

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V
BRATISLAVE**
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Ing. Lucia Letanovská

Autoreferát dizertačnej práce

**KALIBRÁCIA VNÚTORNÝCH PARAMETROV
KAMERY**

Na získanie titulu doktor (philosophiaedoctor)

v doktorandskom študijnom programe 5.2.54 meracia technika

Bratislava, august 2014

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

Predkladateľ: **Ing. Lucia Letanovská**
Ústav elektrotechniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: **doc. Ing. Rudolf Ravas, PhD.**
Ústav elektrotechniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti:

prof. Ing. Ivan Kneppo, DrSc.
Katedra automatizácie, robotizácie a informatiky
Fakulta špeciálnej techniky
Trenčianska univerzita Alexandra Dubčeka
Pri parku 19
911 06 Trenčín

prof. Ing. Anton Vitko, PhD.
Ústav robotiky a kybernetiky
Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa :

Obhajoba dizertačnej práce sa koná oh.

na: Fakulte elektrotechniky a informatiky, Slovenskej technickej univerzity,
 adresa: Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

prof. RNDr. Gabriel Juhás, PhD.

Obsah

ÚVOD.....	4
ZADANIE.....	4
1 PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU A PROBLEMATIKY V OBLASTI KALIBRÁCIE KAMERY	5
1.1 Kalibrácia kamery – fotogrametrická.....	6
1.2 Samokalibrácia alebo autokalibrácia kamery.....	7
1.3 Špeciálne typy kalibrácie kamery rozdelené podľa modelu kamery, ktorý zahŕňa vplyv reálnych šošoviek	7
2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE	9
3 TEORETICKÉ VÝCHODISKÁ.....	10
3.1 Lineárna perspektívna kamera	10
3.2 Kalibračná metóda kamery Zhengyou Zhang-a	11
4 ANALÝZA VYBRANÝCH FAKTOROV PRI KALIBRÁCII KAMERY	12
4.1 Úprava korekcie radiálneho skreslenia vstupných obrazov	14
4.2 Detekcia rohových bodov založených na harris-ovom detektore a operátor význačnosti	18
4.3 Výber vhodných obrazov pre kalibráciu kamery	19
5 ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV A PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE	21
POUŽITÁ LITERATÚRA	23
PUBLIKÁCIE AUTORA	25
SUMMARY	27

ÚVOD

Kamera ako súčasť meračských systémov slúži na získavanie vstupných údajov a, aby sa mohla používať pre aplikácie akými sú napríklad meranie vzdialeností, je potrebné zistiť jej vnútorné a vonkajšie parametre k čomu slúži kalibrácia kamery. Kalibrácia kamery sa vyžaduje najmä pri metódach triangulácie a rekonštrukcie tvaru objektov, napríklad v oblasti navigácie. Triangulácia je metóda určovania relatívnej polohy objektov pomocou známej polohy iného objektu v zosnímanom obraze využívajúc zákonitosti geometrie trojuholníkov. Vstupom je obraz scény s kalibračným objektom a cieľom kalibrácie kamery je získať vzťah medzi súradnicami bodu scény a priestorovými súradnicami bodu scény, k čomu slúži už spomínaná triangulácia. Kalibračné metódy kamier môžu byť použité taktiež na získanie kvalitatívnych informácií o kamerovom systéme alebo informácií o chybe merania dosahovanej meracím systémom, ktorého je daná kamera súčasťou. Téma navigácie a zisťovania polohy je v dnešnej dobe veľmi aktuálna preto sa venujeme práve otázkam kalibrácie kamier, od ktorých závisí celkový výsledok merania.

V prvej kapitole je urobená sumarizácia známych metód kalibrácie kamery a ich rozdelenie. Metódy sú v ďalšom texte práce rozdelené podľa toho aký typ kalibračného objektu sa pri kalibrácii kamery využíva. V závere sa uvádzajú metódy, ktoré riešia problémy reálnych kamier, ako je funkcia zoom, či radiálne skreslenie šošovky v kamere.

V druhej kapitole sú definované ciele dizertačnej práce, ktoré vychádzajú zo zistených teoretických podkladov.

V tretej kapitole sa zhrnuli teoretické východiská, z ktorých sa vychádzalo pri ďalšom spracovaní algoritmu kalibrácie kamery. Predstavili sa matematické postupy a modely, z ktorých algoritmus pre kalibráciu kamery vychádza.

Ťažiskom práce je štvrtá kapitola, v ktorej sú uvedené analýzy vybraných faktorov pri kalibrácii kamery. Prvým faktorom je radiálne skreslenie spôsobené šošovkou v kamere, druhý faktor je presnosť odhadu rohových bodov vstupných obrazov a posledný faktor je vplyv výberu vstupných obrazov. Na vyhodnotenie sa používali, ako reálne tak aj simulované vstupné dáta, aby sa dala overiť presnosť výsledkov.

ZADANIE

V poslednom období sa čoraz viac venuje pozornosť aplikáciám metód, ktoré využívajú informácie získané z obrazu snímaného kamerou. V oblasti merania a diagnostiky vychádzajúcich z geometrických veličín (poloha, dĺžka, plocha) je dôležité poznať vzťah medzi súradnicami obrazov význačných bodov snímanej scény vyjadrených v pixeloch a súradnicami týchto obrazov vyjadrených v dĺžkových jednotkách vzťahnutých voči počiatku súradnicového systému kamery. Procedúra určovania tohto vzťahu, ktorá je založená na experimentálnom určovaní parametrov modelu kamery, sa nazýva kalibrácia vnútorných parametrov kamery. Presnosť

odhadu vnútorných parametrov kamery významne ovplyvňuje kvalitu merania priestorových súradníc významných bodov scény.

1. Analyzujte a porovnajte vlastnosti metód kalibrácie vnútorných parametrov kamery.

2. Pre zvolenú metódu kalibrácie analyzujte a vyberte faktory ovplyvňujúce kvalitu kalibrácie.

3. Na základe analýzy navrhните úpravy metódy alebo postupu kalibrácie zlepšujúce výsledky kalibrácie vnútorných parametrov kamery podľa zvolených kritérií.

1 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU A PROBLEMATIKY V OBLASTI KALIBRÁCIE KAMERY

Základom systémov využívaných pri meraní je digitálna kamera. V dnešnej dobe existuje veľké množstvo rôznych typov digitálnych kamier, ktoré delíme na dve základné skupiny metrické a nemetrické. Správnosť výberu kamery závisí od typu aplikácie pre aké ma byť použitá. Väčšina priemyselných kamier spadá do skupiny nemetrických kamier, čo znamená, že sa musia pred použitím kalibrovať. Postupnosť krokov pri kalibrácii kamery môžeme vo všeobecnosti popísať nasledovne. Najprv potrebujeme nájsť maticu kamery, ktorá popisuje vnútorné parametre kamery. Ďalej potrebujeme vypočítať vektory otočenia a posunutia kamery od počiatku súradnicového systému. Tým určíme vzájomnú polohu kamery k svetovému súradnicovému systému. Keďže šošovka kamery nie je dokonalá, potrebujeme vypočítať aj koeficienty skreslenia kamery a na základe týchto koeficientov upraviť obraz tak, akoby vyzeral keby šošovka bola dokonalá. Vypracovaných bolo veľké množstvo metód, väčšinou však pre konkrétne prípady použitia, resp. pre konkrétne typy kamier. Prakticky možno kalibračné metódy kamier klasifikovať z viacerých hľadísk. Podľa toho čo o kamere a scéne poznáme môžeme kalibráciu kamery rozdeliť na [3], [4], [5], [6]

1. kalibrácia kamery – fotogrametrická
 - a. kalibrácia kamery pomocou testovacieho objektu
 - b. kalibrácia kamery pomocou olovniceho testovacieho poľa
 - c. kalibrácia kamery využívajúca známe vlastnosti scény (vzdialenosť medzi objektmi, rozmery objektov...)
2. samokalibrácia alebo autokalibrácia kamery
 - a. samokalibračné metódy pre známy pohyb kamery
 - b. simultánna kalibrácia kamery
3. špeciálne typy kalibrácie kamery rozdelené podľa modelu kamery, ktorý zahŕňa vplyv reálnych šošoviek
 - a. kalibrácia radiálneho a tangenciálneho skreslenia
 - b. kalibrácia objektívov s funkciou zoom
 - c. kalibrácia kamery so šošovkou typu rybie oko

