(x, y)}{\partial y}$ v smere osi y :

$$\nabla f(x, y) = \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} i_x + \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} i_y \quad (3.6)$$

kde x a y sú súradnice bodu, pre ktorý sa gradient vyšetruje a i_x , i_y sú jednotkové vektory v smere osi x a y . Aplikovaním uvedených postupov často vznikajú hrubé pásy namiesto tenkých hraníc oblastí. Dodatočne sa môžu sprísniť kritériá na výber hraničných bodov z nádejných kandidátov.

Systémy na detekciu hrán založené len na veľkosti gradientu $|\nabla f(x, y)|$ sa nazývajú nesmerové detektory hrán, pretože nie sú citlivejšie na jeden smer ako na druhý. Ak je systém založený na funkciách, ktoré sú citlivé na jeden smer viac ako na druhý, hovoríme o smerovom detektore hrán.

Nasnímaný obraz je digitálny signál. Na spracovanie digitálneho signálu $f(n_1, n_2)$ sa pri výpočte gradientu používa namiesto derivácií diferenciacia. Je niekoľko možností výpočtu gradientu diskkrétnej funkcie. Napríklad derivácia $\frac{\partial f(x, y)}{\partial x}$ sa dá nahradiť:

$$\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \leftrightarrow G_{n1} = \frac{f(n_1, n_2) - f(n_1 - 1, n_2)}{T}$$

$$G_{n1} = \frac{f(n_1 + 1, n_2) - f(n_1, n_2)}{T} \quad (3.7)$$

$$G_{n1} = \frac{f(n_1 + 1, n_2) - f(n_1 - 1, n_2)}{2T}$$

Výpočet gradientu z viacerých hodnôt dvojrozmernej funkcie je menej citlivý na prípadný šum. Príklad zlepšeného odhadu môže vyzerať nasledovne:

$$\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \leftrightarrow [f(n_1 + 1, n_2 + 1) - f(n_1 - 1, n_2 + 1)] + 2 \cdot [f(n_1 + 1, n_2) - f(n_1 - 1, n_2)] \quad (3.8)$$

$$+ [f(n_1 + 1, n_2 - 1) - f(n_1 - 1, n_2 - 1)]$$

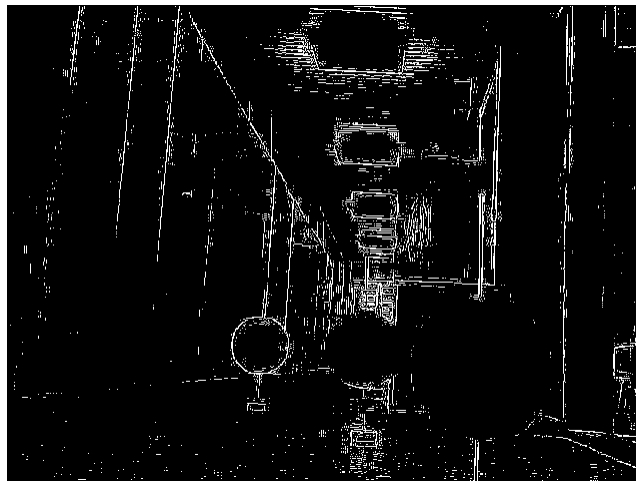
V praxi sa na hľadanie hrán používajú jednoduché konvolučné masky, ktoré dobre aproximujú derivácie obrazovej funkcie. Príklady takýchto masiek sú Robertsov operátor, Prewittov operátor, Sobelov operátor, Robinsonov operátor, Kirschov operátor, ale aj Laplaceov operátor, LoG operátor a Cannyho detektor.

3.3.1 Laplaceov operátor

Laplaceov operátor aproximuje druhú deriváciu, preto je invariantný vzhľadom na otočenie, a udáva len veľkosť hrany. Nevýhodou je veľká citlivosť na šum a dvojité odozvy na hrany odpovedajúce tenkým líniám. Konvolučné masky:

$$4 - \text{susednosť: } h = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$8 - \text{susednosť: } h = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$



Obr. 1. Príklad použitia Laplaceovho operátora, konvolučnej masky (3.10)

3.3.2 LoG operátor (Laplacian of Gaussian)

Základom prístupu je hľadanie miesta v obraze, kde druhá derivácia obrazovej funkcie prechádza nulou. Na tomto mieste prvá derivácia dosahuje lokálne maximum. Problémom je, že druhá derivácia je citlivá na šum. Preto sa najprv potlačí šum a až potom sa derivuje. Na potlačenie šumu sa používa lineárny filter, ktorého koeficienty v konvolučnej maske zodpovedajú dvojrozmernému gaussovskému rozdeleniu

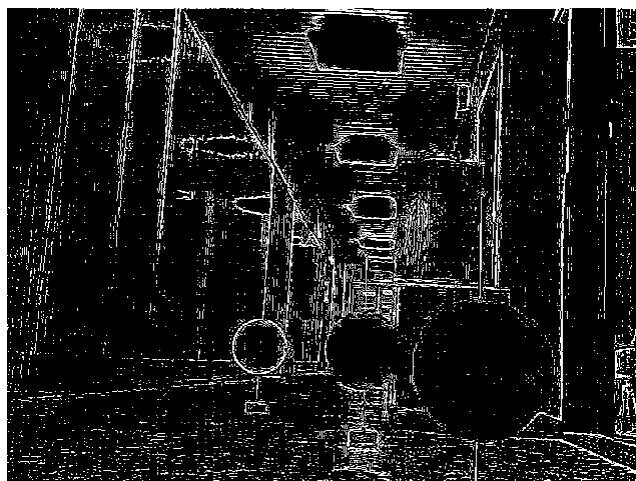
$$G(x, y, \sigma) = e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (3.11)$$

kde s je stredná kvadratická odchýlka, ktorá určuje okolie. Body bližšie k stredu majú väčšiu váhu ako vzdialenejšie. Na odhad druhej derivácie z filtrovanej obrazovej funkcie $G(x, y, s) * f(x, y)$, kde $*$ konvolúcia, sa môže použiť Laplacian \tilde{N}_2 . Získa sa LoG operátor, $\tilde{N}_2[G(x, y, s) * f(x, y)]$, v ktorom vďaka linearite operácií je možné zameniť poradie konvolúcie a derivácie.

$$\nabla^2(G(x, y, \sigma) * f(x, y)) = (\nabla^2 G(x, y, \sigma)) * f(x, y) \quad (3.12)$$

. Aproximácia operátora LoG v maske 5x5 je:

$$h = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -2 & -1 & 0 \\ -1 & -2 & 16 & -2 & -1 \\ 0 & -1 & -2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$



Obr. 2. Príklad použitia LoG operátora

3.3.3 Cannyho detektor

Canny určil tri kritériá, ktoré by mal optimálny hranový detektor spĺňať:

- Detekčné kritérium, detektor nesmie zabudnúť na významnú hranu a na jednu hranu môže byť maximálne jedna odozva.

- Lokalizačné kritérium, rozdiel medzi skutočnou a nájdenou hranou má byť minimálny
- Kritérium jednej odozvy

Cannyho detektor [6] využíva konvolúciu s dvojrozmerným Gaussianom a deriváciu v smere gradientu. Poskytuje informácie o smere a veľkosti hrany. Nech G je dvojrozmerný Gaussian, nech G_n je prvá derivácia G v smere gradientu

$$G_n = \frac{\partial G}{\partial n} = n \nabla G \quad (3.14)$$

kde n je smer gradientu, ktorý sa získa z

$$n = \frac{\nabla(G * f)}{|\nabla(G * f)|} \quad (3.15)$$

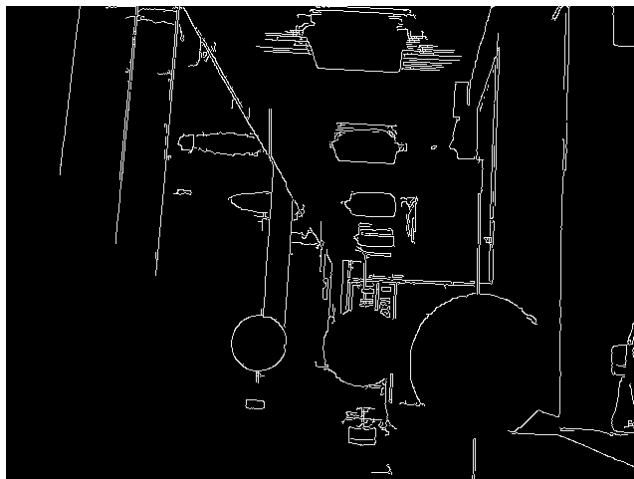
Hrana sa získa v bode, kde funkcia $G_n * f$ dosiahne lokálne maximum a druhá derivácia sa rovná nule

$$\frac{\partial^2}{\partial n^2} G * f = 0 \quad (3.16)$$

Pre silu hrany platí:

$$|G_n * f| = |\nabla(G * f)| \quad (3.17)$$

Kritérium jednej odozvy sa dosahuje následne prahovaním.



Obr. 3. Príklad použitia Cannyho detektora

4 Úvod do riadenia mobilných robotov

Hlavnou úlohou autonómneho mobilného robota je dosiahnuť svoju cieľovú polohu v prostredí s prekážkami bez kolízie s nimi [7]. Aby mohol svoju úlohu splniť, musí byť vybavený potrebnými snímačmi a algoritmami na stanovenie cesty, ktorá by zabezpečila dosiahnutie stanoveného cieľa.

Mobilné roboty môžu byť riadené na základe apriórnej znalosti mapy prostredia, v ktorom sa majú pohybovať a v tom prípade potrebujú neustále disponovať informáciou o svojej okamžitej polohe [8]. Iným spôsobom riadenia sú metódy, ktoré nevyžadujú žiadnu apriórnu informáciu a pohyb robota je riadený len na základe okamžitých informácií z laserového alebo ultrazvukového snímača vzdialenosti resp. vizuálneho systému (reaktívne typy riadenia). Špeciálnym spôsobom riadenia je sledovanie predpísanej trajektórie (čiary namaľovanej reflexnou farbou na podložke, kábla s vysokofrekvenčným signálom zaliatym v podlahovej hmote a pod.).

4.1 Plánovanie cesty mobilného robota

Plánovanie cesty mobilného robota sa delí na tri základné druhy:

- Plánovanie misie (úlohy) – je to celkové stanovenie poslania mobilného robota (napr. dosiahnutie stanovenej polohy v priestore)
- Globálne plánovanie trasy alebo cesty – z dostupnej mapy prostredia sa stanoví body trasy alebo cesta na dosiahnutie cieľa misie
- Lokálne plánovanie cesty – počas pohybu robota je potrebné reagovať na zmenené podmienky (napr. nová statická alebo dynamická prekážka) a splniť stanovený cieľ misie bez stretu s prekážkami

4.1.1 Globálne metódy plánovania cesty

Tieto metódy spočívajú v tom, že cesta sa určí pred začiatkom realizácie pohybu robota. Na jej zostavenie treba mať všetky potrebné informácie vopred a obyčajne je aj dostatok času na jej zhotovenie. Medzi globálne metódy plánovania cesty patrí napr. potenciálová metóda. Táto metóda predpokladá, že každá prekážka vytvára okolo seba umelé potenciálové pole s intenzitou klesajúcou smerom od steny (v dvojrozmernom priestore od hrany) prekážky. Všetky prekážky v priestore vytvoria spoločné potenciálové pole, ktoré je charakterizované „vrchmi“, teda prekážkami a „údoliami“, možnými cestami robota. Intenzitu potenciálového poľa môžeme pre každý bod priestoru počítať aj podľa heuristického vzťahu, napríklad:

$$I_i(x, y) = \frac{1}{1 - e^{-kd}} \quad (4.1)$$

kde $I_i(x, y)$ je intenzita poľa vytvoreného prekážkou i v bode (x, y) priestoru, d je minimálna vzdialenosť bodu (x, y) od hrany prekážky a k je voliteľný koeficient „strmosti“ klesania intenzity od hrany prekážky.

