

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Ing. Lukáš Šroba

Autoreferát dizertačnej práce

ODHAD POLOHY ROHOVÝCH BODOV V OBRAZE

Na získanie titulu doktor (philosophiaedoctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: 5.2.54 meracia technika

Bratislava, november 2014

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

Predkladateľ: **Ing. Lukáš Šroba**
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.**
Nové Sady 240, 951 24 Nové Sady

RNDr. Miroslav Hain, PhD.
Slovenská akadémia vied
Štefánikova 49, 814 38 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
1 Ciele práce	5
2 Detekcia rohových bodov	5
2.1 Harris detektor	6
2.2 Detekcia so subpixelovým rozlíšením	6
2.3 Subpixelové detektory rohových bodov	7
2.3.1 Harris detektor	7
2.3.2 Haralick interest operátor	7
2.3.3 Detektor hľadajúci polohu sedlového bodu	7
2.3.4 Detektor využívajúci ortogonálnosť vektorov a iterácie	7
2.3.5 Detektor využívajúci rozvoj do Taylorovho radu	8
2.3.6 Detektor aproximujúci mapu rohovitosti kvadratickou plochou ...	8
2.3.7 Detektor aproximujúci mapu rohovitosti kvadratickou krivkou ...	8
3 Vlastnosti subpixelovej detekcie	8
3.1 Štúdia citlivosti subpixelovej detekcie rohových bodov	8
3.2 Porovnanie metód vyhodnotenia subpixelových súradníc rohových bodov v prípade viacerých snímok tej istej scény	12
4 Porovnanie subpixelových detektorov na vybraných aplikáciách z oblasti počítačového videnia	14
4.1 Vplyv subpixelovej detekcie na určenie posunu medzi dvoma kamerami použitím obrazového stereopáru	14
4.2 Porovnanie testovaných detektorov z hľadiska reprojekčných chýb	18
4.2.1 Porovnanie testovaných detektorov z hľadiska stability opisovaného postupu	19
5 Zhodnotenie a hlavný prínos dizertačnej práce	22
5.1 Zhodnotenie dizertačnej práce	22
5.2 Hlavný prínos dizertačnej práce a možná využiteľnosť v praxi	22
Použitá literatúra	24
Publikácie autora	26
Summary	28

Úvod

Číslíkové spracovanie obrazu je v súčasnej dobe na vzostupe viac ako kedykoľvek predtým. Je snaha automatizovať výrobné procesy a vniesť prvky umelej inteligencie do každodenného života. Či sa jedná o zvyšovanie kvality, rekonštrukciu alebo rozpoznávanie obrazu, obrazová informácia má pre nás veľký význam. Zaujímavo je to zhrnuté v jednom anonymnom výroku, ktorý v preklade znie: „Jeden obraz je hodnotnejší ako desaťtisíc slov“.

Je zrejmé, že aplikácie ako napríklad sledovanie pohybu, rozoznávanie tvárí, 3D rekonštrukcia objektov alebo navigácia robotov majú svoje opodstatnenie a nesporné výhody. Jedným z prvých krokov pri aplikáciách vo všetkých týchto spomínaných oblastiach je detekcia hrán, rohových bodov alebo vo všeobecnosti akýchkoľvek významných prvkov scény. To jedným z dôvodov, prečo sa nimi táto práca zaoberá.

Čoraz viac sa prikladá význam obrazovej informácii aj v najrôznejších druhoch merania. Pretože sa v týchto typoch úloh vyžaduje určitá presnosť, veľmi často dochádzalo k prípadu, že rozlíšenie použitého fotoaparátu alebo kamery nebolo dostatočné. To je samozrejme niekedy možné vyriešiť použitím kvalitnejšej techniky, ale s tým priamo úmerne rastú aj ekonomické náklady.

Aj kvôli týmto dôvodom vznikla myšlienka subpixelovej detekcie hrán, rohových bodov alebo aj iných prvkov v obraze. Podstatou je interpolovať alebo aproximovať hodnoty intenzít jasu aj mimo celočíselných súradníc v číslíkovom obraze a teda podstatne zvýšiť rozlíšenie. Tieto postupy sa dajú použiť vo veľkom množstve reálnych aplikácií, v ktorých hrá presnosť rozhodujúcu úlohu. Navyše s technickým pokrokom v oblasti hardvéru je možné subpixelovú detekciu vykonávať aj v reálnom čase, čo v minulosti bolo častokrát nemysliteľné. Aj z ekonomického hľadiska je jednoduchšie si zaobstaráť povedzme výkonnejší procesor ako kvalitnejšiu kameru.

Teória z oblasti počítačového videnia, napríklad okolo projektívnej a epipolárnej geometrie spolu s informáciami ohľadom obrazového stereopáru sa v súčasnej dobe využíva vo veľkom počte komerčných aplikácií. Za všetky možno spomenúť meranie vzdialeností, určovanie polohy alebo navigáciu v prostredí len za použitia kamery. Je preto možné postaviť obrazovú informáciu pochádzajúcu z kamery na úroveň informáciám z ostatných používaných senzorov, čo v minulosti rozhodne nebolo pravidlom.

1 Ciele práce

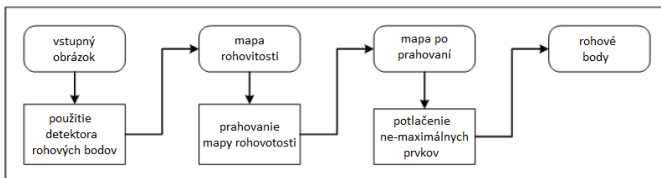
Na základe zadania dizertačnej práce sa práca orientuje na splnenie nasledovných cieľov:

1. Analýza metód a postupov v oblasti detekcie rohových bodov.
2. Porovnanie zvolených vlastností vybraných metód subpixelovej detekcie.
3. Návrh vhodných experimentov umožňujúcich vyšetrovanie vybraných vlastností detektorov.
4. Teoretický rozbor a analýza problematiky obrazového stereopáru.
5. Návrh postupu určenia posunu medzi kamerami stereopáru.
6. Porovnanie detektorov s pixelovým a subpixelovým rozlíšením.
7. Navrhnutie experimentov vhodných na porovnanie pixelových a subpixelových detektorov.

2 Detekcia rohových bodov

Jednou zo skupiny určovania význačných črt obrazu je detekcia rohových bodov. Rohové body sú tvorené prienikom dvoch alebo viacerých hrán, ktoré obvykle definujú hranicu medzi dvoma rozličnými objektmi alebo časťami objektu. Nájdenie zodpovedajúcich rohových bodov vo viacerých obrazoch je veľmi dôležitou súčasťou v mnohých oblastiach spracovania obrazu [1]. Využitie sa nájde napríklad pri spájaní panoramatických fotiek, detekcii a rozoznávaní objektov, sledovaní pohybu, navigácii robota a v mnohých ďalších praktických aplikáciách.

Všeobecný postup detekcie rohových bodov používaný v takmer všetkých detektoroch sa skladá z nasledujúcich krokov ilustrovaných na obr. 2.1 [2]:



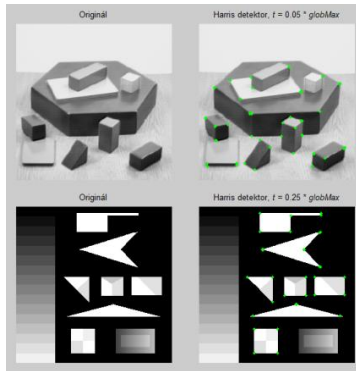
Obr. 2. 1 - Všeobecný postup detekcie rohových bodov

2.1 Harris detektor

Jeden z najznámejších a najčastejšie používaných detektorov rohových bodov podstatou ktorého je aproximácia hodnôt intenzít jasu v posunutých bodoch pomocou prvých dvoch členov Taylorovho rozvoja [3]. Pomocou diferencií v oboch smeroch sa vytvorí pre každý bod v obraze matica (2.1), z ktorej sa ďalším vyšetovaním získa mapa rohovitosti.

$$M(x, y) = \sum_w \begin{bmatrix} I_x \\ I_y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_x & I_y \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Na obr. 2.2 je ukážka rohových bodov nájdených Harris detektorom.



Obr. 2. 2 - Ukážka Harris detektora

Medzi ďalšie známe detekčné postupy patria *Moravec* [4], *SUSAN* [5] alebo *Trajkovic* [6] detektor.

2.2 Detekcia so subpixelovým rozlíšením

Ako je všeobecne známe, najmenšou časťou obrazu je pixel. Za normálnych okolností nie je možné získať z obrazu informáciu s rozlíšením vyšším ako jeden pixel. Niekedy je ale potrebné vyššie rozlíšenie akým použitá kamera disponuje. A práve preto boli vyvinuté matematické techniky, ktoré umožňujú zvyšovať rozlíšenie detekcie [7]. Niektoré z týchto techník sú použiteľné len pri detekcii štruktúr určitého tvaru, napríklad X-rohových bodov (obr. 2.3).