1.1 Kalibrácia kamery – fotogrametrická

Väčšina konvenčných metód zameraných na kalibráciu kamery je založených na tom, že poznáme referenčné súradnice stabilného bodového poľa. Kalibrácia kamery tohto typu je veľmi efektívna. Môžu sa využívať kalibračné objekty rôznych tvarov a veľkostí. Pri metódach tohto typu je nevyhnutné precízne vypracovať laboratórny postup kalibrácie kamery, na ktorý sa vo väčšine prípadov používajú drahé laboratórne prístroje. Základným krokom väčšiny fotogrametrických metód je odhad premietacej matice kamery. Odhad sa obvyčajne realizuje na základe merania priestorových súradníc a korešpondujúcich bodov z obrazov scény. Do výpočtu je v prípade dostatočného počtu nameraných korešpondencií možné zaviesť obmedzujúce podmienky pre spresnenie výsledku. [6], [7], [8], [9].

Jednorozmerné kalibračné objekty

Medzi jednorozmerné objekty zaraďujeme bodové kalibračné objekty. Pri týchto objektoch vlastnosti bodov a ani vzdialenosti medzi nimi nepoznáme. Na to, aby bolo možné body ležiace v rovine využiť pre kalibráciu kamery je potrebné zabezpečiť stabilné parametre týchto bodov. V [10], [11] sú popísané metódy zachytávania scény s použitím 1D objektov pre výpočet parametrov kamery.

Dvojjrozmerné kalibračné objekty

V publikovaných prácach sa najčastejšie používajú rovinné objekty takzvané polia so vzorom, ktoré sú snímané v rôznych orientáciách.



Obrázok 1.1 Ukážka kalibračného poľa a) a kalibračného poľa podľa [14]

Potrebné sú informácie len ohľadne kalibračného objektu a jeho rozmeroch, smer natočenia nie je nutné poznať. Najviac využívanými kalibračnými objektmi sú obrazy šachovnice, sústredných kružníc, či rôzne druhy čiar nakreslených na objekte. Kalibračné polia sa môžu vytvoriť svojpomocne, čo uľahčuje proces kalibrácie kamery. [1], [3], [4], [5], [12], [13]

Trojrozmerné kalibračné objekty

Tretia a posledná podskupina sú 3D objekty. Sem zaraďujeme všetky priestorové objekty využívané pri kalibrácii kamery. Tak ako v predchádzajúcich podskupinách aj pri týchto kalibračných objektoch je ich geometria známa s veľmi veľkou presnosťou. Kalibrácia kamery je založená na využití symetrie 3D objektu. V príspevku [15] je pre kalibráciu robota využitá tyč, na konci ktorej je loptička a na

základe pohybu loptičky sú počítané parametre kamery. V metóde uvedenej v [14] je kalibrácia kamery založená na zosnímaní objektu v rôznych natočeniach. Ako objekt bola vybraná hračka, ktorá sa točí na podstavci a kalibrácia kamery je počítaná z rôznych uhlov natočenia objektu pri statickej kamere.



Obrázok 1.2 Ukážka kalibračného modelu podľa [14]

1.2 Samokalibrácia alebo autokalibrácia kamery

Tento typ kalibrácie kamery sa tiež nazýva kalibrácia kamery z neznámej scény. V prípade neznámej scény je potrebných získať viac snímok danej scény. Platí, že vnútorné parametre kamery sa pre rôzne snímky nemenia, pričom v prvom rade sa zisťuje korešpondencia bodov scény medzi snímkami. Na základe týchto znalostí sa určia ohraničenia vo forme rovníc slúžiacich na výpočet parametrov kamery. Pri tomto type kalibrácie kamery môžu nastať dva prípady. V prvom prípade sa pozná pohyb kamery v neznámej scéne. To znamená, že sa vie ako sa zmenila poloha kamery medzi jednotlivými snímkami. Z toho vyplýva, že už pred samotnou kalibráciou kamery sa vedía určiť parametre rotačnej matice a translačného vektora.

V druhom prípade sa nepozná pohyb kamery v neznámej scéne. Takýto prípad sa nazýva autokalibrácia kamery. Pre túto metódu kalibrácie kamery sú potrebné najmenej tri snímky z troch rôznych pozícií kamery. Autokalibrácia kamery v prípade neznámej scény je stále považovaná za numericky veľmi náročnú, pretože metódy nie sú zatiaľ veľmi prepracované. [3], [4], [5], [16], [17], [18]

1.3 Špeciálne typy kalibrácie kamery rozdelené podľa modelu kamery, ktorý zahŕňa vplyv reálnych šošoviek

Pri fotografickom zobrazení sa stredové premietanie uskutočňuje opticky. Optické premietanie by sa zhodovalo s geometrickým stredovým premietaním len ak sa použije štrbinový model kamery. Skutočný objektív sa skladá z množstva optických členov, kde mechanizmus zobrazenia nezodpovedá stredovému premietaniu.

Vo fotogrametrickej praxi sú predmety obvyčajne tak ďaleko, že lúče vstupujúce do objektívu môžeme pokladať za rovnobežné. V tomto prípade je rovina obrazu scény totožná s ohniskovou rovinou objektívu. Avšak ani v tomto prípade nejde o presné bodové zobrazenie vplyvom odchýliek od bodového zobrazenia [3], [4], [19].

1.3.1 Chyby reálnych šošoviek

Model kamery, ktorý uvažuje s vplyvom reálnej šošovky vnášajúcej do obrazu chybu spôsobí, že lineárny model kamery pre ideálne šošovky sa zmení na nelineárny. Nelinearitu modelu spôsobujú chyby, ktoré vnáša reálna šošovka. Chyby šošovky ovplyvňujúce ostrosť zobrazenia sú:

- sférická aberácia,
- koma (asférická chyba),
- astigmatizmus.

Chyby ovplyvňujúce geometricky správne zobrazenie sú:

- radiálne a tangenciálne skreslenie,
- aberácia (farebná chyba šošovky).

Podrobnejší popis môžeme nájsť v [3], [4], [8].

1.3.2 Kalibrácia kamery zahŕňajúca skreslenie

Najčastejšie typy skreslení sú radiálne a tangenciálne. Pri kalibrácii kamery sa uvažuje len s radiálnym skreslením šošovky pretože sa dá dobre matematicky popísať a tým v rámci kalibrácie kamery aj eliminovať z výsledného obrazu. Skreslený obraz sa upravuje tak, že poloha bodu obrazu sa líši od reálnej polohy bodu len o radiálny posun tzn., že body obrazu sú podrobené transformácií, ktorá závisí len od vzdialenosti od hlavného bodu. Hlavný bod nepodlieha skresleniu. Čím viac je transformovaný bod vzdialený od hlavného bodu, tým viac je jeho poloha skreslená.

Metódy pre korekciu radiálneho skreslenia môžeme rozdeliť do dvoch kategórií:

- metódy využívajúce kalibračný objekt,
- metódy pin-hole kde priamka sa musí zobrazit' do priamky v obraze.

Obidve tieto kategórie sa však nehodia do reálneho prostredia, kde máme časovo premenlivú scénu, pretože si vyžadujú špecificky vymedzené vlastnosti scény pre ich výpočet. [30], [31]

1.3.3 Kalibrácia objektívov využívajúcich funkciu zoom

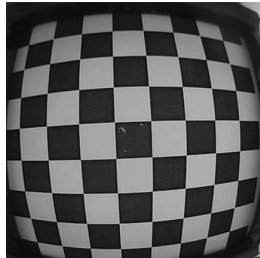
V rámci kalibrácie kamery sa dostávajú do popredia kamery, ktoré obsahujú funkciu zoom teda premenlivú ohniskovú vzdialenosť. Hlavným dôvodom je možnosť zaznamenať scénu pri rôznych pohľadoch, pri rôznych hĺbkach a svetelných podmienkach. Tieto vlastnosti kamier s funkciou zoom sa hlavne začínajú využívať pri 3D rekonštrukcii telies, navigácii robotov a vizuálnom sledovaní trasy, či cesty. Metódy kalibrácie kamery, ktoré sú rozpracované v [19], [20] sa zaoberajú takýmito kamerami. Pri týchto typoch kamier je výhodné využívať samokalibračné metódy.