Celková intenzita poľa $P(x, y)$ od všetkých prekážok v bode (x, y) priestoru je daná súčtom intenzít od jednotlivých prekážok:

$$P(x, y) = \sum_{i=1}^n I_i(x, y) \quad (4.2)$$

kde n je celkový počet prekážok. Ďalšími príkladmi globálnych metód plánovania cesty sú metóda sledovania obrysov prekážok, metóda voľného priestoru alebo metóda založená na Voronoivom diagrame [7].

4.1.2 Lokálne metódy plánovania cesty

Lokálne metódy spočívajú v plánovaní cesty na základe priebežne získavaných informácií o prostredí pomocou vlastných autonómnych senzorov robota počas pohybu do zadaného cieľa. Všeobecne ich možno členiť na metódy založené na exaktných metódach a heuristických metódach založených na skúsenostiach. Exaktné metódy využívajú známe opisy silových polí okolo objektu (prekážky) z fyziky a z aplikovaných vied.

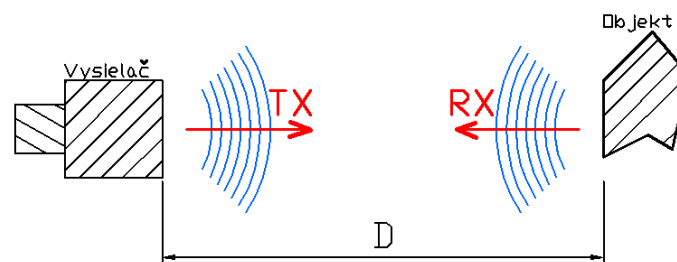
Príkladom heuristických metód je metóda umelého potenciálového poľa [10]. Táto metóda vytvára pole alebo gradient na globálnej geometrickej mape prostredia. Metóda potenciálového poľa považuje robot za bod, ktorý je ovplyvnený umelým potenciálovým poľom $U(p)$. Robot sa v prostredí pohybuje pomocou sledovania tohto poľa. Cieľ je definovaný ako minimum v priestore a správa sa ako príťažlivá sila, zatiaľ čo prekážky majú predpísané správanie v podobe odpudivých síl. Superpozíciou všetkých síl aplikovaných na robot vznikne umelé potenciálové pole, ktoré plynule dovedie robot do cieľovej pozície bez kontaktu s prekážkami.

4.2 Senzorický subsystém robota

Pre autonómnu činnosť mobilného robota sú pre neho dôležité informácie zo senzorového systému. Rozsah informácií charakterizuje schopnosť robota prispôbiť sa zmenám prostredia. V tejto kapitole budú ako príklad uvedené ultrazvukový a laserový senzor.

4.2.1 Ultrazvukový senzor

Jeho princíp činnosti je založený na vysielaní modulovaného ultrazvukového signálu a na prijímaní odrazeného (Obr. 4.). Odrazený signál sa zachytí senzorom a z nameraného času vyslania a prijatia signálu (po odšumení a prechode stanovenou úrovňou hladiny) sa stanoví vzdialenosť prekážky, od ktorej sa vyslaný signál odrazí (4.3)[54]. V rovnici (4.3) je podľa Obr. 4. vzdialenosť objektu označená ako D , rýchlosť zvuku je C , T_0 je čas vyslania ultrazvukovej vlny a T_1 je čas prijatia ultrazvukovej vlny.



Obr. 4. Princíp činnosti ultrazvukového senzora [54]

$$D = \frac{1}{2} C (T_1 - T_0) \quad (4.3)$$

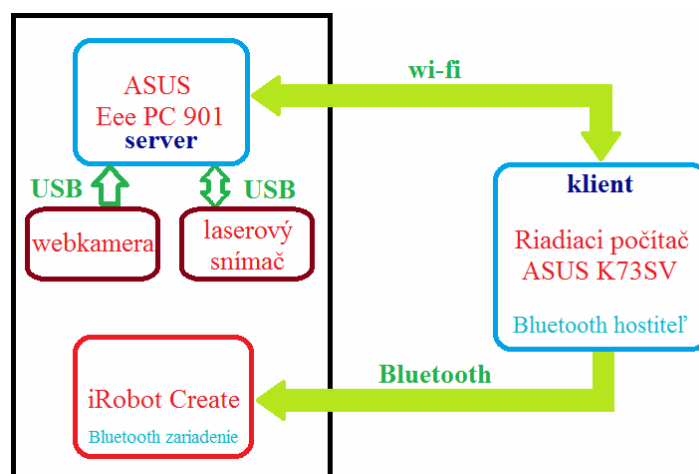
4.2.2 Laserový senzor

Laserový senzor [7] je založený na vysielaní modulovaného signálu a na prijímaní jeho odrazu. Využíva sa na meranie vzdialenosti robota (na ktorom je senzor umiestnený) od prekážky. Je to základný senzor autonómnych mobilných robotov na stanovenie bezkolíznej cesty od štartu do stanoveného cieľa.

Vzhľadom na vysokú rýchlosť šírenia sa laserového lúča vo vzduchu sa nepoužíva metóda vyslania krátkého impulzu a prijatia odrazeného a na základe nameraného času medzi nimi sa určí vzdialenosť (metóda TOF – Time of Flight), ale metóda merania fázového posunu medzi referenčným a odrazeným signálom. Využíva sa vysielanie modulovaného laserového lúča dvojistou moduláciou a to „nízkou“ a „vysokou“ frekvenciou.

5 Analýza a riešenie problému

V prvom rade je potrebné venovať pozornosť architektúre riadiaceho a senzorického systému robota. Výhodou by bolo, keby mobilný robot bol energeticky nezávislý od externých napájacích zdrojov, aby rozsah jeho pohybu nebol ovplyvnený vodičmi vedúcich k týmto zdrojom. Platforma iRobot Create disponuje vlastným napájaním a je možné k nej pripojiť BAM modul (Bluetooth Adapter Module) na ovládanie pomocou Bluetooth rozhrania [34]. Pretože riadiaca aplikácia bude vo veľkej miere založená na algoritmoch spracovania obrazu a je možné očakávať jej vysokú výpočtovú náročnosť, na riadenie mobilného robota bude musieť byť použitý počítač s adekvátnym výpočtovým výkonom. Rozmery takéhoto počítača môžu byť veľké, preto je potrebné architektúru riadiaceho systému zvoliť tak, aby počítač pripevnený na mobilný robot mal malé rozmery a hmotnosť. Zo senzorického hľadiska sa použije laserový skener na detekciu prekážok v okolí mobilného robota. Na Obr. 5. je zobrazená navrhnutá schéma senzorického a riadiaceho systému mobilného robota. Na platformu iRobot Create je pripevnený (pomocný) počítač malých rozmerov Asus Eee PC 901 [38], ďalej web kamera Microsoft LifeCam VX-5000 [35] a laserový skener Hokuyo URG-04LX [44], ktoré sú s počítačom prepojené pomocou USB rozhrania. Úlohou pomocného počítača je zbierať údaje zo snímačov a posilať ich riadiacemu počítaču. Riadiaci počítač (Asus K73SV [41]) má za úlohu celkové riadenie činnosti mobilného robota a beží na ňom riadiaci algoritmus. Ak pohyb mobilného robota nemá obmedziť kabeláž, komunikácia mobilného robota, riadiaceho a pomocného počítača musí byť bezdrôtová. Preto je komunikácia medzi riadiacim a pomocným počítačom riešená prostredníctvom wi-fi siete a na ovládanie mobilného robota riadiacim počítačom sa využíva Bluetooth rozhranie (Obr. 5.).



Obr. 5. Schéma senzorkého a riadiaceho systému mobilného robota

Problémom tejto architektúry môže byť čas potrebný na prenos obrazu (a dát skenera) do riadiaceho počítača – príliš dlhá doba prenosu znemožní prácu mobilného robota v reálnom čase. Preto je potrebné určiť približnú dobu prenosu

obrazu a aj experimentálne overiť. Zo špecifikácie použitej web kamery je potrebné preniesť nasnímaný obraz z kamery s rozlíšením 640x480 pixlov. Tento obraz je farebný a trojkanálový so zložkami *R*, *G* a *B*. Úroveň jasu každej zložky je vyjadrená jedným bytom. Celkový počet bytov, ktoré je potrebné preniesť je teda 921600. Čas prenosu pri rýchlosti prenosu 54 Mbit/s je:

$$t_{\text{prenosu}} = \frac{921600}{7077888} \doteq 0,13\text{s} \quad (5.1)$$

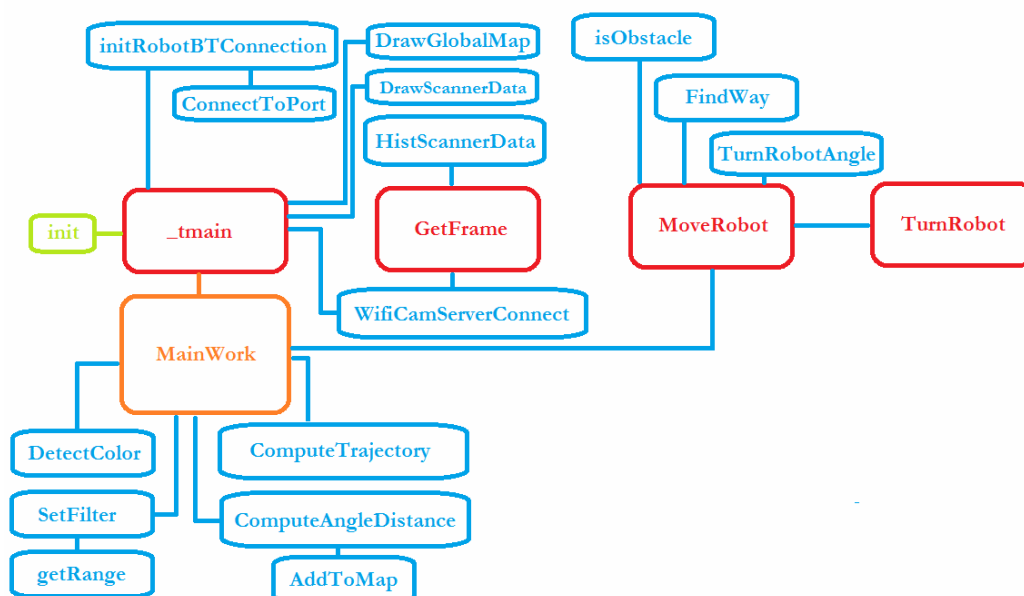
pričom menovateľ zlomku je rýchlosť 54 Mbit/s prevedená na b/s. Táto doba prenosu je pre aplikácie v reálnom čase vyhovujúca (potvrdili aj experimenty). Algoritmy spracovania obrazu si vyžadujú tiež určitú dobu na detekciu značiek a preto načítavanie obrazu je riešené v paralelnom vlákne počas spracovanie predošlého získaného obrazu.

5.1 Algoritmus riadenia mobilného robota

Algoritmus na riadenie mobilného robota (Obr. 6.) beží na riadiacom počítači a obsahuje desiatky funkcií, ktoré zabezpečujú celkovú autonómiu mobilného robota. Na základe cieľov, ktoré funkcie majú splniť, je ich možné rozdeliť do nasledujúcich skupín:

- Inicializačné a komunikačné funkcie
- Funkcie spracovania obrazu a detekcie značiek
- Funkcie na určenie a výpočet navigačných údajov podľa detegovaných značiek
- Funkcie na spracovanie údajov z laserového snímača a na detekciu prekážok
- Funkcie riadiace pohyb mobilného robota
- Ostatné funkcie (zabezpečujúce napr. interakciu s užívateľom, vizualizáciu, atď.)