Obr. 2. 3 - Vzor šachovnice používaný na subpixelovú detekciu X-rohových bodov

2.3 Subpixelové detektory rohových bodov

Nasledujúce detektory sa líšia podľa princípu, na ktorom pracujú, a tiež podľa presnosti, ktorou dokážu rohové body lokalizovať. Porovnania niektorých z nich sú náplňou posledných dvoch kapitol venovaných vlastným výsledkom a zisteniam. Prvým krokom je vždy hrubé určenie súradníc rohových bodov detektorom s pixelovým rozlíšením. Až potom nasleduje aplikácia subpixelového detektora na okolie už predtým na hrubo označeného rohového bodu.

2.3.1 Harris detektor

Princíp Harris detektora pre subpixelovú detekciu je takmer identický ako ten, ktorý bol opísaný v kapitole 2.1. V prípade, že dokážeme interpolovať (napríklad bilineárna alebo bikubická interpolácia) intenzitu jasu kdekoľvek v digitálnom rastru (určiť jej hodnotu pre neceločíselné súradnice) a teda určiť jednotlivé diferencie aj medzi týmito interpolovanými hodnotami, môžeme pomocou Harris detektora určiť pozíciu rohového bodu so subpixelovým rozlíšením.

2.3.2 Haralick interest operátor

Podľa princípu algoritmu tohto známeho detektora [8] je hľadaný taký rohový bod, ktorý je najbližšie ku všetkým priamkam reprezentujúcim hrany v okne. Ako veľmi bod patrí hrane popisuje magnitúda gradientu. Haralick operátor obsahuje tiež pokročilé postupy zamerané na výber optimálneho okna a klasifikáciu obrazovej funkcie vo zvolenom okne (roh, kruh, textúra).

2.3.3 Detektor hľadajúci polohu sedlového bodu

Tento detektor [9] je možné použiť len na detekciu X -rohových bodov vo vzoroch v tvare šachovnice. Pre každý takýto X -roh sa použije kvadratická plocha, ktorá pokrýva profil intenzity jasu v okolí rohového bodu. Táto kvadratická plocha zodpovedá predpisu hyperbolického paraboloidu, pričom jej kritický bod sa nazýva tiež *sedlový bod* a zodpovedá hľadanému X -rohovému bodu.

2.3.4 Detektor využívajúci ortogonálnosť vektorov a iterácie

Základom tohto detektora [10] vhodného len na detekciu X -rohových bodov je teória ohľadom ortogonálnych vektorov a proces iterácie. Platí, že vektor spájajúci X -rohový bod (označený ako q) a akýkoľvek bod patriaci do jeho príľahlej oblasti (označený ako p) by mal byť kolmý na gradient bodu p , ako popisuje aj rovnica (2.2).

$$I(p_i)^T \cdot (q - p_i) = 0 \quad (2.2)$$

Po vyriešení rovnice a určení q , je tento bod zadaný ako nový stred okna W a ďalej sa rovnica rieši cez iterácie. Je možné si zvoliť pevný počet

iterácií alebo iterovanie zastaviť v prípade, že je splnená niektorá z vybraných ukončujúcich podmienok.

2.3.5 Detektor využívajúci rozvoj do Taylorovho radu

Ďalší z uvedených postupov [11] na určenie subpixelových súradníc je vhodný takisto len pre X -rohové body. Je zrejme, že hľadaná subpixelová pozícia musí byť v blízkom okolí nahrubo nájdeného rohového bodu. Pre každý X -roh sa môže použiť Taylorov polynóm druhého stupňa na opísanie profilu intenzity jasu a z neho použitím prvých derivácií (diferencií) získať rovnice, ktorých úpravou sa získajú hľadané hodnoty subpixelových posunov.

2.3.6 Detektor aproximujúci mapu rohovitosti kvadratickou plochou

Nasledujúca metóda [12] predpokladá preloženie mapy rohovitosti v bezprostrednom okolí ľubovoľného typu rohového bodu kvadratickou plochou uvedenou predpisom (2.3) a cieľom je určenie súradníc maxima (zodpovedá rohovému bodu) definovanej plochy.

$$h(x, y) = a \cdot x^2 + b \cdot x \cdot y + c \cdot y^2 + d \cdot x + e \cdot y + f \quad (2.3)$$

Za účelom zvýšenia robustnosti a stability algoritmu je možné hodnoty rohovitosti v okolí rohového bodu vyhladiť napríklad Gaussovým filtrom či prípadne inou oknovou funkciou.

2.3.7 Detektor aproximujúci mapu rohovitosti kvadratickou krivkou

Posledný detektor [13] pracuje na podobnom princípe ako predchádzajúci postup s tým rozdielom, že sa využije kvadratická krivka popísaná (2.4), ktorá sa aplikuje na body v okolí rohového bodu v horizontálnom a vertikálnom smere oddelene.

$$h(x) = a \cdot x^2 + b \cdot x + c \quad (2.4)$$

Z tohto dôvodu sa separátne určí x aj y subpixelová súradnica.

3 Vlastnosti subpixelovej detekcie

Obsahom tejto kapitoly je porovnanie vybraných subpixelových detektorov na základe určitých kritérií a tiež určenie hraničnej citlivosti subpixelovej detekcie v prípade jedného alebo viacerých obrazov. Vyšetrovaný je tiež vplyv bitovej hĺbky na samotnú subpixelovú detekciu.

3.1 Štúdia citlivosti subpixelovej detekcie rohových bodov

Obsahom kapitoly je analýza citlivosti subpixelovej detekcie rohových bodov [14]. Problémom v úvode bolo nájdenie vhodného polohovacieho zariadenia určeného na testovanie citlivosti detekcie. V prípade testovaných jednoduchších polohovacích zariadení určených na posúvanie v horizontálnom smere sa na základe vyhodnotenia získaných údajov zistilo, že z dôvodu výrobných nepresností vykonávajú posun nielen v požadovanom horizontálnom, ale aj vertikálnom smere (v menšej miere), čo ale bolo pre

samotný experiment nežiaduce. Preto na tento účel bolo nakoniec zvolené kvalitné polohovacie zariadenie s presnosťou polohovania približne 0,005 mm zobrazené na obr. 3.1 [15]. Na zariadenie sa pripojil obraz výseku šachovnice a boli nastavené rôzne posuny v horizontálnom smere (obr. 3.2). Následne sa urobila séria snímok pomocou kamery s vysokým rozlíšením a zisťovali sa subpixelové súradnice rohového bodu použitím Harris detektora (kapitola 2.3.1) pre každú jednu snímku zo série. V úvode sa pozícia rohového bodu určila tradičným Harris detektorom a následne sa okolo nájdených súradníc uvažovalo okolie 5×5 pixelov, pričom v rámci každého pixelu bolo bilineárnou interpoláciou získaných 1000×1000 subpixelových hodnôt intenzít jasu. Za týchto podmienok sa našli výsledné subpixelové súradnice. Boli zrealizované nezávislé experimenty s nasledovným priebehom: V rámci merania č. 1 bolo nasnímaných tridsať snímok pre prvé štyri pozície polohovacieho zariadenia a dvadsať snímok pre zvyšné dve pozície. Meranie č. 2 pozostávalo z tridsiatich snímok pre každú pozíciu (spolu desať pozícií). Získané dáta boli štatisticky analyzované a výsledky sa vyniesli do zodpovedajúcich grafov.

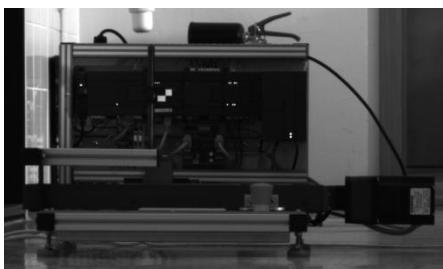


Obr. 3. 1 - Zvolené polohovacie zariadenie

Pre grafy uvedené na obr. 3.3 a 3.4 platí, že na os x sú vynášané pozície na posuvnom zariadení prepočítané na pixely a na osi y je hodnota horizontálnej súradnice nájdenej detektorom (v rámci výseku obrazu). Graf obsahuje štyri druhy hodnôt: A predstavuje aritmetický priemer zo všetkých hodnôt, ktoré sa získali pre každú z pozícií, B označuje maximálnu a minimálnu zo zistených súradníc pre každú pozíciu, C sú hranice $3s$ intervalov a D opisuje hranice $3s$ pre aritmetický priemer. Tento posledný typ sa určuje podľa (3.1):

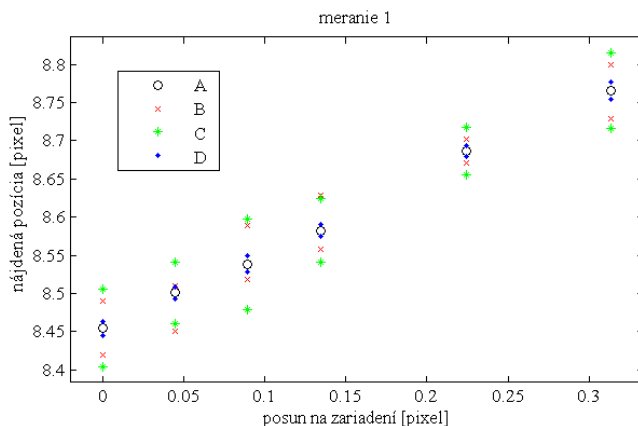
$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N(N-1)}} \quad (3.1)$$

kde N je počet rohových bodov, x_i je aktuálna hodnota a \bar{x} predstavuje aritmetický priemer. Symbol s označuje výberovú smerodajnú odchýlku, v tomto prípade pre aritmetický priemer.