Do modelov a následne do výpočtov sa zahŕňa aj chyba šošovky a to radiálne skreslenie. Jednotlivé metódy využívajú rôzne parametre kamery pri samokalibrácii. V publikáciách sú spomínané metódy, pri ktorých je potrebné poznať skreslenie šošovky a hlavný bod, aby bolo možné vypočítat' ostatné parametre kamery pri

premenlivom nastavení funkcie zoom alebo sa scéna zosníma v rôznych veľkostiach a potom sa pristúpi k hľadaniu korešpondencií v rámci týchto snímok.

1.3.4 Kalibrácia objektívov so šošovkou typu rybie oko

Model, kamery zahŕňajúci skreslenie šošovky typu rybie oko je zložitý, lebo radiálne skreslenie obrazu získaného takouto kamerou je zreteľné na prvý pohľad.



Obrázok 1.3 Zosnímanie kalibračného objektu pomocou kamery so šošovkou typu rybie oko

Model popísaný v [21] pri kalibrácii využíva rovnaké kalibračné objekty, ktoré sú rozmiestnené rovnomerne tak, aby pokryli celú plochu, ktorú táto kamera zachytáva. Z jednotlivých kalibračných objektov na snímke sú získané body korešpondencií, ktoré sú využité pri výpočtoch radiálneho skreslenia. Na obrázku 1.3 je znázornený obraz scény zachytený kamerou so šošovkou typu rybie oko. Ďalšia metóda je popísaná v [22].

2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Na základe rozboru stavu problematiky analyzovaných z dostupnej literatúry, zadania dizertačnej práce a predbežnej analýzy problematiky, ktoré boli predmetom písomnej časti dizertačnej skúšky, sú formulované ciele dizertačnej práce zamerané na analýzu a riešenie čiastkových úloh, pre vybranú metódu kalibrácie vnútorných parametrov kamery.

V zmysle zadania boli na základe analýzy vybranej metódy a z množstva experimentov vybrané relevantné faktory, ktoré významne ovplyvňujú výsledky kalibrácie. Vybrané faktory významne ovplyvňujú výsledky kalibrácie pri väčšine známych metód. Na základe analýz z hľadiska použiteľnosti v praktických aplikáciách bola vybraná pre experimentálne overenie kalibračná metóda, ktorá prakticky nevyžaduje žiadne informácie o polohe kalibračných objektov voči kalibrovanej kamere.

Ciele dizertačnej práce sú :

1. Analýza a úprava zvolenej metódy kalibrácie algoritmi na potlačenie vplyvu deformácie optickej sústavy kamery

Neuvažuje vplyv optickej sústavy objektívu reálnej kamery na mechanizmus zobrazovania. Model “dobré“ vystihuje vzťah medzi priestorovými súradnicami bodu a súradnicami jeho obrazu za určitých podmienok. Modelom kamery je lineárna transformácia z 3D priestoru do 2D priestoru. Transformácia je založená na predpoklade, že svetelný lúč vychádzajúci zo zdroja svetla, ktorý sa odráža v bode X, prechádza v priestore do optického stredy C a na zobrazovacej rovine sa zobrazí, ako bod projekcie u. Stredové premietanie môže byť rozložené do troch jednoduchých transformácií, ktoré zodpovedajú trom prechodom medzi štyrmi rozdielnymi súradnicovými systémami. Toto je znázornené na obr. 3.1 [3], [4], [5]. Vyjadrenie všeobecného štrbinového modelu kamery je

$$\mathbf{u} = \mathbf{K} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{R} & -\mathbf{R} \cdot \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{K}[\mathbf{R} \mid -\mathbf{R} \cdot \mathbf{t}] \cdot \mathbf{X} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{X} \quad (3.1)$$

3.2 Kalibračná metóda kamery Zhengyou Zhang-a

Pri tejto kalibračnej metóde kamery je kamera opísaná klasickým dierovým modelom, t.j. vzťah medzi 3D bodom scény $\tilde{\mathbf{X}}$ a jeho obrazom $\tilde{\mathbf{x}}$ je: $s\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{K}[\mathbf{R} \mid \mathbf{t}]\tilde{\mathbf{X}}$ pričom s je ľubovoľný faktor mierky. \mathbf{R} a \mathbf{t} sú vonkajšie parametre kamery a \mathbf{K} je matica vnútorných parametrov kamery.

Využitím n extrahovaných bodov sa získa n uvedených maticových rovníc, ktoré môžu byť zapísané v tvare $\mathbf{L} \cdot \mathbf{m} = 0$, pričom \mathbf{L} je matica rozmeru $2n \times 9$. Riešením je pravý singulárny vektor matice \mathbf{L} zodpovedajúci najmenej singularnej hodnote \mathbf{L} . Odhadnutím homografií sa získa vstup pre samotnú kalibráciu kamery. Tú možno riešiť analyticky alebo hľadaním maximálne pravdepodobného riešenia. Pri hľadaní maximálne pravdepodobného riešenia je následné riešenie, využitie ako štartovací bod. Zavedie sa premenná \mathbf{B} , daná vzťahom:

$$\mathbf{B} = \mathbf{K}^{-T} \mathbf{K}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{11} & \mathbf{B}_{12} & \mathbf{B}_{13} \\ \mathbf{B}_{12} & \mathbf{B}_{22} & \mathbf{B}_{23} \\ \mathbf{B}_{13} & \mathbf{B}_{23} & \mathbf{B}_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha^2} & -\frac{\gamma}{\alpha^2 \beta} & \frac{v_0 \gamma - u_0 \beta}{\alpha^2 \beta} \\ \frac{\gamma}{\alpha^2 \beta} & \frac{\gamma^2}{\alpha^2 \beta^2} + \frac{1}{\beta^2} & \frac{\gamma(\gamma \gamma - u_0 \beta)}{\alpha^2 \beta^2} - \frac{v_0}{\beta^2} \\ \frac{v_0 \gamma - u_0 \beta}{\alpha^2 \beta} & -\frac{\gamma(\gamma \gamma - u_0 \beta)}{\alpha^2 \beta^2} - \frac{v_0}{\beta^2} & \frac{(v_0 \gamma - u_0 \beta)^2}{\alpha^2 \beta^2} + \frac{v_0^2}{\beta^2} + 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Keďže B je symetrická matica, zapíše sa vo forme 6 rozmerného vektora $b=[B_{11}, B_{12}, B_{22}, B_{13}, B_{23}, B_{33}]^T$. Ak i -ty stĺpec H označíme $h_i = [h_{i1}, h_{i2}, h_{i3}]^T$ vznikne rovnica $h_i^T B h_j = v_{ij}^T b$ pričom:

$$v_{ij} = [h_{i1} h_{j1}, h_{i1} h_{j2} + h_{i2} h_{j1}, h_{i2} h_{j2}, h_{i3} h_{j1} + h_{i1} h_{j3}, h_{i3} h_{j2} + h_{i2} h_{j3}, h_{i3} h_{j3}] \quad (3.3)$$

dve základné ohraničenia $h_1^T K^{-T} K^{-1} h_2 = 0$ a $h_1^T K^{-T} K^{-1} h_1 = h_2^T K^{-T} K^{-1} h_2$ prepíšeme ako dvojicu homogénnych rovníc

$$\begin{bmatrix} v_{12}^T \\ (v_{11} - v_{22})^T \end{bmatrix} b = 0 \quad (3.4)$$

Pri využití n snímkov modelu sa získa maticová rovnica $V \cdot b = 0$, kde V je matica rozmeru $2n \times 6$. Riešením je pravý singulárny vektor korešpondujúci s najmenšou singulárnou hodnotou matice V . Po vypočítaní vektora b možno pristúpiť k určeniu vnútorných a následne vonkajších parametrov kamery. Vnútorne parametre vypočítame