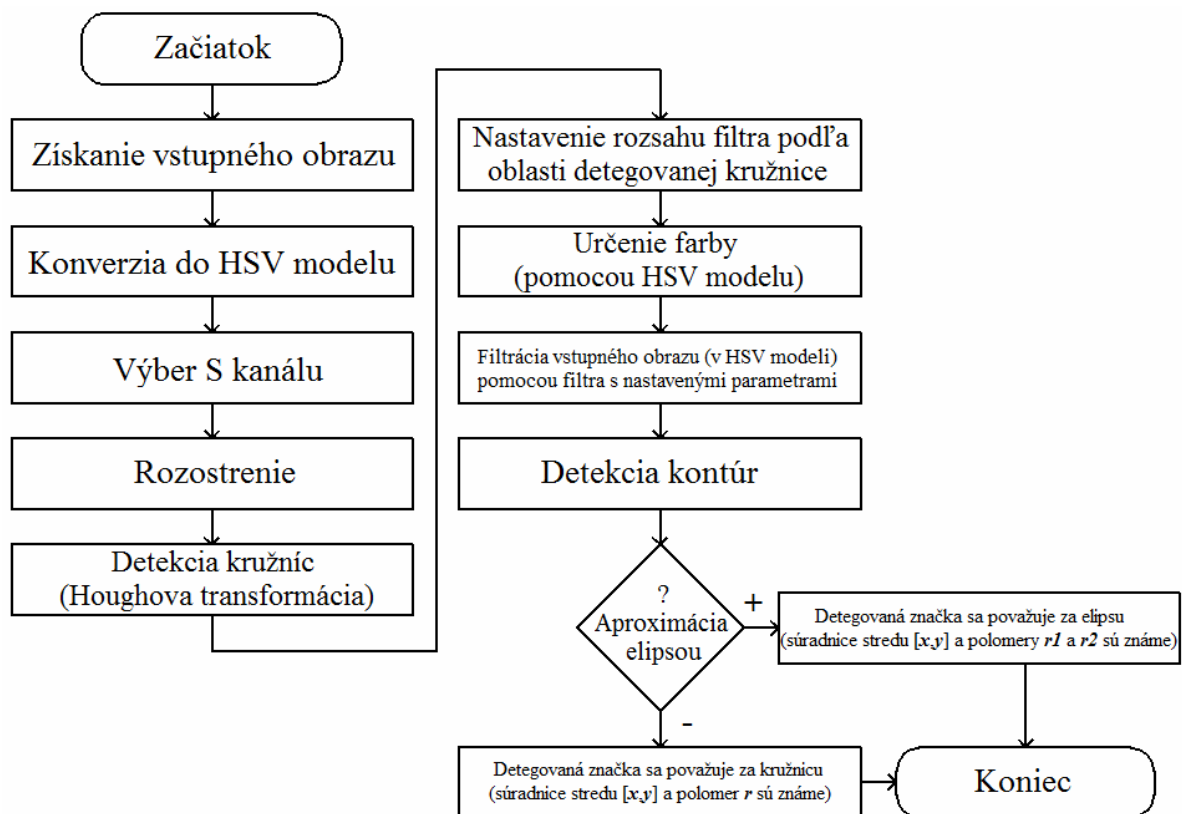
Väčšina týchto úloh sa vykonáva formou paralelných vlákien počas vykonávania hlavného algoritmu.



Obr. 6. Schéma riadiaceho algoritmu

5.1.1 Detekcia značiek

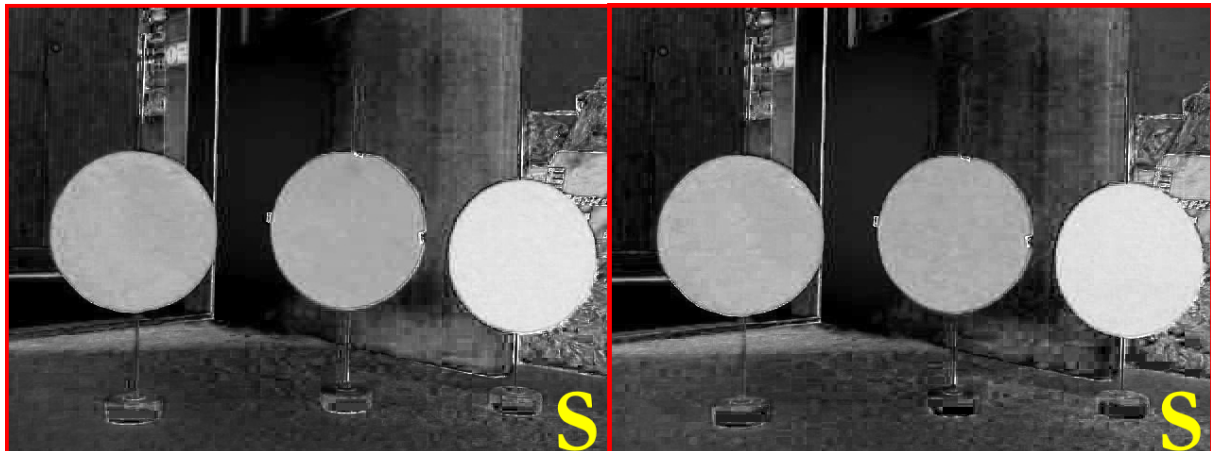
Na Obr. 7. je znázornený algoritmus detekcie značiek. Tento algoritmus využíva *HSV* farebný model, Houghovu transformáciu na detekciu kružníc, farebný filter a algoritmus detekcie kontúr na rozpoznanie značiek v priestore. Použitie klasického *RGB* farebného modelu by bolo nevýhodné z hľadiska veľkej variability zmien hodnôt jasov bodov značiek v každej zo zložiek *R*, *G* a *B* v kamerou snímanom obraze pri zmene osvetlenia. Tieto zmeny sú matematicky ťažko opísateľné. Na rozdiel od *RGB* farebného modelu, kanály *HSV* modelu [47] reagujú na zmenu osvetlenia v miestnosti v menšej miere (okrem kanálu *V*). Zložka *V* tohto farebného modelu predstavuje hodnotu jasov (*V* – value) a je definovaná ako maximálna intenzita z troch zložiek *RGB* modelu. Ostatné zložky definujú farbu a sýtosť (*H* – hue – farba, *S* – saturation – sýtosť), preto sú menej citlivé na zmenu osvetlenia. Na Obr. 8. je znázornený experiment, ktorý dokazuje vhodnosť použitia *S* zložky *HSV* obrazu ako vstup do ďalších krokov spracovania obrazu riadiaceho algoritmu na účel detekcie značiek. Z ľavej strany sú znázornené kruhové značky červenej, žltej a modrej farby pri zapnutom a vypnutom osvetlení v miestnosti. Tento obrázok dokumentuje minimálnu zmenu hodnôt jasov bodov značiek pri zmene osvetlenia. Použitie *H* zložky sa vylúčilo kvôli prekryvaniu sa hodnôt jasov bodov značiek niektorých farieb s hodnotami jasov bodov pozadia (značky by boli ťažšie identifikovateľné).



Obr. 7. Algoritmus detekcie kružníc a elíps

Výber použitia kruhových značiek na vyznačenie cesty mobilného robota zdôvodňuje známa metóda spracovania obrazu – Houghova transformácia [24][25][26] a jej výhody. Táto metóda je použiteľná na detekciu objektov, ktorých tvar je možné opísať matematickou rovnicou (priamka, kružnica, atď.). Využitie Houghovej transformácie môže mať v spojitosti s cieľom tejto práce niekoľko výhod. Jednou z nich je, že touto transformáciou je možné v obraze detegovať hľadaný objekt aj

vtedy, keď daný objekt v obraze nie je celý. Môže sa stať, že hľadaná značka snímaná kamerou bude posunutá voči kamere tak, že do snímaného obrazu vojde iba jej časť alebo značka bude zakrytá nejakou prekážkou, prípadne po predošlých krokoch spracovania obrazu značka v obraze nezostane celá.



Obr. 8. Minimálna zmena v hodnotách jasov obrazových bodov značiek pri vypnutí a zapnutí svetelného zdroja v miestnosti

Ďalšou výhodou Houghovej transformácie je to, že po úspešnej detekcii objektu v obraze, sú k dispozícii informácie o danom objekte (v prípade kružnice sú to súradnice jej stredu x a y v obraze v pixloch a jej polomer v pixloch). Tieto informácie budú použité na odhad vzájomnej polohy mobilného robota a detegovanej značky (značiek).

Počas pohybu mobilného robota sa zmenou vzájomného uhla medzi robotom a značkou (značkami) mení priemet značky do obrazu kamery na elipsu. Kruhovú značku je v kamerou snímanom obraze kruhová len ak os kamery prechádza stredom snímanej značky (pri kolmom pohľade kamery na značku). Zmenu značky na elipsu v kamerou snímanom obraze je možné tiež využiť na odhad polohy medzi mobilným robotom a značkou. Na tento účel je potrebné zabezpečiť, aby riadiaci algoritmus dokázal rozpoznať aj elipsy v obraze. Na to slúžia zvyšné kroky algoritmu na detekciu značiek. Predpokladom je, že Houghova transformácia na detekciu kružníc deteguje kružnice v obraze aj vtedy, ak sa značky do obrazu premietnu ako elipsy (vyplýva to z popísaných výhod Houghovej transformácie). Podľa hodnôt jasov bodov detegovanej značky (štvorcová oblasť opísaná detegovanej kružnicou) sa nastaví rozsah farebného filtra (interval od minimálnej do maximálnej hodnoty jasov v danej oblasti). Takto nastavený filter sa aplikuje na vstupný obraz a prebehne detekcia kontúr. Ak je možné kontúry aproximovať elipsou, detegovaná značka sa považuje za elipsu, v opačnom prípade sa značka považuje za kružnicu pôvodne detegovanú Houghovou transformáciou. Na určenie farieb značiek sú použité hodnoty jasov bodov značiek v H zložke HSV farebného modelu.

5.1.2 Princíp Houghovej transformácie

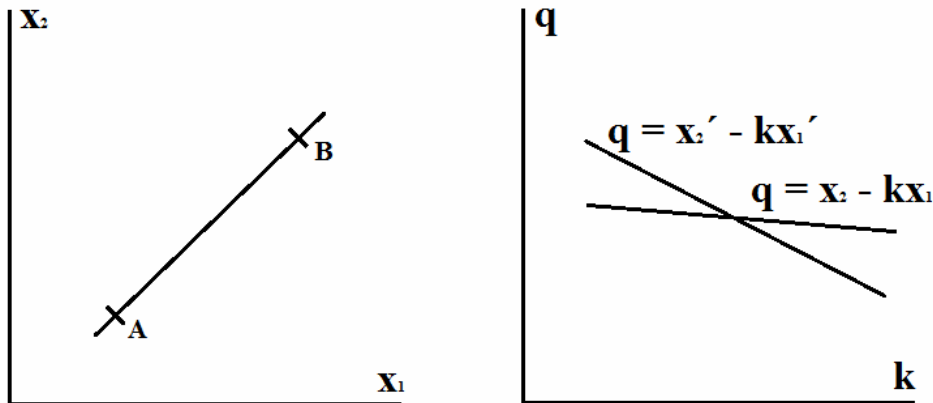
Princíp Houghovej transformácie sa dá jednoducho vysvetliť na detekcii priamok. Uvažujme priamku prechádzajúcu bodmi $A=(x_1, x_2)$ a $B=(x'_1, x'_2)$. Všetky priamky prechádzajúce bodom A musia vyhovovať rovnici priamky $x_2 = kx_1 + q$. Pretože x_1, x_2 sú pre bod A konštanty, rovnica sa môže chápať ako rovnica v priestore parametrov k, q . Tam sú všetky priamky prechádzajúce v obrazovom priestore bodom A reprezentované priamkou:

$$q = x_2 - kx_1 \quad (5.2)$$

Aj všetky priamky prechádzajúce bodom B sa môžu reprezentovať v priestore parametrov priamkou:

$$q = x_2' - kx_1' \quad (5.3)$$

Jediným spoločným bodom oboch priamok v priestore parametrov je bod (k, q) odpovedajúci v obrazovom priestore priamke spájajúcej body A a B .



