

Analýza obrazové informace kamerového systému

Ing. Erik Král

Diplomová práce
2006



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav aplikované informatiky
akademický rok: 2005/2006

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ing. Erik KRÁL**
Studijní program: **N 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Informační technologie**

Téma práce: **Analýza obrazové informace kamerového systému**

Zásady pro vypracování:

Současný směr při řízení a navigaci adaptivních robotů je orientován na optoelektronické systémy skládající se z CCD popřípadě CMOS kamerového systému a strukturovaných světelných útvarů ze zářičů, zpravidla laserových diod. Cílem diplomové práce je rozbor a ověření měřicího řetězce na vzorkování obrazové informace o poloze světelných stop laserových zářičů pro řízení adaptivního mobilního robotického systému.

Cíle diplomové práce:

1. Zhodnocení současného stavu techniky v oblasti optoelektronických kamerových systémů.
2. Popis a rozbor možností použitého kamerového systému.
3. Analýza linearity a přesnosti optického zobrazení použitého objektivu.
4. Zvýšení přesnosti rozpoznávání obrazové informace o poloze světelných stop.
5. Elementární algoritmy rozpoznávání tvaru světelné stopy.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- [1] KREIDL M., *Senzory*. Vydavatelství ČVUT, Praha 1993. 141 s.
- [2] ŠKRÁŠEK J., *Základy aplikované matematiky I*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury. 1989. ISBN 80-03-00150-1.
- [3] SÁSIK J., *Viaczložkové snímače síl a momentov*, Bratislava: Slovenská Technická Univerzita v Bratislave, 2000, 203s, ISBN 80-227-1438-0.
- [4] KVASNICA M., *Head Joystick and Interactive Positioning for the Wheelchair* Proceeding of the ICOST 2003. In 1th IEEE International Conference on Smart Homes and Health Telematics. Paris, 2003, France.
- [5] <http://www.neovision.cz>
- [6] <http://www.humusoft.cz>
- [7] <http://www.humusoft.cz/MATLAB/MATLAB.htm>
- [8] <http://www.mathworks.com/>
- [9] <http://www.dlr.de/>

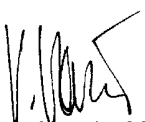
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Mgr. Milan Kvasnica, CSc.**

Ústav elektrotechniky a měření

Datum zadání diplomové práce: **14. února 2006**

Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2006**

Ve Zlíně dne 14. února 2006


prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
pověřený děkan




doc. Ing. Ivan Zelinka, Ph.D.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je analýza obrazové informace zaměřená na zpřesnění pozice světelných stop generovaných laserovými diodami. Poloha světelných stop je vstupní informací z digitální kamery vybavené CCD alternativně CMOS obrazovými snímači při řízení mobilního robotického systému. Analýza obrazu zahrnuje zkreslení optického členu a obrazového snímače. Eliminace zkreslení je dosaženo aplikací kalibračního modelu kamery. Nejprve se určí vnitřní parametry kamery pomocí distorze zobrazení. Poloha světelných stop se určí pomocí lícovacího algoritmu. Ověření kombinací nalezených světelných stop je realizováno pomocí inverzní afinní transformace. Aproximace užitím 2-D Gaussova rozdělení zpřesňuje polohy středů světelných stop. Prezentovány jsou výsledky testování pomocí 3-D grafického zobrazení intenzit jak v oblasti celého světelného spektra obrazového snímače, tak i jeho části v oblasti 670nm pro RGB kameru. Vyhodnocovací algoritmy jsou implementovány v prostředí MATLAB.

Klíčová slova:

Optoelektronické měření, 2-D CCD (CMOS) obrazový snímač, laserová dioda, kalibrace kamery, rozpoznávání, analýza obrazové informace.

ABSTRACT

Master thesis are focused on the analyse of the image information for the accuracy of the positioning of the laser diode's light spots which creates input information for the control of mobile robotic system. An image processing of the digital camera with 2-D CCD or CMOS sensors is described in order to eliminate the optical member and image sensor distortion. For the first the laser light spots positions are determined using basic matching algorithm. Then for the verification of the detected laser light spots combinations is used inverse affine transformation. Using 2-D Gauss distribution is estimated precise position of the centre of the lasers light spots. Resulting 3-D graphical tests in the area of the light spectrum are presented. Evaluation algorithm are implemented in MATLAB.

Keywords:

Optoelectronic measurements, 2-D CCD (CMOS) image sensor, Laser Diode, Camera Calibration, Pattern Recognition, Image Processing.

Děkuji Ing. Mgr. Milanovi Kvasnicovi, CSc. za spolupráci a odborné vedení.

OBSAH

ÚVOD	4
I TEORETICKÁ ČÁST	6
1 OPTOELEKTRONICKÉ KAMEROVÉ SYSTÉMY	7
1.1 ANALOGOVÉ A DIGITÁLNÍ KAMERY	7
1.2 INTELIGENTNÍ DIGITÁLNÍ KAMERY	8
2 KALIBRACE KAMERY	9
2.1 OBRAZOVÁ FUNKCE A TROJROZMĚRNÝ SVĚT	9
2.2 PROJEKTIVNÍ MODEL KAMERY	10
2.3 ANALÝZA OPTICKÉHO ZKRESLENÍ KAMERY	12
3 ROZPOZNÁVÁNÍ OBRAZOVÉ INFORMACE O POLOZE SVĚTELNÝCH STOP	13
3.1 METODY SEGMENTACE OBRAZU A ROZPOZNÁVÁNÍ OBJEKTŮ	13
3.2 TEORETICKÉ ZÁKLADY NAVRŽENÉHO ALGORITMU.....	15
3.2.1 Lícování vzorku (matching algorithm)	15
3.2.2 Nalezení matice zpětné afinní transformace	16
3.2.3 Aproximace 2-D Gaussovým rozdělením	17
II PRAKTICKÁ ČÁST	18
4 ALGORITMUS PRO PŘESNÉ ROZPOZNÁVÁNÍ OBRAZOVÉ INFORMACE O POLOZE SVĚTELNÝCH STOP	19
4.1 KALIBRACE KAMERY	19
4.1.1 Kamera KAMPRO KC-381CG.....	20
4.1.2 AXIS Network 206 Camera	21
4.2 STRUKTURA FUNKCÍ A VÝZNAM PARAMETRŮ ALGORITMU	22
4.2.1 Struktura funkcí algoritmu	22
4.2.2 Vstupní parametry algoritmu	23
4.3 EXPERIMENTY	25
4.3.1 CMOS kamera KAMPRO KC-381CG	25
4.3.2 AXIS Network 206 Camera	30
5 ZHODNOCENÍ A DALŠÍ VÝVOJ	36
ZÁVĚR	37
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	38
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	40
SEZNAM OBRÁZKŮ	42
SEZNAM TABULEK	43
SEZNAM PŘÍLOH	44

ÚVOD

Tato práce se zabývá analýzou a zpracováním obrazové informace pro řízení mobilního robotického systému. Obrazová informace je zpracována z digitální kamery nebo soustavy digitálních kamer vybavených CCD nebo CMOS obrazovými snímači. Výstup z kamery může být buď analogový, nebo digitální video signál přenášený pomocí různých komunikačních rozhraní a protokolů. Kamery s analogovým výstupem jsou v současnosti nahrazeny kamerami s digitálním výstupem.

Poslední typy digitálních kamer jsou vybaveny vlastním výkonným mikroprocesorem, embedded operačním systémem a vstupně výstupními prvky [1] [2]. Tyto systémy je možné rozšiřovat o vlastní uživatelské algoritmy pro digitální zpracování obrazu a řízení systémů. Výhodou takového řešení je pak rychlost vývoje (kdy není nutné vyvíjet vlastní embedded systém a stačí vyměnit paměťovou kartu, nebo instalovat jiný algoritmus), stabilita řešení a jeho modulárnost.

Při analýze obrazové informace je důležité vzít do úvahy zkruslení kamerového systému. Pro tento účel byl využit Camera Calibration Toolbox for Matlab [3], jehož verze v jazyce c++ je implementována v knihovně OpenCV firmy Intel [4] (volně šiřitelné). Výstupem tohoto programu jsou vnitřní parametry kamery, s jejichž pomocí může být zpřesněna informace o distorzi polohy světelné stopy [5].

Dále byl navržený algoritmus pro nalezení světelné stopy vhodný především pro aplikace založené na analýze pozic světelných stop generovaných čtyřmi a více laserovými diodami tvořícími pravidelný geometrický útvar. Příkladem tohoto systému je například Head Joystick [7]. Algoritmus je schopen analyzovat obrazovou informaci, segmentovat oblasti odpovídající světelným stopám a určit jejich souřadnice. Pomocí srovnání s výchozí známou pozicí diod naleznou body, které nejlépe odpovídají afinní transformaci tohoto objektu [7]. Souřadnice jsou zpřesněny pomocí již zmíněných vnitřních parametrů kamery. V posledním kroku jsou určeny středy světelných stop pomocí jejich aproximace 2-D Gaussovým rozdělením podobně jako v programu Multi-Camera Self-Calibration [9].

Na základě přesných pozic světelných stop lze potom určit akční zásah do systému, například řídicího systému mobilního robota. K tomuto tématu již byly zpracovány bakalářské práce [10 - 13]. Tyto práce jsou založeny na digitalizaci analogového video signálu pomocí

digitalizační karty – frame grabberu a následného zpracování pomocí algoritmů vytvořených v prostředí MATLAB.

Nejprve budou zmíněny teoretické základy zmíněných postupů. Potom budou analyzovány různé možnosti architektury systémů pro analýzu obrazové informace. Větší pozornost bude věnována systémům aplikovaným pro Head Joystick. V praktické části bude provedeno orientační měření vnitřních parametrů použitého kamerového systému pomocí kterého lze odstranit zkreslení kamerového systému. Dále bude uveden popis a výsledky navrženého algoritmu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 OPTOELEKTRONICKÉ KAMEROVÉ SYSTÉMY

Obrazová informace se získává pomocí kamer vybavených řádkovými, maticovými, popřípadě kruhovými 2-D CCD nebo CMOS obrazovými snímači, pro některá průmyslová použití jsou postačující i PSD snímače. Kamera se z našeho pohledu skládá z optické soustavy, snímače (CCD nebo CMOS) a elektroniky která předzpracovává sejmutý obraz. CCD prvky jsou využívány již od sedmdesátých let 20. století, jejich výhodou je nižší úroveň šumu proti CMOS. Nevýhodou je vzájemné ovlivňování nábojů v sousedních pixelech (obrazových elementech), nemožnost přímého adresování pixelů, saturace pixelů a nižší rozsah použitelných intenzit pokud není použito chlazení. Novější technologie CMOS představuje levnější řešení a nabízí možnost integrace procesorů na jednom čipu. Dále oproti CCD prvkům jsou schopny zachytit větší rozsah intenzit a mají vysokou rychlost snímání. Nevýhodou je vyšší šum než u CCD [7].

1.1 Analogové a digitální kamery

Přestože je využit CCD nebo CMOS prvek, výstup z kamery může být jak digitální tak analogový. U analogového výstupu je pak nutné analogový signál digitalizovat pomocí digitalizační karty (frame grabberu). Výhodou jsou nízké pořizovací náklady, ke kterým ovšem musíme přidat náklady na digitalizační kartu. Digitální kamery jsou naopak dražší ale nabízí možnost přímého digitálního výstupu [7].

Běžné rozhraní pro získání obrazové informace z digitální kamery jsou:

- Analogový video signál,
- Camera Link [8],
- Firewire,
- USB, USB2,
- Ethernet,
- WiFi.

Kromě rozhraní pro získání obrazové informace jsou digitální kamery vybaveny vstupně-výstupními rozhraními pro přenos řídicích informací, rozšířené jsou:

- RS-232,
- RS-485,
- CAN,
- Bluetooth,
- Firewire,
- USB,
- Ethernet.