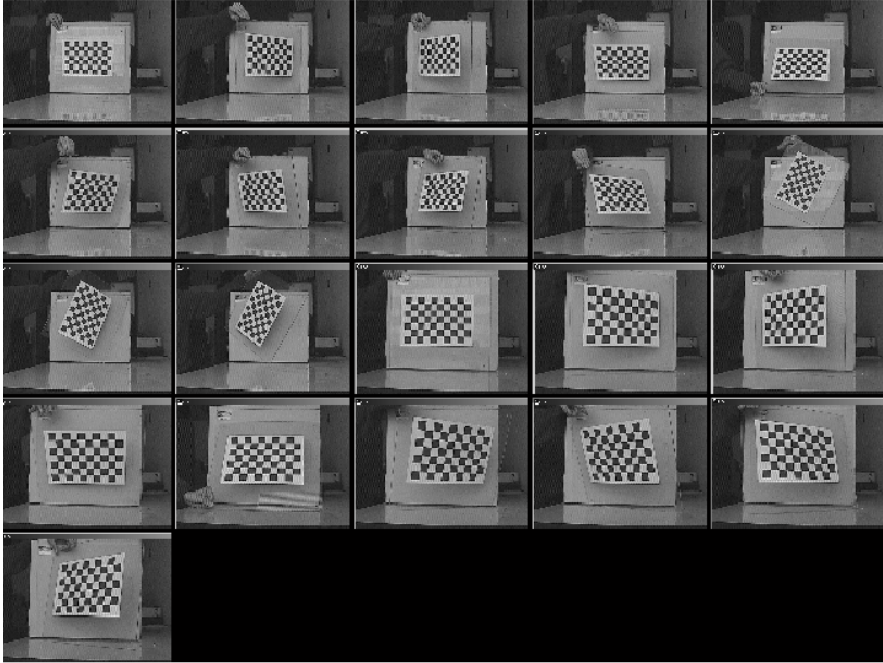
$$\begin{aligned} v_0 &= (B_{12} B_{13} - B_{11} B_{23}) / (B_{11} B_{22} - B_{12}^2) \\ \lambda &= B_{33} - [B_{13}^2 + v_0 (B_{12} B_{13} - B_{11} B_{23})] / B_{11} \\ \alpha &= \sqrt{\lambda / B_{11}} \\ \beta &= \sqrt{\lambda B_{11} / (B_{11} B_{22} - B_{12}^2)} \\ \gamma &= -B_{12} \alpha^2 \beta / \lambda \\ u_0 &= \gamma v_0 / \beta - B_{13} \alpha^2 / \lambda \end{aligned} \quad (3.5)$$

Z týchto hodnôt sa teda zostaví matica vnútorných parametrov K , na základe ktorej sa uskutoční výpočet vonkajších parametrov kamery. [1]

4 ANALÝZA VYBRANÝCH FAKTOROV PRI KALIBRÁCIÍ KAMERY

Ako prvý faktor ovplyvňujúci kvalitu vstupných obrazov bol vybraný faktor, ktorý vnaša do vstupných obrazov kamera a to, jej radiálne skreslenie šošovky. Ako druhý faktor sme si vybrali vplyv určenia presnej polohy rohových bodov vo vstupnom obraze. A posledný faktor, ktorým sme sa zaoberali bol vplyv počtu snímkov vstupnej množiny na kvalitu kalibrácie. Tieto tri faktory sme považovali za

najdôležitejšie pri ovplyvňovaní kalibrácie kamery, pretože najviac vplyvajú na určenie súradníc rohových bodov, ktoré slúžia ako vstup na odhad vnútorných parametrov kamery zo vstupných obrazov. Ako vstupný obraz bol zvolený obraz šachovnice zosnímaný v rôznych natočeniach. Na obr. 4.1. je znázornená jedna z troch sád vstupných obrazov, ktoré boli používané pri overovaní navrhovaných postupov.



Obrázok 4.1 Vstupné obrazy kalibračného poľa sady č. 2

Na posúdenie či prišlo k zlepšeniu odhadu vnútorných parametrov kamery sme používali výberovú smerodajnú odchýlku (3σ) a chybu reprojekcie. Výberovú smerodajnú odchýlku sme si vybrali preto, že pokiaľ jej hodnota klesá tak z toho môžeme usúdiť zlepšenie odhadu parametra kamery, pretože sa tým zmenší rozptyl všetkých hodnôt určených z jednotlivých vstupných obrazov. Chyba reprojekcie resp. chyba pixela určuje ako presne sa nám podarí spätne určiť polohu rohu v obraze z toho vyplýva čím nižšiu hodnotu dosiahneme tým presnejší odhad vnútorných parametrov kamery sme urobili. Výsledok z kalibrácie kamery je interval pre odhadované parametre uvádzaný v tvare:

$$p = p_e \pm 3\sigma_p \quad (4.1)$$

Kde p_e predstavuje odhadovanú hodnotu parametra kamery a σ_p je výberová smerodajná odchýlka. Pri výpočte nepoznáme skutočnú hodnotu počítaných parametrov a máme len jedinú informáciu, že chyba je vyjadrená ako výberová smerodajná odchýlka.

4.1 Úprava korekcie radiálneho skreslenia vstupných obrazov

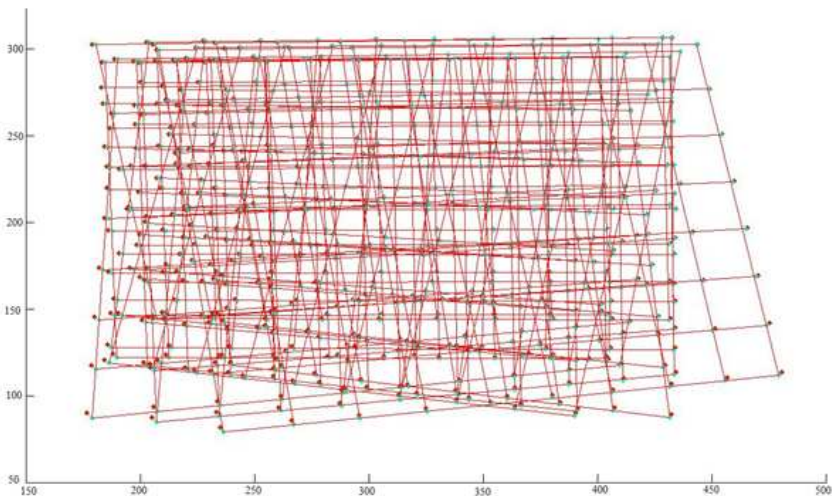
Radiálne skreslenie je odchýlenie polohy zobrazovaného bodu od jeho teoreticky správnej polohy. Inak povedané, je to zmena v uhle medzi lúčom a optickou osou. Model deformácie je:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \end{pmatrix} + L(r) \begin{pmatrix} x - x_c \\ y - y_c \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

kde $r = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2}$ je radiálna vzdialenosť od stredu deformácie, $L(r)$ je faktor skreslenia. Je to funkcia závislá iba od r , (x', y') je nová pozícia, (x, y) je nameraná poloha bodu (skreslená). [30], [31], [35],

4.1.1 Iteračná metóda pre odhad parametrov a stredu radiálneho skreslenia

Prezentovaná metóda umožňuje počítať stred radiálneho skreslenia a uvažuje s možnosťou, že stred radiálneho skreslenia a hlavný bod nie sú ten istý bod. [32], [33], [34], [36].



Obrázok 4.2 Úprava rohových súradníc v grafickom vyobrazení

Predpokladá sa, že stred radiálneho skreslenia nie je veľmi vzdialený od hlavného bodu obrazu. Metóde postačuje jeden obraz scény, v ktorom sa nájde úsečka s bodmi a z predpokladu, že úsečka sa zobrazí do úsečky určí radiálne skreslenie kamery a tým určí aj nové súradnice rohových bodov bez znalosti vnútorných parametrov kamery.