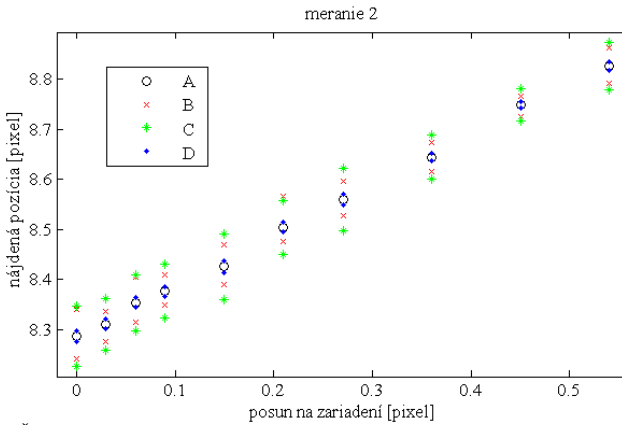
Obr. 3. 2 - Experiment s polohovacím zariadením a výškou šachovnice

Ak v uvedených grafoch porovnáme $3s$ hranice medzi jednotlivými pozíciami, je možné určiť najmenší posun nevyhnutný na spoľahlivé rozlíšenie dvoch rôznych pozícií detektorom. Ako je možné vidieť, vzdialenosť okolo 0,15 pixela je postačujúca. Znamená to, že ak urobíme snímku a potom posunieme šachovnicu o 0,15 pixela, Harris detektor dokáže rozoznať túto zmenu na intervale spoľahlivosti $3s$ (čo dáva 99,73% pravdepodobnosť správneho rozhodnutia). V prípade série snímok sa počíta aritmetický priemer \bar{x} získaných súradníc a na spoľahlivú detekciu zmeny (citlivosť metódy) je nevyhnutný posun okolo 0,03 pixela. Jedná sa o interval spoľahlivosti $3s$ určený pre aritmetický priemer.



Obr. 3. 3 - Štatistická analýza získaných horizontálnych súradníc pre experiment č. 1

V tabuľke 3.1 sú uvedené výberové smerodajné odchýlky súradníc počítané pre série zo všetkých dát. Priemerná hodnota s pre celé meranie je v rozmedzí 0,015 – 0,018 pixela.



Obr. 3. 4 - Štatistická analýza získaných horizontálnych súradníc pre experiment č. 2

Obe uvedené merania boli uskutočnené za štandardných svetelných podmienok a preto je za týchto podmienok významný vplyv meniacej sa intenzity jasu medzi jednotlivými snímkami a jednotlivými pozíciami polohovacieho zariadenia. Táto zmena sa odzrkadľuje na hodnotách počítaných výberových smerodajných odchýlok. V prípade statickej scény je možné získaním viacerých snímkov tieto zmeny úrovne jasu aspoň čiastočne eliminovať.

Tab. 3. 1 - Výberové smerodajné odchýlky pre každý posun oboch meraní

meranie 1		meranie 2	
<i>posun [pixel]</i>	<i>s [pixel]</i>	<i>posun [pixel]</i>	<i>s [pixel]</i>
0	0,0170	0	0,0200
0,0488	0,0135	0,0300	0,0174
0,0896	0,0197	0,0600	0,0187
0,1344	0,0138	0,0900	0,0180
0,2240	0,0105	0,1500	0,0221
0,3136	0,0166	0,2100	0,0180
\bar{s}	0,0152	0,2700	0,0208
		0,3600	0,0144
		0,4500	0,0105
		0,5400	0,0159
		\bar{s}	0,0176

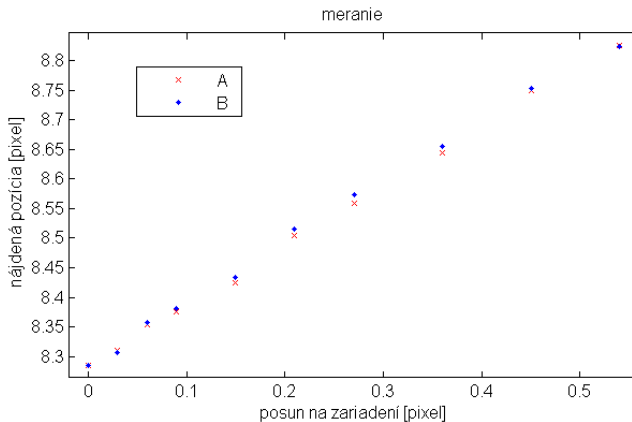
Oproti zrejším výhodám plynúcim z použitia zvoleného subpixelového detektora je ale na druhej strane praktická nevýhoda vo forme výrazne vysokej výpočtovej náročnosti.

3.2 Porovnanie metód vyhodnotenia subpixelových súradníc rohových bodov v prípade viacerých snímok tej istej scény

Ďalšia z analýz uvedených v tejto práci sa týka porovnania dvoch metód vyhodnotenia subpixelových súradníc rohových bodov v prípade statickej scény. Celý postup a výsledky sú tiež uvedené v [16]. Vyhodnocovali sa dáta merania č. 2 z experimentu popísaného v predchádzajúcej kapitole 3.1, ktoré pozostávali z tridsiatich snímok pre každý z posunov jedna až desať. To znamená, že podmienky subpixelovej detekcie zostali nezmenené. Výsledky sa stanovili nielen pre kompletný, ale aj orezaný (cenzurovaný) súbor dát.

Samotné porovnanie pozostáva z analýzy metód označených *A* a *B*. Podstatou metódy *A* je najskôr aplikovať detektor na každý z obrazov patriacich danej pozícii a potom štatisticky vyhodnotiť výsledky. Keďže sa jedná o viacero obrazov statickej scény, je možné určiť aritmetický priemer a výberovú smerodajnú odchýlku zistených súradníc. Metóda *B* je založená na priemerovaní hodnôt intenzít jasu v rámci obrazov spadajúcich do danej pozície a až na následnom použití detektora. Porovnanie týchto prístupov k detekcii je ilustrované v grafoch a uvedené v tabuľkách.

Na obr. 3.5 je ukázané porovnanie absolútnych *x*-ových súradníc detegovaných rohových bodov v prípade kompletného súboru dát. Označenie *A* v grafe predstavuje aritmetický priemer všetkých súradníc pre konkrétny posun použitím metódy *A*. Výsledky získané postupom *B*, teda úvodným priemerovaním hodnôt jasu, sú označené v grafe ako *B*. Ako je možné vidieť, medzi oboma postupmi nie je žiaden výraznejší rozdiel.



Obr. 3.5 - Horizontálne súradnice pre každý posun získané metódou *A* a *B*

Všetky dáta, ktoré boli získané a vypočítané, sú uvedené v tabuľke 3.2 a 3.3. Označenia *A* a *B* v záhlaví tabuľky hovoria o použitej metóde. Rozlišuje sa tiež kompletný a orezaný (cenzurovaný) súbor dát. V prípade orezaného súboru pre metódu *A* boli vylúčené extrémne hodnoty (10 maximálnych a 10 minimálnych z 30 celkových hodnôt) súradnic a ďalšie výpočty sa vykonali pre takto obmedzený súbor (10 hodnôt). Orezaný súbor pri metóde *B* pozostával z 10 hodnôt intenzít jasu pre každý pixel (10 obrazov), pričom 10 minimálnych a 10 maximálnych hodnôt intenzít jasu pochádzajúcich z celkových tridsiatich snímok bolo opäť vylúčených.