1.2 Inteligentní digitální kamery

Běžné digitální kamery samy o sobě obrazovou informaci nezpracovávají, ale pouze poskytují výstup ve formě digitálních dat. Samotné zpracování obrazové informace musí probíhat na externím zařízení vybaveném kompatibilním rozhraním. Naproti tomu inteligentními digitálními kamerami (Smart Camera) bývají označovány kamery, které v sobe integrují kameru a mikroprocesor pro analýzu získané obrazové informace. Odpadá tedy nutnost přenosu obrazové informace do externího zařízení a zpracování může probíhat přímo v kameře. Tyto kamery bývají vybaveny embedded operačním systémem jako je například Embedded Linux. Také často obsahují vstupně výstupní porty pro ovládání potřebných zařízení, případně podporují komunikační rozhraní jako je RS-485 nebo CAN. Tyto kamery jsou potom schopny pracovat jako samostatné jednotky provádějící jak zpracování vstupní obrazové informace, tak potřebné akční zásahy do řízeného systému. Příkladem takových kamer jsou kamera Pulnix TM-6740GE [1] a kamera Vision Components VC4058 [2].

2 KALIBRACE KAMERY

Cílem kalibrace kamery je odstranění nedostatků kamerového optoelektronického systému, jako je radiální nebo tangenciální zkreslení čočky nebo parametry CCD nebo CMOS senzoru jako například jiný než čtvercový rozměr pixelu nebo jiný než pravý úhel mezi osami senzoru. Kamera je popsána matematickým modelem, který zahrnuje vnější a vnitřní parametry kamery. Mezi vnitřní parametry patří již zmíněné radiální a tangenciální zkreslení, zkreslení digitalizací, pozice hlavního bodu a ohnisková vzdálenost. Vnější parametry kamery jsou poloha a natočení kamery v 3-D prostoru. Výsledkem kalibrace je sada parametrů popisujících vztah mezi 3-D souřadnicemi a projekcí do souřadnic 2-D obrazu [1]. Pro potřeby této diplomové práce postačuje znalost vnitřních parametrů kamery.

2.1 Obrazová funkce a trojrozměrný svět

Obrazová funkce je výsledek perspektivního (středového) promítání daném vztahem (1) v model dírkové komory (pinhole model) kde x, y, z jsou souřadnice bodu P v 3-D scéně a f je vzdálenost obrazové roviny od středu promítání, objektová rovina bývá u objektivů umístěna ve vzdálenosti odpovídající ohniskové vzdálenosti, u, v jsou potom souřadnice bodu promítnuté do obrazové roviny.

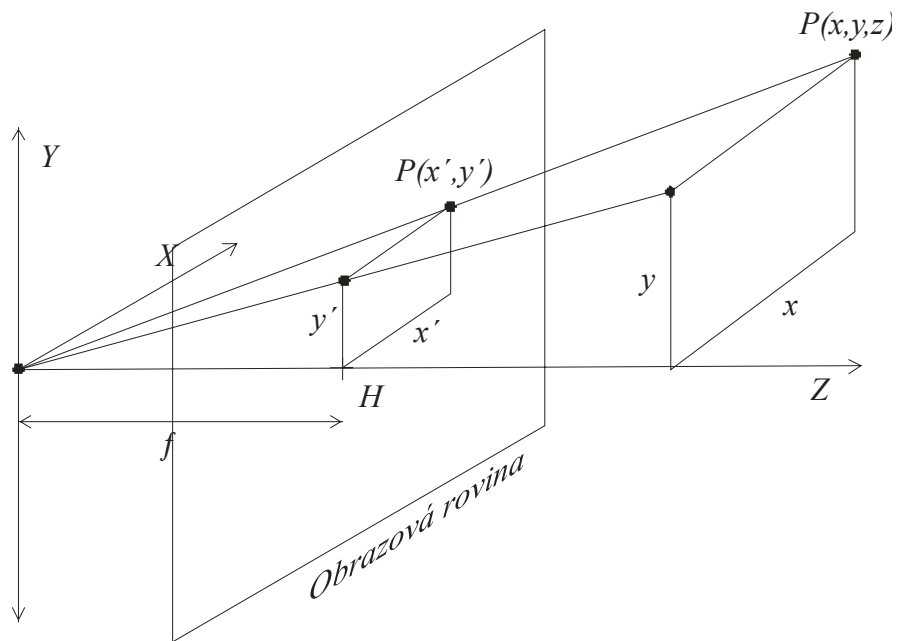
$$u = \frac{xf}{z}, v = \frac{yf}{z} \quad (1)$$

Perspektivní zobrazení dané tímto vztahem není lineární, postačující je ale, když jsou pozorované objekty v mnohem větší vzdálenosti než je vzdálenost f od obrazové roviny [7], tedy když platí:

$$\frac{z + dz}{f} \doteq \frac{z}{f} \quad (2)$$

2.2 Projektivní model kamery

Projektivní model je využíván při kalibraci kamery [17] a jeho základní princip je znázorněn na Obr. 1.



Obr. 1. Princip projektivní kamery

Vztah (3) představuje maticový zápis projektivního modelu kamery v homogenních souřadnicích.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \propto \begin{bmatrix} \lambda u \\ \lambda v \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Protože počátek souřadnic 2-D obrazu neleží v hlavním bodě H , který představuje průsečík hlavní osy s obrazovou rovinou, je třeba posunout tento bod do počátku souřadnic 2-D obrazu. Matice K představuje kalibrační matici modelu.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad K = \begin{bmatrix} f & 0 & u_0 \\ 0 & f & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

U digitální kamery jsou rozměry obrazu udávány v pixelech s různým měřítkem v ose x a y z důvodu možnosti nečtvercových pixelů snímacího senzoru. Koeficienty D_u a D_v představují počet pixelů na jednotku vzdálenosti ohniskové vzdálenosti v souřadnicích obrazu. Výsledná matice K je potom v jednotkách pixelů na jednotku vzdálenosti.

$$K = \begin{bmatrix} D_u & 0 & 0 \\ 0 & D_v & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & p_x \\ 0 & f & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow K = \begin{bmatrix} D_u f & 0 & D_u u_0 \\ 0 & D_v f & D_v v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Konečný projektivní model zahrnuje i úhel mezi osou x a y snímacího senzoru, který vyjadřuje koeficient s_u .

$$K = \begin{bmatrix} D_u f & s_u & D_u u_0 \\ 0 & D_v f & D_v v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.3 Analýza optického zkreslení kamery

Nejčastější používaná korekce je odstraňování radiální zkreslení objektivu, které způsobuje, že aktuální bod je radiálně přesunutý na obrazové rovině. Radiální zkreslení může být aproximováno vztahem (8). Pro aproximaci zkreslení většinou postačují 2 nebo 3 koeficienty zkreslení k_i [18].

$$\begin{bmatrix} \tilde{u}_i \\ \tilde{v}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ z \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \delta u_i^{(r)} \\ \delta v_i^{(r)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{u}_i (k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4 + \dots) \\ \tilde{v}_i (k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4 + \dots) \end{bmatrix} \quad r_i = \sqrt{\tilde{u}_i^2 + \tilde{v}_i^2} \quad (8)$$

Druhé běžné zkreslení je způsobeno nedokonalým vycentrováním plochy čočky. Toto tangenciální zkreslení může být aproximováno vztahem (9). Kde koeficienty p_1 a p_2 jsou koeficienty tangenciálního zkreslení [18].

$$\begin{bmatrix} \delta u_i^{(t)} \\ \delta v_i^{(t)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2p_1 \tilde{u}_i \tilde{v}_i + p_2 (r_i^2 + 2\tilde{u}_i^2) \\ p_2 (r_i^2 + 2\tilde{v}_i^2) + 2p_1 \tilde{u}_i \tilde{v}_i \end{bmatrix} \quad r_i = \sqrt{\tilde{u}_i^2 + \tilde{v}_i^2} \quad (9)$$

Vlastní model pro kalibraci kamery je kombinací uvedeného modelu dírkové komory se složkami radiálního a tangenciálního zkreslení:

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \left(\tilde{u}_i + \delta u_i^{(r)} + \delta u_i^{(t)} \right) \\ \left(\tilde{v}_i + \delta v_i^{(r)} + \delta v_i^{(t)} \right) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

3 ROZPOZNÁVÁNÍ OBRAZOVÉ INFORMACE O POLOZE SVĚTELNÝCH STOP

Vyhledávání světelných stop je snadný úkol při ideálních světelných podmínkách a ideálním povrchu, potom mají světelné stopy výrazně vyšší intenzitu než jejich okolí. V tomto případě lze jejich pozici určit prostým prahováním. Pokud se ale zhorší podmínky, je nutné použít robustnější metody. V mnoha případech nemusí mít světelná stopa největší intenzitu, může se také nacházet na hranici materiálů s různým povrchem, nebo scéna může být osvětlená jenom částečně, nebo z různých světelných zdrojů. V tomto případě se vyhledání pozice světelných stop stává složitějším problémem.

3.1 Metody segmentace obrazu a rozpoznávání objektů

Segmentaci a rozpoznávání objektů předchází předzpracování obrazové informace například pomocí vyhlazování, zvýraznění hran, změna kontrastu atd. Po této přípravě může dojít k segmentaci obrazu, nejpoužívanější metody jsou [19] [20] [22] :

- Prahování (Thresholding)
- Segmentace na základě hran (Edge-based segmentation)
- Segmentace na základě oblastí (Region-based segmentation)
- Lícování (Matching)

Zajímavou metodou z hlediska segmentace na základě hran je Houghova transformace, kdy jsou hledány objekty o známém tvaru a rozměru, obraz je transformován na prostor parametrů odpovídajících hledanému objektu a nejčastější výskyt parametrů pak může být označen jako hledaný objekt. Tato metoda je vhodná pro hledání úseček nebo kružnic o známe velikosti.

Rozpoznat objekt (a jeho tvar) je velmi náročný úkol. Nejběžnější metody pro rozpoznávání objektů jsou:

- Rozpoznání na základě statistických vzorků (Statistical Pattern Recognition)
- Využití neuronových sítí [21]
- Využití genetických algoritmů [21]
- Aplikace teorie grafů
- Syntaktické rozpoznávání vzorků (Syntactic Pattern Recognition)

V této práci byl využit princip segmentace na základě lícování (Matching). Jako velmi zajímavé řešení se také jeví využití neuronových sítí. Vzhledem k možnému využití navrženého algoritmu v embedded systému, nebyly neuronové sítě zatím použity. Další vývoj ale bude pravděpodobně zaměřen tímto směrem. Kdy zadaný vzorek by mohl být využitý jako startovací a dále by se měnil podle okolních podmínek, případně by bylo použito více skupin vzorků volených podle konkrétních podmínek.

3.2 Teoretické základy navrženého algoritmu

Navržený algoritmus je založen na lícování (Matching) vzorku s podezřelými body v obrazu, které jsou určeny pomocí velké změny intenzity v jedné ose v poloměru porovnávaného vzorku. Dále jsou vyřazeny příliš rozsáhlé stopy. Nalezené podezřelé stopy jsou pak ve čtveřicích porovnávány s výchozím čtvercovým tvarem světelných zdrojů a jsou definovány parametry afinní geometrické transformace a celková odchylka. Každá čtveřice je oceněna poměrnou sumou intenzity a shody se vzorkem. Nejvíce oceněná suma je vybrána jako čtveřice světelných stop. Každý střed světelné stopy je pak upřesněn jako střed aproximace 2-D Gaussovým rozdělením

3.2.1 Lícování vzorku (matching algorithm)

Vzorkem pro vyhledávání je 2-D Gaussovo rozložení intenzit s očekávanými rozměry a parametry hledané světelné stopy. Hodnoty jsou vždy přizpůsobeny intenzitě ve středu matice. Z lícování jsou vynechány hodnoty nižší než rozdíl intenzity ve středu matice a zadané hloubky testování. Suma odchylek d testované matice \mathbf{M} a vzorku \mathbf{P} je pak převedena na celkový koeficient shody c v intervalu $\langle 0,1 \rangle$.

$$d = \sum_i^h \sum_j^w |M_{ij} - P_{ij}| \quad (11)$$

$$c = \frac{d_{\max} - d}{d_{\max}} \quad d_{\max} = i_{\max} w h \quad (12)$$

3.2.2 Nalezení matice zpětné afinní transformace

Vzhledem k tomu že nás zajímají pouze světelné stopy odražené od roviny, můžeme považovat transformaci souřadnic výchozího pravidelného útvaru za afinní transformaci, která zahrnuje rotaci, translaci a zkosení [7]:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = T_A \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad T_A = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Řešení soustavy rovnic (17) pro 3 a více korespondujících bodů ve scéně a obrazu můžeme zapsat pro n takových bodů jako jako matici $2n \times 12$ (18). Nalezenou matici T pak snadno převedeme na matici T_A .