Majme množinu K z obrazov p_{ki} s vybranými bodmi so súradnicami (x_{ki}, y_{ki}) v skreslenom obraze. Obrazy p_{ki} by mali ležať na úsečke L_k v ideálnom neskreslenom obraze. Rovnica

$$r_d = r(1 + \alpha_2 r^2 + \alpha_4 r^4 + \dots) \quad (4.3)$$

je nahradená modelom zohľadňujúcim rôznu stupeň deformácie obrazu v smere súradnicových osí obrazu, ktorý môže byť pre každý pod p_{ki} vyjadrený ako:

$$r_{xki} = \frac{r_{dki}}{(1 + \beta_{x2} r_{dki}^2 + \beta_{x4} r_{dki}^4 + \dots)} \quad r_{yki} = \frac{r_{dki}}{(1 + \beta_{y2} r_{dki}^2 + \beta_{y4} r_{dki}^4 + \dots)} \quad (4.4)$$

kde r_{xki}, r_{yki} sú relatívne súradnice bodu p_{ki} pri súradniciach radiálneho skreslenia v neskreslenom obraze rovnom $C = (c_{dx}, c_{dy})$, r_{dki} je vzdialenosť obrazového bodu od stredu radiálneho skreslenia v skreslenom obraze, $\beta_{x2}, \beta_{x4}, \beta_{y2}, \beta_{y4}$ sú koeficienty z inverzného radiálneho skreslenia pozdĺž osí x a y .

4.1.2 Úprava korekcie radiálneho skreslenia z bodových korešpondencií medzi skresleným a neskresleným obrazom

Pri tejto metóde sa nevychádza len z rohových bodov, ktoré je potrebné získať pre kalibráciu kamery, ale využíva sa obraz ako celok, čo znamená, že použijeme každý jeden pixel z obrazu. Na pamäť a výkon počítača je táto metóda náročnejšia keďže v predchádzajúcej metóde nám do výpočtu vstupovalo len 80 bodov z každého obrazu. Matematicky skreslenie vyjadríme ako:

$$\begin{aligned} x'' &= x' \cdot (1 + k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4) + 2 \cdot p_1 \cdot x' \cdot y' + p_2 \cdot (r^2 + 2 \cdot x'^2) \\ y'' &= y' \cdot (1 + k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4) + 2 \cdot p_2 \cdot x' \cdot y' + p_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot y'^2) \\ r^2 &= x'^2 + y'^2 \end{aligned} \quad (4.5)$$

kde:

(k_1, k_2)	koeficienty radiálneho skreslenia
(p_1, p_2)	koeficienty tangenciálneho skreslenia
$[x' \ y']^T$	vstupná projekcia bodov obrazu $[x \ y \ z]^T$
$[x'' \ y'']^T$	nová projekcia

4.1.3 Porovnanie výsledkov po rôznych úpravách radiálneho skreslenia šošovky

Z prezentovaných výsledkov môžeme vidieť, že obe metódy na úpravu radiálneho skreslenia šošovky priniesli zmenu odchýlky výsledku kalibrácie kamery. Avšak ako je možné vidieť v tab. 1, 2 a 3 tak iteračná metóda v percentuálnom vyčíslení zmeny odchýlky vyšla vyššia ako metóda bodových korešpondencií, čo znamená, že čím väčšie percentuálne zväčšenie je, tým je 3σ interval menší a vypočítaná hodnota presnejšia. Obe metódy však prispeli k zníženiu hodnoty odchýlky čo znamená, že sa zmenšila chyba ohniskovej vzdialenosti, chyba hlavného bodu a chyba pixela z čoho vyplýva celkové zlepšenie odhadu vnútorných parametrov kamery. Ako je možné vidieť na prezentovaných výsledkoch tak či iteračná metóda alebo metóda bodových korešpondencií spôsobila pre každý parameter inú percentuálnu zmenu v každej sade. Z toho vyplýva, že najväčší vplyv na určenie vnútorných parametrov kamery majú nasnímané vstupné obrazy a ich kvalita. Každá sada obrazov bola snímaná tou istou kamerou a napriek tomu vyšli iné výsledky.

Tabuľka 1 porovnanie výsledkov vnútorných parametrov kamery po korekcii radiálneho skreslenia vo vstupných obrazoch

Sada č. 1	Iteračná metóda			Metóda bodových korešpondencií	
	váha	zmena odchýlky pre Δf_{cx} v %	zmena odchýlky pre Δf_{cy} v %	zmena odchýlky pre Δf_{cx} v %	zmena odchýlky pre Δf_{cy} v %
	0,001	1,4092953	0,2194	0,60969	0,09973
	0,002	0,1999	0,139623		
		zmena odchýlky pre Δc_{cx} v %	zmena odchýlky pre Δc_{cy} v %	zmena odchýlky pre Δc_{cx} v %	zmena odchýlky pre Δc_{cy} v %
	0,001	4,590679	16,9749	3,7877	7,309
	0,002	2,024786	10,678		
		zmena odchýlky pre Δer_{rx} v %	zmena odchýlky pre Δer_{ry} v %	zmena odchýlky pre Δer_{rx} v %	zmena odchýlky pre Δer_{ry} v %
	0,001	37,804878	38,22222	22,76422	24,000
	0,002	12,601626	12,88888		

Tabuľka 2 Porovnanie výsledkov vnútorných parametrov kamery po korekcii radiálneho skreslenia vo vstupných obrazoch

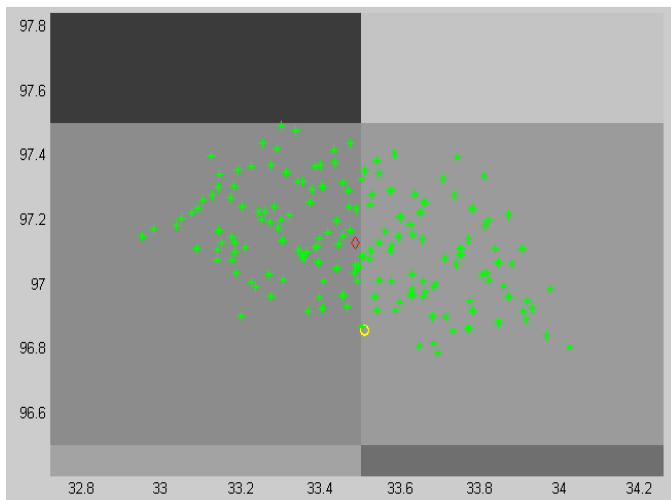
Sada č. 2		zmena odchýlky pre Δf_{cx} v %	zmena odchýlky pre Δf_{cy} v %	zmena odchýlky pre Δf_{cx} v %	zmena odchýlky pre Δf_{cy} v %
	0,001	1,44144	1,35277	0,12012	0,26267
	0,002	1,92192	2,180194		
		zmena odchýlky pre Δc_{cx} v %	zmena odchýlky pre Δc_{cy} v %	zmena odchýlky pre Δc_{cx} v %	zmena odchýlky pre Δc_{cy} v %
	0,001	28,021215	8,126613	4,708	6,7536
	0,002	30,57527	9,290864		
		zmena odchýlky pre Δe_{rx} v %	zmena odchýlky pre Δe_{ry} v %	zmena odchýlky pre Δe_{rx} v %	zmena odchýlky pre Δe_{ry} v %
	0,001	9,027777	3,465346	6,59722	7,92079
	0,002	12,84722	4,455445		

Tabuľka 3 Porovnanie výsledkov vnútorných parametrov kamery po korekcii radiálneho skreslenia vo vstupných obrazoch

Sada č. 3		zmena odchýlky pre Δf_{cx} v %	zmena odchýlky pre Δf_{cy} v %	zmena odchýlky pre Δf_{cx} v %	zmena odchýlky pre Δf_{cy} v %
	0,001	6,37892	1,605239	0,7797	1,3162
	0,002	6,442399	2,947219		
		zmena odchýlky pre Δc_{cx} v %	zmena odchýlky pre Δc_{cy} v %	zmena odchýlky pre Δc_{cx} v %	zmena odchýlky pre Δc_{cy} v %
	0,001	5,2446282	6,413266	4,9400	4,2339
	0,002	4,107407	5,055767		
		zmena odchýlky pre Δe_{rx} v %	zmena odchýlky pre Δe_{ry} v %	zmena odchýlky pre Δe_{rx} v %	zmena odchýlky pre Δe_{ry} v %
	0,001	1,14503	3,05676	1,1450	2,1834
	0,002	1,52671	3,93013		