Tab. 3. 2 - Výsledky z kompletného a orezaného súboru dát získané metódou *A*

	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>
	<i>kompletné</i>	<i>kompletné</i>	<i>orezané</i>	<i>orezané</i>
<i>posun</i> [pixel]	<i>x</i> [pixel]	<i>s</i> [pixel]	<i>x</i> [pixel]	<i>s</i> [pixel]
0	8,2853	0,0200	8,2850	0,0053
0,03	8,3102	0,0174	8,3115	0,0070
0,06	8,3534	0,0187	8,3556	0,0032
0,09	8,3761	0,0180	8,3746	0,0084
0,15	8,4250	0,0221	8,4314	0,0099
0,21	8,5041	0,0180	8,5020	0,0048
0,27	8,5596	0,0208	8,5575	0,0057
0,36	8,6445	0,0144	8,6433	0,0032
0,45	8,7488	0,0105	8,7480	0,0042
0,54	8,8266	0,0159	8,8250	0,0048
\bar{s}		0,0176		0,0057

Tab. 3. 3 - Výsledky z kompletného a orezaného súboru dát získané metódou *B*

	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>
	<i>kompletné</i>	<i>kompletné</i>	<i>orezané</i>	<i>orezané</i>
<i>posun</i> [pixel]	<i>x</i> [pixel]	<i>s</i> [pixel]	<i>x</i> [pixel]	<i>s</i> [pixel]
0	8,2840	0,0076	8,2820	0,0014
0,03	8,3063	0,0089	8,3070	0,0016
0,06	8,3556	0,0039	8,3570	0,0019
0,09	8,3803	0,0053	8,3806	0,0018
0,15	8,4333	0,0042	8,4333	0,0012
0,21	8,5156	0,0041	8,5152	0,0013
0,27	8,5728	0,0042	8,5735	0,0011
0,36	8,6552	0,0030	8,6540	0,0011
0,45	8,7528	0,0043	8,7512	0,0008
0,54	8,8240	0,0051	8,8220	0,0013
\bar{s}		0,0051		0,0014

Pre stanovenie hodnôt výberových smerodajných odchýlok s v postupe B sa generoval náhodný výber piatich hodnôt zodpovedajúcich si intenzit jasu z kompletného a orezaného súboru dát pre každý pixel z bezprostredného okolia rohového bodu (najmenej 5×5 pixelov v rámci ktorých operoval subpixelový detektor). Týchto päť hodnôt sa spriemerovalo a výsledná hodnota sa umiestnila do novovzniknutej mapy pixelov (výseku obrazu). Našli sa subpixelové súradnice rohového bodu a celý postup sa pre každé posunutie zariadenia zopakoval šesťkrát. Zo získaných hodnôt sa vypočítali príslušné výberové smerodajné odchýlky.

V prípade postupu A je priemerná hodnota s približne 0,018 pixela pre kompletné dáta a okolo 0,006 pixela pre dáta orezané. Pre postup B sú tieto hodnoty cca trikrát nižšie. Porovnaním hodnôt s sa najlepšie javí kombinácia postupu B a orezaného súboru dát.

Pretože hodnota rozoznateľnej zmeny v prípade postupu A bola určená na 0,03 pixela (kapitola 3.1) a hodnoty \bar{s} predstavujú pre postup A a postup B 0,0176 respektíve 0,0051 pixela (pomer približne 3:1), je možné odhadnúť hodnotu rozoznateľnej zmeny pri postupe B na 0,01 pixela (tretina z hodnoty vzťahnutej k postupu A).

Rozdiely medzi oboma skúmanými postupmi nie sú výrazné a oba sú vhodné na použitie aj pri presných meraniach. Výhodou postupu B je ale podstatne nižšia výpočtová náročnosť, čo je pri praktickej aplikácii veľká výhoda.

4 Porovnanie subpixelových detektorov na vybraných aplikáciách z oblasti počítačového videnia

Obsahom tejto kapitoly bude opäť porovnanie subpixelovej a pixelovej detekcie na základe ich aplikácie vo vybraných oblastiach počítačového videnia.

4.1 Vplyv subpixelovej detekcie na určenie posunu medzi dvoma kamerami použitím obrazového stereopáru

Experimentom opísaným v tejto kapitole je porovnanie vybraných detektorov aplikovaných na úlohu určenia posunu medzi dvoma kamerami za použitia obrazového stereopáru. Teória popisujúca túto oblasť je obsiahnutá v druhej kapitole dizertačnej práce.

Pre popisovanú situáciu platí, že v úvodnom kroku je vyhotovená snímka vybranej scény a následne sa pozícia kamery zmení (rotácia a translácia medzi jednotlivými polohami). Získa sa ďalšia snímka obsahujúca aspoň časť tej istej scény a výsledkom je získanie veľkosti vzájomného posunu v SI jednotkách.

Z tohto dôvodu a za týmto cieľom bol navrhnutý vlastný postup, pričom celý proces určenia posunu pozostáva z viacerých čiastkových úloh a je vysvetlený aj v [17].

Vo všeobecnosti sú jednotlivé navrhované kroky nasledovné:

1. kalibrácia kamery [18]
2. detekcia význačných číť a ich párovanie [19]
3. odstránenie deformácie obrazu [20]
4. stanovenie esenciálnej matice [21]
5. dekompozícia esenciálnej matice [22]
6. rektifikácia oboch obrazov stereopáru [23]
7. určenie disparity [24]

Na test bola použitá kamera *Sony DSC F707* s kvalitnou *Carl Zeiss* optikou. Kalibrácia kamery bola uskutočnená za použitia kalibračného toolboxu **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.** určeného pre prostredie *Matlab* [26] a z dôvodu presnejších výsledkov bola vykonaná viackrát (vždy 20 obrazov kalibračnej šachovnice s rôznou vzdialenosťou a natočením). Ukážka z procesu kalibrácie je na obr. 4.1. Výstupom bola intrinsická matica obsahujúca vnútorné parametre kamery spolu s koeficientami deformácie (radiálne a tangenciálne). Vytvorilo sa viacero snímok rovnakej scény (3 šachovnice) líšiacich sa rôznym vzájomným natočením a posunutím a z ktorých na testovanie bola vybraná vždy dvojica. Proces získavania snímok je zobrazený na obr. 4.2.



Obr. 4. 1 - Kalibrácia použitej kamery

Na realizovanie ostatných častí opisovaného postupu sa vytvoril zdrojový kód v programovacom jazyku *C++* za čiastočného využitia *OpenCV* knižnice [27]. V oboch testovaných obrazoch (transformovaných na šedotónové) stereopáru boli detegované *X*-rohové body a tie boli za pomoci algoritmu *SIFT*

(získanie matice homografie) spárované do korešpondujúcich dvojíc (využitím RANSAC [28] algoritmu). Na detekciu sa použil Harris detektor a za subpixelové detektory to bol detektor využívajúci ortogonálnosť vektorov a iterácie z kapitoly 2.3.4 (*subpixel A*) a detektor aproximujúci profil rohovitosti krivkou z kapitoly 2.3.7 (*subpixel B*). Príklad korešpondencií nájdených bodov medzi oboma obrazmi je na obr. 4.3.

K dispozícii boli teda dve sady korešpondujúcich rohových bodov z oboch obrazov. Keďže ale tieto súradnice boli ovplyvnené deformáciou kamery, bolo ju nevyhnutné odstrániť využitím koeficientov deformácie získaných pri kalibrácii kamery. Z takto upravených súradníc bodov je už možné určiť fundamentálnu maticu [29], v našom prípade sa použil *8-bodový* algoritmus. Využitím intrinsickej matice sa z fundamentálnej matice získala matica esenciálna a tá bola pomocou *SVD* rozkladu [30] dekomponovaná na rotačnú maticu a translačný vektor. Na získanie správnej kombinácie *R* matice a *t* vektora je body potrebné lineárne triangulovať [31] do *3D* priestoru. Po opätovnej projekcii takýchto *3D* bodov naspäť do *2D* roviny je možné stanoviť vzhľadom na pôvodnú sadu bodov reprojekčnú chybu [32] ako veľmi časté kritérium kvality *3D* rekonštrukcie.