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ax + by + c \\ dx + ey + f \\ gx + hy + i \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} x'(gx + hy + i) &= ax + by + c \\ y'(gx + hy + i) &= dx + ey + f \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} ax + by + c - gx'x - hx'y - ix' &= 0 \\ dx + ey + f - gy'x - hy'y - iy' &= 0 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_1x_1 & -x'_1y_1 & -x'_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -y'_1x_1 & -y'_1y_1 & -y'_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_nx_n & -y'_nx_n & -x'_n \\ 0 & 0 & 0 & x_n & y_n & 1 & -y'_nx_n & -y'_ny_n & -y'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ \vdots \\ i \end{bmatrix} \quad (18)$$

Tato soustava pak může být řešena například pomocí singulárního rozkladu matice (Singular Value Decomposition) [19].

3.2.3 Aproximace 2-D Gaussovým rozdělením

Intenzita světelné stopy je aproximována 2-D Gaussovým rozdělením. Distribuční funkce radiálně symetrického 2-D Gaussova rozdělení s centrem v počátku souřadnic je definována následovně:

$$f(x, y) \propto e^{-\frac{1}{2} \frac{(x^2+y^2)}{\sigma^2}} \quad (19)$$

Pro různé standardní odchylky σ a střed v bodě (x_0, y_0) je distribuční funkce definována takto:

$$f(x, y) \propto e^{-\frac{1}{2} \frac{(x-x_0)^2}{\sigma_x^2} - \frac{1}{2} \frac{(y-y_0)^2}{\sigma_y^2}} \quad (20)$$

Vlastní aproximace spočívá v odhadu standardních odchylek σ_x a σ_y tak aby distribuční funkce s určitou tolerancí odpovídala rozložení intenzit testované světelné stopy.

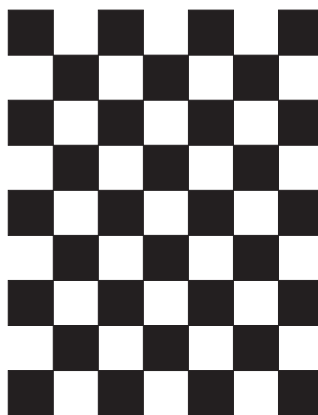
II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 ALGORITMUS PRO PŘESNÉ ROZPOZNÁVÁNÍ OBRAZOVÉ INFORMACE O POLOZE SVĚTELNÝCH STOP

Algoritmus byl vyvinutý v prostředí Matlab. Při tvorbě algoritmu byly využity funkce Camera Calibration Toolbox [3] jehož verze v jazyce c++ je implementována v knihovně OpenCV firmy Intel [4]. Tento toolbox musí být mít nainstalován v prostředí Matlab. Dále byla využita funkce „invpersp.m“ z knihovny MATLAB and Octave Functions for Computer Vision and Image Processing [24] a Matlab 2D Gaussian fitting code [25] jehož využití pro zpřesnění středů světelných stop bylo inspirováno programem Multi-Camera Self-Calibration [9].

4.1 Kalibrace kamery

Camera Calibration Toolbox for Matlab [3] vychází z popsaného kamerového modelu [19] [17], srovnání značení je uvedeno v Tab. 1. Kalibrace se provádí pomocí standardního kalibračního vzoru (Obr. 1) u kterého jsou známy rozměry čtverců. Na snímcích z kamery jsou potom automaticky indentifikovány rohy obrazců a na základě porovnání s očekávanou pozicí a zjištěnou pozicí jsou určeny vnitřní parametry kamery. Čím více snímků bude otestováno, tím větší bude přesnost měření.



Obr. 2. Kalibrační vzor

Tab. 1. Srovnání značení Camera Calibration Toolbox a Heikkilä

Značení toolboxu	Značení Heikkilä
fc(1), fc(2)	fD_u, S_u, fD_v
cc(1), cc(2)	u_0, v_0
alpha_c	0
kc(1), kc(2)	k_1, k_2
kc(3), kc(4)	p_1, p_2
kc(5)	0

Parametr alpha_c a kc(5) se při výchozím nastavení nepoužívá.

4.1.1 Kamera KAMPRO KC-381CG

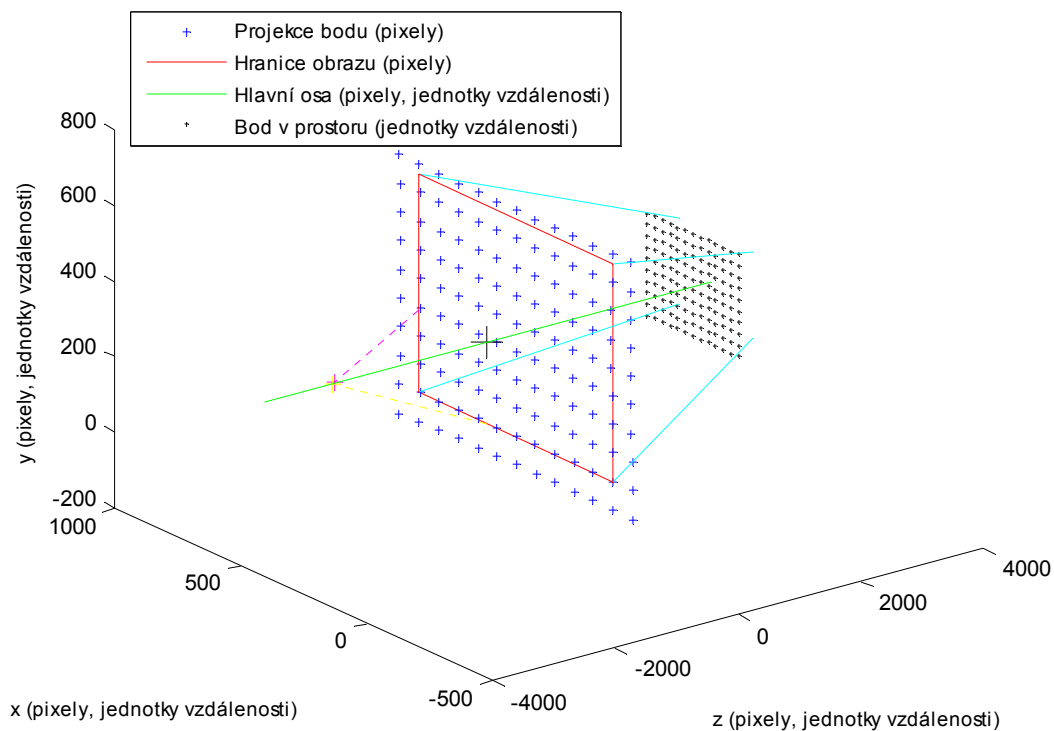
Při vlastní kalibraci bylo použito 16 snímků a byly otestovány 2 kamery. Vnitřní parametry první kamery KAMPRO KC-381CG připojené digitalizační kartou Data Translation DT31155 jsou schématicky zobrazeny na Obr. 3 a byly stanoveny jako:

$$fc = [2530.16945 \quad 2477.62113]$$

$$cc = [497.45131 \quad 217.58861]$$

$$alpha_c = [0.00000]$$

$$kc = [0.58380 \quad -1.03393 \quad -0.01955 \quad 0.03647 \quad 0.00000]$$



Obr. 3. Schématické zobrazení modelu kamery KAMPRO KC-381CG

4.1.2 AXIS Network 206 Camera

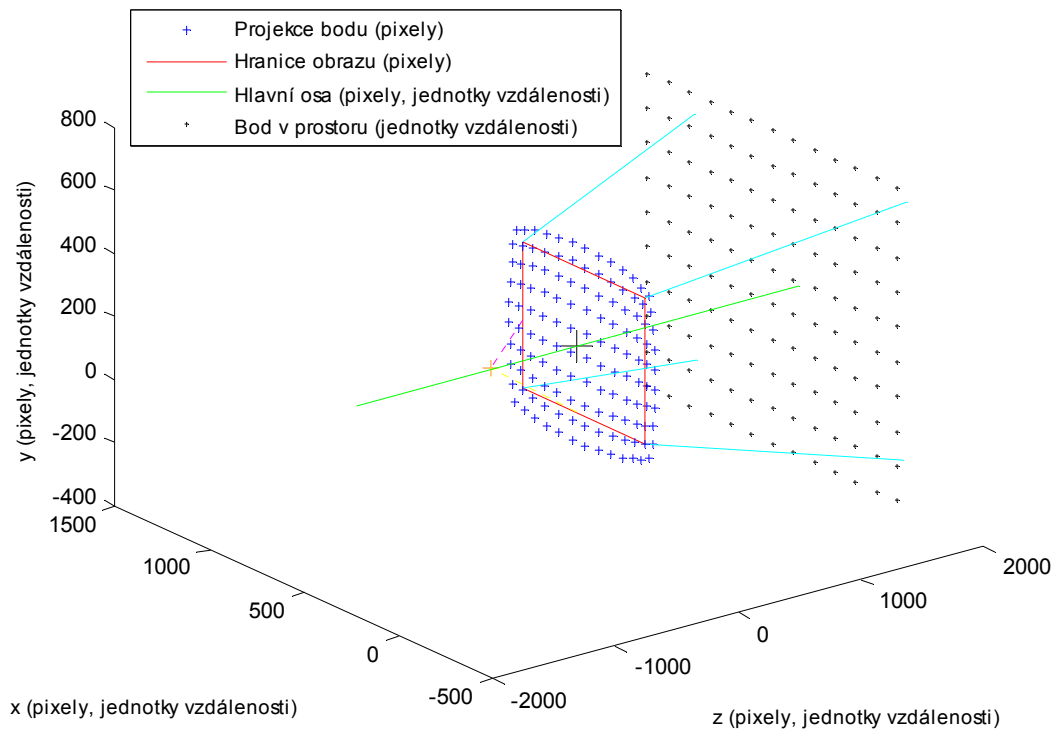
Parametry kamery AXIS Network 206 jsou zobrazeny na Obr. 4 a byly stanoveny jako:

$$fc = [699.73374 \quad 699.02060]$$

$$cc = [356.11367 \quad 212.92863]$$

$$\alpha_c = [0.00000]$$

$$kc = [-0.41229 \quad 0.10129 \quad 0.00083 \quad -0.00419 \quad 0.00000]$$



Obr. 4. Schématické zobrazení modelu kamery AXIS Network 206 Camera

Druhá kamera má mnohem menší ohniskovou vzdálenost v pixelech na jednotku délky a také větší radiální zkreslení.

4.2 Struktura funkcí a význam parametrů algoritmu

Postup algoritmu byl popsán v kapitole 3.2, všechny funkce algoritmu jsou vytvořeny programovacím jazyce Matlab. Verze algoritmu je vývojová a obsahuje mnoho funkcí pro analýzu výsledků.

4.2.1 Struktura funkcí algoritmu

Celý algoritmus je rozdělen do funkcí popsanych v Tab. 1, podrobný popis je uveden ve zdrojových textech.

Tab. 2. Struktura souborů a funkcí algoritmu

Název souboru	Popis
LEDS_Test.m	Výchozí funkce.
LEDS_VisualCameraParams.m	Funkce která schematicky zobrazuje parametry zadané vnitřní parametry kamery.
LEDS_MatchingTest.m	Funkce provádějící lícování (matching)
LEDS_GaussianMatrix.m	Pomocná funkce vrací matici 2-D normálního zobrazení.
LEDS_MatrixMatching.m	Pomocná funkce která provede vlastní porovnání matic.
LEDS_UpdateBlob.m	Pomocná funkce, která zařazuje matici do světelné stopy.
LEDS_AffinityTest.m	Funkce která provádí nalezení nejvhodnější čtveřice světelných stop
LEDS_2dGaussFit.m	Funkce která určuje středy světelných stop pomocí aproximace 2-D Gaussovým rozdělením.