4.2 Detekcia rohových bodov založených na harris-ovom detektore a operátor význačnosti

Snahou bolo urobiť automatický systém na výber rohových bodov v toolbox-e pre Matlab tak, aby užívateľ zadal len vstupné obrázky a nemusel už viac do výpočtu zasahovať. Harris Plessey detektor [24] aj operátor význačnosti [23], [27] patria do skupiny efektívnych, robustných detektorov, ktoré sú vhodné pre realizáciu algoritmov na automatické vyhľadávanie rohov. Oba detektory potrebujú na vstupe štartovacie okno, v ktorom budú vyhľadávať roh preto je potrebné predspracovanie, v ktorom sa najprv určí štartovacie okno. Na to by slúžili detektory operátor SUSAN, metódu Rýchly Hessian, Moravcov detektor, Harrisov detektor a Harris – Laplace detektor, ktoré pracujú na pixelovej úrovni [25], [26], [27], [29]. Tie by určili okno, v ktorom by potom detektory na sub-pixelovej úrovni odhadli polohu rohu.



Obrázok 4.3 Harris Plessey detektor (žltý) a operátor význačnosti (červený) aplikované na obraz z CCD kamery

V automatizovanom systéme je výhodnejšie použiť operátor význačnosti, ktorý používa adaptívne okno na odhad rohu. Keďže Harris-ov operátor nebol významne horší, maximálne zlepšenie do 1,8% pri sade č. 3, tak sme ho i naďalej používali pri kalibrácii kamery. Zlepšenie sme vyjadrovali v percentách na základe vzťahu

$$z_{Ox} = \frac{e_{rxH} - e_{rxO}}{e_{rxH}} * 100 \quad z_{Oy} = \frac{e_{ryH} - e_{ryO}}{e_{ryH}} * 100 \quad (4.6)$$

kde e_{rrH} je chyba reprojekcie Harris Plessey detektora, e_{rrO} je chyba reprojekcie operátora význačnosti.

Tabuľka 4 porovnanie chyby reprojekcie pre všetky sady obrazov pre oba rohové detektory

Sada č. 1			
pixel error	Harris Plessey detektor	Operátor význačnosti	% zlepšenie Operátora význačnosti
e_{rx}	0,247	0,245	0,809
e_{ry}	0,226	0,224	0,888

Sada č. 2			
pixel error	Harris Plessey detektor	Operátor význačnosti	% zlepšenie Operátora význačnosti
e_{rx}	0,292	0,289	1,027
e_{ry}	0,205	0,203	0,975

Sada č. 3			
pixel error	Harris Plessey detektor	Operátor význačnosti	% zlepšenie Operátora význačnosti
e_{rx}	0,267	0,263	1,498
e_{ry}	0,232	0,229	1,293

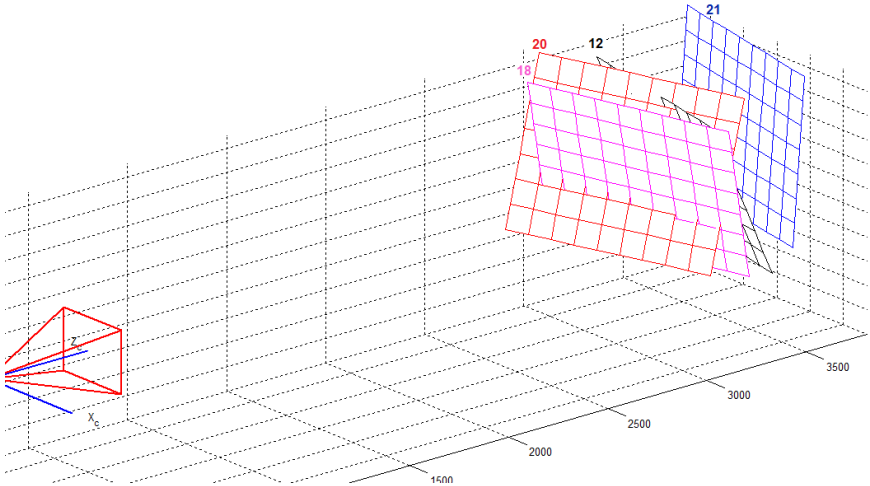
4.3 Výber vhodných obrazov pre kalibráciu kamery

Vychádzali sme zo vstupnej množiny obrazov kalibračného objektu, ktorá obsahovala 20 obrazov. Úlohou bolo stanoviť pravidlo na základe, ktorého by sme povedali, že daný obraz je vhodný alebo nevhodný pre kalibráciu kamery. Testovacie kritérium, ktoré sme si zvolili na porovnanie výsledkov kalibrácie kamery bola výberová smerodajná odchýlka vnútorných parametrov kamery. Tieto štyri parametre kamery sa považujú za najdôležitejšie pri kalibrácii kamery. Vybrané kritérium nie je váhované.

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{fx}^2 + \sigma_{fy}^2 + \sigma_{cx}^2 + \sigma_{cy}^2} \quad (4.7)$$

V prvom kroku sme spravili kalibráciu kamery z celej skupiny obrazov. Po kalibrácii kamery sme porovnali výstupy a vybrali sme najmenej významný obraz,

ktorý sme zo skupiny vyradili ako najnevhodnejší vstup pre kalibráciu kamery, ktorý po vyradení zo skupiny spôsobil najmenšiu zmenu hodnoty σ (4.7). Tento proces sa opakoval až kým hodnota σ neprekročila dva krát hodnotu vstupnej hodnoty σ z celej skupiny obrazov. Táto procedúra skončila pri počte obrazov 4. Tieto obrazy vyzerajú ako najdôležitejšie a postačujúce obrazy pre kalibráciu vnútorných parametrov kamery. Časť krokov procedúry výberu sú zobrazené v tab. 5 a poloha štyroch posledných obrazov je na obr. 4.4.



Obrázok 4.4 Poloha kalibračného poľa pre posledné štyri obrazy pri redukcii stratégiej najmenej odchyľky

Tabuľka 5 Štandardné odchyľky pre postup redukcie stratégiej najmenej odchyľky

poradie selekcie	počet obrazov v skupine	σ	poradové číslo obrazu odstráneného zo skupiny	σ bez najmenej významného obrazu
1	20	21,35	[1]	21,47
2	19	21,47	[1 4]	21,93
7	14	23,16	[1 4 7 9 8 16 5]	23,67
10	11	24,91	[1 4 7 9 8 16 5 10 14 2]	25,77

13	8	27,99	[1 4 7 9 8 16 5 10 14 2 6 17 13]	29,45
16	5	30,86	[1 4 7 9 8 16 5 10 14 2 6 17 13 11 19 15]	38,04

Z predchádzajúcich analýz vyplýva, že :

- počet použitých obrazov kalibračného objektu ovplyvňuje veľkosť interval pre odhadované vnútorné parametre kamery

- v prípade stratégie redukcie podľa najmensej odchýlky viedlo k minimálnej množine 4 obrazov, pri ktorých bodové odhady boli veľmi málo odlišné od hodnôt vypočítaných pre celú množinu obrazov, čiže sa určitých podmienok sa dá extrahovať reprezentatívna podmnožina snímok

- z uvedeného vyplýva, že je potrebné venovať zvýšenú pozornosť výberu polohovania kalibračného objektu. Exaktné pravidlá vzhľadom na charakter výpočtu parametrov nie je jednoduché definovať, i keď určité závery pre konkrétny typ kamery boli vyslovené pri porovnaní selektovaných množín obrazov

- na vyslovenie všeobecných záverov by bola potrebné vykonať experimenty pre väčší počet kamier.

Jednoznačne je možné tvrdiť, že napriek náročnosti pri spracovaní väčšieho počtu obrazov, nie je možné jednoznačne dôverovať výsledkom z relatívne malej množiny obrazov pre rôzne polohy kalibračného objektu.

5 ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV A PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE

Dizertačná práca sa zoberá analýzou vybraných faktorov na výsledky kalibrácie vnútorných parametrov kamery. Vychádza z prehľadu súčasného stavu riešenia danej problematiky. Pre potreby experimentálnej analýzy a experimentálneho overenia návrhov na zlepšenie výsledkov kalibrácie bol vybraný lineárny model kamery, ktorý sa používa v mnohých v súčasnosti známych a používaných metódach kalibrácie. Pre experimentovanie a hlbšie skúmanie bola vybraná veľmi rozšírená Zhangova kalibračná metóda. Pre svoju nenáročnosť na prostriedky a podmienky kalibrácie je veľmi často používaná najmä v technickej praxi, podporuje používanie tejto metódy aj softvérové produkt v prostredí Matlab. Vzhľadom na charakter metódy je možné kvalitu výsledkov kalibrácie posudzovať pomocou štatistických charakteristík, ktorými sú výberová smerodajná odchýlka (prípadne jej násobky) pre bodové odhady parametrov, resp. odhad strednej hodnoty rozdielu medzi súradnicami obrazov rohových bodov kalibračného terčika a súradnicami obrazov bodov vypočítaných z modelu použitím odhadovaných parametrov, označovaný ako chyba reprojekcie.

Hlavnými cieľmi práce bolo posúdenie vplyvu

1. stratégie polohovania kalibračného terčika

2. metódy korekcie radiálneho skreslenia optickej sústavy kamery
3. odhadu súradníc obrazov rohových bodov so subpixelovým rozlíšením pri kalibrácii kamery.

Za pôvodné vedecké prínosy možno považovať:

1. Návrh a overenie pôvodnej metódy postupnej extrakcie obrazov kalibračného z definovanej množiny obrazov, ktorá umožňuje získať podmnožiny obrazov, ktoré dominantne ovplyvňujú kvalitu kalibrácie. Uvedeným postupom je možné odhaliť vplyv neprávneho výberu obrazov, ktorých použitie môže viesť k vychýleným odhadom vnútorných parametrov kamery.
2. Analýza a stabilizácia pôvodnej metódy korekcie radiálneho skreslenia iteratívnou metódou, ktorej riešením je priblíženie korigovaných bodov k úsečkám. Použitie kalibračného terčika typu šachovnica umožňuje definovať potenciálnu príslušnosť obrazov bodov k úsečkám v prípade obrazu bez deformácie. Metóda umožňuje stanoviť nielen parametre modelu deformácie, ale aj súradnice stredu deformácie, umožňuje korigovať tento typ deformácie pre obecnější prípad, nevyžaduje aby charakter deformácie bol rovnaký pre oba smery súradných osí v obraze.
3. Pôvodný návrh a implementácia kritérií AREL a MREL, ktoré umožňujú kvalifikovať mieru korekcie obrazu bez znalosti ideálnych súradníc obrazov bodov, čo pre reálne aplikácie má veľký význam. Za prínos je možné považovať aj fakt, že korekcia radiálnej deformácie sa dá urobiť z jedného obrazu, bez znalosti parametrov snímacieho zariadenia, čo umožňuje využitie aj v iných oblastiach, za predpokladu, že deformovaný obraz obsahuje obrazy úsekov, ktoré v ideálnom prípade boli časťami priamky.

Medzi ostatné výsledky práce možno zaradiť:

1. Analýza existujúceho stavu problematiky s dôrazom na metódy kalibrácie kamery
2. Analýza a experimentálne porovnanie metód korekcie radiálnej deformácie
3. Analýza a porovnanie subpixelových detektorov (Harris detektora a operátora význačnosti). Analýza nepotvrdila významné rozdiely ich vplyvu na výsledok kalibrácie.

POUŽITÁ LITERATÚRA

1. Zhang Z.: A flexible new technique for camera calibration. Technical report MSR-TR-98-71. 22s.
2. Bouguet J. Y.: Camera Calibration Toolbox for Matlab, [online], [citované 2007-15-08], dostupné na: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html#examples
3. Hartley R., Zisserman A.: Multiple view Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, 2000.
4. Šonka M., Hlaváč V., Boyle, R.: Image Processing, Analysis, and Machine Vision, ISBN 0-534-95393-X, 1998.
5. Hornberg A.: Handbook of Machine Vision. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaG, Weinheim 2006
6. Pavelka K.: Fotogrammetrie, ČVUT, ISBN 80-01-01863-6, 1998
7. Haralic R. M., Shapiro G. L.: Computer and Robot Vision, Addison-Vesley Publishing Company, Inc., ISBN 0-201-56943-4 (v. 2), 1993
8. Yang A., Y.: Image Formation and Camera Models, Berkeley 2007.
9. Zhang Y., Wang Z.: A Flexible Camera Calibration Method for Computer Visual 3D Reconstruction System, 0-7803-9737-1/06, IEEE 2006, ICSP 2006 Proceedings
10. Zhegyou Z.: Camera Calibration with One-Dimensional Objects, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol 26, No 7, 2004.
11. Xiangjian H., Zhang H., Hur N., et. all: Estimation of Internal and External Parameters for Camera Calibration Using 1D Pattern, Proceedings of the IEEE International Conference on Video and Signal Based Surveillance, 2006.
12. Kim J., S., Kweon I., S.: Estimating Intrinsic Parameters of Cameras Using Two Arbitrary Rectangles, Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition, 0-7695-2521-0/06, IEEE, 2006.
13. Tommaselli A. M. G., Telles S. S. S.: A Mathematical Model for Camera Calibration Using Straight Line, Department of Cartography, FCT-Unesp, Brazil, 2006
14. Xiaochun C., Foroosh H.: Camera Calibration Using Symmetric Objects, IEEE Transactions on Image Processing, VOL. 15, NO. 11, 2006.
15. Li Y., Hung Y., S.: Recovery of Circular Motion Geometry in Spite of Varying Intrinsic Parameters, Proceedings of the IEEE International Conference on Video and Signal Based Surveillance, IEEE, 2006.
16. Wang N., Tang J., Fan Y., Z., et. all: An Algorithm of Camera Self-Calibration, 0-7803-9737-1/06, IEEE, ICSP Proceedings, 2006
17. Cao X., Xiao J., Foroosh H.: Self – Calibration Using Constant Camera Motion, Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition, 0-7695-2521-0/06, IEEE 2006

18. Seo Y., Heyden A., Cipolla R.: A Linear Iterative Method for Auto-Calibration using the DAC Equation, 0-7695-1272-0/01, IEEE, 2001.
19. Sarkis M., Senft Ch. T., Diepold K.: A Novel Technique to Model the Variation of the Intrinsic Parameters of an Automatic Zoom Camera Usin Adaptive Deleunay Meshes over Moving Least-Squares Surface, 1-4244- 1437-7/07, ICIP, IEEE 2007
20. Fraser C. S., Al-Ajlouni S.: ZOOM-Dependent Camera Calibration in Digital Close-Range Photogrammetry, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Vol. 72, No 9, 2006
21. Hughes C., Glavin M., Jones E.: Simply fish-eye calibration method with accuracy evaluation, Electronic Letters on Computer Vision and Image Analysis 10(1):54-62, 2011
22. Schwalbe E.: Geometric modeling and calibration of fisheye lens camera systems, 2. Panoramic Photogrammetry Workshop, Berlin, Germany, 2005
23. Heikkilä J., Silvén O.: A four-step camera calibration procedure with implicit image correction, In.: Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Computer Society Conference on, Sna Juan, Puerto Rico. 17-19.6 1997, pp 1106-1112
24. Gao X., et all.: Scale-space Based Corner Detection of Gray Level Image Usúing Plessey Operator, ICICS, 0-7803-9282-5/05, IEEE, 2005
25. Shen F., Wang H.: A Local Edge Detector Used for Finding Corners, School of Electrical and Electronic Engineering Nanyang Technological University, Singapore, 2008
26. Nadernejad E., Sharifzadeh S., Hassanpour H.: Edge Detection Techniques: Evaluations and Comparisons, Applied Mathematical Science, Vol. 2, no. 31, 1507-1520, 2008
27. Jiao W., Fang Y., He G.: An Integrated Feature Based Method for Sub-Pixel Image Matching, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII part B1, Beijing, 2008
28. Förstner W., Gülch E.: A Fast Operator for Detection and Precise Location of Distinct Points, Corners and Centres of Circular Features, ISPRS Intercommission Workshop, Interlaken, June 2007
29. Tuytelaars T., Mikolajczyk K.: Local Invariant Feature Detectors: A Survey, Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision Vol. 3, No. 3, 177– 280, 2008, DOI: 10.1561/0600000017
30. Nowakowski A., Skarbek W.: Lens Radial Distortion Calibration Using Homography of Central Points, The International Conference on: Computer as a Tool, Warsaw, 2007
31. Barreto P., J., Daniilidis K., : Fundamental Matrix for Cameras with Radial Distortion, Proceedings of the Tenth IEEE International Conference on Computer Vision , 1550-5499/05, 2005