Obr. 9. Princíp Houghovej transformácie

Ak sa Houghovou transformáciou majú detegovať kružnice, tak namiesto rovnice priamky sa použije rovnica kružnice

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2 \quad (5.4)$$

V tomto prípade sú tri parametre (a, b, r) . Zovšeobecnený algoritmus je nasledovný:

- Diskretizovať n – rozmerný priestor parametrov v rozsahu ich možných hodnôt.
- Vytvoriť počítadlá, pre každú kombináciu parametrov jedno a vynulovať ich. (n - rozmerná matica počítadiel).
- Pre každý obrazový element (x, y) , kde sa nachádza významná hrana, inkrementovať všetky počítadlá p , pre ktoré platí $f(x, y, p) = 0$.

Významné lokálne maximá počítadiel zodpovedajú parametrom hľadaných kriviek.

5.1.3 Určenie vzájomnej polohy mobilného robota a detegovanej značky

V tejto časti riadiaceho algoritmu sa predpokladá, že jeho predchádzajúce kroky dokážu detegovať značky v priestore a získať o nich uvedené informácie (poloha jej stredu $[x, y]$ v obraze a jej polomer r v prípade kružnice alebo horizontálny polomer r_1 a vertikálny polomer r_2 v prípade elipsy). Táto kapitola sa bude zaoberať možnosťami využitia týchto informácií na určenie vzájomnej polohy mobilného robota a značky, pričom jediná známa hodnota bude reálny polomer značiek r_p .

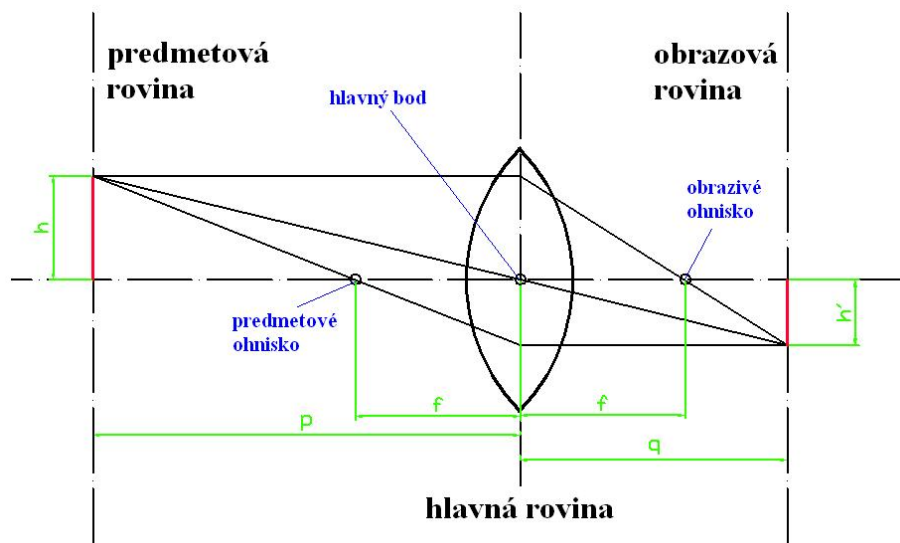
Vzájomnú polohu mobilného robota a detegovanej značky je možné vyjadriť napr. určením súradnice $[x, y]$ značky v priestore relatívne voči polohe robota, alebo

určením polárnych súradníc $[L, \alpha]$ značky v priestore oproti polohe robota, pričom za polohu robota sa považuje súradnica $[0, 0]$.

Určenie vzdialenosti medzi značkou a mobilným robotom môže vyplynúť zo zmeny veľkosti polomeru značky v obraze pri zmene jej vzdialenosti od kamery. Čím je kruhová značka bližšie ku kamere, tým je jej polomer v nasnímanom obraze väčší a naopak, čím je značka od kamery ďalej, tým je jej polomer v nasnímanom obraze menší – táto vedomosť by mohla viesť k získaniu vzťahu pre výpočet vzdialenosti značky od kamery na základe polomeru značky v obraze. Na to je možné využiť zákony optiky. Obr. 10. znázorňuje princíp priemetu predmetu v priestore do obrazovej roviny (senzoru kamery) tenkou šošovkou (objektívom kamery). Pri správne zaostrenej šošovke sa prechádzajúce svetelné lúče lámu tak, že sa pretínajú so svetelným lúčom prechádzajúcim pozdĺž optickej osi v jednom bode (hlavný bod). Tenká šošovka sústreďuje svetelné lúče vychádzajúce z bodu v rovine kolmej k optickej osi podľa rovnice šošovky:

$$\frac{1}{q} + \frac{1}{p} = \frac{1}{f} \quad (5.5)$$

pričom f je ohnisková vzdialenosť t.j. vzdialenosť medzi hlavným bodom a (obrazovým, predmetovým) ohniskom, p je vzdialenosť medzi predmetovou rovinou a hlavnou rovinou a q je vzdialenosť medzi obrazovou rovinou a hlavnou rovinou.



Obr. 10. Zobrazenie predmetu šošovkou

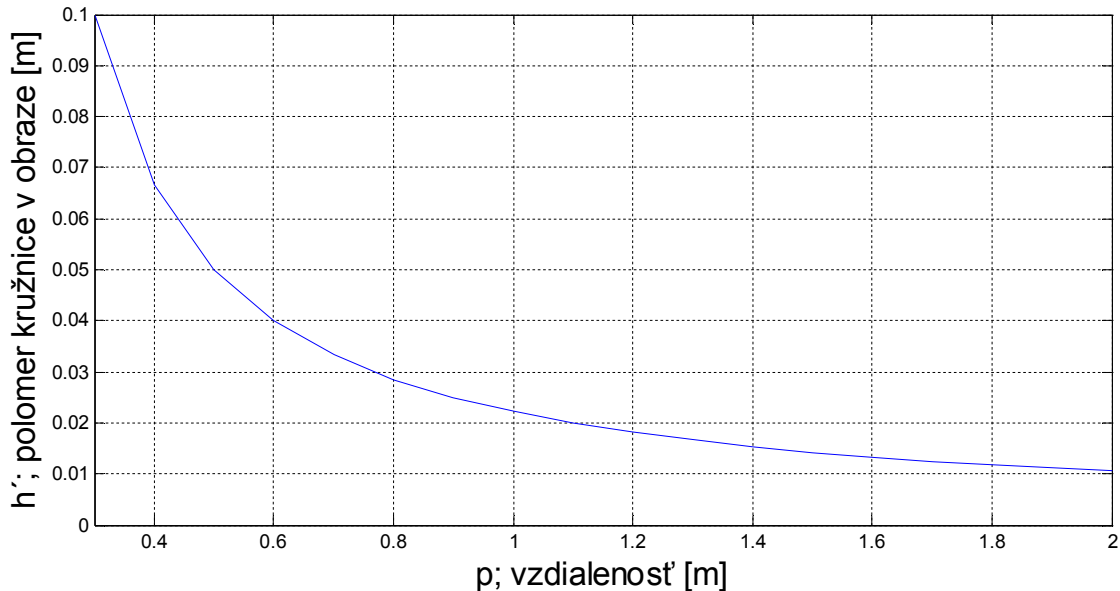
Ak sa označí skutočná výška predmetu h a výška predmetu v obraze h' , vzťah medzi nimi je možné vyjadriť rovnicou:

$$\frac{h'}{h} = \frac{q}{p} = \frac{q-f}{f} \quad (5.6)$$

Vyjadrením q z rovnice (5.5), dosadením do (5.6) a úpravou je možné určiť veľkosť predmetu h' v obraze nasledovne:

$$h' = \frac{h}{\frac{p}{f} - 1} \quad (5.7)$$

Táto rovnica z pohľadu aktuálnej úlohy vyjadruje závislosť polomeru značky v obraze (h') od vzdialenosti značky od kamery (robotu) p , pričom je známy skutočný polomer značky h . Pre konkrétne parametre šošovky a polomer značky je táto závislosť zobrazená na Obr. 11.



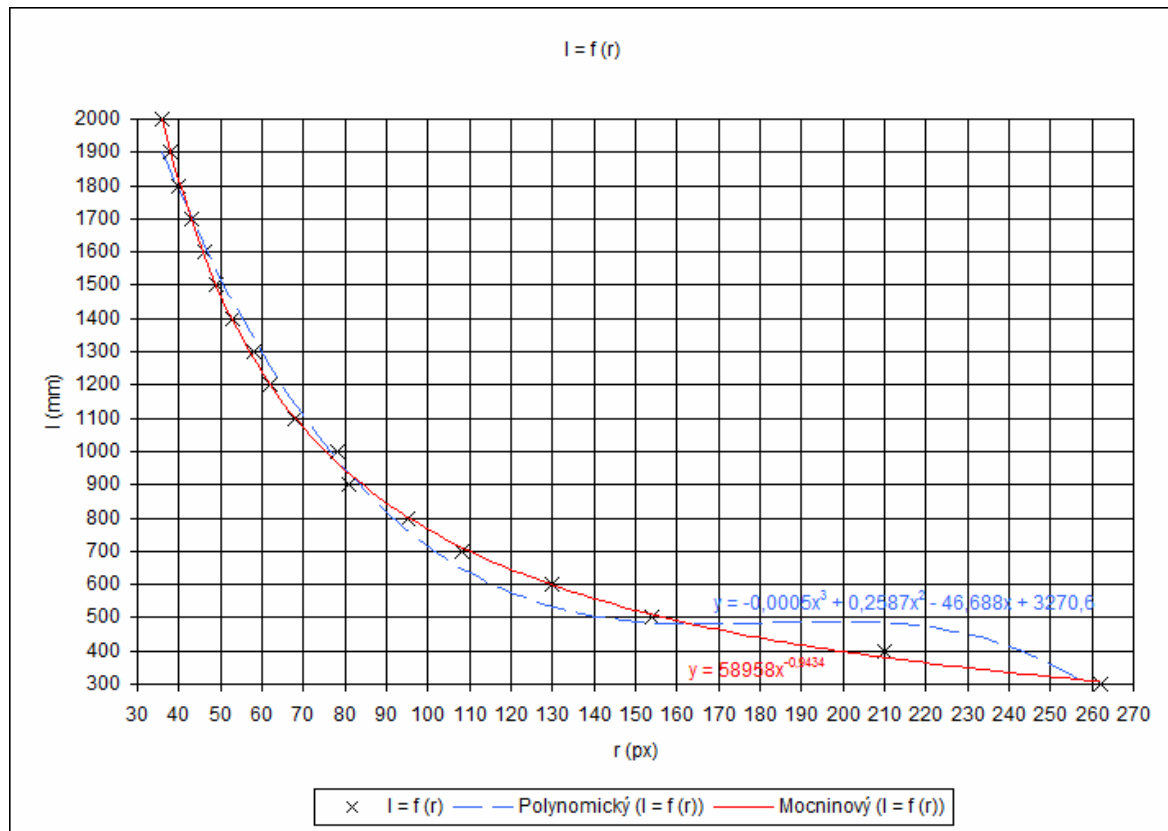
Obr. 11. Závislosť polomeru značky v obraze od vzdialenosti značky od kamery. Parametre: polomer značky 20 cm, vzdialenosť <0.3, 2> m, $f = 0.1$ m