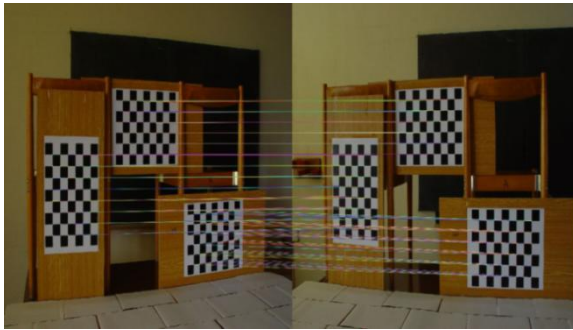
Obr. 4. 2 - Získavanie snímok použitých v experimente

Platí, že takýmto spôsobom je možné získať len relatívne prvky vzájomného translačného vektora (jednotkový smerový vektor). Preto bolo potrebné rektifikovať vyšetrovaný stereopár čo v našom prípade znamenalo aplikovať transformáciu rotačnou homografiou [33] na základe nájdených rektifikačných matíc pre obe sady súradníc. Pre takto upravené body je možné

použiť vlastnosti vyplývajúce z teórie okolo disparity v rámci obrazového stereopáru, ktoré popisuje vzťah (4.1).

$$\frac{b}{Z} = \frac{b + x_r - x_l}{Z - f} \Rightarrow d = x_l - x_r = \frac{f \cdot B}{Z} \quad (4.1)$$

V použitom predpise figurovali v dôvodu použitého postupu dve neznáme – báza (hľadaný posun, translácia) B a $3D$ hĺbka Z , pričom hodnota disparity d a ohniskovej vzdialenosti f boli známe. Bolo teda nevyhnutné zahrnúť aj apriórnu informáciu o hĺbke vyšetrovaných bodov a na základe toho už bolo možné určiť posun medzi oboma polohami kamery. Z každej dvojice zodpovedajúcich rohových bodov sa určí vlastná hodnota translácie a tie je potom možné vhodne štatisticky upraviť.



Obr. 4. 3 - Nájdené korešpondencie medzi oboma obrazmi stereopáru

Ak by sa uvedený postup použil na účely navigácie alebo komplexnejšieho určenia polohy či prejdenej trajektórie, vstupná informácie o hĺbke zvolených spracovávaných význačných črt by sa musela zadať len na začiatku v prvom kroku (v prvom stereopáre). Ako by sa mobilná jednotka pohybovala prostredím ďalej, snímky vytvorené kamerou by vytvárali ďalšie stereopáry a v rámci nich by už bolo možné priebežne určiť hĺbkové parametre scény z predchádzajúcich hodnôt aj bez znalosti iných apriórnych informácií.

Špecifikácia samotného prevedenia experimentu je nasledovná: Na detekciu rohových bodov boli použité už spomínané detekčné algoritmy. Algoritmus A je priamo určený na detekciu X -rohových bodov a algoritmus B je možné aplikovať na akékoľvek typy rohových bodov. Navyše je výpočtovo nenáročný (možné použitie v reálnom čase) a v porovnaní s postupom založenom na aproximácii kvadratickou plochou je aj oveľa stabilnejší (nájdené subpixelové súradnice sú takmer vždy v rámci považovaného okolia). Originálne rozlíšenie nadobudnutých snímok bolo 2560×1920 pixelov a pri tomto rozlíšení bola kamera aj kalibrovaná. Z dôvodu širšej analýzy boli

dodatočne podvzorkovaním vyhotovené tiež snímky s rozlíšením 1280×960 a 640×480 pixelov. Adekvátne tomu boli upravené aj zodpovedajúce intrinsické matice vnútorných parametrov (koeficienty deformácie sa zmenou rozlíšenia nemenia). Testovali sa dvojice obrazov s rôznym vzájomným posunutím a natočením, konkrétne 7 dvojíc pre posuny 20, 30 a 40 cm, 5 dvojíc pre 50, 60 a 70 cm a napokon 3 dvojice pre 80, 90 a 100 cm posuny.

Na úvodné vyhladenie obrazu sa použilo Gaussovo okno o veľkosti 3×3 prvky ($\sigma = 0,7$) a bolo tiež použité na vyhladenie mapy rohovitosti získanej Harris detektorom. Pri určovaní polohy bodov sa v prípade algoritmu *A* bralo do úvahy okolie 7×7 pixelov okolo pôvodne nájdeného rohového bodu s pixelovými súradnicami a u algoritmu *B* to bolo okolie 5×5 prvkov z mapy rohovitosti. Ak sa subpixelové súradnice v horizontálnom alebo vertikálnom smere líšili od tých pixelových o viac ako 2 pixely, nebol takýto bod v ďalších krokoch už zahrnutý.

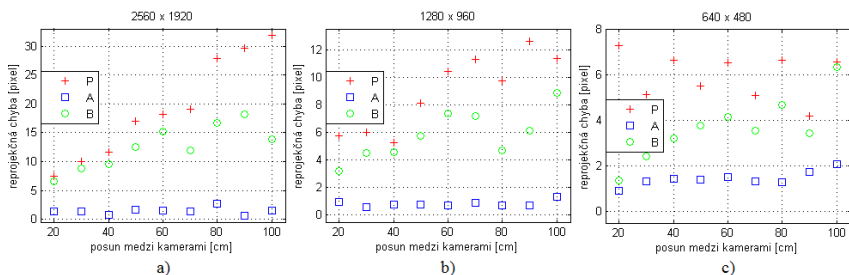
Zo 144 obvykle detegovaných *X*-rohových bodov (3 šachovnice po 48 bodov) bolo vybraných 12 bodov (4 z každej šachovnice), z ktorých sa určila fundamentálna matica (preurčený systém 12 rovníc o 8 neznámých) a celý postup pokračoval už opisovaným spôsobom. V prípade už rektifikovaných súradníc rohových bodov pre oba obrazy stereopáru sa napokon vybralo 9 dvojíc (3 pre každú šachovnicu) a tým sa priradila informácia o veľkosti hĺbkovej súradnice. Vzniklo tak 9 výsledkov určenia vzájomného posunu a tie boli za účelom spresnenia spriemerované.

4.2 Porovnanie testovaných detektorov z hľadiska reprojekčných chýb

Prvým vyhodnotením výstupov z experimentu bolo porovnanie testovaných detektorov kritériom reprojekčnej chyby. Platilo, že všetky detegované *X*-rohové body boli triangulované použitím zistenej *R* matice a *t* vektora do *3D* priestoru a spätne premietnuté do *2D* roviny oboch obrazov stereopáru. Pre každý takýto pár zodpovedajúcich bodov v rámci jednej obrazovej roviny sa určila Euklidova vzdialenosť a následne celková spolu s priemernou reprojekčnou chybou. Priemerné reprojekčné chyby z oboch obrazov sa ešte spriemerovali a získané hodnoty sú uvedené v tabuľke 4.1. Pre lepšiu vizualizáciu sú tieto hodnoty ilustrované aj na obr. 4.4.

Jednotlivé detektory sú v grafe aj tabuľke (aj tých nasledovných) označené ako *P* pre Harris detektor a *A* s *B* pre subpixelové algoritmy so zodpovedajúcim označením definovaným v úvode kapitoly. Situáciu charakterizujú aj uvedené priemerné hodnoty chýb stanovené zo všetkých posunov v rámci daného rozlíšenia. Ako je možné z grafu a tabuľky vidieť, reprojekčné chyby pre všetky testované posuny a rozlíšenia sú v prípade subpixelových detektorov výrazne lepšie ako je tomu v prípade pixelovej detekcie. V prípade algoritmu *A* a pôvodného Harris detektora sú rozdiely

dokonca priepastné. Vysvetlením môže byť fakt, že detektor *A* je vhodný výhradne na detekciu *X*-rokových bodov. Zaujímavo vyznejú aj výsledky porovnania *P* a *B* detektorov, nakoľko oba priamo pracujú s rovnakou mapou rohovitosti aj napriek tomu *B* algoritmus poskytuje podstatne lepšie výsledky. Podľa predpokladu reprojekčná chyba klesá spolu s rozlíšením pre *P* a *B*, u postupu *A* sú hodnoty vo všetkých prípadoch porovnateľne nízke.



Obr. 4. 4 - Výsledky reprojekčných chýb porovnaných algoritmov

Tab. 4. 1 - Reprojekčná chyba jednotlivých použitých postupov v závislosti od testovaných parametrov

posun [cm]	reprojekčná chyba [pixel]								
	2560×1920			1280×960			640×480		
	<i>P</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>P</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>P</i>	<i>A</i>	<i>B</i>
20	7,54	1,43	6,62	5,75	0,98	3,18	7,29	0,92	1,37
30	9,95	1,42	8,79	6,02	0,59	4,52	5,16	1,32	2,43
40	11,65	0,80	9,49	5,28	0,80	4,60	6,66	1,44	3,22
50	16,95	1,66	12,59	8,13	0,79	5,76	5,51	1,42	3,80
60	18,23	1,47	15,25	10,39	0,71	7,39	6,56	1,54	4,15
70	19,11	1,30	11,97	11,27	0,89	7,21	5,12	1,33	3,58
80	27,90	2,77	16,71	9,72	0,69	4,67	6,66	1,29	4,68
90	29,59	0,61	18,16	12,61	0,73	6,10	4,19	1,76	3,44
100	31,83	1,45	13,80	11,37	1,32	8,88	6,58	2,10	6,34
\bar{x}	19,19	1,43	12,60	8,95	0,83	5,81	5,97	1,46	3,67

Záver z tohto porovnania teda jednoznačne potvrdzuje výhodnosť aplikácie subpixelových detektorov z hľadiska kritéria reprojekčnej chyby.