32. Ravas R., Syrová L.: Use of Improved Iterative Correction of Radial Distortion, The 22nd DAAAM International World Symposium, Vienna, 2011
33. Wang A., Qiu T., Shao L.: A Simple Method of Radial Distortion Correction with Center of Distortion Estimation, Springer Science Business Media, 2009
34. Hartley R., Kang B. S.: Parameter-free Radial Distortion Correction with Centre of Distortion Estimation, Technical Report, Redmond, MSR-TR-2005- 42
35. Jedlička J., Potůčková M.: Correction of Radial Distortion in Digital Images, In: Technical computing Prague, Praha, 2007
36. Matsuoka R., et. all: Experimental on Parameter Selection of Image Distortion Model, IAPRS Volume XXXVI, Part 5, Dresden, 2006
37. Lu L., Dong F., Xia D., et all: A new method for improving camera calibration precision, Computer Application and System Modeling, International Conference on Vol. 3, 2010
38. Hosseinaveh A., et. all: Automatic Image Selection in Photogrammetric Multi-view Stereo Methods, International Symposium on Virtual Reality, Archeology and Intelligent Cultural Heritage, 2012
39. Huang L., Zhang Q., Asundi A.: Camera calibration with active phase target: improvement on feature detection and optimization, Optical Letters, Vol., 38, 2013
40. Li L., at. all.: Experimental analysis and improvement on camera calibration pattern, Optical Engineering, Vol. 53 Imaging Components Systems And Processing, 2014

PUBLIKÁCIE AUTORA

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- AFC1 Noskovičová, Lucia (50%) - Ravas, Rudolf (50%): Camera Calibration.
In: Process Control 2008 : Proceedings of the 8th International Scientific-Technical Conference. Kouty nad Desnou, Czech Republic, June 9-12, 2008. - Pardubice : University of Pardubice, 2008. - ISBN 978-80-7395-077-4. - CD-Rom
- AFC2 Noskovičová, Lucia (100%): Camera Calibration Techniques.
In: Control & Information Technology : International Workshop. Gliwice, Poland, 18.-19.9.2008. - : Politechnika Śląska, 2008. - S. 189-194
- AFC3 Noskovičová, Lucia (60%) - Ravas, Rudolf (40%): Image Preprocessing for Image Vectorization.
In: IKWCIT 2007 : 6th International PhD. Student's Workshop on Control and Information Technology. - Ostrava : Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB - Technical University of Ostrava, 2007. - S. 151-154

- AFC4 Noskovičová, Lucia (60%) - Ravas, Rudolf (40%): Image Selection for Camera Calibration.
In: Annals of DAAAM for 2009 & Proceedings : 20th International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Focus in Theory, Practice and Education". Vienna, Austria, 25.-28.11.2009. - Vienna : DAAAM International, 2009. - ISSN 1726-9679. - S. 1875-1876
- AFC5 Noskovičová, Lucia (60%) - Ravas, Rudolf (40%): Image Selection for Computing Intrinsic Camera Parameters.
In: InterTech 2010 : III. International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientists. Poznań, Poland, 19.-21.5.2010. - Poznań : Uczelniany Samorząd Doktorantów Politechniki Poznańskiej, 2010. - ISBN 978-83-926896-2-1. - S. 215-217
- AFC6 Noskovičová, Lucia (60%) - Ravas, Rudolf (40%): Vectorization of Binary Images.
In: Annals of DAAAM for 2007 & Proceedings : 18th International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation" Zadar, Croatia, 24.-27.10.2007. - Viedeň : DAAAM International, 2007. - ISBN 3-901509-58-5. - S. 513-514

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- AFD1 Noskovičová, Lucia (100%): Camera Calibration Method Based on Direct Linear Transformation.
In: ELITECH '08 : PhD Students Conference. Bratislava, Slovak Republic, 20.5.2008. - Bratislava : STU v Bratislave, 2008. - ISBN 978-80-227-2878-2. - CD-Rom
- AFD2 Noskovičová, Lucia (70%) - Ravas, Rudolf (30%): Camera Self-Calibration.
In: ELITECH '09 : 11th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 25.5.2009. - Bratislava : STU v Bratislave FEI, 2009. - ISBN 978-80-227-3091-4. - CD-Rom
- AFD3 Noskovičová, Lucia (60%) - Ravas, Rudolf (40%): Subpixel Corner Detection for Camera Calibration.
In: Mechatronika 2010 : Proceedings of 13th International Conference on Mechatronics. Trenčianske Teplice, Slovak Republic, 2.-4.6.2010. - Trenčín : Trenčianska univerzita Alexandra Dubčeka v Trenčíne, 2010. - ISBN 978-80-8075-451-8. - ISBN 978-808075-452-5. - S. 78-80
- AFD4 Noskovičová, Lucia (50%) - Ravas, Rudolf (50%): Technique for Camera Calibration.
In: 19th International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on Next Generation of Intelligent Systems and Solutions : Trnava, Slovak Republic, 22.-25.10.2008. - Wien : DAAAM International, 2008. - CD-Rom

BDF Odborné práce v domácích nekarentovaných časopisoch

- BDF1 Noskovičová, Lucia (100%): Toolbox for Camera - Self Calibration.
(<http://www.posterus.sk/?p=2071>)
In: Posterus [elektronický zdroj]. - ISSN 1338-0087. - Vol. 2, Iss. 9 (2009),
web-page

SUMMARY

The theoretical part of the thesis is focused on the problems of camera calibration in ideal and real cameras. The aim was to process of summary of the camera calibration methods and selects one of them for the next step. We focused on the calibration of a single camera. Overview of actual methods is depending on what type of calibration is used. The first type of the camera calibration uses object whose specifications is known. The second type is a scene where some of the features are known and the third type is a self-calibration.

In the next section of the thesis we focus on the theoretical basis. The basis is necessary for the implementation of algorithms and procedures for camera calibration. In the next part of the thesis we were focused on mathematical models and methods. Next we looked at the publications to the same or similar camera calibration methods that we have chosen for further work. There are a lot of studies with and related themes but exactly the same camera calibration solution which was examined in the thesis was not found. Each approach of camera calibration is unique and the slightest change in conditions led to different results.

In the main part of the thesis we focused on solutions and experiments, that were substantiated the theoretical knowledge of the previous chapters. During the processing of the issues we dealt with processing methods that would improve estimation results of the calibration camera. The first method which was described in the first part of the section was intended to suppress the effect of the radial distortion of the camera lens. Influence of radial distortion is removed from the input image before being used to camera calibrate. This will ensure a more accurate estimate of corner coordinates and thus a better result of intrinsic camera parameters. Two approaches removing radial distortion of the input image were compared. Both approaches have shown improvement in the percentage standard deviation of the intrinsic parameters. The significant impact of that correction in the process of the camera calibration comparing was confirmed on the percentages errors.

Furthermore, the work deal with the adjustment of the input image uses method that estimate the corner coordinates with sub-pixel precision. Finally, the thesis describes an experimental method for determining a sufficient number of input images to camera calibration and image detection which can cause misalignment estimates of intrinsic camera parameters.

Poznámky