Výrobca použitej kamery v dokumentácii [36] neudáva ohniskovú vzdialenosť ani ostatné potrebné parametre, preto na zistenie závislosti vzdialenosti značky od kamery od polomeru rozpoznanej značky v obraze bolo uskutočnené reálne meranie (Obr. 12.). Kruhová značka bola postavená pred kameru tak, že jej stredom prechádzala z-ová os kamery. Počiatočná vzdialenosť značky od kamery bola 2 m a postupne sa krokom 100 mm znižovala až do vzdialenosti 300 mm. Pre každú vzdialenosť bol zistený polomer detegovanej kružnice v obraze v pixloch. Najlepšia aproximácia merania bola mocninová a je daná vzťahom:

$$y = 58958 \cdot x^{-0,9434} \quad (5.8)$$

Dosadením polomeru detegovanej kružnice v obraze (získaného po detekcii Houghovou transformáciou) za premennú x do rovnice (5.8) v pixloch je možné určiť vzdialenosť medzi mobilným robotom a značkou v mm. Výhodou takéhoto riešenia je, že riadiaci algoritmus vie určiť vzdialenosť od značky aj mimo meraných hodnôt a dokáže pomocou tejto aproximácie predpokladať (určovať) aj vzdialenosti väčšie ako pôvodne merané 2 m. Zároveň dokáže určiť vzdialenosť aj medzi násobkami 100 mm. Vzdialenosť vypočítaná týmto spôsobom predstavuje vzájomnú vzdialenosť mobilného robota a značky na y -ovej osi globálneho súradnicového systému (miestnosti). Na určenie x -ovej súradnice je potrebný detailnejší rozbor zákonov priemetu značky do obrazu kamery, ktoré sú založené na perspektívnom zobrazení. Pretože svet, ktorý nás obklopuje, je trojrozmerný (3D) a obrazová funkcia je dvojrozmerná (2D), obraz v kamere je výsledkom perspektívneho zobrazenia (alebo

stredového premietania), ktoré je v jednoduchom priblížení modelované dierkovou komorou [50].

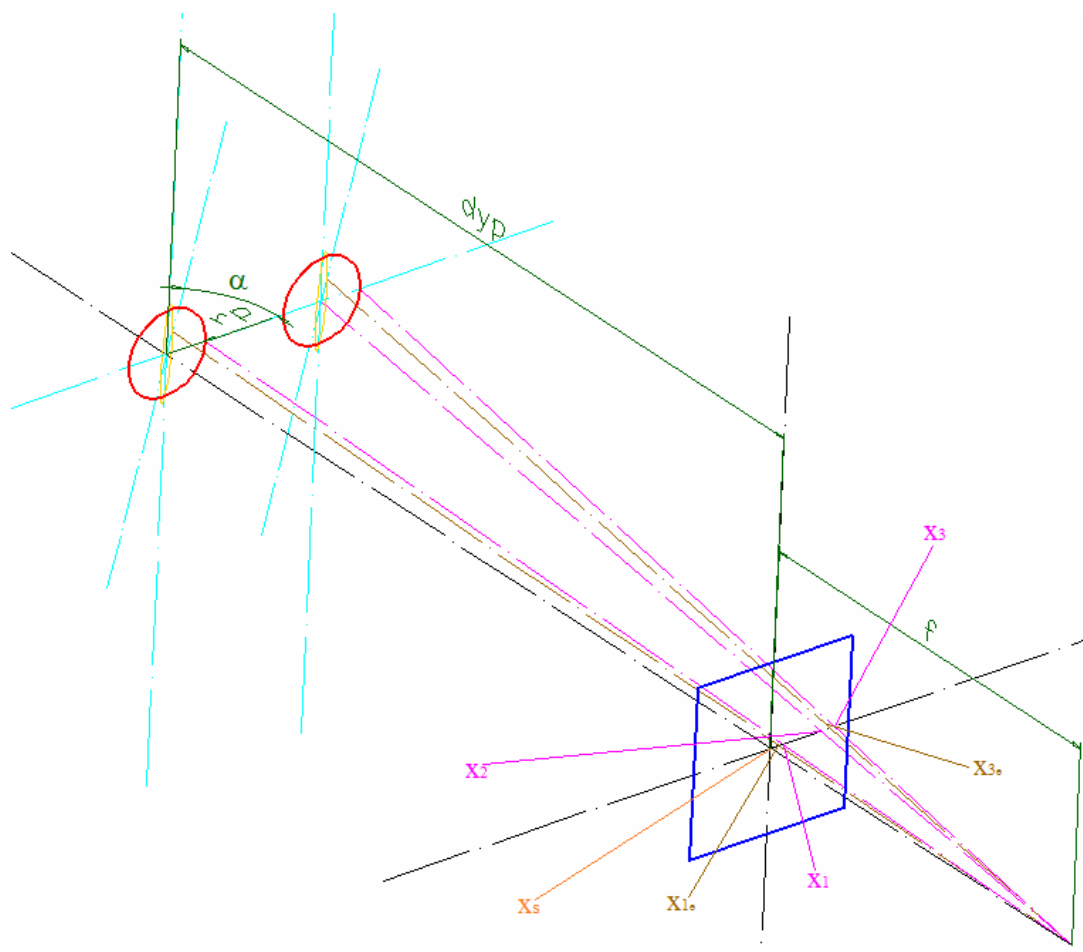


Obr. 12. Polynomická a mocninová aproximácia nameraných údajov

Najjednoduchší prípad priemetu kruhovej značky do obrazu kamery je, keď je značka umiestnená oproti kamere tak, že z-ová os kamery prechádza stredom značky, kolmo na jej rovinu. V tomto prípade sú kamera a značka v rovnakej výške a tento pohľad sa nazve ako kolmý pohľad kamery na značku a značka je v obraze kamery tiež kruhová. Ak sa značka z tejto pozície vychýli (otočí sa o určitý uhol okolo z-ovej osi v súradnicovom systéme robota), tak sa jej tvar v obraze kamery zmení na elipsu s horizontálnym polomerom r_1 a vertikálnym polomerom r_2 . Ďalej je možné si všimnúť, že otáčaním značky okolo z-ovej osi sa mení horizontálny polomer elipsy r_1 v obraze. Ak sa uváži fakt, že vertikálny polomer elipsy je možné využiť na určenie vzdialenosti značky od kamery (5.8) (veľkosť vertikálneho polomeru elipsy v obraze sa mení iba vzdialenosťou kamery od značky, pretože značka je v rovnakej výške ako kamera), tak pomer veľkostí vertikálneho a horizontálneho polomeru by bolo možné využiť na výpočet uhla medzi značkou a mobilným robotom a neskôr aj na výpočet spomínanej x-ovej súradnice polohy značky.

Obr. 13. znázorňuje rôzne prípady priemetu značiek do obrazu kamery. Pre jednoduchosť sa stred obrazu považuje za začiatok súradnicovej sústavy [0,0] kamery, v normálnom prípade je začiatok súradnicovej sústavy umiestnený v ľavom hornom rohu obrazu. Vzdialenosť obrazovej roviny od stredy premietania je f . Skutočný polomer značky v priestore je r_p . Otočenie značky okolo z-ovej osi súradnicového systému robota je označený uhlom α , ktorý je meraný od x-ovej osi prechádzajúcou stredom značky proti smeru hodinových ručičiek. Pri kolmom pohľade kamery na značku sa stred značky premieta do stredy obrazu [0,0], tento bod v obraze je označený ako x_s . Priemet priesečníku koncového bodu značky

s x-ovou osou prechádzajúcou cez jej stred je v obraze označený ako x_1 . Rotáciou značky je tento priemet v obraze označený ako x_{1e} . Priemet stredu značky, ktorý vznikne jej posunutím po x-ovej osi, je označený ako x_2 . Priemet priesečníka koncového bodu posunutej značky s x-ovou osou je v obraze označený ako x_3 a priemet takéhoto koncového bodu pootočenej značky je označený ako x_{3e} . Vzdialenosť medzi x-ovou osou prechádzajúcou stredom premietania a x-ovou osou prechádzajúcou stredom značky je d_{yp} .



Obr. 13. Perspektívne zobrazenie značky v rôznych pozíciách

Horizontálny polomer značky vyjadrujú vzťahy:

$$r_1 = x_1 - x_s \quad (5.9)$$

$$r_1 = x_{1e} - x_s \quad (5.10)$$

$$r_1 = x_3 - x_2 \quad (5.11)$$

$$r_1 = x_{3e} - x_2 \quad (5.12)$$

Je potrebné určiť hodnoty x_s , x_1 , x_{1e} , x_2 , x_3 a x_{3e} . Najjednoduchšie je určiť x_s , pretože pri kolmom pohľade na značku sa stred značky premietne do tohto bodu v obraze a práve tento bod je považovaný za stred súradnicového systému, čo znamená, že $x_s = 0$. Na výpočet ostatných hodnôt je možné využiť podobnosť trojuholníkov: pomer horizontálneho polomeru značky v obraze pri kolmom pohľade k vzdialenosti

obrazovej roviny od stredu premietania je taký istý ako pomer skutočného polomeru značky k vzdialenosti roviny značky od stredu premietania:

$$\frac{x_1 - x_s}{f} = \frac{r_p}{d_{yp}} \quad (5.13)$$

Ak x_s je rovné 0, tak rovnicu je možné prepísať do tvaru:

$$\frac{x_1}{f} = \frac{r_p}{d_{yp}} \quad (5.14)$$

Výpočet hodnoty x_1 je teda možné úpravou tejto rovnice:

$$x_1 = f \frac{r_p}{d_{yp}} \quad (5.15)$$

Použitím rovníc (5.9) a (5.15) je možné získať veľkosť horizontálneho polomeru značky v obraze pri kolmom pohľade, pričom hodnotu d_{yp} je možné získať z rovnice (5.8). Posunutím značky v smere osi x o určitú vzdialenosť (pre jednoduchosť o násobky r_p), sa veľkosť polomeru r_1 v obraze nemení (značka v obraze ostáva kruhová):

$$r_1 = x_3 - x_2 = f \frac{r_p}{d_{yp}} \quad (5.16)$$

Situácia je o niečo zmenená, ak sa značka otáča okolo z-ovej osi. V týchto prípadoch, keď je značka otočená, sa jej stred premieta na rovnaké miesto ako v predošlých prípadoch, keď otočená nebola – tak isto pri kolmom pohľade ako aj pri posunutí, x -ová súradnica značky sa jej otočením nemení. Hodnoty x_s a x_2 ostávajú nezmenené, menia sa iba hodnoty x_1 na x_{1e} a x_3 na x_{3e} a v tomto prípade sa kruhová značka v obraze kamery mení na elipsu. Z Obr. 13. je dôvod zmeny na elipsu jasný – otočením značky sa mení vzdialenosť d_{yp} medzi koncovým bodom značky a stredom premietania. Súradnice stredov značky je po jej otočení možné počítať z podobnosti tých istých trojuholníkov ako v predošlom prípade, ale pri určovaní súradníc x_{1e} a x_{3e} sa strana d_{yp} pravouhlého trojuholníka mení v závislosti od uhla otočenia značky α a veľkosti jej polomeru r_p . Rovnice (5.17) a (5.18) slúžia na výpočet súradníc x_s , x_{1e} , x_2 , x_{3e} , pričom pre výpočet súradníc stredov značiek v obraze používajú podobnosť trojuholníkov z predošlého prípadu a na výpočet x_{1e} a x_{3e} používajú zmenenú stranu d_{yp} trojuholníka a uvažujú posunutie stredu značky v smere x -ovej osi o vzdialenosť $4 \cdot r_p$ a uhol otočenia značky okolo z -ovej osi o uhol α :

$$\begin{aligned} x_s &= f \frac{0}{d_{yp}} \\ x_{1e} &= f \frac{r_p \cos \alpha}{d_{yp} + r_p \sin \alpha} \end{aligned} \quad (5.17)$$

$$\begin{aligned}
 x_2 &= f \frac{4r_p}{d_{yp}} \\
 x_{3e} &= f \frac{4r_p + r_p \cos \alpha}{d_{yp} + r_p \sin \alpha}
 \end{aligned}
 \tag{5.18}$$

Porovnaním spôsobu výpočtu x_1 a x_{1e} (alebo aj x_3 a x_{3e}) je vidieť zmenu strán používaného trojuholníka na výpočet týchto hodnôt na základe podobnosti trojuholníkov. Strana trojuholníka rovnobežná s osou y súradnicového systému robota sa otočením značky mení o hodnotu $r_p \sin \alpha$ a strana rovnobežná s osou x sa mení na $r_p \cos \alpha$.