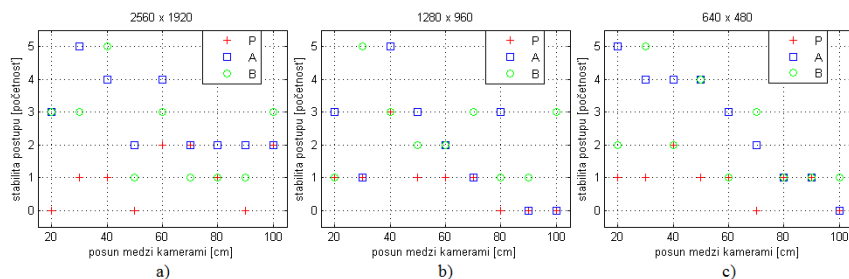
4.2.1 Porovnanie testovaných detektorov z hľadiska stability opisovaného postupu

Druhou zo získaných výstupov vyhodnocovanou kvantitou bola stabilita navrhovaného postupu určovania vzájomného posunu pri zapojení porovnaných detektorov, pričom výsledky boli publikované v [34]. Keďže prezentovaný spôsob kvantifikovania posunutia kamery je súborom matematických procesov a algoritmov, je možné získať výsledok bez ohľadu

na to do akej miery je možný či reálny. Preto bol navrhnutý vlastný filter na odlišenie kedy sú výsledky akceptovateľné a kedy nie.

Prvým kritériom bol počet správne triangulovaných 3D rohových bodov. Kontrolovalo sa či pre všetky triangulované body (častokrát 144) platí, že ich hĺbková Z súradnica je kladná v pohľadoch oboch kamier. Ak to neplatilo, aktuálne testovaný stereopár bol zamietnutý.

Druhým kritériom bola mimoriadne veľká odchýlka medzi skutočnou a zistenou hodnotou posunu. Pre každú dvojicu obrazov sa získalo 9 výsledkov (disparita pre 3 dvojice bodov z každej šachovnice) s hodnotami hľadaného posunutia, a keďže skutočné hodnoty translácie boli známe, stačilo aby sa zistené hodnoty aspoň jednej z deviatich dvojíc odlišovali od tých skutočných o viac ako 50% v oboch smeroch a celý testovaný stereopár bol zamietnutý.



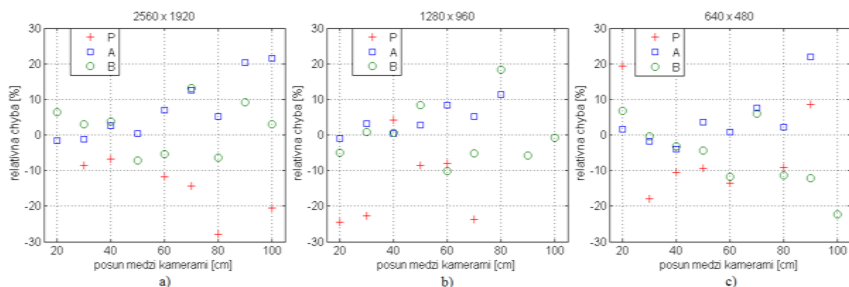
Obr. 4. 5 - Stabilita testovaného postupu

Tab. 4. 2 - Výsledky analýzy testu stability pre porovnávané algoritmy

posun [cm]	stabilita postupu [početnosť]								
	2560×1920			1280×960			640×480		
	P	A	B	P	A	B	P	A	B
20	0	3	3	1	3	1	1	5	2
30	1	5	3	1	1	5	1	4	5
40	1	4	5	3	5	3	2	4	2
50	0	2	1	1	3	2	1	4	4
60	2	4	3	1	2	2	1	3	1
70	2	2	1	1	1	3	0	2	3
80	1	2	1	0	3	1	1	1	1
90	0	2	1	0	0	1	1	1	1
100	2	2	3	0	0	3	0	0	1
Σ	9	26	21	8	18	21	8	24	20

Výsledky takto overovanej stability postupu pri zapojení testovaných detektorov sú uvedené v tabuľke 4.2 a graficky zobrazené aj na obr. 4.5. Z počtu vyhodnocovaných dvojíc obrazov pre dané posunutie vyplýva, že pre prvé tri posunutia sa mohlo získať maximálne 7, pre ďalšie tri maximálne 5 a pre posledné tri posuny maximálne 3 akceptovateľné výsledky.

Z uvedených výsledkov je zrejmé, že subpixelové detektory boli v porovnaní s tým pixelovým úspešnejšie minimálne dva až trikrát. Samotné algoritmy *A* a *B* dosiahli približne rovnaké hodnoty úspešnosti. Je teda jasne ukázaný výrazne pozitívny vplyv subpixelovej detekcie na robustnosť testovaného postupu určovania vzájomného posunu kamery v rámci stereopáru.



Obr. 4. 6 – Priemerné relatívne chyby nájdených posunov

Tab. 4. 3 – Priemerné relatívne chyby v prípade nájdených posunutí

posun [cm]	relatívna chyba [%]								
	2560×1920			1280×960			640×480		
	<i>P</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>P</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>P</i>	<i>A</i>	<i>B</i>
20	---	-1,54	6,31	-24,43	-0,99	-5,06	19,24	1,50	6,86
30	-8,64	-1,12	2,96	-22,66	3,21	0,87	-17,94	-1,88	-0,42
40	-6,70	2,59	3,86	4,27	0,39	0,50	-10,61	-4,06	-3,26
50	---	0,41	-7,27	-8,55	2,82	8,44	-9,27	3,52	-4,46
60	-11,78	6,90	-5,43	-8,05	8,37	-10,10	-13,64	0,70	-11,79
70	-14,42	12,54	13,18	-23,75	5,20	-5,17	---	7,57	5,99
80	-27,99	5,12	-6,33	---	11,46	18,42	-9,09	2,24	-11,42
90	---	20,28	9,16	---	---	-5,88	8,54	22,01	-12,09
100	-20,59	21,48	3,07	---	---	-0,70	---	---	-22,37

V rámci testu boli porovnávané aj relatívne chyby nájdených hodnôt posunov (translácií) vzhľadom na tie skutočné podľa vzťahu (4.2):

$$\delta_B = \frac{B' - B}{B} \cdot 100 \quad (4.2)$$

kde B' predstavuje získanú hodnotu použitím uvedeného postupu.

Výsledky sú zobrazené na obr. 4.6 a vypísané v tabuľke 4.2. V prípade že je v tabuľke uvedený znak "---", znamená to že z dôvodu nedostatku dát (problém robustnosti) nemohli byť relatívne chyby určené. Pri viacerých získaných hodnotách pre daný posun a rozlíšenie boli výsledky priemerované.

Je vidieť lepšie výsledky (nižšie relatívne chyby) subpixelových detektorov čo opäť potvrdzuje oprávnenosť a výhodnosť použitia subpixelovej detekcie.

5 Zhodnotenie a hlavný prínos dizertačnej práce

5.1 Zhodnotenie dizertačnej práce

Cieľom dizertačnej práce bolo poskytnúť komplexný pohľad na problematiku detekcie rohových bodov s dôrazom na súčasne známe možnosti a postupy z oblasti detekcie so subpixelovou presnosťou. Boli skúmané vlastnosti subpixelových detektorov a subpixelovej detekcie pričom zámerom bolo overiť ich výhody respektíve nevýhody oproti tradičnej detekcii s pixelovým rozlíšením. Na tento účel boli zrealizované zodpovedajúce experimenty.

Uvedená práca sa svojim obsahom delí na štyri základné časti, ktorým zodpovedajú príslušné kapitoly. Kapitola 1 obsahuje prehľad v oblasti detekcie rohových bodov s pixelovým ale aj subpixelovým rozlíšením (informatívne aj ohľadom detekcie hrán) a výber zo súčasných postupov a algoritmov.

Náplňou kapitoly 2 sú vybrané časti teórie z oblasti triangulácie použitím obrazového stereopáru. Tieto informácie poslúžili neskôr ako základ na experimenty uvedené v kapitole 4.

Kapitola 3 sa zaoberá analýzou zvolenej metódy subpixelovej detekcie rohových bodov predovšetkým pre vybrané faktory ovplyvňujúce presnosť a citlivosť odhadu súradníc v obraze.

Kapitolu 4 tvoria porovnanie vybraných algoritmov subpixelovej a pixelovej detekcie za realizácie experimentov vychádzajúcich z kapitoly 2. Dôraz sa kladol na určenie reálneho posunu medzi dvoma polohami kamery v rámci stereopáru.

Nadobudnuté výsledky jasne preukazujú význam a výhodnosť použitia subpixelovej detekcie pri použitých experimentoch v laboratórnych podmienkach.