4.2.2 Vstupní parametry algoritmu

Vstupní parametry algoritmu se dělí do těchto částí:

- Sdílené proměnné, viz. Tab. 3
- Proměnné funkce LED_S_MatchingTest, viz. Tab. 4
- Proměnné funkce LED_S_AffinityTest, viz. Tab. 5
- Proměnné funkce LED_S_2dGaussFit, viz. Tab. 6
- Vnitřní parametry kamery, viz. Kapitola 4.1

Tab. 3. Sdílené proměnné

Název parametru	Význam
ImageName	Jméno testovaného obrázku
xm, ym	Rozměry matice intenzit obrazu v pixelech

Tab. 4. Proměnné funkce LEDS_MatchingTest

Název parametru	Význam
cx, cy	Střed 2-D Gaussova rozdělení
sx, sy	Standardní odchylky σ_x a σ_y 2-D Gaussova rozdělení
Peak	Maximální hodnota 2-D Gaussova rozdělení v pixelech
HighCut	Hodnota ořezání intenzit 2-D Gaussova rozdělení v pixelech
Depth	Hloubka testování intenzit v pixelech
MinVal	Minimální hodnota intenzit pro testování v pixelech
DerivateThresh	Minimální rozdíl hodnot pro označení za podezřelý bod v pixelech
MinEquality	Minimální hodnota koeficientu shody
BlobRadius	Poloměr hledané světelné stopy v pixelech
BlobEqDiff	Maximální rozdíl koeficientů shody světelné stopy
SpLen	Velikost pole struktur světelné stopy, pomocná proměnná

Tab. 5. Proměnné funkce LEDS_AffinityTest

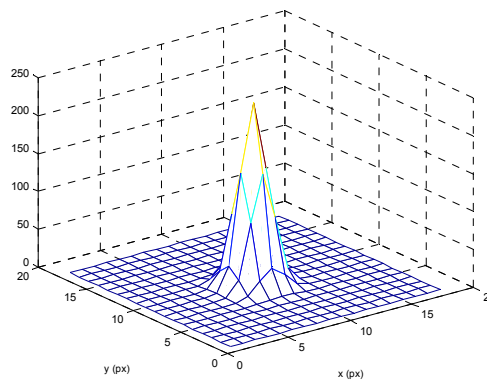
Název parametru	Význam
AffinityThresh	Tolerance pro odhad
ApLen	Maximální velikost pole struktur kombinací, pomocná proměnná
MaxCombinations	Maximální počet bodů zahrnutých do kombinací afinních transformací

Tab. 6. Proměnné funkce LEDS_2dGaussFit

Název parametru	Význam
GaussTolerance	Tolerance při odhadu aproximace 2-D Gaussova rozdělení

4.3 Experimenty

V následující část jsou uvedeny dva příklady různých typů kamer, v příloze jsou potom uvedeny další ukázky testovaných snímků. Vstupní parametry obou testů jsou shodné, jen se liší název obrázku a vnitřní parametry kamery. Parametry lícované matice intenzit s 2-D Gaussovým rozdělením jsou zobrazeny na Obr. 5.

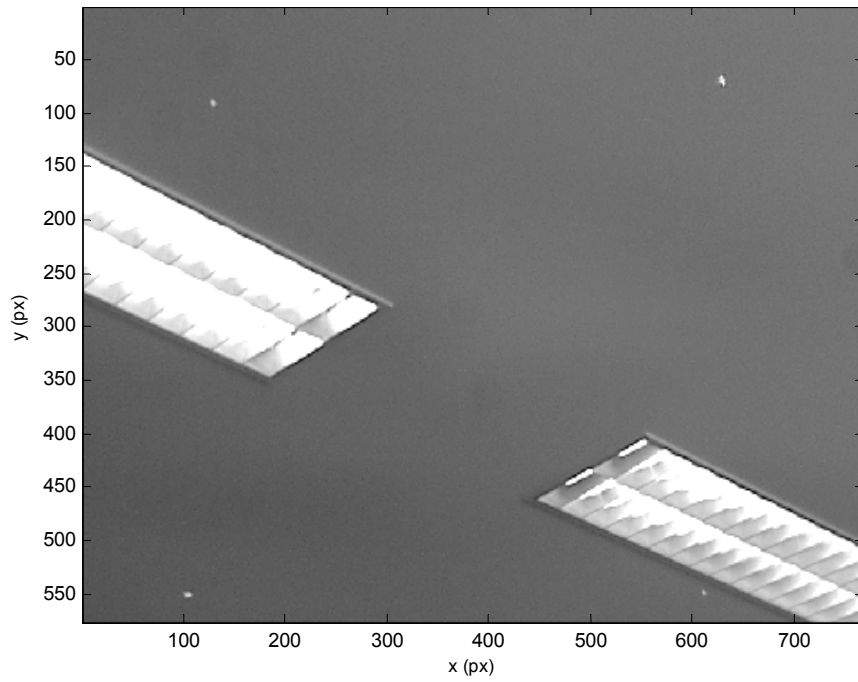


Obr. 5. Hledané 2-D Gaussovo rozdělení

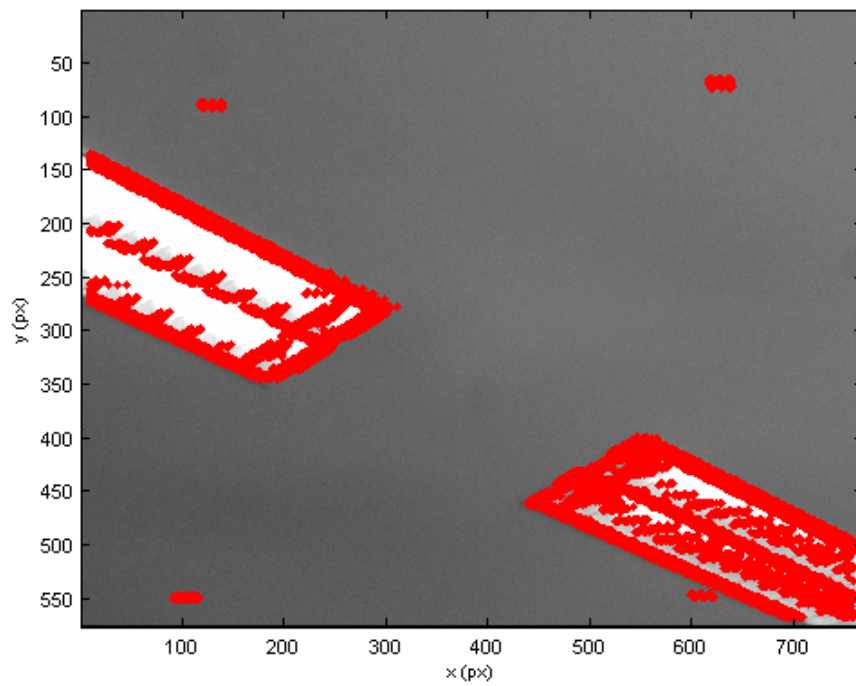
4.3.1 CMOS kamera KAMPRO KC-381CG

Tato kamera nabízí pouze analogový video výstup a testovací obraz by sejmutý pomocí digitalizační karty (frame grabberu) Data Translation DT31155.

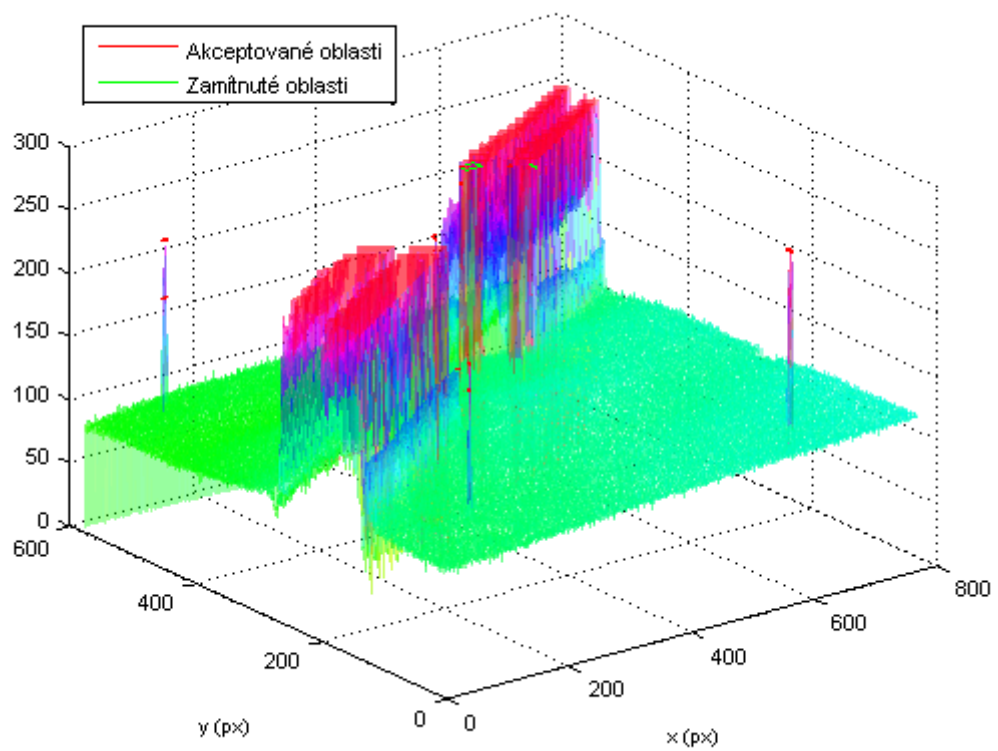
Ve výchozí snímku (Obr. 6) mají světelné stopy nižší intenzitu než světelný zdroj, na obrázku jsou potom označené nalezené podezřelé oblasti, kterých bylo celkem 16416 (viz. Obr. 7). Velká většina oblastí které představuje světelný zdroj jsou vyřazeny kvůli velkým rozměrům (viz. Obr. 8). Na Obr. 9 jde potom vidět, že světelné stopy mají mnohem vyšší koeficient shody než ostatní oblasti, graf zobrazuje pouze hodnoty vyšší než 0.85. Pomocí koeficientů inverzní afinní transformace potom byla určena nejvhodnější čtveřice bodů (Obr. 10), která je zobrazena i ve výchozím snímku včetně ostatních oblastí se shodou vyšší než 0.85 (Obr. 14). Na Obr. 11 a Obr. 12 je pak zobrazeno zpřesnění středů světelných stop, které je výrazné. Obr. 13 pak už jenom zobrazuje nalezenou čtveřici v normalizovaných souřadnicích pomocí inverzního převodu v kalibračním modelu.



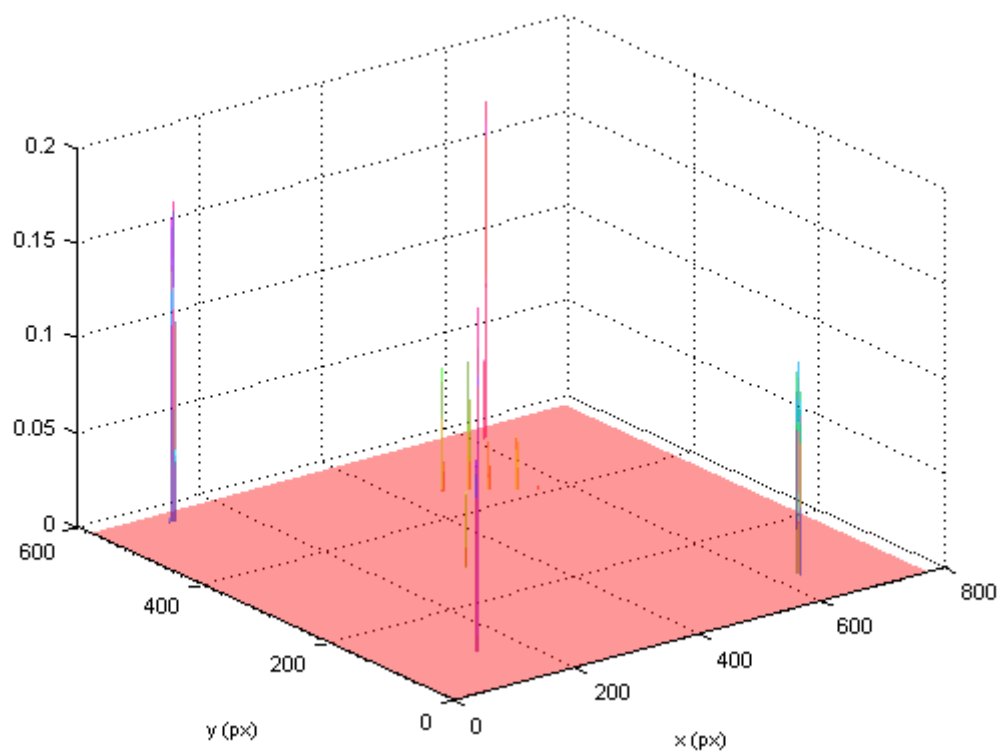
Obr. 6. Analyzovaná scéna (obrázek 9)



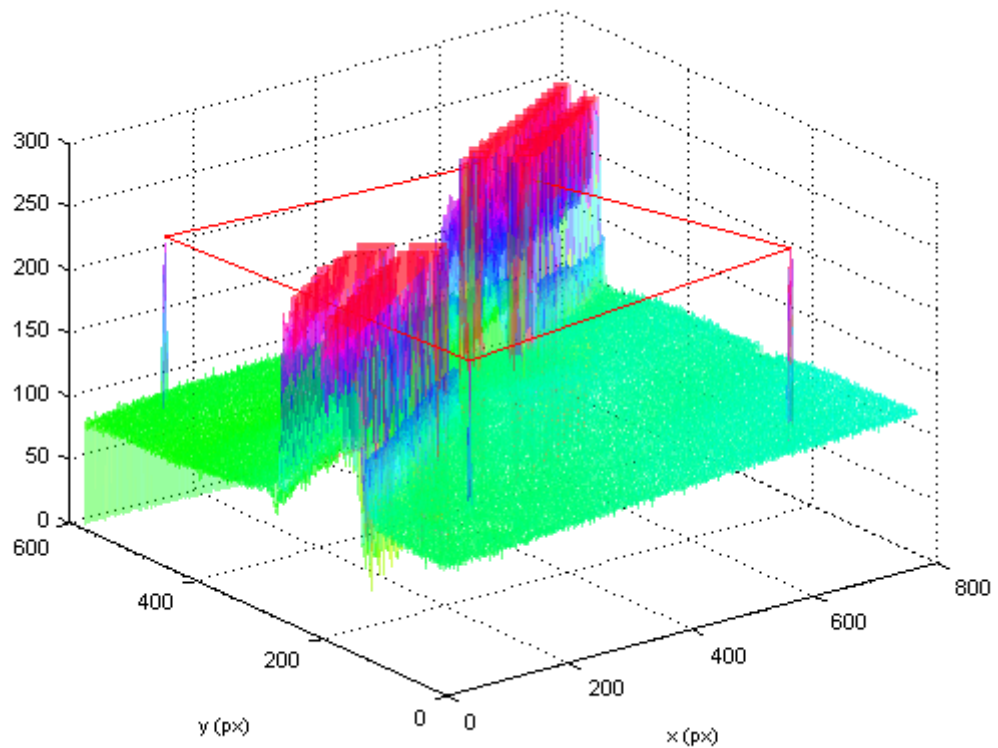
Obr. 7. Testované oblasti (obrázek 9)



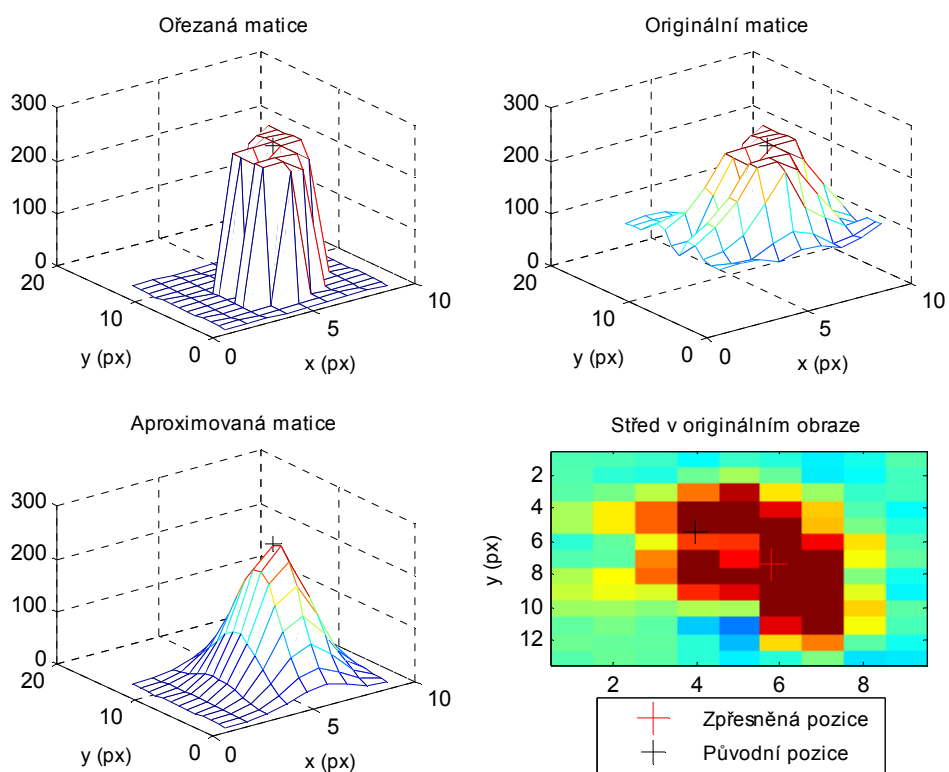
Obr. 8. Akceptované a zamítnuté oblasti shody (obrázek 9)



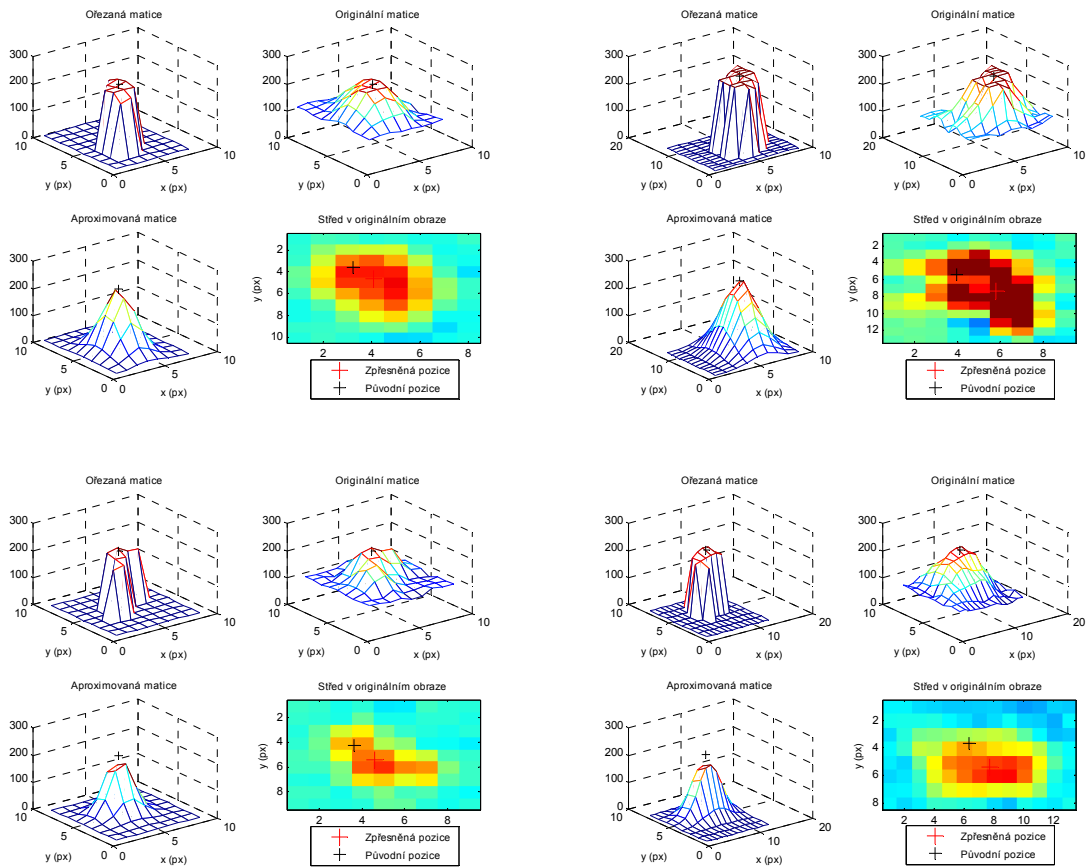
Obr. 9. Nalezené úrovně shody vyšší než 0,85 (obrázek 9)



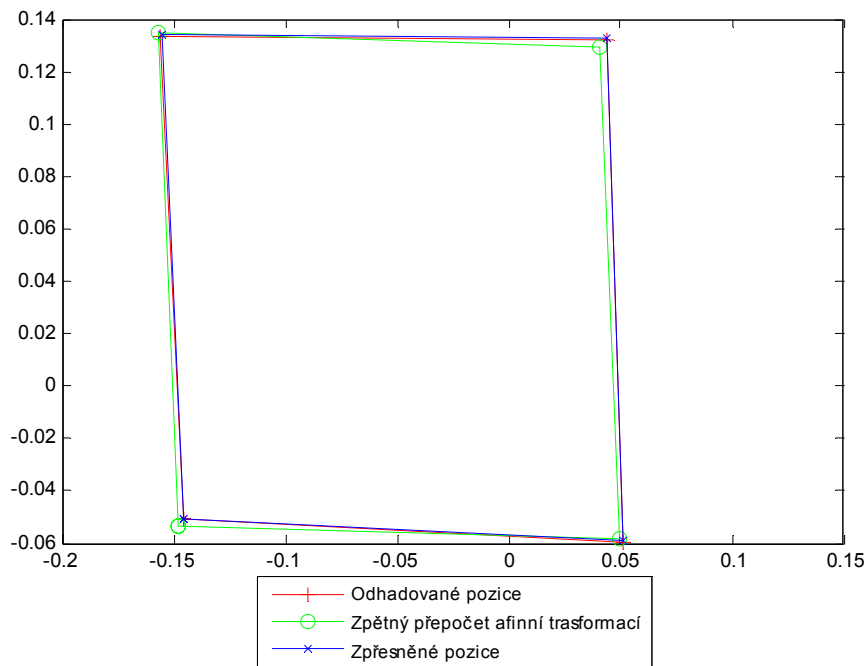
Obr. 10. Nalezená čtveřice světelných stop v grafu intenzit (obrázek 9)



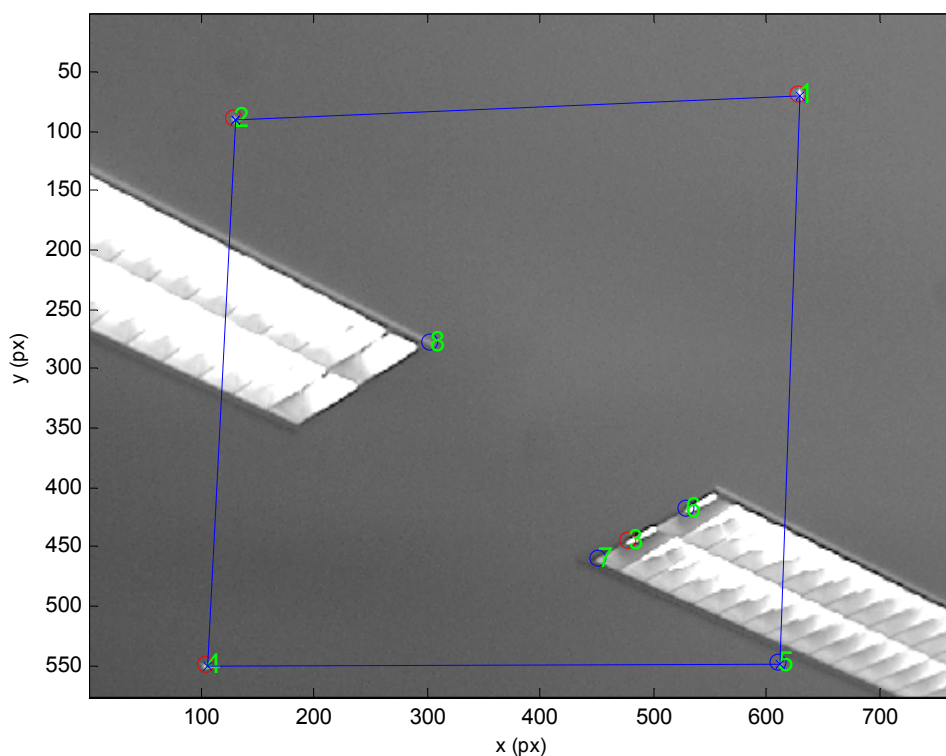
Obr. 11. Zpřesnění středu první světelné stopy (obrázek 9)



Obr. 12. Zpřesnění středů nalezených světelných stop (obrázek 9)



Obr. 13. Normalizované zobrazení čtveřice světelných stop (obrázek 9)

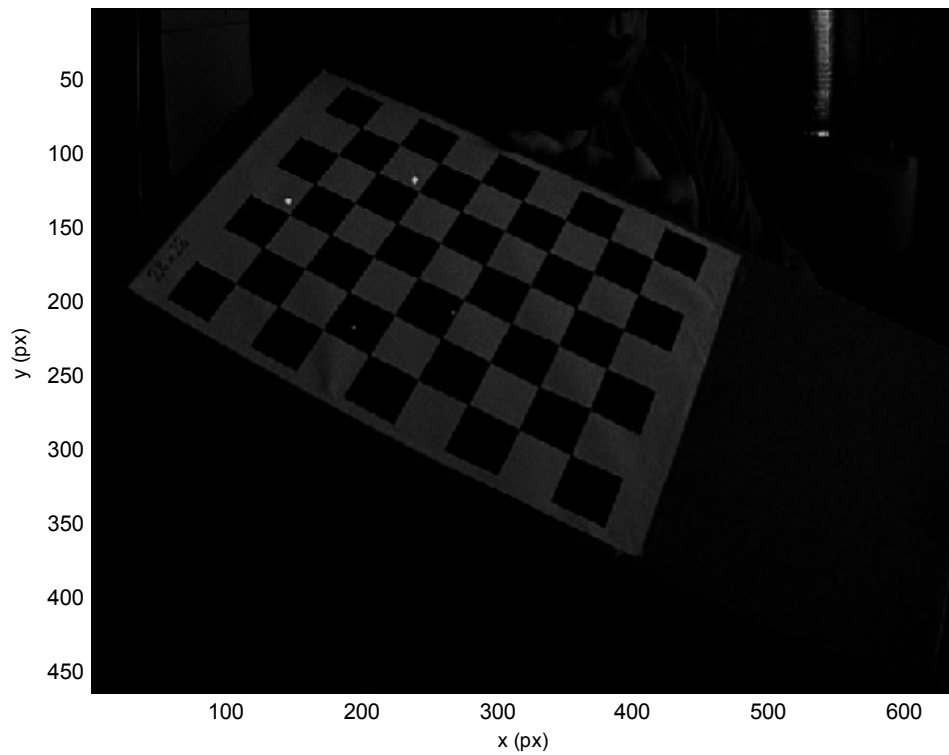


Obr. 14. Nalezená čtveřice světelných stop (obrázek 9)

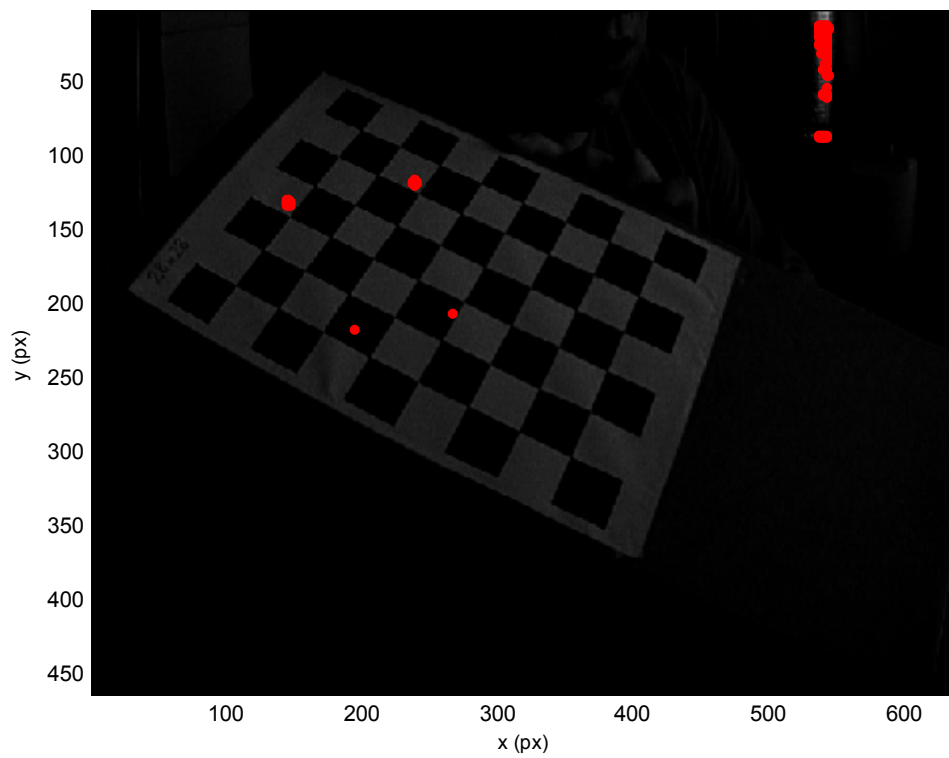
4.3.2 AXIS Network 206 Camera

Tato kamera představuje levnější řešení s výrazně horší optikou, k obrazové informaci se dá přistupovat pomocí Wifi a standardních internetových protokolů.

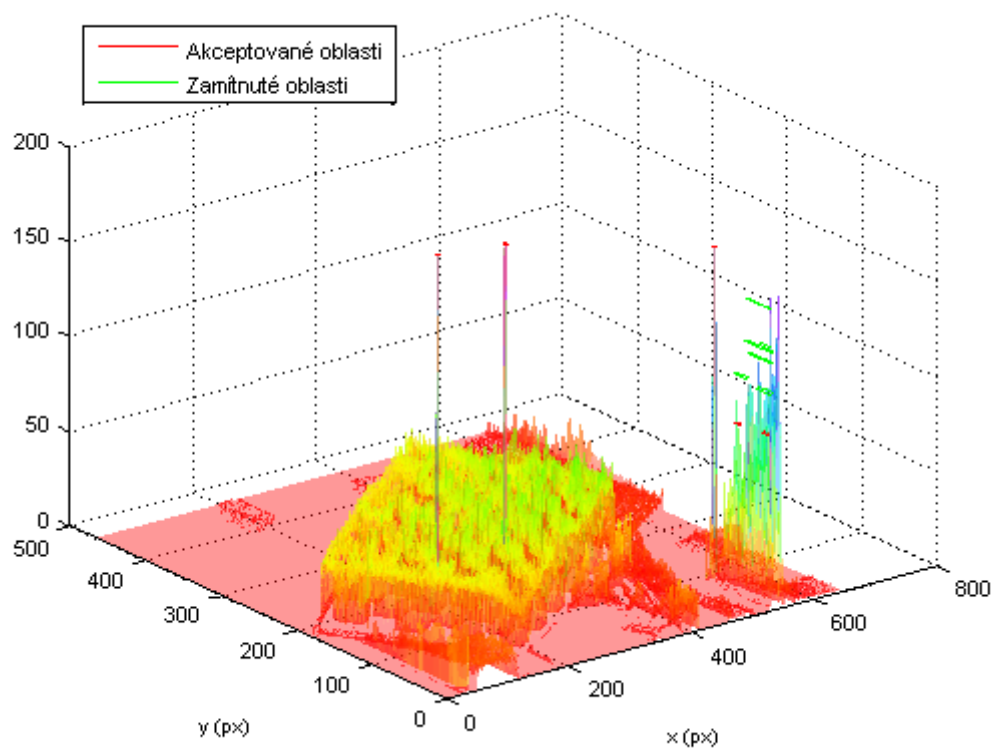
Scéna je tentokrát komplikovanější, dvě světelné stopy se odrážejí od světlého povrchu a dvě od tmavého (viz. Obr. 15). Dále se na scéně nachází několik falešných světelných odlesků. Tento snímek byl na hranici rozlišitelnost a ukázalo se jako výhodné snížit jas a zvýšit kontrast při pořizování snímku. To platilo obecně pro všechny pořízené snímky. Podezřelých bodů bylo tentokrát mnohem méně a to 174 (Obr. 16). Opět byly zamítnuty oblasti s velkými rozměry (Obr. 17). Na Obr. 18 lze vidět, že tentokrát je situace složitější a několik světelných odlesků má větší koeficient shody než světelné stopy na tmavém pozadí. Pomocí koeficientů inverzní afinní transformace byla ovšem nakonec opět určena nejvhodnější čtveřice světelných stop (Obr. 19, Obr. 23) a byly zpřesněny jejich středy (Obr. 11, Obr. 12). Obrázek Obr. 22 vypovídá o větší nepřesnosti objektivu.



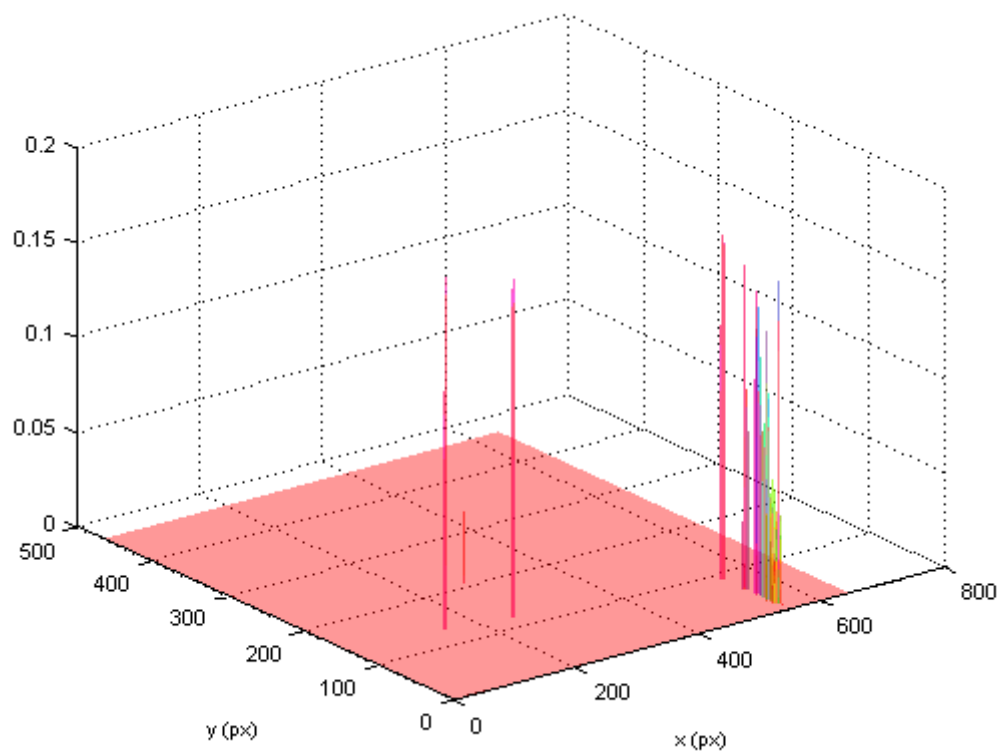
Obr. 15. Analyzovaná scéna (obrázek 1)



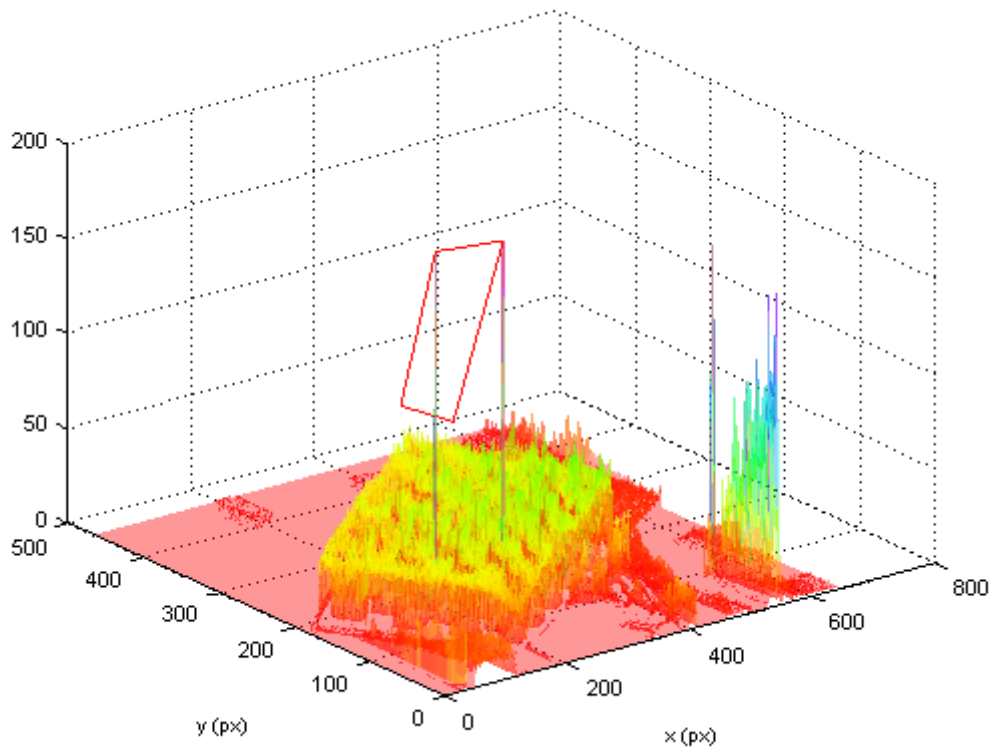
Obr. 16. Testované oblasti (obrázek 1)



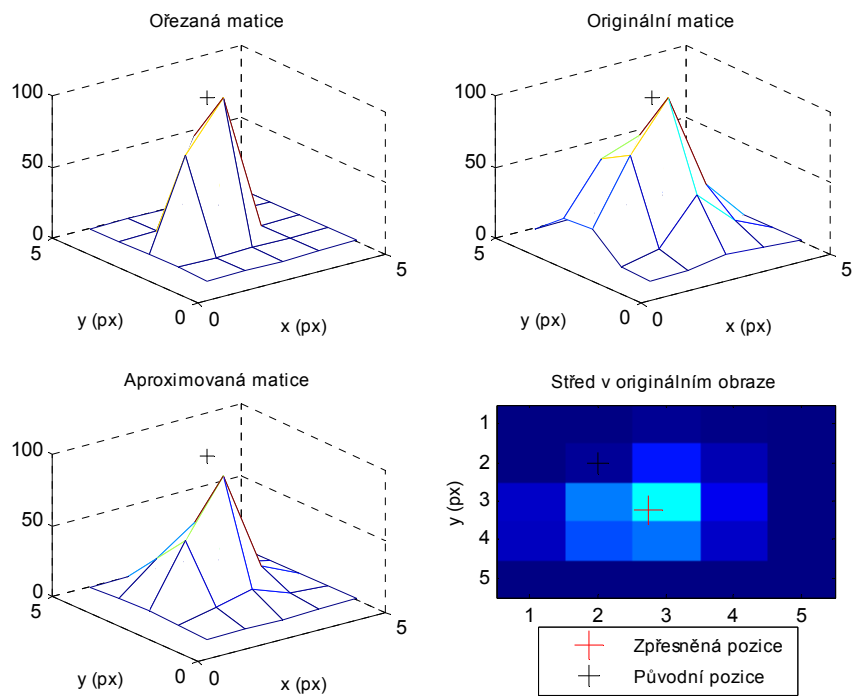
Obr. 17. Akceptované a zamítnuté oblasti shody (obrázek 1)



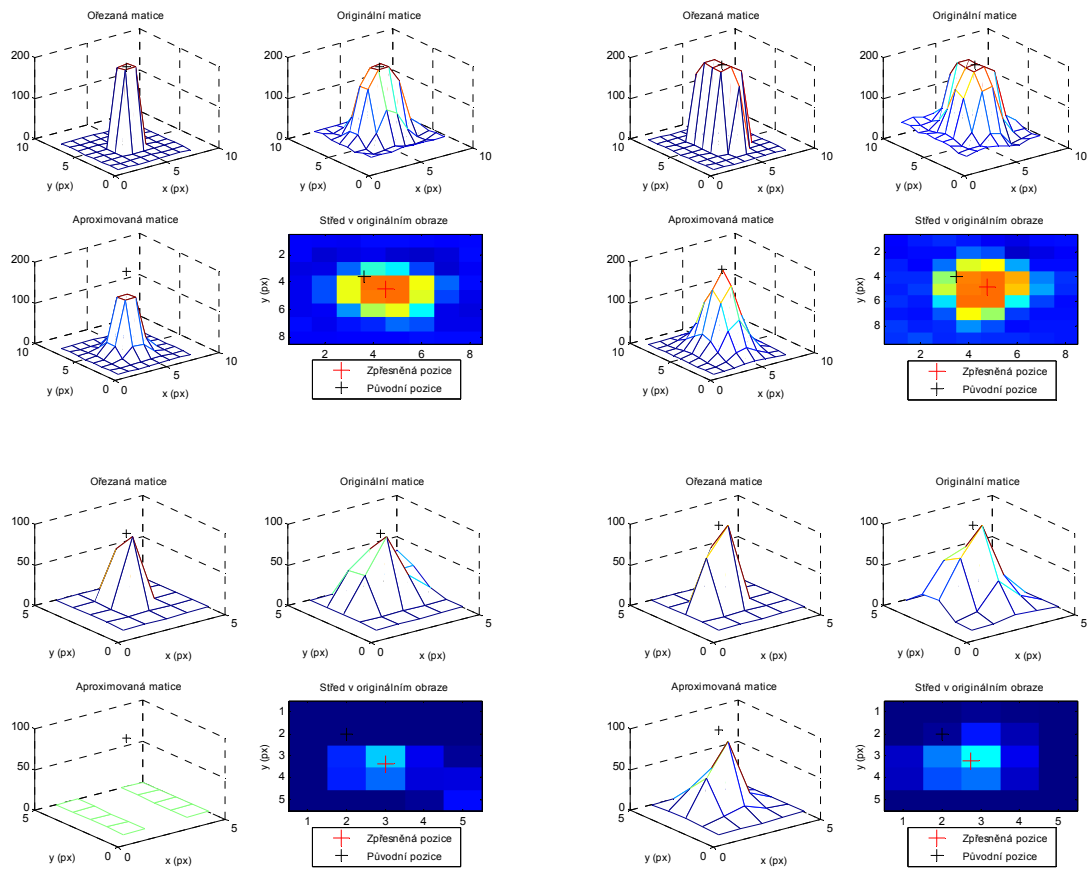
Obr. 18. Nalezené úrovně shody vyšší než 0,85 (obrázek 1)



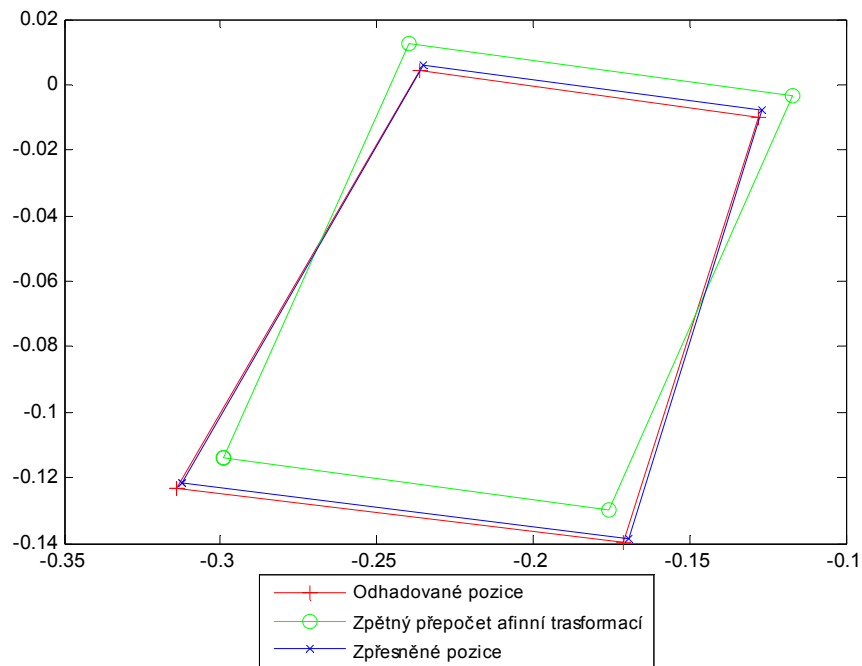
Obr. 19. Nalezená čtveřice světelných stop v grafu intenzit (obrázek 1)



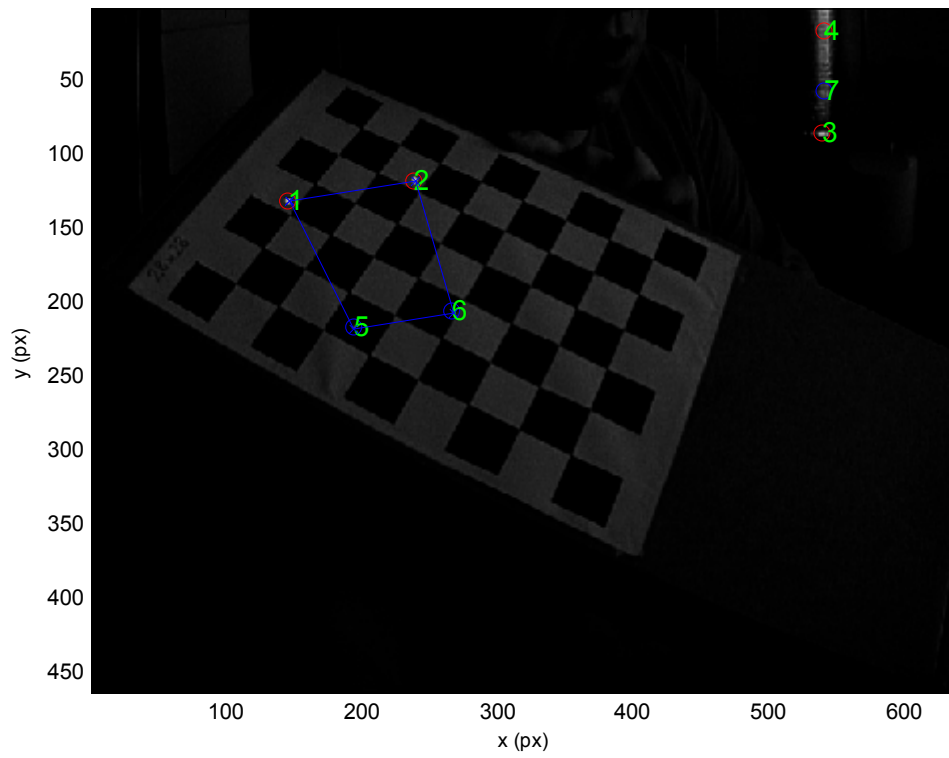
Obr. 20 Zpřesnění středu první světelné stopy (obrázek 1)



Obr. 21. Zpřesnění středu nalezených světelných stop (obrázek 1)



Obr. 22. Normalizované zobrazení čtveřice světelných stop (obrázek 1)



Obr. 23. Nalezená čtveřice světelných stop (obrázek 1)

5 ZHODNOCENÍ A DALŠÍ VÝVOJ

Algoritmus dosahoval v prvních testech velmi dobrých výsledků ve zvyšování přesnosti rozpoznávání obrazové informace o poloze světelných stop. Je ovšem nezbytné další testování za různých světelných podmínek a s různými objektivy. První měření vnitřních parametrů objektivu bylo zaměřeno na vývoj algoritmu. Tyto parametry by měly být ověřeny pomocí přímé metody měření. Tato verze algoritmu byla vytvořena jako vývojová se zaměřením na analýzu získaných dat.

Další vývoj by měl být zaměřen na zpřesnění lícovací funkce, například pomocí neuronové sítě. Velmi zajímavé by mohla být také aplikace samoučícího procesu optimalizace vstupních parametrů algoritmu. Toto si vyžádá implementaci vhodnou pro nasazení v reálném čase. Množství informací získávaných při zpracování obrazové informace v reálném čase by mohlo umožnit nasazení optimalizačních algoritmů jako jsou například evoluční algoritmy.

ZÁVĚR

V práci je předložena analýza a zpracování obrazové informace se zřetelem na segmentaci a eliminaci světelné stopy. Na základě zhodnocení současného stavu techniky v oblasti optoelektronických kamerových systémů a jejich možností byla provedena analýza kalibračního modelu dvou různých typů kamer a zvýšení přesnosti rozpoznávání obrazové informace o poloze světelných stop. Ověření kombinací nalezených světelných stop je realizováno pomocí inverzní afinní transformace. Byla provedena aproximace užitím 2-D Gaussova rozdělení zpřesňující polohy středů světelných stop. Zpracovány jsou vyhodnocovací a testovací algoritmy pro rozpoznávání polohy světelné stopy v programovém prostředí MATLAB.

Realizačním výsledkem této práce je funkční verze algoritmů pro nalezení a zpřesnění polohy světelné stopy v prostředí s rušivými vlivy, včetně ověřovacích testů uvedeného algoritmu, které jsou prezentovány pomocí 3-D grafů.

Další práce v této oblasti bude směřovat především na vývoj alternativních lícovacích (matching) funkcí, popřípadě neuronových sítí, kde bude možno využít samooptimalizace vstupních parametrů. Předpokládá se, že jednou z aplikací bude implementace algoritmu do inteligentní kamery pro řízení mobilního robotického systému, například invalidního vozíku s motorovým pohonem.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Gigabit Ethernet interface TM-6740GE Dual Tap AccuPiXEL*. [cit. 2006-05-17]. Dostupný z WWW: < http://www.jai.com/camera/products_info.asp?id=366&sprog=uk/ >
- [2] *Vision Components GmbH :: The smart camera people - VC4058 Smart Camera*. [cit. 2006-05-17]. Dostupný z WWW: < <http://www.vision-components.com> >
- [3] MEI C. *Camera Calibration Toolbox for Matlab*. Dostupný z WWW: < http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/ >
- [4] *Open Source Computer Vision Library*. [cit. 2006-05-17]. Dostupný z WWW: < <http://www.intel.com/technology/computing/opencv/> >
- [5] TSAI R. *An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision*. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami Beach, FL, pp. 364-374, 1986.
- [6] KVASNICA M. *Head Joystick and Interactive Positioning for the Wheelchair Proceeding of the ICOST 2003*. In 1th IEEE International Conference on Smart Homes and Health Telematics. Paris, 2003, France.
- [7] HLAVÁČ V., SEDLÁČEK M. *Zpracování signálů a obrazů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-03110-1.
- [8] *Camera Link Specification*. [cit. 2006-05-17]. Dostupný z WWW: < <http://www.machinevisiononline.org/public/articles/articlesdetails.cfm?id=2028> >.
- [9] SVOBODA T. *Multi-Camera Self-Calibration*. [cit. 2006-05-17]. Dostupný z WWW: < <http://cmp.felk.cvut.cz/~svoboda/SelfCal/> >.
- [10] KRČMÁŘ, A. *Optoelektronický interaktivní systém pro řízení pohybu invalidního vozíku – bakalářská práce*. Zlín: UTB ve Zlíně, FT. 2004
- [11] NOVÁK, P. *Navigační zařízení pro mobilní robotické systémy – bakalářská práce*. Zlín: UTB ve Zlíně, Fakulta technologická. 2004
- [12] BRENN, F. *Automatické parkovací zařízení pro mobilní robotické systémy – bakalářská práce*. Zlín: UTB ve Zlíně, Fakulta technologická. 2004
- [13] VINCOUREK, Z. *Ovládání invalidního vozíku*. Zlín: UTB ve Zlíně, Fakulta technologická. 2004

- [14] KREIDL M. *Senzory*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1993. 141 s.
- [15] ŠKRÁŠEK J. *Základy aplikované matematiky I*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1989. ISBN 80-03-00150-1.
- [16] SÁSIK J. *Viaczložkové snímače síl a momentov*, Bratislava: Slovenská Technická Univerzita v Bratislave, 2000. ISBN 80-227-1438-0.
- [17] HEIKKILÄ J. *Geometric Camera Calibration Using Circular Control Points*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 22, no. 10, 2000.
- [18] HEIKKILÄ J., SILVÉN O. *A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction*. In Proc. Of IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 1106-1112, 1997.
- [19] SONKA M., HLAVAC V., BOYLE R. *Image Processing, Analysis, and Machine Vision*. 2. vyd. PWS Publishing, Pacific Grove, 1999. ISBN 0-534-95393-X.
- [20] PARKER J. *Algorithms for Image Processing and Computer Vision*. Wiley Computer Publishing, 1997. ISBN 0-471-14056-2.
- [21] ZELINKA I. *Zelinka Ivan Umělá inteligence Hrozba nebo naděje?*. Praha: BEN, 2002. ISBN 80-7300-068-7
- [22] HAKALAHTI H. *Image Analysis Methods for Robotic Vision*. Oulu: University of Oulu, 1985. ISBN 951-99625-1-4.
- [23] ZIMMERMANN K. *Detekce a rozpoznávání znaku v obraze a videosekvencích – diplomová práce*. Praha: CVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra kybernetiky, 2001.
- [24] KOVESI P. *MATLAB and Octave Functions for Computer Vision and Image Processing*. [cit. 2006-05-17]. Dostupný z WWW:
< <http://www.csse.uwa.edu.au/~pk/Research/MatlabFns/> >
- [25] *Matlab 2D Gaussian fitting code*. [cit. 2006-05-17]. Dostupný z WWW:
< http://jilawww.colorado.edu/bec/BEC_for_everyone/matlabfitting.htm >

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

CCD	Nábojově vázané fotocitlivé elementy (Charge Coupled Device).
PSD	Polohově citlivé senzory (Position Sensitive photo-Detector).
CMOS	(Complementary Metal Oxid Semiconductor).
2-D	Značení dvojdimenzionálního prostoru.
3-D	Značení trojdimenzionálního prostoru.
PC	Osobní počítač (Personal Computer).
Ethernet	Technologie pro vytváření lokálních počítačových sítí.
RS-232	Standard pro sériový přenos dat.
RS-485	Standard pro sériový přenos dat.
USB	Univerzální sériová sběrnice (Universal Serial Bus)
CAN	Sériový komunikační protokol (Controller Area Network)
Wifi	Standard pro lokální bezdrátové sítě (<i>Wireless LAN</i>)
Kamera Link	Komunikační rozhraní pro připojení kamery k frame grabberu.
Bluetooth	Bezdrátová komunikační technologie.
x, y, z	Souřadnice bodu P v 3-D scéně.
f	Vzdálenost obrazové roviny od středu promítání.
u, v	Souřadnice bodu promítnutého do obrazové roviny.
u_0, v_0	Souřadnice hlavního bodu v obrazové rovině.
D_u, D_v	Počet pixelů na jednotku vzdálenosti ohniskové vzdálenosti v souřadnicích obrazu.
s_u	Koeficient vyjadřující úhel mezi osou x a y snímacího senzoru
k_i	Koeficienty radiálního zkreslení.
p_1, p_2	Koeficienty tangenciálního zkreslení.
$fc(1), fc(2)$	Značení v Camera Calibration Toolbox, ohniskové vzdálenosti vyjádřené v pixelech na jednotku vzdálenosti.

$cc(1), cc(2)$	Značení v Camera Calibration Toolbox, souřadnice hlavního bodu v obrazové rovině.
$alpha_c$	Značení v Camera Calibration Toolbox, koeficient vyjadřující úhel. Mezi osou x a y snímacího senzoru.
$kc(1), kc(2), kc(3)$,	Značení v Camera Calibration Toolbox, koeficienty radiálního zkreslení.
$kc(3), kc(4)$	Značení v Camera Calibration Toolbox, koeficienty tangenciálního zkreslení.
dif	Suma odchylek při lícování matic.
Dif_{max}	Maximální hodnota sumy odchylek.
M	Testovaná matice v obrazu.
P	Testovací vzorek.
c	Koeficient shody matic v intervalu $\langle 0,1 \rangle$.
a, b, c, d, e, f	Koeficienty afinní transformace.
x', y'	Obraz bodů po afinní transformaci
T_A	Matice afinní transformace
x_0, y_0	Střed distribuční funkce 2-D Gaussova rozdělení
σ_x, σ_y	Odchytky 2-D Gaussova rozdělení
Pixel, px	Obrazový element

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Princip projektivní kamery	10
Obr. 2. Kalibrační vzor	19
Obr. 3. Schématické zobrazení modelu kamery KAMPRO KC-381CG.....	21
Obr. 4. Schématické zobrazení modelu kamery AXIS Network 206 Camera	22
Obr. 5. Hledané 2-D Gaussovo rozdělení	25
Obr. 6. Analyzovaná scéna (obrázek 9).....	26
Obr. 7. Testované oblasti (obrázek 9).....	26
Obr. 8. Akceptované a zamítnuté oblasti shody (obrázek 9).....	27
Obr. 9. Nalezené úrovně shody vyšší než 0,85 (obrázek 9)	27
Obr. 10. Nalezená čtveřice světelných stop v grafu intenzit (obrázek 9).....	28
Obr. 11. Zpřesnění středu první světelné stopy (obrázek 9).....	28
Obr. 12. Zpřesnění středů nalezených světelných stop (obrázek 9)	29
Obr. 13. Normalizované zobrazení čtveřice světelných stop (obrázek 9)	29
Obr. 14. Nalezená čtveřice světelných stop (obrázek 9)	30
Obr. 15. Analyzovaná scéna (obrázek 1).....	31
Obr. 16. Testované oblasti (obrázek 1).....	31
Obr. 17. Akceptované a zamítnuté oblasti shody (obrázek 1).....	32
Obr. 18. Nalezené úrovně shody vyšší než 0,85 (obrázek 1)	32
Obr. 19. Nalezená čtveřice světelných stop v grafu intenzit (obrázek 1).....	33
Obr. 20 Zpřesnění středu první světelné stopy (obrázek 1).....	33
Obr. 21. Zpřesnění středů nalezených světelných stop (obrázek 1)	34
Obr. 22. Normalizované zobrazení čtveřice světelných stop (obrázek 1)	34
Obr. 23. Nalezená čtveřice světelných stop (obrázek 1)	35

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Srovnání značení Camera Calibration Toolbox a Heikkilä.....	20
Tab. 2. Struktura souborů a funkcí algoritmu.....	23
Tab. 3. Sdílené proměnné	23
Tab. 4. Proměnné funkce LEDS_MatchingTest.....	24
Tab. 5. Proměnné funkce LEDS_AffinityTest	24
Tab. 6. Proměnné funkce LEDS_2dGaussFit.....	24

SEZNAM PŘÍLOH

PI Ukázky testovaných snímků

PŘÍLOHA P I: UKÁZKY TESTOVANÝCH SNÍMKŮ