Komplexný pohľad na spôsob premietania značky do obrazu kamery a doteraz odvodené vzťahy s tým súvisiacich vedie k záveru, že na pôvodný účel tejto analýzy (určenie uhlu medzi ťažiskom robota a značkou, prípadne x -ovú súradnicu značky v súradnicovom systéme robota) je potrebné použiť iný (modifikovaný) prístup ako len pomer medzi hodnotami vertikálneho a horizontálneho polomeru značky v obraze kamery. Z uvedeného pomeru by bolo možné určiť iba uhol natočenia roviny značky voči rovine kamery ale nie hľadaný uhol medzi ťažiskom mobilného robota a značkou. Navyše z odvodených vzťahov je vidieť, že by na výpočet pomeru bolo potrebné vedieť ohniskovú vzdialenosť kamery a iné parametre. Uvedenými vzťahmi je možné určiť veľkosť polomeru značiek v obraze v metroch a preto je potrebné vedieť aj spomínané ďalšie parametre používanej kamery (napríklad veľkosť pixlu alebo rozmer čipu kamery). Na obídenie uvedených nedostatkov je možné použiť ďalší prístup k výpočtu uhla medzi robotom a značkou. Vychádza zo známej polohy značky v obraze, ktorú je možné získať po detekcii značky pomocou Houghovej transformácie. V tomto prípade d_{yp} bude označovať vzdialenosť medzi mobilným robotom a značkou podľa rovnice (5.8) a d_{xp} bude označovať vzdialenosť medzi ťažiskom mobilného robota a polohou značky na x -ovej osi súradnicového systému robota (Obr. 14.). Uhol α medzi mobilným robotom a značkou je možné vypočítať podľa vzťahu (5.19):

$$\alpha = \arctan \frac{d_{yp}}{d_{xp}}
 \tag{5.19}$$

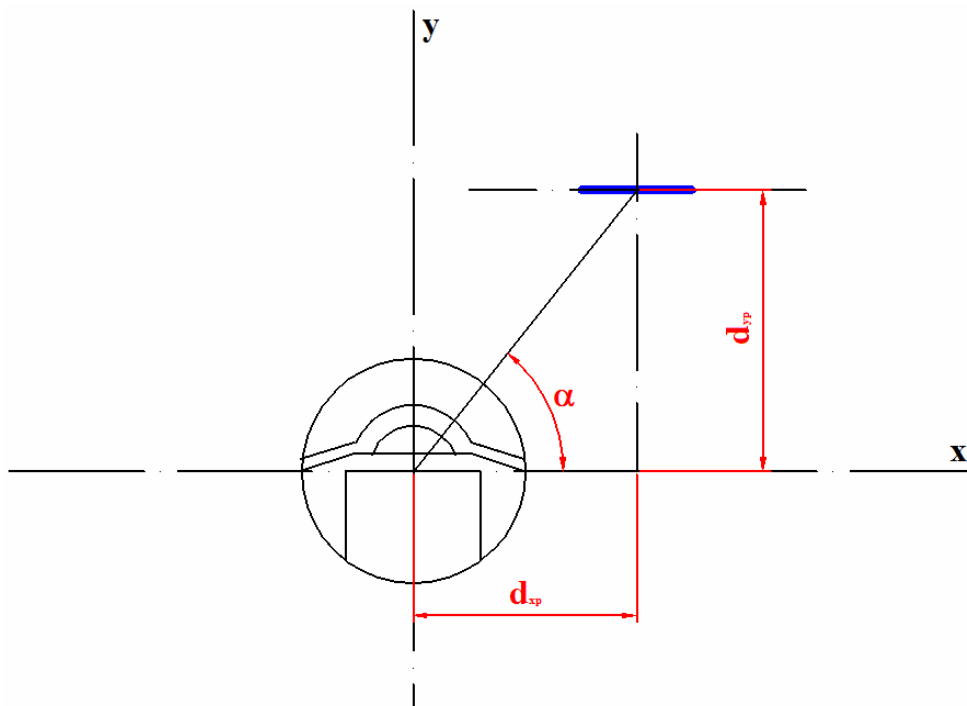
Na výpočet uhla α podľa uvedeného vzťahu musí byť d_{xp} známe. Na jeho výpočet je práve možné využiť spomínané údaje o značke získané z obrazu Houghovou transformáciou. Súradnice polohy stredu značky v obraze budú mať označenie x_o a y_o , polomer značky v obraze bude označený ako r_o , reálny polomer značky bude r_p a x -ová súradnica stredu obrazu sa označí ako x_{co} (v tomto prípade stred súradnicového systému obrazu začína v ľavom hornom rohu obrazu, ako to je v skutočnosti). Hodnotu d_{xp} je potom možné získať z poznatku, že pomer medzi vzdialenosťou značky od y -ovej osi súradnicového systému robota a jej skutočným

polomerom ($\frac{d_{xp}}{r_p}$) je rovnaký ako pomer medzi vzdialenosťou x -ovej súradnice polohy značky v obraze od x -ovej súradnice stredu obrazu a polomerom značky v obraze ($\frac{x_o - x_{co}}{r_o}$), čo vyjadruje rovnica (5.20):

$$d_{xp} = \frac{x_o - x_{co}}{r_o} r_p \quad (5.20)$$

Ak rovina značky nie je rovnobežná s obrazovou rovinou (značka sa do obrazu premietne ako elipsa), tak je potrebné do rovnice (5.20) použiť namiesto r_o hodnotu vertikálneho polomeru značky (elipsy) v pixloch (r_2) a tým sa dosiahne model, ako keby rovina značky a obrazu boli rovnobežné:

$$d_{xp} = \frac{x_o - x_{co}}{r_2} r_p \quad (5.21)$$



Obr. 14. Výpočet uhla α medzi mobilným robotom a značkou

5.1.4 Plánovanie cesty mobilného robota

Plánovanie cesty mobilného robota sa zakladá na zistenej pozícii detegovaných značiek v priestore. Riadiaci algoritmus dokáže plánovať v každom kroku mobilného robota cestu ku každej aktuálne detegovanej značke, pričom prioritný je pohyb k najbližšej značke. Riadiaca aplikácia delí pohyb mobilného robota do fáz:

- Pohyb robota k najbližšej značke so snahou udržiavať stred značky v strede obrazu, kým vzdialenosť od značky neklesne pod úroveň 1,5 m alebo sa nedeteguje prekážka laserovým skenerom
- Obchádzanie detegovanej značky (modrú z ľavej, červenú z pravej strany, pokles vzdialenosti od žltej značky pod 1,5 m znamená koniec činnosti). Obchádzanie značiek je riešené pohybom po Bézierovej krivke.
- Pri detekcii prekážky v predošlých fázach nastane modifikácia dráhy robota zmenou riadiaceho bodu Bézierovej krivky, aby sa dosiahlo obídenie prekážky, v prípade nečakanej prekážky sa hľadá voľný priestor v údajoch z laserového skenera.

- V prípade, ak po obídení značky (najbližšej – aktuálnej) nie je v dohľade ďalšia, robot sa začne otáčať okolo svojej osi do smeru pozície ďalšej detegovanej značky pred začatím obchádzania aktuálnej.

Mobilný robot obchádza značky po dráhe určenou kvadratickou Bézierovou krivkou, pričom riadiaci a koncový bod krivky upravuje na základe známych pozícií značiek a prekážok v priestore. Na nečakané prekážky reaguje natočením sa do voľného prechodného pásma v smere obchádzania značky, ktoré získava z údajov laserového skenera. Ak takéto pásmo neexistuje, pokúsi sa otočiť do voľného prechodného pásma v opačnom smere. Pri realizácii natočenie sa kontroluje aktuálny uhol natočenia mobilného robota, ktorý nesmie presiahnuť tie hranice, ktoré by viedli k opačnému pohybu mobilného robota (smerom dozadu).

Kvadratická Bézierova krivka ($n=2$) je dráha, ktorá je popísaná funkciou $C(t)$ pre body P_0, P_1, P_2 [51][52]:

$$C(t) = \sum_{i=0}^2 \binom{2}{i} t^i (1-t)^{2-i} P_i = (1-t)^2 P_0 + 2t(1-t)P_1 + t^2 P_2, t \in \langle 0,1 \rangle \quad (5.22)$$

P_0 a P_2 sú začiatkový a koncový bod a P_1 je riadiaci bod. Pohyb mobilného robota po určenej Bézierovej krivke sa realizuje výpočtom potrebných rýchlostí jeho kolies v každom časovom okamihu jeho pohybu po tejto krivke – použitím kinematických rovníc dvojkolesového mobilného robota. Rovnice opisujúce pohyb ťažiska T mobilného robota sú:

$$v_x = \frac{v_L + v_R}{2} \cos \varphi \quad (5.23)$$

$$v_y = \frac{v_L + v_R}{2} \sin \varphi \quad (5.24)$$

$$v_\varphi = \frac{v_R - v_L}{2d} \quad (5.25)$$

$$\Delta x_T = v_x \cdot \Delta t \quad (5.26)$$

$$\Delta y_T = v_y \cdot \Delta t \quad (5.27)$$

$$\Delta \varphi = v_\varphi \cdot \Delta t \quad (5.28)$$

V týchto rovniciach v_x a v_y predstavujú x -ovú a y -ovú zložku rýchlosti v , v_φ je rýchlosť smerového uhla φ , Δx_T , Δy_T sú prírastky súradnice ťažiska T v osiach x a y za čas Δt a $\Delta \varphi$ je prírastok uhla φ za čas Δt . Dosadením súradníc začiatkového, koncového a riadiaceho bodu krivky, sa predchádzajúca rovnica môže prepísať do tvaru:

$$C_x(t) = (1-t)^2 x_0 + 2(1-t)tx_1 + t^2 x_2 \quad (5.29)$$

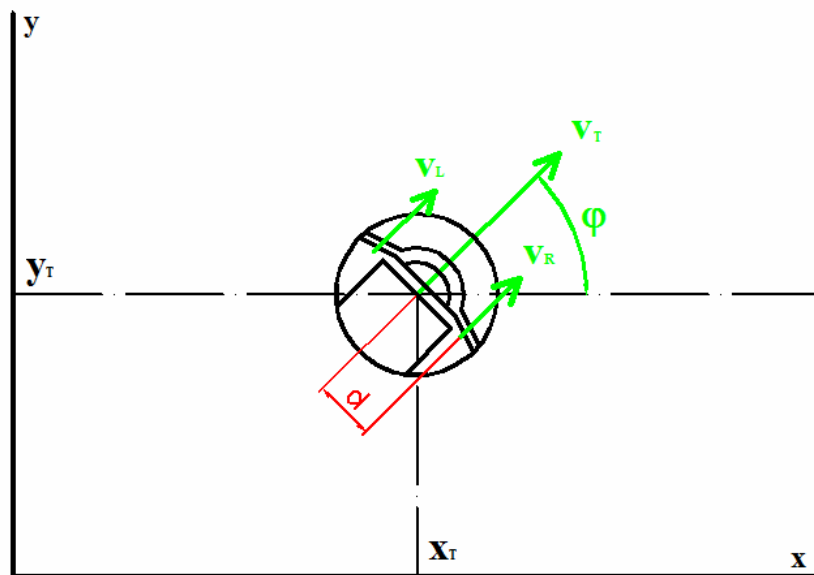
$$C_y(t) = (1-t)^2 y_0 + 2(1-t)ty_1 + t^2 y_2 \quad (5.30)$$

Voľbou začiatočného a koncového bodu Bézierovej krivky je možné vytvoriť krivku ľubovoľnej dĺžky. Pri predpoklade, že bola vygenerovaná krivka, po ktorej sa má robot pohybovať (krivka je známa), tak pohyb robota po zvolenej krivke je možné zaistiť jej rozdelením na úseky – voľbou časového intervalu Δt deliaceho interval $t \in \langle 0,1 \rangle$. Úlohou je v takomto prípade vypočítať rýchlosti kolies mobilného robota tak,

aby sa robot z pozície $[C_x(t), C_y(t)]; t=0$ do pozície $[C_x(t+\Delta t), C_y(t+\Delta t)]; t=0$.

Problém môže nastať v prípade, ak je vzdialenosť medzi začiatočnou a koncovou pozíciou príliš veľká, pretože robot nemusí vedieť dosiahnuť potrebnú rýchlosť na prejdeie danej vzdialenosti za časový interval Δt . Interval t je medzi 0 a 1 a pri veľkých vzdialenostiach nie je možné dosiahnuť, aby ich robot prešiel za jednu sekundu. Riešením tohto problému by mohol byť výpočet časového intervalu Δt_r , za ktorý dokáže mobilný robot s maximálnou rýchlosťou v_{max} prejsť vzdialenosť z počiatočnej pozície do koncovej pozície. Toto je možné chápať ako transformáciu jedného kroku na určenej Bézierovej krivke (s časovým intervalom Δt) do reálneho kroku mobilného robota v priestore (s časovým intervalom Δt_r). Výpočet časového intervalu Δt_r sa realizuje použitím rovnice:

$$\Delta t_r = \frac{\sqrt{(x_T - x_0)^2 + (y_T - y_0)^2}}{v_{max}} \quad (5.31)$$



Obr. 15. Kinematika dvojkolesového mobilného robota

Pri určovaní Bézierovej krivky, po ktorej by sa mal mobilný robot pohybovať, sa v každom prípade jeho počiatočná pozícia považuje ako pozícia $[x_0, y_0] = [0, 0]$

s uhlom $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$. Robot sa v ďalšom kroku potrebuje dostať do pozície $[x_T, y_T]$, pričom sa jeho uhol zmení na uhol φ_T , ktorý sa určí nasledovne:

$$\varphi_T = \arctan 2\left(\frac{y_T - y_0}{x_T - x_0}\right) \quad (5.32)$$

Potrebné rýchlosti pravého v_R a ľavého v_L kolesa v každom kroku pohybu sa určia zo vzťahov:

$$v_L = \frac{1}{\Delta t_r} \left[\frac{(x_T - x_0)}{\cos \varphi_0} - d(\varphi_T - \varphi_0) \right] \quad (5.33)$$

$$v_R = \frac{2d(\varphi_T - \varphi_0)}{\Delta t_r} + v_L \quad (5.34)$$

Mobilný robot sa pritom v každom kroku posunie na novú pozíciu pod novým uhlom:

$$x_T = x_0 + v_x \cdot \Delta t_r \quad (5.35)$$

$$y_T = y_0 + v_y \cdot \Delta t_r \quad (5.36)$$

$$\varphi_T = \varphi_0 + v_\varphi \cdot \Delta t_r \quad (5.37)$$

6 Záver

Práca splnila všetky body zadania. Bol vytvorený riadiaci algoritmus pre mobilný robot, ktorý dokáže detegovať kruhové značky v priestore a aj pri meniacich sa svetelných podmienkach získavať geometrické údaje, ktoré neskôr používa v kombinácii s údajmi z laserového skenera na navigáciu mobilného robota.

Mobilný robot komunikuje s riadiacim algoritmom prostredníctvom bezdrôtovej siete, odkiaľ riadiaci algoritmus získava údaje priamo z kamery a laserového skenera, ktoré sú na robote upevnené. Riadenie robota prebieha po spracovaní získaných údajov pomocou rozhrania Bluetooth.

Mobilný robot si na základe získaných a spracovaných údajov dokáže plánovať svoju cestu. Pomocou vizuálneho systému a funkcií, ktoré obraz spracúvajú, si mobilný robot vypočítava relatívnu polohu značiek v priestore voči polohe mobilného robota. Do výpočtu cesty na obídenie značiek dokáže naplánovať obídenie prekážky zároveň s obchádzaním značky, ak prekážku v danom momente deteguje. V prípade, že sa mu nepodarí prekážku detegovať, dokáže na ňu reagovať aj počas vykonávania naplánovaného pohybu. Prekážka totiž môže byť zakrytá inou prekážkou a laserový skener nie je schopný ju detegovať. Mobilný robot ale reaguje aj na nečakané prekážky a upravuje pôvodne naplánovanú cestu tak, aby dodržal podmienku obídenia značky a zároveň obídenie prekážky.

Mobilný robot si dokáže poradiť aj so situáciami, keď nemá v dohľade svojho vizuálneho systému žiadnu značku. V tom prípade sa začne otáčať okolo svojej osi, až kým nezahliadne nejakú značku a keď má v pamäti uloženú pozíciu predchádzajúcej videnej značky, dokáže si určiť smer, ktorým sa má začať otáčať, aby značku čím skôr detegoval.

Pri nasnímaní viacerých značiek vizuálnym systémom mobilného robota si riadiaci algoritmus vytvára poradie značiek na základe ich určených vzdialeností voči mobilnému robotu a prioritu plánovanej cesty dáva na prvú značku v poradí.

Mobilný robot pracuje v reálnom čase aj napriek posielaniu obrazu a údajov cez bezdrôtovú sieť a popri tom má riadiaci algoritmus implementovaný veľký rozsah funkcií spracúvajúcich obraz. Na prácu s obrazom sa využíva knižnica OpenCV.

Prínosy práce:

Podarilo sa vytvoriť algoritmus, ktorý dokáže navigovať mobilný robot pri meniacich sa svetelných podmienkach v rôznych miestnostiach použitím iba dvoch rôznych snímačov. Počas fúzie informácií z týchto snímačov nie je potrebné venovať zvýšenú pozornosť ich rôznym presnostiam. Mobilný robot si vizuálnym systémom určuje svoju relatívnu polohu voči detegovaným značkám s určitou presnosťou, pričom navigácia pomocou rozmiestnenia značiek v priestore je prioritne založená na základe týchto údajov (získaných vizuálnym systémom). Presnosť určenia polohy mobilného robota voči značkám laserovým skenerom by mohla byť iná ako presnosť určenia polohy vizuálnym systémom. Údaje z laserového skenera však slúžia hlavne na detekciu bližších objektov k mobilnému robotu a ich prioritou je zastaviť mobilný robot pred prípadnou kolíziou alebo doplnenie informácií pri plánovaní cesty mobilného robota na základe údajov z vizuálneho systému. Robot sa v priestore riadi určitým spôsobom „intuitívne“, teda podobne ako človek, nemusí vedieť úplne presne

svoju polohu voči značkám, stačí, ak značku správnym spôsobom obíde a pritom nenarazí do žiadnej prekážky.

Medzi ďalšie prínosy tejto práce je možné zaradiť spôsob určenia vzájomnej polohy značky a mobilného robota. Na základe jediného známeho rozmeru (reálny polomer značky) je algoritmus schopný určiť vzdialenosť aj uhol medzi značkou a mobilným robotom v priestore (použitím polomeru detegovanej značky v obraze).

Literatúra

- [1] Tölgyessy, M.: KINECT, hacknutý snímač v mobilnej robotike. (<http://www.posterus.sk/?p=10623>) In: Posterus. - ISSN 1338-0087. - Vol. 4, Iss. 5 (2011).
- [2] Duchoň, F. - Jurišica, L.: Detekcia značiek prostredia pomocou laserového skenera. In: AT&P Journal Plus. - ISSN 1336-5010. - Č. 1: Inteligentné pohybové systémy (2009), s. 43-48.
- [3] Blázsovits, G.: Interaktívna učebnica spracovania obrazu. (<http://dip.sccg.sk/>). - ISBN 80-89186-08-4. - Knižničné a edičné centrum FMFI UK, Bratislava. - 2006 [online] – citované 12.06.2012.
- [4] Hlaváč, V. – Sedláček, M.: Zpracování signálu a obrazu. Pracovní verze skripta v tisku pro studenty FEL ČVUT. Elektrotechnická fakulta ČVUT v Praze. 1999. http://neuron.tuke.sk/~pluchta/Pocitacove%20Videnie/Prednasky/NIECO/HL_AZSO.PDF [online] – citované 12.06.2012.
- [5] Pavlovičová J., Partyk M., Polec J.: Číslícové spracovanie obrazu. - Vydavateľstvo STU v Bratislave. - ISBN 80-227-2301-0.
- [6] Russ J. C., The image processing handbook / by John C. Russ – 5th ed. p. cm. ISBN 0-8493-7254-2.
- [7] Varga M., Mobilné robotické systémy. - Texty k predmetu, ÚRPI FEI STU 2008
- [8] Jurišica, L. – Hubinský, P. – Kardoš, J.: Robotika. – Texty k predmetu, ÚRPI FEI STU 2005.
- [9] Baraquand J., Latombe Jean-Claude.: Robot Motion Planing: A Distributed Representation Approach. In: The Internarional Journal of Robotics Research, vpl. 10, No. 6 1991.
- [10] Duchoň, F. - Jurišica, L.: Globálna navigácia mobilných robotov na báze metrickej mapy. In: AT&P Journal. - ISSN 1335-2237. - Roč. 17, č. 12 (2010), [online] – citované 13.06.2012
- [11] <http://www.android.com/about/>, [online] – citované 15.06.2012
- [12] Pásztó, P. - Hubinský, P.: Mobile Robot Controlled with Android Device. (<http://www.posterus.sk/?p=10719>) In: Posterus. - ISSN 1338-0087. - Vol. 4, Iss. 5 (2011)
- [13] http://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors_overview.html, [online] – citované 15.06.2012
- [14] <https://market.android.com/details?id=com.dicon.sonar.ad>, [online] – citované 15.06.2012
- [15] Teyvonia, T.: Visual Obstacle Avoidance using Optical Flow on the Android-powered HTC EVO for Safe Navigation of the iRobot Create. In: <http://teyvoniatthomas.com/index.php/projects/55-opticalflow.html>, [online] – citované 19.06.2012

- [16] Bayramoglu, E. – Andersen, N. A. – Poulsen, N. K. – Ravn, O.: Mobile Robot Navigation in a Corridor Using Visual Odometry. In: http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:55512/datastreams/file_3763732/content, [online] – citované 19.06.2012
- [17] José, J. – Farrajota, M. – Rodrigues, J. M. F. – Buf, J. M. H.: A vision system for detecting paths and moving obstacles for the blind. In: http://sapiencia.ualg.pt/bitstream/10400.1/884/1/659_DSAI%202010_A%20vision%20system%20for%20detecting%20paths%20and%20moving%20obstacles%20for%20the%20blind.pdf, [online] – citované 19.06.2012
- [18] <http://esd.volvocars.com/local/us/2012-Volvo-S60-Owners-Manual.pdf>, [online] – citované 25.06.2012
- [19] <http://www.volvocars.com/intl/all-cars/volvo-s60/pages/5-things.aspx>, [online] – citované 25.06.2012
- [20] http://media.opel.com/media/intl/en/opel/vehicles/driver_assistance_systems/2011.html, [online] – citované 25.06.2012
- [21] Ohnishi, N. – Imiya, A.: Corridor Navigation and Obstacle Avoidance using Visual Potential for Mobile Robot. In: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4228532>, [online] – citované 25.06.2012
- [22] Sales, D. – Shinzato, P. – Pessin, G. – Wolf, D. – Osório, F.: Vision-Based Autonomous Navigation System Using ANN and FSM Control. In: 2010 Latin American Robotics Symposium and Intelligent Robotics Meeting. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5702186>, [online] – citované 25.06.2012
- [23] Russ J. C.: The image processing handbook / by John C. Russ – 5th ed. p. cm. ISBN 0-8493-7254-2
- [24] Šonka, M. - Hlaváč, V.: Počítačové vidění, Praha: Grada, 1992. ISBN 80-85424-67-3
- [25] Hlaváč, V. - Sedláček, M.: Zpracování signálu a obrazu, Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02114-9
- [26] Šonka, M. - Hlaváč, V. - Boyle, R.: Image Processing, Analysis and Machine Vision, Brooks/Cole Publishing Company, 1999. ISBN 0-534-95393-X
- [27] Zhou, F. – Song, B. – Tian, G.: Bézier Curve Based Smooth Path Planning for Mobile Robot. In: Journal of Information & Computational Science 8: 12 (2011) 2441-24450. (http://www.joics.com/publishedpapers/2011_8_12_2441_2450.pdf), [online] – citované 28.06.2012
- [28] <http://docs.opencv.org/opencv2refman.pdf>, [online] – citované 29.06.2012
- [29] Bradski, G. - Kaehler, A.: Learning OpenCV, Sebastopol: O'Reilly Media, Inc., 2008, ISBN: 978-0-596-51613-0
- [30] http://www.irobot.com/filelibrary/pdfs/hrd/create/Create%20Manual_Final.pdf, [online] – citované 29.06.2012

- [31] http://homesupport.irobot.com/app/answers/detail/a_id/349/~/_what-sensors-does-irobot-create%E2%AE-have%3F, [online] – citované 01.07.2012
- [32] http://www.irobot.com/filelibrary/pdfs/hrd/create/Command%20Module%20Manual_v2.pdf, [online] – citované 01.07.2012
- [33] http://www.irobot.com/filelibrary/pdfs/hrd/create/Create%20Open%20Interface_v2.pdf, [online] – citované 01.07.2012
- [34] <http://www.elementdirect.com/files/10542B.pdf>, [online] – citované 01.07.2012
- [35] <http://www.microsoft.com/hardware/en-gb/p/lifecam-vx-5000#overview>, [online] – citované 03.07.2012
- [36] <http://www.microsoft.com/hardware/en-gb/p/lifecam-vx-5000#support>, [online] – citované 03.07.2012
- [37] <http://www.atmel.com/Images/doc2545.pdf>, [online] – citované 03.07.2012
- [38] http://www.asus.com/Eee/Eee_PC/Eee_PC_901/#overview, [online] – citované 03.07.2012
- [39] http://www.asus.com/Eee/Eee_PC/Eee_PC_901/#specifications, [online] – citované 04.07.2012
- [40] http://www.asus.com/Notebooks/Versatile_Performance/K73SV/#specifications, [online] – citované 04.07.2012
- [41] http://www.asus.com/Notebooks/Versatile_Performance/K73SV/#overview, [online] – citované 04.07.2012
- [42] Schramm, M.: Kinect: The company behind the tech explains how it works. In: <http://www.joystiq.com/2010/06/19/kinect-how-it-works-from-the-company-behind-the-tech/>, [online] – citované 05.07.2012
- [43] <http://www.minoru3d.com/WebCams/View-all-products.html>, [online] – citované 05.07.2012
- [44] http://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/urg_04lx.html, [online] – citované 05.07.2012
- [45] <http://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/download/data/URG SCIP11.pdf>, [online] – citované 09.07.2012
- [46] Štugel, J.: Farebné modely. In: <http://www.netgraphics.sk/farebne-modely>, [online] – citované 17.07.2012
- [47] Ebner, M.: Color Constancy, John Wiley & Sons, 2007, ISBN: 978-0-470-05829-9
- [48] <http://opencv.willowgarage.com/wiki/documentation/c/imgproc/CvtColor>, [online] – citované 18.07.2012
- [49] Emami, S.: Converting between RGB and HSV color formats in OpenCV. In: <http://www.shervinemami.info/colorConversion.html>, [online] – citované 18.07.2012
- [50] Hlaváč, V. - Sedláček, M.: Zpracování signálů a obrazů – ISBN 80-01-03110-1, Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005

- [51] http://cs.wikipedia.org/wiki/B%C3%A9zierova_k%C5%99ivka, [online] – citované 20.09.2012
- [52] http://en.wikipedia.org/wiki/B%C3%A9zier_curve, [online] – citované 21.09.2012
- [53] Pásztó, P. – Klůčik, M. – Smolák, M. – Chovanec, L. – Hubinský, P.: „Mobile Robot Navigation with Android Device Using OpenCV“ – International Conference on Innovative Technologies, IN-TECH 2012, Rijeka, 26. – 28.09.2012, pp. 499-502, ISBN 978-953-6326-77-8
- [54] <http://www.hexamite.com/hetheory.htm>, [online] – citované 31.10.2012
- [55] Helland, T.: Seven grayscale conversion algorithms (with pseudocode and VB6 source code). In: <http://www.tannerhelland.com/3643/grayscale-image-algorithm-vb6/>, [online] – citované 15.11.2012

Zoznam publikácií autora

ADF Vedecké práce v domácich nekarentovaných časopisoch
Počet záznamov: 4

ADF1 Klůčik, Marian - Jurišica, Ladislav - Vitko, Anton - Pásztó, Peter - Hanzel, Jaroslav: Semiautomatic Mechatronic Design: The Basis for a Creation of Models for Optimization with Genetic Programming.

In: ATP Journal plus. - ISSN 1336-5010. - Č. 1 : Modelling of Mechanical and Mechatronic Systems (2012), s. 45-52

ADF2 Pásztó, Peter - Hubinský, Peter: Application of a Visual System for Mobile Robot Navigation (OpenCV).

In: AT&P Journal Plus. - ISSN 1336-5010. - Č. 1: Systémy automatického riadenia (2010), s. 62-65

ADF3 Pásztó, Peter - Klůčik, Marian - Hanzel, Jaroslav - Hubinský, Peter: Optimization of Circular Marks Detection for the Purpose of Mobile Robot Localization.

In: ATP Journal plus. - ISSN 1336-5010. - Č. 1 : Modelling of Mechanical and Mechatronic Systems (2012), s. 112-116

ADF4 Pásztó, Peter – Hubinský, Peter: Mobile Robot Navigation Based on Circle Recognition.

In: Journal of Electrical Engineering. Akceptované šéfredaktorom pre publikovanie v č.1/2013

AED Vedecké práce v domácich recenzovaných vedeckých zborníkoch, monografiách

Počet záznamov: 2

AED1 Hubinský, Peter - Pásztó, Peter: Circle Sign Detecting Mobile Robot Navigation.

In: Selected Topics in Modelling and Control. Vol. 7. - Bratislava : Slovak University of Technology, 2011. - ISBN 978-80-227-3597-1. - S. 95-99

AED2 Pásztó, Peter – Klůčik, Marian – Hubinský, Peter: Vision guided mobile robot's trajectory planning.

In: : Selected Topics in Modelling and Control, Vol. 8. – Bratislava : Slovak University of Technology, 2012. – ISBN 978-80-227-3597-1. - S. 140-144

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách
Počet záznamov: 6

AFC1 Klůčik, Marian - Pásztó, Peter - Babinec, Andrej - Jurišica, Ladislav - Hanzel, Jaroslav - Rodina, Jozef: The Search for Optimal Trajectories of the Welding Tool in the Automatic Welding Line Using Evolutionary Computation.

- In: IN-TECH 2012 : Proceedings of International Conference on Innovative Technologies, Rijeka, Croatia, 26. - 28. 09. 2012. - Rijeka : Faculty of Engineering University of Rijeka, 2012. - ISBN 978-953-6326-77-8. - S. 229-232
- AFC2 Pászto, Peter - Hubinský, Peter: Application of a Visual System for a Mobile Robot Navigation (OpenCV).
In: Process Control 2010 : 9th International Conference. Kouty nad Desnou, 7.-10. 6. 2010 (2010). - Pardubice : University of Pardubice. - ISBN 978-80-7399-951-3. - C015a[6]
- AFC3 Pászto, Peter - Klůčik, Marian - Chovanec, Ľuboš - Smolák, Martin - Hubinský, Peter: Mobile Robot Navigation with Android Device Using OpenCv.
In: IN-TECH 2012 : Proceedings of International Conference on Innovative Technologies, Rijeka, Croatia, 26. - 28. 09. 2012. - Rijeka : Faculty of Engineering University of Rijeka, 2012. - ISBN 978-953-6326-77-8. - S. 499-502
- AFC4 Klůčik, Marian - Jurišica, Ladislav - Vitko, Anton - Pászto, Peter – Hanzel, Jaroslav: The mechatronic system optimization with use of genetic programming.
In: Euro 2012, 25th European Conference on Operational Research, 8-11 July 2012, Vilnius, Litva, S. 257
- AFC5 Hanzel, Jaroslav - Jurišica, Ladislav - Vitko, Anton – Klůčik Marian – Pászto, Peter: Optimal cutting of the raw materials.
In: Euro 2012, 25th European Conference on Operational Research, 8-11 July 2012, Vilnius, Litva, S. 113
- AFC6 Pászto, Peter – Klůčik, Marian – Palkovič, Lukáš, Hubinský, Peter: Light conditions independent circular marks recognition for the purpose of mobile robot navigation.
In: Mezinárodní Masarykova konference 2013 – Akceptované programovým výberom konferencie k publikovaniu v zborníku
- AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách
Počet záznamov: 3
- AFD1 Pászto, Peter: Navigácia mobilného robota s vizuálnym systémom ku značke.
In: Nové trendy v kybernetike, automatizácii a informatike : Odborný seminár. Gabčíkovo, Slovenská republika, 7.-9.9.2009. - Bratislava : STU v Bratislave FEI, 2009. - ISBN 978-80-227-3107-2. - CD-Rom
- AFD2 Smolák, Martin - Pászto, Peter: Využitie operačného systému Android na riadenie mobilného robota.
In: ŠVOČ 2012 [elektronický zdroj] : Zborník vybraných prác, Bratislava, 25. apríl 2012. - Bratislava : FEI STU, 2012. - ISBN 978-80-227-3697-8. - S. 413-415

AFD3 Smolák, Martin - Pásztó, Peter (ved. práce): Robot sledující čiernu čiaru.

In: ŠVOČ 2010: Študentská vedecká a odborná činnosť. Zborník vybraných prác. Bratislava, Slovak Republic, 21.4.2010. - Bratislava: STU v Bratislave FEI, 2010. - ISBN 978-80-227-3286-4. - CD-Rom

BDF Odborné práce v domácich nekarentovaných časopisoch
Počet záznamov: 3

BDF1 Pásztó, Peter - Hubinský, Peter: Mobile Robot Controlled with Android Device.
(<http://www.posterus.sk/?p=10719>)

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

BDF2 Pásztó, Peter: Navigácia mobilného robota s vizuálnym systémom ku značke.
(<http://www.posterus.sk/?p=3760>)

In: Posterus [elektronický zdroj]. - ISSN 1338-0087. - Vol. 2, Iss. 7 (2009),
web-page

BDF3 Pásztó, Peter - Hubinský, Peter: Využitie vizuálnych systémov na navigáciu mobilného robota.

In: Technika. - ISSN 1337-0022. - Roč. 8, č. 3 (2010), s. 34-36