5.2 Hlavný prínos dizertačnej práce a možná využiteľnosť v praxi

Na základe navrhnutých experimentov, spracovaných dát a nadobudnutých výsledkov boli získané nasledovné poznatky a z nich odvodené prínosy predloženej práce:

- 1.** Návrh metodiky experimentálneho stanovenia citlivosti subpixelového detektora bez kalibrácie kamery. V prípade priemyselných kamier a štandardných svetelných podmienok boli štatisticky významné detegovateľné zmeny polohy terčika prepočítané na pixely v obraze. Pre jednu snímku bola zistená štatisticky významná detegovateľná zmena polohy 0,15 pixela.

2. Významným faktorom pre zmenšenie hodnoty detegovateľného posunu je použitie viacerých snímkov pri nezmenenej polohe terčika. Hodnota štatisticky významnej zmeny polohy klesla 5-krát (0,03 pixela) pre sériu 20 respektíve 30 snímkov (postup A).
3. Hypotéza, že významným faktorom ktorý ovplyvňuje citlivosť detegovateľnej zmeny polohy je premenlivosť jasových úrovní v okolí obrazu rohového bodu, ktorá má náhodný charakter, sa potvrdila experimentom, kedy sa poloha rohového bodu stanovila z jednej snímky, ktorá bola vytvorená priemerovaním jasových úrovní pre pixely s rovnakou pozíciou v obraze zo série obrazov (postup B). Hodnota rozoznateľnej zmeny dosiahla pre tú istú sériu snímkov hodnotu odhadom 0,01 pixela.
4. Význam uvedeného poznatku spočíva v tom, že postup založený na priemerovaní jasových úrovní a následnom stanovení súradníc rohového bodu je podstatne výpočtovo menej náročný pri približne 3-krát vyššej citlivosti detekcie zmeny polohy, respektíve citlivosti stanovenia súradníc rohového bodu v obraze.
5. Použitie orezaného (cenzurovaného) súboru v prípade oboch postupov A a B vykazuje zníženie hodnôt výberových smerodajných odchýlok približne na tretinu v porovnaní so všetkými dátami má priamy vplyv aj na citlivosť detekcie zmeny polohy.
6. Odchýlky v hodnotách súradníc so znižovaním bitovej hĺbky v rozsahu od 8 do 6 bitov sa ukázali ako nevýznamné. Z uvedeného faktu je možné usudzovať, že sa dajú dosiahnuť porovnateľné výsledky pri násobne vyššom kroku kvantovania jasovej úrovne, ktoré budú závislé od podielu šumu v obraze. Prakticky je možné pracovať s z hľadiska počtu bitov menším objemom dát (možná kompresia dát), na druhej strane citlivosť detektorov závisí od veľkosti jasových zmien v okolí obrazu rohového bodu. Dá sa očakávať zhoršenie detegovateľnosti rohových bodov pri menej výrazných jasových zmenách, kvantifikácia prahu detegovateľnosti nebola skúmaná.
7. Pri praktickej realizácii kvantifikácie zmeny polohy kamery vypočítanej zo sekvencie snímkov v laboratórnych podmienkach bol štatistickými metódami potvrdený fakt, že použitie odhadu súradníc rohových bodov subpixelovým detektorom oproti

detektorom s pixelovým rozlíšením zvyšuje presnosť aj robustnosť procedúr potrebných na stanovenie relatívnej zmeny polohy kamery pre čiastkové fázy výpočtu, ako napríklad určenie matíc homografie medzi snímkami, kalibrácii vnútorných parametrov kamery, a najmä pri porovnaní priemerných hodnôt relatívnych chýb odhadovaných posunov (translácií) voči správnym hodnotám posunov. Uvedený poznatok neplatí pre reálnu scénu všeobecne. Dôležitou podmienkou, kedy subpixelové detektory poskytujú lepšie výsledky je predpoklad, že rohové body sú vo vnútri rovinných útvarov, to znamená že ideálny obraz rohového bodu zodpovedá tomu istému bodu scény (je invariálny voči posunu a natočeniu kamery).

Využitelnosť predostrenej dizertačnej práce v praxi priamo súvisí s uvedenými získanými poznatkami. Ako už bolo viackrát spomínané, zvýšenie rozlišovacej schopnosti detekcie rohových bodov má významný vplyv vo veľkom počte aplikácií z oblasti spracovania obrazu či počítačového videnia.

Použitá literatúra

- [1] Maini, R., Aggarwal, H., „Study and Comparison of Various Image Edge Detection Techniques“, 2009, International Journal of Image Processing (IJIP), s. 1 – 11.
- [2] Parks, D., Gravel, J. P., „Corner detection“, s. 1 – 3 [cit. 2012-12-01]. Dostupné na internete: http://ftp.utcluj.ro/pub/users/nedeveschi/AV/3_CornerDetectors/CornerDetection.pdf
- [3] Harris, Ch., Stephens, M., „A Combined Corner and Edge Detectors“, 1988, In Alvey Vision Conference, s. 147 – 152.
- [4] Chuang, Y., „Features“, 2007, Digital Visual Effects, s. 2 – 4.
- [5] Smith, S. M., Brady, J. M., „SUSAN – A New Approach to Low Level Image Processing“, 1997, International Journal of Computer Vision, s. 45 – 78.
- [6] Parks, D., Gravel, J. P., „Trajkovic operator (4-Neighbours)“ [cit. 2012-12-01]. Dostupné na internete: <http://kiwi.cs.dal.ca/~dparks/CornerDetection/trajkovic.htm>
- [7] Sinha, U., „Subpixel Corners – Increasing accuracy“, 2010 [cit. 2012-12-01]. Dostupné na internete: <http://www.aishack.in/2010/05/subpixel-corners-increasing-accuracy/>
- [8] Haralick, R. M., Shapiro, L. G., 1993, „Computer and Robot Vision“, Addison-Wesley, s. 332 – 347, ISBN 0-201-56943-4.
- [9] Lucchese, L., Mitra, S. K., „Using Saddle Points for Subpixel Feature Detection in Camera Calibration Targets“, 2002, Circuits and Systems, APPCCAS 2002 Asia-Pacific Conference, s. 191 – 195.
- [10] Weixing, Z., Changhua, M., Libing, X., Xincheng, L., „A Fast and Accurate Algorithm for Chessboard Corner Detection“, 2009, Image and Signal Processing, CISP '09 2nd International Congress on, s. 1 – 5.
- [11] Chen, D., Zhang, G., „A new sub-pixel detector for X-corners in camera calibration targets“, 2005, In WSCG, s. 97 – 100.
- [12] Brown, M., Szeliski, R., Winder, S., „Multi-image matching using multi-scale oriented patches“, 2005, International conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), IEEE Computer Society Conference on, s. 510 – 517.
- [13] Rea, M., Mc. Robbea, D., Elhawary, D., Tse, Z., Lamperth, M., Young, I., „Sub-pixel localization of passive micro-coil fiducial markers in interventional MRI“, 2009, Magnetic

- Resonance Materials In Physics, Biology and Medicine (MAGMA), s. 71 – 76.
- [14] Sroba, L., Ravas, R., „Sensitivity of Subpixel Corner Detection“, 2012, 23rd DAAAM International Symposium, s. 0743 – 0746.
- [15] Juhas, M., „Mikropolohovací stól s krokovým pohonom: technická správa“, 2012, Bratislava: STU, s. 1 – 136.
- [16] Sroba, L., Ravas, R., „Comparison of 2 various approaches to determine subpixel coordinates of corner point in static scene“, 2012, 2nd Theoretical and Applied Aspects of Cybernetics, s. 181 – 185, ISBN 978-966-399-447-5.
- [17] Sroba, L., Ravas, R., Smiesko, V., „Determination of displacement between two cameras using corresponding image stereo pair“, 2014, ELITECH 16th Conference of Doctoral Students, ISBN 978-80-227-4171-2.
- [18] Brown, D. C., „Close-Range Camera Calibration“, 1971, Photogrammetric Eng. Vol. 37, s. 855 – 866.
- [19] OpenCV documentation, „Introduction to SIFT (Scale-Invariant Feature Transform)“ [cit. 2014-09-01]. Dostupné na internete: http://docs.opencv.org/trunk/doc/py_tutorials/py_feature2d/py_sift_intro/py_sift_intro.html
- [20] Brown, D. C., „Decentering distortion of lenses“, 1966, Photogrammetric Eng. Vol. 32, s. 444 – 462.
- [21] Longuet-Higgins, H. C., „A Computer Algorithm for Reconstructing A Scene from Two Projections“, 1981, Nature vol. 293, s. 133 – 135.
- [22] Wei, W., Tsui, H. T., „A SVD Decomposition of Essential Matrix with Eight Solutions for the Relative Positions of Two Perspective Cameras“, 2000, Pattern Recognition 2000. Proceedings, 15th International Conference on, s. 161 – 195.
- [23] Fusiello, A., Trucco, E., Verri, A., „A compact algorithm for rectification of stereo pairs“, 2000, Machine Vision and Applications 2000, s. 94 – 96.
- [24] Navab, N., Unger, Ch., „Rectification and Disparity“, Computer Aided Medical Procedures, Technical University of Munich [cit. 2014-09-01]. Dostupné na internete: http://campar.in.tum.de/twiki/pub/Chair/TeachingWs10Cv2/3D_CV2_WS_2010_Rectification_Disparity.pdf
- [25] Bouguet, Jean-Yves, „Camera Calibration Toolbox for Matlab“, Computational Vision at Caltech [cit. 2014-9-01]. Dostupné na internete: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/
- [26] Výpočtové prostredie Matrix Laboratory (Matlab) [cit. 2012-12-01]. Dostupné na internete: <http://www.mathworks.com/>
- [27] OpenCV Open Source Computer Vision [cit. 2014-9-01]. Dostupné na internete: <http://opencv.org/>
- [28] Haladova, Z., „RANSAC“, Cvičenia z Počítačového Videnia 2 [cit. 2014-09-01]. Dostupné na internete: <http://www.sceg.sk/~haladova/PV2Ransac.pdf>
- [29] Luong, Q. T., Fauregas, O. D., „The Fundamental matrix: theory, algorithms, and stability analysis“, 1995, International Journal of Computer Vision (IJCV), s. 42 – 75.
- [30] Ientilucci, E. J., „Using the Singular Value Decomposition“, 2003, Chester F. Carlson Center for Imaging Science, Rochester Institute of Technology, Technická správa [cit. 2014-09-01]. Dostupné na internete: <http://astro.rit.edu/~ejipci/Reports/svd.pdf>
- [31] Hartley, R., Zisserman, A., „Multiple View Geometry in Computer Vision“, 2003, Cambridge University Press, s. 312 – 313, ISBN 0-521-54051-8.
- [32] Hartley, R., Zisserman, A., „Multiple View Geometry in Computer Vision“, 2003, Cambridge University Press, s. 94 – 96, ISBN 0-521-54051-8.
- [33] Beneda, M., „Homografie a epipolarní geometrie“, Trilobit [cit. 2014-09-01]. Dostupné na internete: <https://trilobit.fai.utb.cz/homografie-a-epipolarni-geometrie>
- [34] Sroba, L., Ravas, R., Grman, J., „The influence of subpixel corner detection to determine the displacement between two cameras using image stereo pair“, 2014, 25th DAAAM International Symposium (in press).

Publikácie autora

ADE Vedecké práce v zahraničných nekarentovaných časopisoch

- ADE1** Hopp, Torsten – Šroba, Lukáš - et al: Breast imaging with 3D ultrasound computer tomography: results of a first in-vivo study in comparison to MRI images. In: 12th International Workshop on Breast Imaging, IWDM 2014, Gifu City, Japan, June 29 - July 2, 2014, Breast Imaging, Springer. - ISBN 978-3-319-07886-1. - S. 72-79
- ADE2** Šroba, Lukáš – Ravas, Rudolf: Impact of Subpixel Paradigm on Determination of 3D Position from 2D Image Pair. In: ITHEA International Journal "Information Content and Processing" IJ ICIP: Volume 1, Number 2, 2014. - ISSN 2367-5152. - S. 162-169

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- AFC1** Šroba, Lukáš – Ravas, Rudolf: Comparison of 2 Various Approaches to Determine Subpixel Coordinates of Corner Point in Static Scene. In: Theoretical and Applied Aspects of Cybernetics : 2nd International Scientific Conference of Students and Young Scientists. Kyiv, Ukraine, November 12-16, 2012. - Kyiv : Bukrek, 2012. - ISBN 978-966-399-447-5. - S. 181-185
- AFC2** Šroba, Lukáš – Ravas, Rudolf: Impact of Subpixel Paradigm on Determination of 3D Position from 2D Image Pair. In: Theoretical and Applied Aspects of Cybernetics : 3rd International Scientific Conference of Students and Young Scientists. Kyiv, Ukraine, November 25-29, 2013. - Kyiv : Bukrek, 2013. - ISBN 978-966-399-538-0. - S. 249-257
- AFC3** Šroba, Lukáš – Ravas, Rudolf: Sensitivity of Subpixel Corner Detection. In: Annals of DAAAM and Proceedings of DAAAM Symposium. - ISSN 1726-9679. - Vol. 23, No. 1 Annals of DAAAM for 2012 & Proceedings of the 23rd International DAAAM Symposium [elektronický zdroj] : 24 - 27th October 2012, Zadar, Croatia. - Vienna : DAAAM International, 2012. - ISBN 978-3-901509-91-9. - ISSN 2304-1382, s. 0743-0746
- AFC4** Šroba, Lukáš – Ravas, Rudolf - Grman, Ján: The influence of subpixel corner detection to determine the displacement between two cameras using image stereo pair. 2014, 25th DAAAM International Symposium, Vienna (in press).

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- AFD1** Šroba, Lukáš – Páleník, Tomáš: Dekódovanie turbokódov pomocou iteratívnych grafových algoritmov. In: ŠVOČ 2011 : Študentská vedecká a

odborná činnosť. Zborník vybraných prác. Bratislava, Slovak Republic, 4.5.2011. - Bratislava : STU v Bratislave FEI, 2011. - ISBN 978-80-227-3508-7. - S. 612-617

- AFD2** Šroba, Lukáš – Ravas, Rudolf - Smieško, Viktor: Determination of displacement between two cameras using corresponding image stereo pair. In: ELITECH'14 [elektronický zdroj] : 16th Conference of Doctoral Students; Bratislava, Slovakia, 4 June 2014. - Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2014. - ISBN 978-80-227-4171-2. - CD ROM, [3] p.
- AFD3** Šroba, Lukáš – Ravas, Rudolf: Impact of Subpixel Paradigm on Homography Determination. In: ELITECH'13 [elektronický zdroj] : 15th Conference of Doctoral Students; Bratislava, Slovakia, 5 June 2013. - Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2013. - ISBN 978-80-227-947-4. - CD-ROM, [2] s.
- AFD4** Šroba, Lukáš – Ravas, Rudolf: Influence of Image Bit Depth for Subpixel Detection Sensitivity. In: Measurement 2013 : Proceedings of the 9th International Conference on Measurement. Smolenice, Slovakia, May 27-30, 2013. - Bratislava : Slovak Academy of Sciences, 2013. - ISBN 978-80-969672-5-4. - S. 307-310
- AFD5** Šroba, Lukáš – Ravas, Rudolf: The Subpixel X-Corner Detectors and Their Window Shift Robustness Comparison. In: ELITECH'12 [elektronický zdroj] : 14th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 22 May 2012. - Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2012. - ISBN 978-80-227-3705-0. - CD-ROM, [4] s.

Záverečné práce

- 1* Šroba, Lukáš: Program na prevod a zobrazenie rôznych formátov údajov GPS. Bachelor thesis. Bratislava: FEI STU, 2009. 39 p.
- 2* Šroba, Lukáš: Dekódovanie turbokódov pomocou iteratívnych grafových algoritmov. Diploma thesis. Bratislava: FEI STU, 2011. 57 p.

Citácie

[ADE 1, Hopp & Sroba, 2014]

citované v:

- ADE** Gyöngy Miklós – Kollár Sára: Variation of ultrasound image lateral spectrum with assumed speed of sound and true scatterer density. In: Ultrasonics, Elsevier Journal, 2014. - ISSN 0041-624X. - Dostupné na internete: <http://www.journals.elsevier.com/ultrasonics/>

Summary

The dissertation thesis presented here deals with estimation of image corner points position with the focus on concept of subpixel detection. It means the possibility to state the coordinates of interest point (corner point in our case) with the resolution higher than one pixel. The goal is to interpolate or approximate the values of brightness intensities between the pixels in digital image and significantly increase the resolution in this way.

First thesis part contains the overview of corner points detection paradigm in case of both pixel and subpixel detection. The various algorithms are presented here where especially the subpixel ones were published quite recently. Also the edge detection is mentioned informatively. In the end of this part there are some newest application employing subpixel detection listed.

The second part consists of chosen computer vision area parts focused mostly on theory behind image stereo pair. These information were used later as the basis for experiments demonstrating the tested properties of subpixel detection and subpixel detectors.

The third chapter deals with comparisons of chosen subpixel detection algorithms and presentation of obtained findings. There were the detection window shape, sensitivity and precision of subpixel detection in case of dynamic or static scene or influence of bit depth on detection sensitivity compared for example.

The last chapter contains the tests again, in this case there are comparisons of pixel and subpixel detectors related to image stereo pair experiments. For example the areas like homography determination and relative or real displacement between both camera positions stating.

The obtained results clearly prove the significance and advantage of subpixel detection involving in case of experiments done in laboratory conditions.

Poznámky: