

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



TÉZY K DIZERTAČNEJ PRÁCI

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra měření

Ondrej Pribula

**METÓDY PRESNÉHO MERANIA POLOHY OBJEKTŮ
OPTIMALIZOVANÉ PRE INTELIGENTNÚ KAMERU**

Doktorský študijný program: Elektrotechnika a informatika
Študijný obor: Měřící technika

Tézy dizertácie k získaniu akademického titulu "doktor", v skratke "Ph.D."

Praha, február 2014

Dizertačná práca bola vypracovaná v kombinovanej forme doktorského štúdia na Katedře měření Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

Uchádzač: Ing. Ondrej Pribula
Katedra měření
Fakulta elektrotechnická ČVUT
Technická 2, 166 27 Praha 6

Školiteľ: Doc. Ing. Jan Fischer, CSc.
Katedra měření
Fakulta elektrotechnická ČVUT
Technická 2, 166 27 Praha 6

Oponenti:

.....

.....

Tézy boli rozoslané dňa:

Obhajoba dizertácie sa koná dňa o hod. pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v študijnom obore Měřicí technika v zasadačej miestnosti č Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

S dizertáciou je možné sa zoznámiť na dekanáte Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze, na oddělení pro vědu, výzkum a zahraniční styky, Technická 2, Praha 6.

.....
predseda komisie pre obhajobu dizertačnej práce
v študijnom obore Měřicí technika
Fakulta elektrotechnická ČVUT, Technická 2, Praha 6

OBSAH

1	SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	1
1.1	PRESNOSŤ URČENIA POLOHY	1
2	CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE	3
3	METÓDY SPRACOVANIA	3
3.1	VÝPOČET POLOHY MARKERU METÓDOU OBRAZOVÉHO ŤAŽISKA	4
3.2	PRACOVISKO PRE VERIFIKÁCIU METÓD PRESNÉHO MERANIA	4
3.3	MARKRE POUŽITÉ PRE VERIFIKAČNÉ MERANIA	6
3.4	KONCEPT INTELIGENTNEJ KAMERY	7
3.5	METODIKA SPRACOVANIA A INTERPRETÁCIE VÝSLEDKOV MERANIA ..	8
4	VÝSLEDKY	10
4.1	METÓDY PRESNÉHO MERANIA POLOHY OBJEKTOV	10
4.2	OPTIMALIZÁCIA METÓD MERANIA POLOHY PRE INTELIGENTNÚ KAMERU	17
5	ZÁVER.....	21
6	ZOZNAM LITERATÚRY POUŽITEJ V TÉZACH.....	24
7	ZOZNAM PUBLIKÁCIÍ DIZERTANTA	25
7.1	PUBLIKÁCIE VZŤAHUJÚCE SA K TÉME DIZERTAČNEJ PRÁCE	25
7.2	OSTATNÉ PUBLIKÁCIE	27
7.3	OHLASY	28
8	SUMMARY	29
9	RESUMÉ	30

1 SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Kamera umožňujúca nie len samotné získanie obrazovej informácie, ale aj jej následné spracovanie a vyhodnotenie (v niektorých prípadoch aj realizáciu regulačného zásahu) bez trvalej asistencie nadradeného systému (PC) je označovaná ako inteligentná kamera (*smart camera*) [1].

Inteligentné kamery sú typom senzoru, ktorý dokáže zastúpiť funkciu ľudského pozorovateľa výrobného procesu a nachádzajú svoju aplikáciu v jeho záverečných fázach – najčastejšie pri optickej kontrole výrobku (kontrola tvarových charakteristík, kontrola detailov atď.) [2].

Jednou z hlavných oblastí použitia inteligentných kamier je realizácia úloh merania geometrických charakteristík objektov. Jedná o podporu pri kontrole kvality spracovania objektu a procese rozhodovania o jeho následnom označení ako správny alebo chybový. Výsledky merania však môžu byť použité aj pre následný technologický proces – korektné uchopenie objektu, navádzanie zvráacieho automatu po hrane objektu, kontrolu presných výrobných tolerancií atď. Existuje množstvo aplikácií, kedy nie je vyhodnocovaný tvar ako komplexný parameter objektu, ale je potrebné meranie polohy objektu alebo jeho súčastí s vysokou presnosťou (v rádoch mm až μm).

Meranie polohy s využitím kamery je možné aj tam kde nie je možná aplikácia mechanických senzorov alebo senzorov priblíženia z dôvodu možného ovplyvnenia meracej sústavy. Príkladom môže byť meranie polohy senzoru magnetického poľa v rámci realizovaného meracieho systému pre mapovanie magnetického poľa [3].

V prípadoch vyžadujúcich vysokú presnosť určenia polohy je potrebné eliminovať neistotu identifikácie objektu, ktorú spôsobuje napr. znížený kontrast objektu v rámci meranej scény, prípadne ťažko identifikovateľný, nestály tvar objektu. V takomto prípade je možné pri spracovaní obrazu s výhodou použiť a priori informáciu vo forme optických značiek - markerov, ktoré jednoznačne identifikujú objekt.

Využitie a priori informácie vo forme markerov taktiež znižuje komplexnosť potrebných algoritmov spracovania obrazu a tým aj celkovú cenu riešenia inteligentnej kamery. V prípade jasne identifikovateľného objektu (napr. markerom s unikátnym jasovým profilom) sú pre výpočet polohy objektu aplikovateľné algoritmy počítajúce stred dominantnej jasovej oblasti (*target image center algorithms*).

1.1 Presnosť určenia polohy

Jedny z prvých aplikácií presného merania polohy objektov pomocou kamier s CCD obrazovým senzorom boli aplikácie sledujúce polohu hviezd (*star trackers*). Využitie metódy výpočtu obrazového ťažiska pre určenie po-

lohy hviezd umožnilo dosiahnuť vysokého rozlíšenia určovanej polohy aj s kamerou s relatívne nízkym rozlíšením. Dosiadnuteľné rozlíšenie bolo vyčíslené na 0,01 pixel [4].

Problematickou dosiadnuteľnej presnosti určenia polohy objektov kamerami sa vo svojich prácach dlhoročne zaoberali autori T.A. Clarke a M.R. Shortis, ktorí priniesli množstvo teoretických a praktických analýz [5]. Pri použití objektu identifikovaného bielym svetlom a laserom bola v rámci práce [6] dosiadnuta smerodajná odchýlka merania polohy objektu 0,03 pixel. V rámci práce [7] boli teoretické hodnoty dosiadnuteľnej presnosti verifikované reálnym pokusom za pomoci pojazdu s krokovým motorom a pohybom objektu v zlomkoch obrazového bodu, pričom bola dosiadnuta smerodajná odchýlka polohy 0,006 pixel.

Rozsiahlou analýzou rôznych modifikácií algoritmov určujúcich stred objektu a verifikáciou dosiadnuteľnej presnosti merania polohy sa zaoberá práca [8], pričom priemerná smerodajná odchýlka polohy bola dosiadnuta v rozsahu 0,02 – 2,3 pixel. Ako jeden z obecných záverov bola v rámci tejto práce autormi uvedená nepriama úmera medzi plochou markeru a nastavením jasového prahu pre dosiadnutie optimálnych výsledkov.

V práci [9] autor identifikuje periodickú závislosť odchýlky meranej polohy markeru od jeho ideálne lineárnej polohy. Závislosť nazýva sinusovou a identifikuje v nej periódu veľkosti jedného obrazového bodu. Ako dôvod vzniku tejto periodickej chyby je udávaná nesprávna hodnota úrovne signálu kompenzujúceho jasovú hodnotu tmavých obrazových bodov. Uvedená práca nadväzuje na predchádzajúce práce vysvetľujúce identickú pozorovanú chybu ako následok medzery medzi obrazovými bodmi, resp. chybu vnesenú digitalizátorom obrazu. Otázka vzniku a charakteru chyby merania objektu pri použití algoritmu výpočtu obrazového ťažiska teda nie je v literatúre doposiaľ jednoznačne uzavretá.

Uvedené práce, spojené s aplikáciou strojového videnia pre účely presného merania, v minulosti predpokladali pre získanie obrazovej informácie senzory technológie CCD, ktoré sú považované za parametricky lepšie a vhodnejšie pre konštrukciu precíznych kamier než senzory technológie CMOS. V dnešnej dobe sa však vďaka mnohým aspektom dostávajú do popredia obrazové senzory CMOS, ktoré okrem jednoznačných výhod na strane riadenia a digitalizácie obrazu prinášajú aj zásadné rozdiely v procese tvorby obrazovej informácie v porovnaní s technológiou CCD. Z pohľadu využitia týchto senzorov pre úlohy presného merania sa rozdiely dajú označiť ako parazitné (napr. menší *fill-factor* kompenzovaný aplikáciou mikro šošoviek).

Ekonomická efektivita použitia technológie CMOS je hlavným argumentom pre ich nastupujúcu masovú aplikáciu. V súčasnosti teda nie sú známe komplexné výsledky verifikujúce reálne limity CMOS senzorov pre

účely realizácie úloh presného merania polohy objektov na báze spracovania obrazovej informácie.

2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Hlavným cieľom tejto práce bol návrh metód pre zvýšenie presnosti merania polohy objektov na základe obrazovej informácie, aplikačne vhodných pre inteligentné kamery. Navrhované metódy by mali byť použiteľné pre presné merania polohy objektov v reálnom čase.

Splnenie hlavného cieľa práce bolo podmienené splnením nasledujúcich čiastkových cieľov:

- Analyzovať limity subpixelového určenia polohy objektu identifikovaného aktívnym markerom na základe metódy obrazového ťažiska. Identifikovať kľúčové parametre obrazovej informácie a nastavenia metódy z pohľadu výslednej neistoty merania polohy.
- Navrhnúť a overiť metódy optimalizácie nastavenia parametrov výpočtového algoritmu s ohľadom na dosiahnuteľnú neistotu merania polohy aktívneho markeru.
- Navrhnúť možnosti zvýšenia presnosti základného algoritmu aplikačne vhodné pre inteligentnú kameru a dosiahnuteľné zvýšenie presnosti overiť.
- Optimalizovať algoritmy výpočtu obrazového ťažiska s ohľadom na beh v reálnom čase pre inteligentnú kameru a úlohu presného merania polohy objektov identifikovaných jedným alebo viacerými aktívnymi markermi.

Pre účely vývoja, verifikácie a následného praktického využitia navrhovaných metód bolo súčasne nevyhnutné navrhnúť inteligentnú kameru, ktorá bude umožňovať úplnú kontrolu nad obrazovým sensorom, procesom získania obrazovej informácie a jej následným vyhodnotením (vrátane vývoja potrebného softwarového vybavenia). Ďalej bolo potrebné navrhnúť a realizovať pracovisko pre zber obrazových dát a verifikáciu metód presného merania polohy objektov s využitím navrhnutej inteligentnej kamery.

3 METÓDY SPRACOVANIA

Metódy presného subpixelového merania polohy objektov identifikovaných pomocou aktívnych markerou boli v rámci tejto práce analyzované, navrhované a verifikované na základe veľkého množstva obrazových dát získaných reálnym meraním (v priebehu riešenia práce bolo získaných viac ako 700 GB relevantných obrazových dát). Z tohto dôvodu vzniklo v rámci rieše-

nia dizertačnej práce pracovisko spĺňajúce kritériá zabezpečujúce získanie obrazových dát relevantných pre vyhodnocovanie navrhovaných metód.

3.1 Výpočet polohy markeru metódou obrazového ťažiska

Metóda určenia polohy objektu založená na výpočte obrazového ťažiska vychádza zo vzťahov elementárnej matematiky pre výpočet ťažiska obecné definovaného geometrického útvaru. Vzhľadom na diskretizovanú formu obrazovej informácie prechádza výpočet obrazového ťažiska do diskrétného tvaru (3-1), kde H reprezentuje vertikálny počet obrazových bodov a W horizontálny počet obrazových bodov, I je dvojrozmerná obrazová jasová funkcia (rozloženie jasu v obraze).

$$Tx = \frac{\sum_{y=0}^{H-1} \sum_{x=0}^{W-1} xI(x, y)}{\sum_{y=0}^{H-1} \sum_{x=0}^{W-1} I(x, y)} \quad Ty = \frac{\sum_{y=0}^{H-1} \sum_{x=0}^{W-1} yI(x, y)}{\sum_{y=0}^{H-1} \sum_{x=0}^{W-1} I(x, y)} \quad (3-1)$$

Vzťah (3-1) je vo svojej podstate podielom súčtu súčinov, preto je vhodnou výpočtovou platformou pre implementáciu výpočtového algoritmu digitálny signálový procesor (DSP), ktorého výpočtové jadro je pre tieto operácie optimalizované (návrhu inteligentnej kamery na báze DSP a optimalizácii algoritmov je venovaná samostatná časť dizertačnej práce).

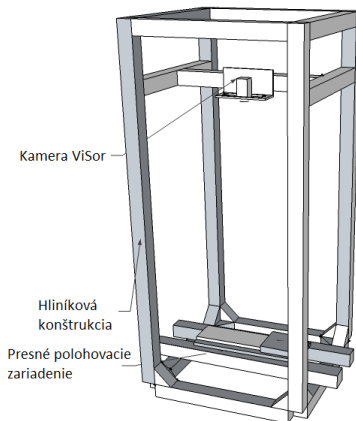
Uvedený spôsob výpočtu je zo svojej podstaty integrálny – výpočet polohy zahŕňa veľké množstvo jasových hodnôt definujúcich objekt a tým poskytuje matematický výsledok s rozlíšením v zlomkoch obrazového bodu – tzv. subpixelové rozlíšenie.

V rámci riešenia dizertačnej práce boli identifikované tri hlavné zdroje pôsobiace na dosiahnuteľnú neistotu merania polohy objektu uvedenou metódou: vplyvy optickej sústavy, vplyvy parametrov obrazového senzoru a vplyvy nastavenia jasového prahu pri segmentácii obrazu. Kým prvé dva uvedené zdroje neistoty je možné kompenzovať konfiguráciou meracej scény a vhodnou mierou filtrácie (priemerovania) obrazového signálu, nastavenie jasového prahu je variabilným parametrom merania. Analýzy vykonané v rámci riešenia dizertačnej práce boli zamerané na konkrétnu charakterizáciu vplyvov nastavenia hodnoty jasového prahu na výsledok merania a jeho optimalizáciu nastavenia s ohľadom na minimalizáciu dosiahnuteľnej neistoty merania polohy objektu.

3.2 Pracovisko pre verifikáciu metód presného merania

Pre účely získania obrazových dát bola navrhnutá meracia sústava pozostávajúca z presnej lineárnej polohovacej jednotky *Physical Instruments*

M511.DD (najmenší inkrementálny krok nastavenia polohy $0,1 \mu\text{m}$), digitálne nastaviteľného zadného osvetľovača a modulárnej inteligentnej kamery. Vzájomná poloha kamery a polohovacej jednotky bola mechanicky prepojená v rámci konštrukcie hliníkovej rámu, čo zvyšuje odolnosť meracej sústavy voči vonkajším mechanickým vplyvom. Vzhľadom na to, že sa v rámci merania jedná o vyhodnocovanie zmien polohy v ráde jednotiek mikrometrov bola celá sústava umiestnená na pevnom, monolitickom betónovom základe. Mechanické usporiadanie navrhutej meracej sústavy ukazuje obr. 3-1.



Obr. 3-1 Mechanické usporiadanie meracej sústavy

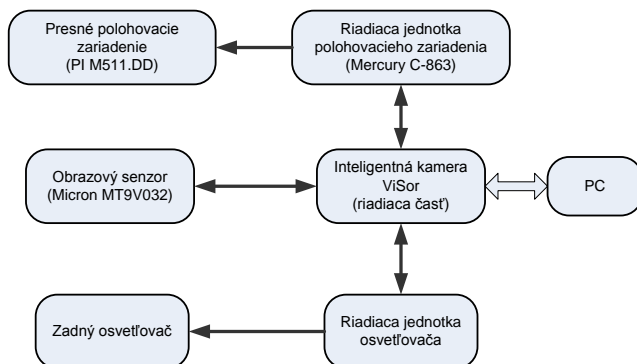
S ohľadom na ďalšie ciele tejto práce bola navrhnutá inteligentná kamera ViSor, umožňujúca plnú kontrolu nad obrazovým senzorm, tokom obrazových dát a ich spracovaním, ktorá bola použitá v rámci uvedenej meracej sústavy.

Pre účely získania verifikačných obrazových dát bol na pojazd polohovacej jednotky umiestnený zadný osvetľovač, ktorý spoločne s presnou clonkou reprezentoval pozorovaný aktívny marker. Intenzita jasu osvetľovača (a tým aj intenzita jasu výsledného markeru) boli riadené regulátorom jasu vyvinutým v rámci diplomovej práce [10].

Pre účely vyhodnocovania subixelovej presnosti bol použitý posun polohovacieho zariadenia v jednej ose, ktorej pohyb bol mechanickou konštrukciou stotožnený so smerom obrazového riadku použitého obrazového senzoru (stotožnenie bolo približné bez presného vzájomného zostavenia markeru, kamery a polohovacej jednotky).

Presná polohovacia jednotka, ako aj regulátor jasu boli pripojené k inteligentnej kamere ViSor, ktorá pôsobila ako spoločný riadiaci a synchronizačný článok merania (obr. 3-2). Kamera komunikovala s PC prostredníctvom

tvom rozhrania USB a softwaru pre realizáciu presných meraní polohy vytvoreného v rámci riešenia tejto dizertačnej práce.

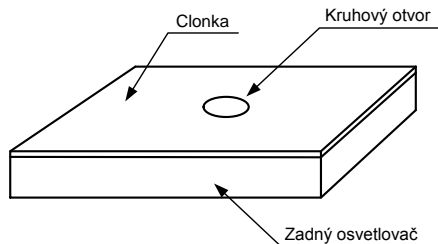


Obr. 3-2 Blokový diagram realizovaného meracieho pracoviska

Všetky vyhodnocované obrazové dáta boli získané prostredníctvom obrazového senzoru *Micron MT9V032* [11]. S obrazovým senzorom bol použitý objektív *Schneider Kreuznach XENOPLAN* s ohniskovou vzdialenosťou $f=17\text{mm}$. Použitý reálny objektív, vzhľadom na existujúce geometrické chyby [12], môže negatívne ovplyvňovať výsledky merania polohy markeru. Geometrické chyby optickej sústavy sú najmenšie v blízkom okolí optickej osi [13], preto bol meraný marker vždy umiestnený do stredu obrazového poľa. Počas merania bola vzdialenosť medzi obrazovým senzorom a markerom 570 mm, zväčšenie použitej meracej sústavy tak bolo 0,0318. Pri meraní bol z dôvodu eliminácie neistoty polohy zvolený krok o rád vyšší ako minimálny možný opakovateľný inkrement polohy použitej polohovacej jednotky, teda krok $1\mu\text{m}$. Pri veľkosti obrazového bodu $6\mu\text{m}$ bol inkrement polohy obrazu markeru na obrazovom senzore približne $\frac{1}{189}$ obrazového bodu. Rozsah meraných polôh markeru bol pre všetky realizované merania približne ± 2 pixely v okolí osi zobrazovacej sústavy (stred obrazového poľa).

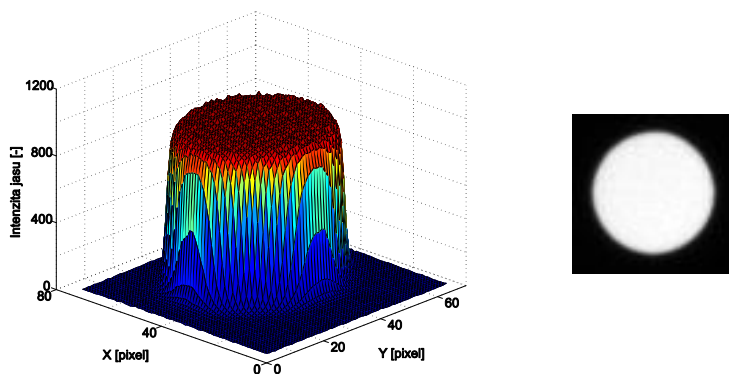
3.3 Markre použité pre verifikačné merania

Vlastnosti metód merania polohy objektu boli analyzované a verifikované na troch typoch aktívneho markeru kruhového prierezu, líšiacich sa veľkosťou. Použité boli markery s priemerom 2,2 mm, 5,3 mm a 8,3 mm (v ďalšom texte označované ako A, B, C).



Obr. 3-3 Realizácia verifikačného markeru

Použité markery boli realizované formou clonky s kruhovým otvorom požadovaného priemeru umiestnenej na zadnom osvetľovači (obr. 3-3). Presné clonky boli vyrobené laserovým obrábaním zo základného materiálu, ktorým je medený plech hrúbky 0,15 mm.



Obr. 3-4 Marker C. Jasový profil (vľavo), snímka markeru (vpravo)

Merania, ktoré tvoria základ analýz a verifikácie metód diskutovaných v rámci dizertačnej práce boli realizované s jasovou intenzitou markeru nastavenou tesne pod saturačným prahom obrazového senzoru (príklad jasového profilu ukazuje obr. 3-4).

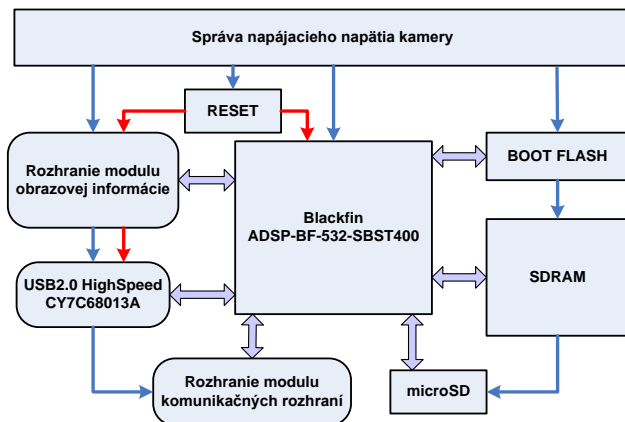
3.4 Koncept inteligentnej kamery

Potreba úplnej kontroly nad procesom získavania a spracovania obrazovej informácie, ako aj potreby synchronného zásahu do procesu samotného získavania obrazovej informácie boli hlavnou motiváciou pre vytvorenie vlastnej koncepcie kompaktnej inteligentnej kamery.

Vzniklo jednoduché riešenie systému strojového videnia vhodné pre implementáciu menej náročných algoritmov spracovania obrazu v reálnom čase (obr. 3-5). Novo vytvorená platforma inteligentnej kamery, ako výsledok

mnohoročnej práce v tejto oblasti, je základným nástrojom, ktorý bol použitý pre získanie dát a výsledkov diskutovaných v rámci dizertačnej práce.

Jednou z motivácií vzniku novej kamery bola aj potreba priniesť a overiť minimalistické riešenie systému strojového videnia vhodné pre priamu implementáciu vyvíjaných algoritmov presného merania polohy a rozmeru objektov. Za pomoci tejto platformy boli vytvorené a overené koncepcie optimálnej implementácie navrhovaných algoritmov, schopných behu v minimalistickom hardwarovom prostredí.



Obr. 3-5 Bloková schéma modulu riadenia a spracovania signálu kamery ViSor

3.4.1 Optimalizácia algoritmov pre meranie polohy objektov

Jedným z cieľov dizertačnej práce bola optimálna implementácia navrhovaných algoritmov presného merania polohy do hardwarových štruktúr inteligentnej kamery. Navrhnutá inteligentná kamera ViSor bola použitá pri podrobnej analýze zložiek ceny výpočtových algoritmov, ako aj pri verifikácii výsledkov navrhovaných optimálnych algoritmov.

Všetky reálne výsledky boli vzťahnuté k navrhutej hardwarovej konfigurácii (DSP *Blackfin*[®], frekvencia jadra 400 MHz, frekvencia periférií 133 MHz, externá SDRAM 32 MB, obrazový senzor *MT9V032* s 752x480 obrazovými bodmi o frekvencii 24 MHz).

3.5 Metodika spracovania a interpretácie výsledkov merania

Za pomoci uvedenej meracej sústavy boli pre všetky analyzované nastavenia metódy (veľkosti markeru, nastavenia optickej sústavy, nastavenia

jasu markeru atď.) získané sety skutočných polôh markeru (získaných z polohovacej jednotky) a snímok pre uvedené polohy. Pre každú meranú polohu markeru bolo nasnímaných vždy 50 snímok.

Za odhad polohy markeru bola v každom sete považovaná stredná hodnota (aritmetický priemer) jednotlivých odmerov pre danú polohu markeru. Skutočná poloha markeru bola pre každé posunutie vyhodnotená ako aritmetický priemer skutočných polôh jednotlivých snímok v sete (meraných polohovacou jednotkou). Pre každé posunutie tak bola získaná jedna hodnota skutočnej polohy a jedna hodnota vypočítaného obrazového ťažiska. Pre hodnotenie dosiahnuteľnej presnosti určenia polohy jednotlivých metód bola uvažovaná iba zložka polohy objektu T_x v smere obrazového riadku (osa x bola mechanicky približne stotožnená so smerom riadku obrazového senzoru).

Predpokladom jednoduchého použitia navrhovaných metód v reálnych podmienkach merania je lineárna závislosť vypočítanej a skutočnej hodnoty polohy meraného objektu (markeru). Dosiahnuteľná presnosť merania je v takomto prípade limitovaná odchýlkou získaného výsledku od ideálne lineárneho priebehu. Pre vyhodnotenie tejto odchýlky sú z vypočítaných hodnôt a skutočných hodnôt posunutia (meraných polohovacou jednotkou) určené metódou najmenších štvorcov koeficienty ideálne lineárneho priebehu. Pre každé posunutie markeru bola vyhodnotená odchýlka meranej polohy od očakávanej polohy danej ideálne lineárnym priebehom, t.j. odchýlka od lineariry. V celom rozsahu vyhodnocovaných polôh (posunutí) markeru bol touto metódou získaný priebeh odchýlky skutočnej meranej polohy od jej ideálne lineárneho predkladu.

$$u_p = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (l_i - x_i)^2} \quad (3-2)$$

Zo získaného priebehu odchýlky od lineariry bola určovaná smerodajná odchýlka podľa vzťahu (3-2), v ktorom l_i reprezentuje ideálne lineárnu hodnotu polohy markeru pre posunutie i , x_i je hodnota polohy markeru získaná meraním, N je celkový počet vyhodnocovaných polôh markeru.

Vzhľadom na povahu uvedeného výpočtu bola smerodajná odchýlka u_p chápaná ako neistota merania polohy. Na základe takto vypočítanej neistoty boli charakterizované a porovnávané výsledky navrhovaných metód.

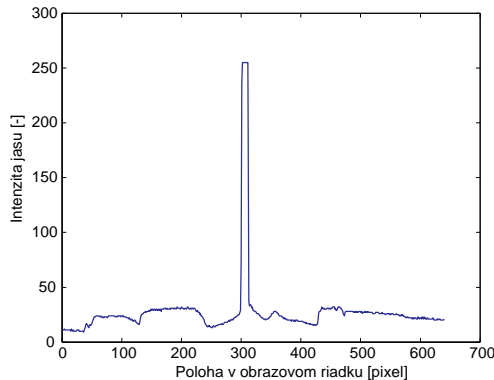
4 VÝSLEDKY

4.1 Metódy presného merania polohy objektov

Výrazné zjednodušenie identifikácie meraného objektu v rámci snímanej scény prináša jeho označenie markerom. Marker reprezentuje a priori informáciu vnesenú do obrazovej scény, čím je vytvorená obsahovo normalizovaná obrazová informácia. Použitím aktívnych markerov dochádza k výraznému zjednodušeniu úlohy segmentácie obrazovej informácie. Zložité algoritmy identifikácie vzorov tak môžu byť nahradené jednoduchým prahovaním jasových hodnôt.

Integrálny charakter algoritmu pre výpočet obrazového ťažiska (podľa vzťahu (3-1)) zo svojej podstaty poskytuje rozlíšenie polohy objektu v zlomkoch obrazových bodov.

Dosiahnuteľná neistota merania polohy markeru je závislá od parametrov samotného markeru, parametrov obrazového senzoru a nastavení segmentačného kritéria – hodnoty jasového prahu.

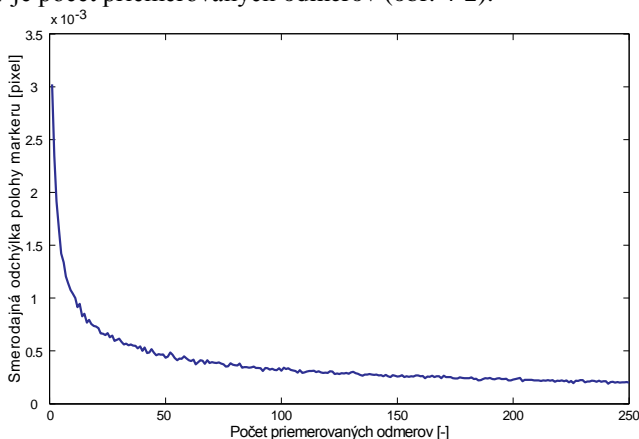


Obr. 4-1 Ukážka jasového profilu aktívneho markeru.

Marker musí byť svojím jasovým profilom jednoznačne identifikovateľný a dominantný v rámci obrazovej scény (obr. 4-1). Rotácia markeru nesmie spôsobovať zmenu polohy obrazového ťažiska – marker teda musí byť rotačne symetrický. V rámci predpokladaného rozsahu merania nesmie dochádzať k systematickej zmene veľkosti alebo tvaru markeru (čiastočná zmena plochy markeru s periodickou osciláciou hodnoty je daná fyzikálnou realizáciou obrazového senzoru, jasovým profilom markeru a nastaveným jasovým prahom výpočtového algoritmu). Tvarovo najjednoduchším typom markeru, spĺňajúcim stanovené geometrické kritériá, je kruhový marker.

4.1.1 Vplyvy šumu na výsledky výpočtu polohy markeru

Zdroje šumu obrazového senzoru, vplývajúce na kvalitu výstupnej digitalizovanej informácie, sa prejavujú fluktuáciou vypočítanej hodnoty polohy markeru. V rámci riešenia dizertačnej práce bolo na rozsiahlom sete reálnych odmerov ukázané, že náhodná zložka neistoty merania polohy, spôsobená šumom jasovej informácie jednotlivých obrazových bodov, klesá s \sqrt{N} , kde N je počet priemerovaných odmerov (obr. 4-2).

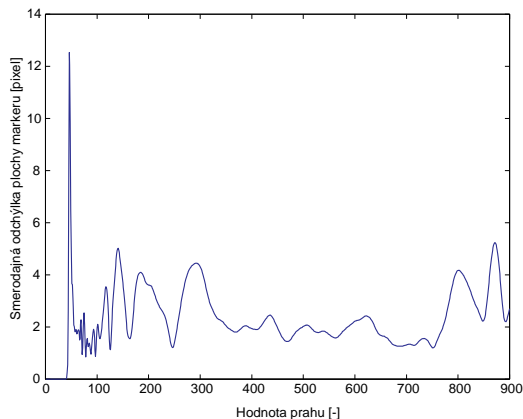


Obr. 4-2 Závislosť veľkosti smerodajnej odchýlky vypočítanej hodnoty polohy markeru na počte priemerovaných odmerov

Ako vhodná veľkosť priemerovanej množiny bolo zvolených 50 odmerov, kedy náhodná zložka chyby merania polohy dosiahla $5 \cdot 10^{-4}$, t.j. $\frac{1}{2000}$ pixel.

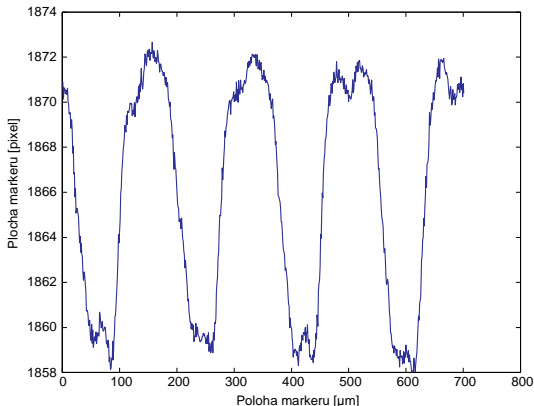
4.1.2 Vplyv prahovania obrazu na vypočítanú plochu markeru

Jediným konfigurovateľným parametrom algoritmu výpočtu polohy markeru je hodnota jasového prahu. V rámci práce bola analyzovaná závislosť vypočítanej veľkosti plochy markeru na jeho polohe v rozsahu posunutí 700 μm pre celý rozsah nastavení jasového prahu (1024 hodnôt jasového prahu). Získaný priebeh ukazuje nelineárnu závislosť medzi veľkosťou smerodajnej odchýlky plochy markeru a nastaveným jasovým prahom s výraznými lokálnymi extrémami (obr. 4-3). Analýzou tvaru priebehu plochy markeru v závislosti na jeho polohe pre identifikované minimá a maximá smerodajnej odchýlky bolo zistené, že pre hodnoty jasového prahu, pre ktoré dosahuje smerodajná odchýlka plochy markeru lokálne maximálne hodnoty je priebeh plochy v závislosti na jeho polohe kvázi sinusový (obr. 4-4).



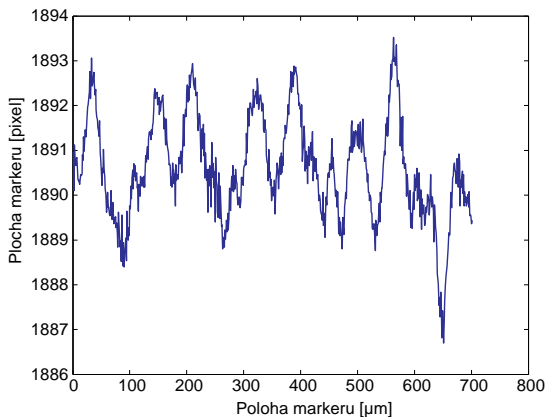
Obr. 4-3 Marker C. Závislosť smerodajnej odchýlky plochy markeru na zvolenom prahu (smerodajná odchýlka počítaná vždy zo všetkých posunutí markeru 0-700 μm).

Periódou tohto priebehu je rovná vzdialenosť stredov obrazových bodov, t.j. veľkosti obrazového bodu¹ (obr. 4-4). Pre hodnoty jasového prahu spôsobujúce lokálne minimá smerodajnej odchýlky bola pozorovaná závislosť veľkosti plochy markeru na jeho polohe bez výraznej periódy, či symetrie (obr. 4-5).



Obr. 4-4 Marker C. Závislosť plochy markeru na polohe, hodnota prahu v lokálnom maxime smerodajnej odchýlky.

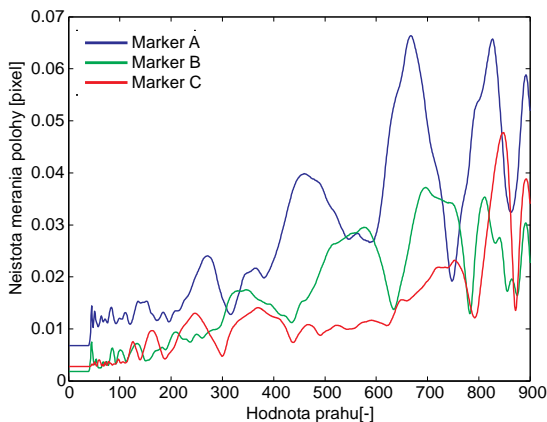
¹ Vzdialenosť stredov obrazových bodov je rovná veľkosti obrazového bodu v prípade, že jednotlivé obrazové body na seba priamo nadväzujú.



Obr. 4-5 Marker C. Závislosť plochy markeru na polohe, hodnota prahu v lokálnom minime smerodajnej odchýlky.

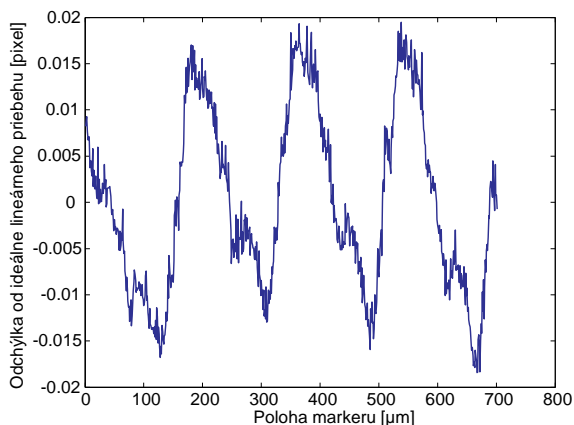
Uvedené zistenia je možné s výhodou využiť pri charakterizácii kamery s neznámou veľkosťou obrazového bodu nasledovne: v prípade, že je dosiahnutá kvázi sinusová zmena plochy testovacieho markeru v závislosti na jeho posunutí je perióda pozorovanej zmeny plochy rovná veľkosti obrazového bodu kamery (po prepočte cez známe zväčšenie použitého objektívu).

4.1.3 Kritérium optimálneho nastavenia jasového prahu



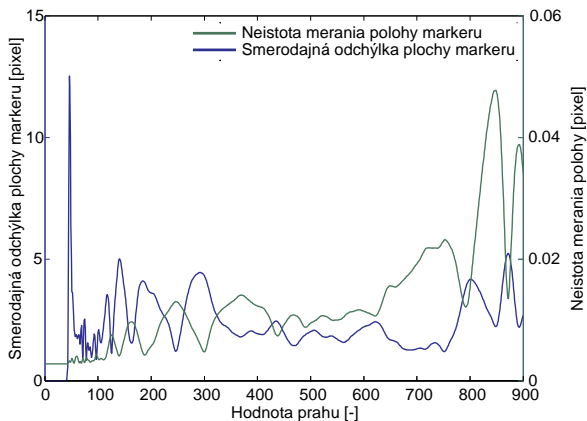
Obr. 4-6 Závislosť neistoty merania polohy markeru na zvolenom prahu (smerodajná odchýlka počítaná vždy zo všetkých posunutí 0-700 μm)

V rámci práce bol analyzovaný vplyv nastavenia úrovne jasového prahu na dosiahnuteľnú neistotu merania polohy markeru. V súlade s predchádzajúcimi zisteniami bola pozorovaná nelineárna závislosť medzi neistotou merania polohy a nastaveným jasovým prahom vykazujúca výrazné lokálne extrémny (obr. 4-6). Podrobnou analýzou jednotlivých lokálnych extrémov bol zistený periodický a symetrický tvar odchýlky meranej hodnoty polohy markeru od ideálne lineárneho priebehu pre hodnoty jasového prahu s maximálnou neistotou merania polohy (obr. 4-7). Neperiodický a nesymetrický tvar odchýlky meranej hodnoty od ideálne lineárneho priebehu bol pozorovaný pre hodnoty jasového prahu s minimálnou neistotou merania polohy.



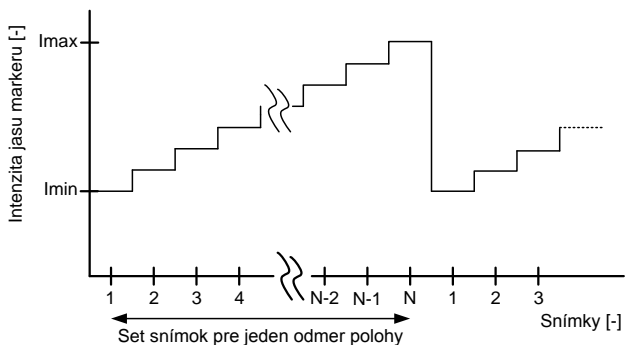
Obr. 4-7 Marker C. Priebeh odchýlky od ideálne lineárneho priebehu v závislosti na polohe markeru – hodnota jasového prahu mimo optima

Podobnosť priebehov smerodajnej odchýlky plochy markeru a dosiahnutej neistoty merania jeho polohy (obr. 4-8) viedla k definícii nového kritéria pre optimálne nastavenie hodnoty jasového prahu s ohľadom na dosiahnuteľnú neistotu merania polohy: Jasový prah je nastavený v lokálnom optime vzhľadom na minimálnu dosiahnuteľnú neistotu merania polohy vtedy, keď je tvar priebehu zmeny plochy markeru v závislosti na jeho polohe v meranom rozsahu periodický a symetrický (kvázi sínusový). V závislosti od požadovanej hodnoty jasového prahu priebeh neistoty dosahuje viac lokálnych optím. Uvedené kritérium je prakticky aplikovateľné v bežných podmienkach merania (bez potreby nákladného laboratórneho vybavenia) a jeho platnosť bola potvrdená pre všetky markery v rámci verifikačného setu.



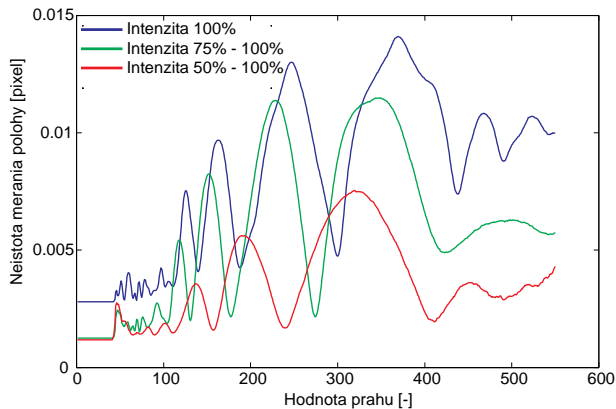
Obr. 4-8 Marker C. Priebeh neistoty merania polohy a smerodajnej odchýlky plochy markeru v závislosti od hodnoty jasového prahu

4.1.4 Zvýšenie presnosti merania polohy metódou modulácie jasu markeru



Obr. 4-9 Metóda modulácie intenzity jasu markeru - princíp zmeny jasu markeru v rámci jednotlivých snímok odmerového setu

V rámci práce bola navrhnutá a overená nová metóda zvýšenia presnosti merania polohy pomocou modulácie jasu aktívneho markeru. Zmenou jasu markeru synchronizovanou s odberom snímok podľa obr. 4-9 a následným priemerovaním vypočítaných výsledkov polohy pre jednotlivé jasy dochádza k výraznému zníženiu dosiahnuteľnej neistoty merania polohy (obr. 4-10).



Obr. 4-10 Marker C. Závislosť neistoty merania polohy na hodnote prahu pre rôzne stupne modulácie intenzity jasu markeru

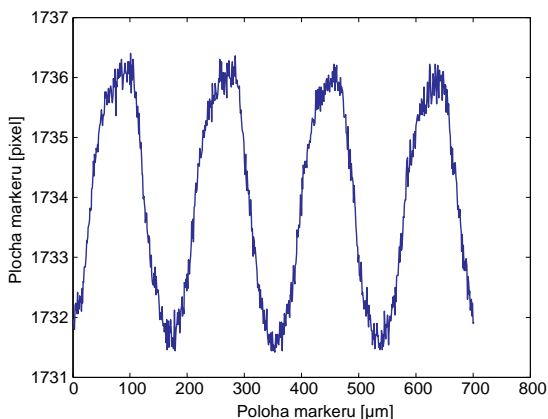
Navrhnutá metóda pomohla znížiť neistotu merania polohy markeru v priemere na polovicu v porovnaní s neistotou dosiahnuteľnou bez modulácie jasu markeru. Vybrané reálne výsledky pre marker C ukazuje tab. 4.1 (extremný prípad, až $\frac{1}{1000}$ pixel sa podarilo dosiahnuť pri použití markeru A).

Hodnota prahu [-]	Neistota [pixel]	Neistota [1/pixel]
0-43	0,00117	$\frac{1}{855}$
90	0,00139	$\frac{1}{719}$
158	0,0016	$\frac{1}{625}$
241	0,00169	$\frac{1}{592}$
411	0,00195	$\frac{1}{513}$
490	0,00289	$\frac{1}{346}$

Tab. 4.1 Vybrané hodnoty neistoty merania polohy markeru C pri použití modulácie jasu s hĺbkou 50%

Navrhnuté kritérium optimálneho nastavenia hodnoty prahu podľa kapitoly 4.1.3 je v nezmenenej forme aplikovateľné aj pri použití popisovanej

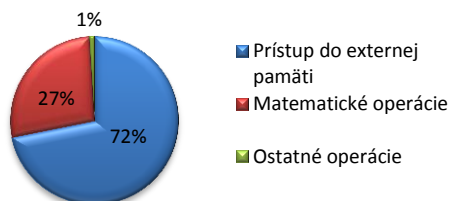
metódy modulácie jasu. Príklad priebehu zmeny plochy markeru v závislosti na jeho polohe pre optimálne nastavený jasový prah modulovaného markeru ukazuje obr. 4-11. Uvedený priebeh potvrdzuje globálne zistenie u všetkých verifikačných markerov – aplikovaná metóda modulácie zároveň vyhladzuje priebeh závislosti plochy na polohe markeru pre hodnoty jasového prahu, pri ktorých nastáva maximálna smerodajná odchýlka plochy (minimum neistoty) a priebeh sa približuje tvarom sinusovému s periódou rovnou vzdialenosti obrazových bodov.



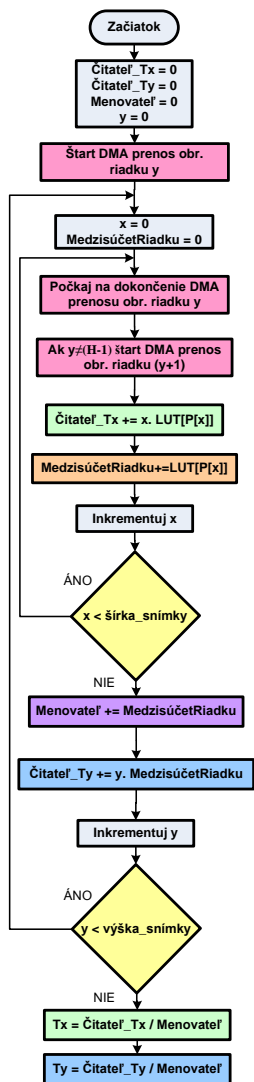
Obr. 4-11 Marker C. Závislosť plochy markeru na polohe, hodnota prahu v optimálne podla navrhnutého kritéria, modulácia 50 %

4.2 Optimalizácia metód merania polohy pre inteligentnú kameru

4.2.1 Výpočet jednoduchého centroidu



Obr. 4-12 Zloženie času pri výpočte obrazového ťažiska neoptimalizovaným algoritmom



Obr. 4-13 Vývojový diagram plne optimalizovaného algoritmu pre výpočet centroidu

Využitelnosť metód bezdotykového merania polohy objektov spracovaním obrazovej informácie je prakticky limitovaná schopnosťou efektívnej implementácie použitých algoritmov spracovania obrazových dát. Stupeň komplexnosti týchto algoritmov determinuje hardwarové nároky na ich reálnu implementáciu.

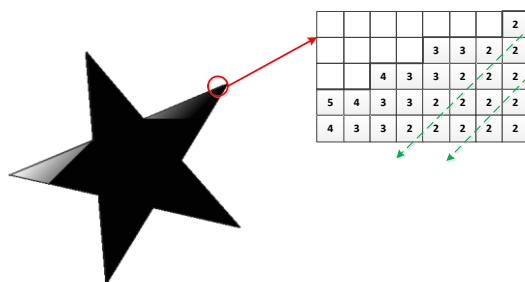
Fundamentálnym algoritmom je výpočet jednoduchého obrazového ťažiska (3-1), ktorého implementáciou a analýzou behu v reálnom HW bola ako jednoznačne najdrahšia časť identifikovaná manipulácia s externou obrazovou pamäťou, zabierajúca približne 70 % času spracovania snímky (obr. 4-12). Optimalizáciou samotného algoritmu výpočtu po matematickej a koncepcnej stránke bola s využitím bloku *DMA*, navrhnutá optimalizovaná implementácia tohto algoritmu dosahujúca cca. 7-násobné zrýchlenie výpočtu oproti jednoduchej implementácii podľa definície (obr. 4-13). Prepočtom dosiahnutých výsledkov je možné odhadnúť maximálnu frekvenciu obrazových dát, ktoré je schopná navrhnutá inteligentná kamera spracovať v reálnom čase na cca. 32 MPix/s².

² 32 megapixel/s je cca. 80 fps pri rozlíšení WVGA 752x480 a časovaní senzoru zodnom s použitým typom MT9V032

4.2.2 Algoritmus multi-objektového obrazového ťažiska

Optimalizácii algoritmu pre výpočet obrazového ťažiska v obecnej scéne (s väčším počtom objektov súčasne) bola venovaná záverečná časť dizertačnej práce. Poznatky získané v priebehu optimálnej implementácie jednoduchého centroidu boli doplnené o optimalizáciu rozhodovacieho stromu pri vyhodnocovaní príslušnosti obrazových bodov k jednotlivým objektom.

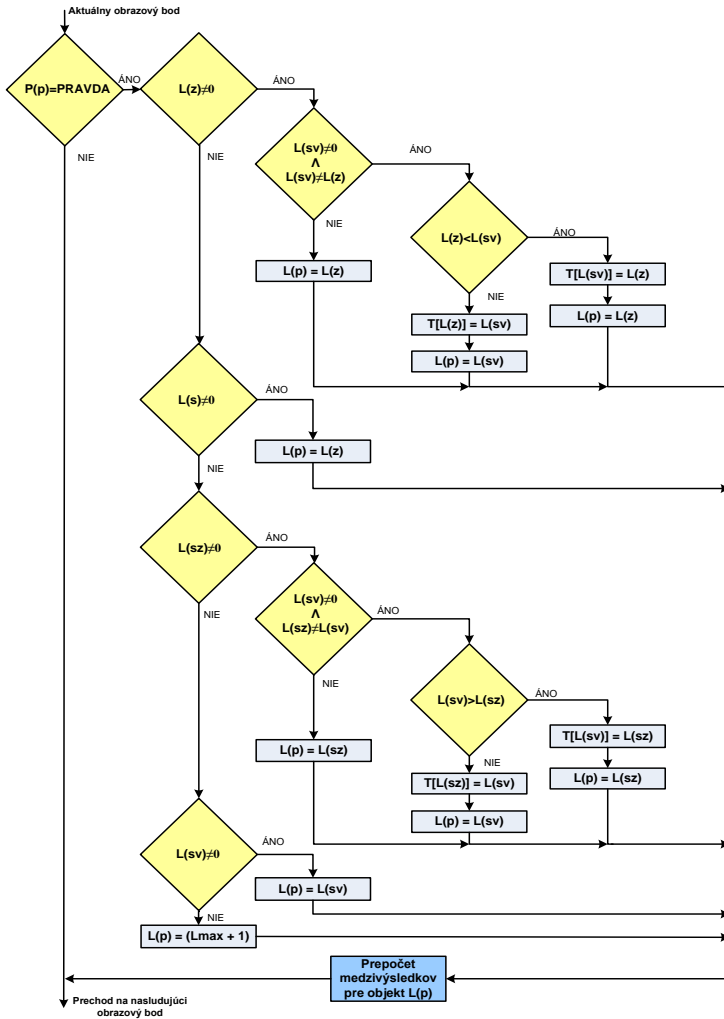
Na rozdiel od publikovaných riešení rozhodovacieho stromu[14],[15], ktoré vytvárajú obecné nemonotónnu tabuľku ekvivalencií, bol navrhnutý rozhodovací strom (obr. 4-15), ktorého výsledkom je tabuľka monotónne klesajúcich ekvivalencií (obr. 4-14). Fáza vyhladzovania stromu objektových identifikátorov sa tým zjednodušuje na jediný priechod tabuľkou. Takýto algoritmus je vhodný najmä pre implementáciu do štruktúr programateľných obvodov (FPGA).



Obr. 4-14 Grafické znázornenie šírenia identifikátorov pri použití navrhnutého rozhodovacieho stromu

Optimálnou implementáciou algoritmu bolo dosiahnuté signifikantné 26 násobné zrýchlenie spracovania snímky a vyhodnotenia polohy a plochy jednotlivých objektov s lineárnou závislosťou procesného času na celkovej ploche objektov v obraze. V prípade priemerného 10 % pokrytia obrazovej scény objektmi záujmu, za použitia HW koncepcie navrhutej v rámci tejto práce, je teoretická priepustnosť obrazových dát 18 MPixel/s.

Vzhľadom na dosiahnutú rýchlosť spracovania obrazu a odhadovaný dátový tok v reálnom čase je možné uvedený optimalizovaný algoritmus implementovať do HW prostriedkov bez nároku na externú pamäť obrazových dát. Vhodným prepojením obrazového senzoru a výpočtového jadra, ktoré by malo disponovať blokmi rýchleho násobenia a pamäťovým kanálom DMA, je možné realizovať koncepciu jednoduchšej inteligentnej kamery poskytujúcu výsledky merania v reálnom čase a s minimálnym oneskorením.



Obr. 4-15 Vývojový diagram optimalizovaného algoritmu značenia oblasti (rozhodovací strom pre jeden pixel)

5 ZÁVER

Hlavným cieľom dizertačnej práce bol návrh metód pre zvýšenie presnosti merania polohy objektov na základe obrazovej informácie, aplikácie vhodných pre inteligentné kamery s implementáciou v reálnom čase.

Aby bolo možné stanovený cieľ práce dosiahnuť, bola navrhnutá a realizovaná inteligentná kamera s obrazovým senzorom CMOS poskytujúca úplnú kontrolu nad nastaviteľnými parametrami obrazového senzoru a procesom spracovania obrazových dát. Pre riadenie kamery a realizáciu presných meraní polohy taktiež vznikol špecializovaný software. Navrhnutá kamera sa stala súčasťou meracieho pracoviska, ktoré umožnilo vývoj a verifikáciu metód subpixelového merania diskutovaných v rámci tejto práce.

Originálne výsledky dosiahnuté v rámci riešenia tejto práce:

- **Analýza a identifikácia kľúčových parametrov metódy obrazového ťažiska vzhľadom na neistoty merania polohy:**

V rámci práce bola predstavená metóda identifikácie objektov na základe a priori obrazovej informácie vo forme aktívnych markerov. Vplyv šumov indukovaných do obrazovej informácie fyzikálnymi parametrami použitého obrazového senzoru a ich propagácia do výsledku merania polohy objektu boli analyzované. Na základe analýzy dát bola stanovená optimálna miera filtrácie potlačujúca náhodnú zložku chyby merania polohy.

Bola identifikovaná jednoznačná závislosť medzi nastavením jasového prahu algoritmu, fluktuáciou plochy markeru a jeho polohou v rámci meranej scény, na základe ktorej bol navrhnutý nový postup charakterizácie rozlíšenia neznámeho obrazového senzoru (neznámej kamery).

Bola identifikovaná nelineárna závislosť nastavenia jasového prahu a dosiahnuteľnej neistoty merania polohy markeru obsahujúca niekoľko lokálnych miním a maxím neistoty. Podrobnou analýzou tejto závislosti bol za určitých podmienok nastavenia jasového prahu pozorovaný kvázi sínusový priebeh odchýlky určenia polohy markeru od ideálne lineárneho priebehu polohy. Výsledky pozorovania sú v zhode s pozorovaním publikovaným v rámci práce [9], avšak analýzy vykonané v priebehu riešenia tejto práce jednoznačne potvrdzujú, že uvedený kvázi sínusový priebeh priamo súvisí s voľbou hodnoty jasového prahu. V citovanej práci je pozorovaný priebeh pripisovaný nevhodnej voľbe úrovne signálu kompenzujúceho úroveň tmavých obrazových bodov. Zistenia v rámci tejto práce nie sú v priamom rozpore s publikovanými tvrdeniami, prinášajú však iný pohľad na vznik uvedeného javu. Zmena úrovne kompenzačného signálu a posunutie jasovej úrovne prahu sú dva mechanizmy, ktoré môžu mať rovnaký vonkajší prejav, avšak

priama súvislosť priebehu chyby a hodnoty jasového prahu doposiaľ nebola publikovaná.

Identifikovaná závislosť taktiež potvrdzuje nevhodnosť použitia štatistických algoritmov typu *optimal-threshold*, nastavujúcich automaticky jasový prah, v prípade požadovaného subpixelového výsledku merania polohy objektu s minimálnou neistotou.

- **Stanovenie kritéria identifikujúceho optimálne nastavenie parametrov algoritmu s ohľadom na minimalizáciu neistoty merania polohy:**

Na základe identifikovaných závislostí medzi hodnotou jasového prahu a priebehom plochy markeru v rámci meranej scény a získaných závislostí medzi jasovým prahom a neistotou merania bola navrhnutá nová metóda identifikácie optimálneho nastavenia hodnoty jasového prahu v požadovanej lokálnej pracovnej oblasti. Pre praktické nastavenie meranej úlohy je optimálne nastavenie prahovej úrovne vždy identifikované periodickým a symetrickým priebehom zmeny plochy markeru v závislosti od jeho polohy v rámci požadovaného rozsahu posunutí. Aplikáciou navrhnutého kritéria pri nastavovaní parametrov algoritmu bolo u verifikačných meraní možné dosiahnuť zníženie neistoty merania polohy v priemere o viac ako polovicu.

- **Zvýšenie presnosti základného algoritmu aplikácie vhodné pre inteligentnú kameru:**

V rámci riešenia práce bol identifikovaný vzťah medzi tvarom jasového profilu aktívneho markeru, nastavením jasového prahu a dosiahnuteľnou neistotou merania polohy. Uvedené zistenia inšpirovali návrh novej metódy zvýšenia presnosti merania polohy markeru moduláciou intenzity jeho jasu, synchronizovanou s odberom snímok. Aplikáciou navrhnutej metódy a verifikačným meraním bolo potvrdené priemerné zníženie neistoty merania o viac ako polovicu v porovnaní s hodnotou nastavenou do optima použitím metód uvedených vyššie. Pri aplikácii navrhnutej metódy bola dosiahnutá reálna neistota merania polohy markeru, v najlepšom z prípadov, menšia než $\frac{1}{1000}$ pixel.

- **Optimalizované algoritmy merania polohy jedného a viacerých objektov vzhľadom na rýchlosť spracovania v inteligentnej kamere :**

Bola uvedená podrobná analýza faktorov vplyvujúcich na cenu algoritmu merania polohy jedného objektu v scéne metódou obrazového ťažiska pri implementácii tejto metódy do inteligentnej kamery na báze DSP *Blackfin*[®]. Na základe výsledkov analýz boli optimalizované jed-

notlivé výpočtové operácie a dosiahnuté výsledné cca. 7-násobné zrýchlenie behu algoritmu v porovnaní s algoritmom bez optimalizácie. Celkovo je tak možné s navrhnutou kamerou a optimalizovaným algoritmom spracovať v reálnom čase až cca. 32 MPixel obrazových dát za sekundu (teoreticky cca. 93 jednoduchých odmerov polohy objektu za sekundu, pri rozlíšení obrazu 752 x 480 obrazových bodov).

Práca sa taktiež zaoberala optimalizáciou algoritmu výpočtu obrazového ťažiska súčasne viacerých objektov v obrazovej scéne. Oproti publikovaným algoritmom značenia spojitých oblastí bol optimalizovaný rozhodovací strom algoritmu. Výsledkom optimalizácie je monotónna tabuľka ekvivalencií objektov vhodná pre jednopriechodové spracovanie (vhodná pre implementáciu do *FPGA*). Navrhovaná implementácia je tak 26-násobne rýchlejšia v porovnaní so základnou neoptimalizovanou implementáciou algoritmu. V prípade 10 % pokrytia obrazovej scény objektami, za použitia navrhutej HW koncepcie kamery, je dosiahnuteľná teoretická priepustnosť obrazových dát 18 MPixel/s (teoreticky cca. 53 odmerov polohy objektov za sekundu, pri rozlíšení obrazu 752 x 480 obrazových bodov).

Dosiahnuté výsledky pri verifikácii navrhnutých optimalizovaných algoritmov jednoduchého a multi-objektového výpočtu obrazového ťažiska predurčujú použitie týchto algoritmov v jednoduchých obrazových senzoroč, ktoré nedisponujú možnosťou uložiť celý snímok do obrazovej pamäti (implementácia uvedených algoritmov vyžaduje uloženie max. 4 obrazových riadkov).

Z uvedených záverov plynie, že vytýčené ciele práce boli splnené. Výsledky práce boli priebežne v rámci riešenia práce využívané a publikované (publikačné výsledky sú obsahom kapitoly 7). Okrem publikačných výstupov, boli výsledky práce, najmä navrhnutá inteligentná kamera ViSor a meracie pracovisko používané v rámci riešenia množstva bakalárskych a diplomových prác. Navrhnutá inteligentná kamera ViSor, spoločne s vytvoreným PC softwarom je súčasťou výučby predmetov zameraných na obrazové senzory, videometriu a bezdotykové meranie na Katedre měření.

6 ZOZNAM LITERATÚRY POUŽITEJ V TÉZACH

- [1] Kahar, N.F., a ďalší, "Embedded Smart Camera Performance Analysis." International Conference on Computer Engineering and Technology (IC CET'09), 2009, stránky 79-83, ISBN 978-1-4244-3334-6
- [2] Liu, Yung-Chun, a ďalší, "A computer vision system for automatic steel surface inspection.", 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2010, stránky 1667-1670, ISBN 978-1-4244-5046-6
- [3] Pribula, O., Janošek, M. a Fischer, J., "Optical Position Sensor Based on Digital Image Processing: Magnetic Field Mapping Improvement." Radioengineering, 2011, vyd. 20, stránky 55-60, ISSN 1210-2512
- [4] Stanton, R.H., Alexander, J.W., Dennison, E.W., Glavich, T.A. and Hovland, L.F., "Optical tracking using Charge-Coupled." Optical Engineering, č. 26, zv. 9, 1987
- [5] Shortis, M.R. Clarke, T.A., Short, T., "A comparison of some techniques for the subpixel location of discrete target images." Videometrics III, SPIE, 1994, zv. 2350, stránky 239-250
- [6] Clarke, T.A., "An analysis of the properties of targets uses in digital close range photogrammetric measurement." Videometrics III, SPIE, 1994, zv. 2350, stránky 251-262
- [7] Clarke, T.A. and Wang, X., "An analysis of subpixel target location accuracy using Fourier Transform based models." Videometrics IV, SPIE, 1995, zv. 2598
- [8] Shorts, M.R., Clarke, T.A. a S., Robson., "Practical Testing of the Precision and Accuracy of Target Image Centring Algorithms." Videometrics IV, SPIE, 1995, zv. 2598
- [9] Clarke, T.A., "A frame-grabber related error in subpixel target location." Photogrammetric Record, 1995, zv. XV
- [10] Palaj, P., *Analýza vlastností kamer a metodika jejich testování*, Diplomová práca, ČVUT Praha, Fakulta elektrotechnická, Katedra Měření, 2013
- [11] *Datasheet MT9V032: 1/3-Inch Wide-VGA Digital Image Sensor*, Micron Technologies Inc., 2006, Rev. B3/07
- [12] Fischer, R. E., Tadic G., Biljana, Y., Paul R., *Optical System Design*, SPIE Press, 2008, ISBN:0071472487

[13] Fischer, J., Optoelektronické senzory a videometrie. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2002, ISBN 80-01-02525-X

[14] Wu K., Otoo E., Suzuki K., "Optimizing two-pass connected-component labeling algorithms" Pattern Analysis & Applications, Springer-Verlag, 2009, zv. 12, vyd. 2, stránky 117 – 135, ISSN: 1433-7541

[15] Dillencourt M.B., Samet H., Tamminen M., "A general approach to connected component labeling for arbitrary image representations" Journal of the ACM (JACM), zv. 2, vyd. 39, 1992, ISSN:0004-5411

7 ZOZNAM PUBLIKÁCIÍ DIZERTANTA

U všetkých uvedených publikácií je podiel jednotlivých autorov zhodný.

7.1 Publikácie vzťahujúce sa k téme dizertačnej práce

7.1.1 Publikácie v impaktovaných časopisoch

[1] Platil, A., Tomek, J., Pribula, O., Janošek, M., Fischer, J., a ďalší, "Magnetopneumography Using Optical Position Reference", Sensor Letters, 2013, vyd. 11, zv. 1, stránky 69-73, ISSN 1546-198X

[2] Pribula, O., Janošek, M., Fischer, J., "Optical Position Sensor Based on Digital Image Processing: Magnetic Field Mapping Improvement", Radioengineering, 2011, vyd. 20, stránky 55-60, ISSN 1210-2512

[3] Pribula, O., Šedivý, J., Fischer, J., "Cost-effective Image Acquisition System for Precise PC-based Measurement", Przegląd Elektrotechniczny, 2011, vyd. 87, zv. 7, stránky 259-263, ISSN 0033-2097

7.1.2 Publikácie v recenzovaných časopisoch

[4] Pribula, O., Fischer, J., "Alternative Tools For Embedded Signal Processing Applications Development: Evaluation Of Image Processing Performance on Blackfin DSP" Access server, 2010, vol. 8., ISSN 1214-9675, [online]

7.1.3 Patenty

7.1.4 Publikácie excerptované WoS

[5] Fischer, J., Pribula, O., "Precise Subpixel Position Measurement with Linear Interpolation of CMOS Sensor Image Data", Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS), 2011, vyd. 1, stránky 500-504, ISBN 978-1-4577-1426-9

[6] Pribula, O., Fischer, J., "Real Time Precise Position Measurement Based on Low-Cost CMOS Image Sensor", 18th International Conference on Systems, Signals and Image Processing, University of Sarajevo, 2011, stránky 119-122, ISBN 978-9958-9966-3-4

[7] Pohanka, J., Pribula, O., Fischer, J., "An Embedded Stereovision System: Aspects of Measurement Precision", Proceedings of the 12th Biennial Baltic Electronics Conference, Tallin University of Technology, 2010, stránky 157-161, ISSN 1736-3705. ISBN 978-1-4244-7357-1

7.1.5 Publikácie ostatné

[8] Platil, A., Tomek, J., Pribula, O., Janošek, M., Fischer, J. a ďalší, "Magnetopneumography - Incorporation of Optical Position Reference" Magnetic Measurements 2012, Slovenská Technická Univerzita Bratislava, 2012, ISBN 978-80-227-3770-8

[9] Platil, A., Tomek, J., Pribula, O., Janošek, M., Fischer, J., a ďalší, "Magnetopneumography Using Optical Position Reference", EMSA 2010, Uludag University Bodrum, 2010

[10] Pribula, O., Šedivý, J., "USB Board Camera for 2D and 3D PC Based Vision Systems", POSTER 2010 - Proceedings of the 14th International Conference on Electrical Engineering, ČVUT v Praze, 2010, ISBN 978-80-01-04544-2

[11] Pribula, O., "Modular Smart Camera for Image-Based Measurement", Proceedings of the 13th International Conference on Electrical Engineering, ČVUT v Praze, 2009

[12] Pribula, O., "GNU Tools for Blackfin(R) Based Embedded Image Processing Applications Development", Proceedings of the 12th International Conference on Electrical Engineering, ČVUT v Praze, 2008

[13] Janošek, M., Pribula, O., "Optically Referenced 2D Magnetic Field Mapping", EUROSENSORS XXII, 2008, stránky 247-249, ISBN 978-3-00-025217-4

[14] Pribula, O., "Universal Image Sensor Board - Line Camera Using the Area CMOS Image Sensor Implementation", Proceedings of the 11th International Conference on Electrical Engineering, ČVUT v Praze, 2007

[15] Pribula, O., Fischer, J., "Embedded Sensor for Real-time Image-based Measurement" Proceedings of the 10th International Conference on Electrical Engineering, ČVUT v Praze, 2006

7.2 Ostatné publikácie

7.2.1 Publikácie v impaktovaných časopisoch

[16] Nováček, P., Ripka, P., Pribula, O., Fischer, J., "Mine Detector with Discrimination Ability", Journal of Electrical Engineering, 2010, vyd. 61, zv. 7/s, stránky 141-143, ISSN 1335-3632

7.2.2 Publikácie v recenzovaných časopisoch

7.2.3 Patenty

7.2.4 Publikácie excerptované WoS

[17] Pribula, O., Pohanka, J., Fischer, J., "Real-Time Video Sequences Matching Using the Spatio-Temporal Fingerprint", 15th IEEE Mediterranean Electromechanical Conference MELECON, 2010, stránky 911-916, ISBN 978-1-4244-5794-6

7.2.5 Publikácie ostatné

[18] Tomek, J., Platil, A., Janošek, M., Pribula, O., "Magnetopneumography - Real-World Phantom Inversion", 12th International Workshop on Optimization and Inverse Problems in Electromagnetism, 2012, stránky 248-249, ISBN 978-94-6197-069-5

[19] Demčák, D., Pribula, O., "Autonomous Robot Control with Smart Camera Based Optical Feedback", POSTER 2011 - 15th International Student Conference on Electrical Engineering, Praha: ČVUT, 2011, ISBN 978-80-01-04806-1

[20] Pribula, O.: "Development of a Smart Camera and a Mobile Robot for Demonstration and Validation of Precise Positioning Methods Based on the Real Time Image Processing", Workshop 2010, ČVUT v Praze, 2010, ISBN 978-80-01-04513-8

[21] Platil, A., Janošek, M., Rychetský, Š., Pribula, O., Ripka, P., "Short-range Navigation of Minesweeping Detector", Eurosensors XXII2008, ISBN 978-3-00-025218-1

7.3 Ohlasy

[2] citované v:

Popelka, J. Paces, P., "Performance of smart sensors standards for aerospace applications", Przegląd Elektrotechniczny, zv. 88, vyd: 1A, stránky 229-232, 2012, ISSN 0033-2097

[3] citované v:

Xu, G., Li, X., Su, J., a další, "Integrative evaluation of the optimal configuration for the measurement of the line segments using stereo vision", OPTIK - International Journal on Light and Electron Optics, Elsevier, zv. 124, vyd. 11, stránky 1015-1018, 2013, ISSN: 0030-4026

[17] citované v:

Cook, R., "An efficient, robust video fingerprinting system", IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME), Spain, 2011, ISBN: 978-1-61284-348-3

8 SUMMARY

The main topic of this doctoral thesis is analysis of precise position measurement methods based on the image information processing and their optimal implementation into smart camera hardware structures.

Based on the need of an image processing system with opened hardware and software architecture a simple modular and compact smart camera with a digital signal processor and CMOS image sensor was designed. A designed and realized measurement workplace, which allows object position change with step of $0.1\mu\text{m}$, together with the smart camera create a platform for analysis and verification of subpixel resolution precise position measurement methods.

Identification of the object of interest in the measured scene was simplified with the use of a-priori information in a form of an active marker. Once the active marker is assumed the segmentation part of the image processing algorithm is reduced to the image thresholding operation.

Features of the object position measurement based on the centroid calculation were in details analyzed with the main focus on the image threshold value optimization. A non-linear dependency between the image threshold value and achievable position measurement uncertainty with significant local minima and maxima was identified. Having analyzed a large amount of the real world data a new criterion for identification of the optimal threshold value as well as a new method for unknown image sensor raster identification have been developed.

Based on the analysis of brightness distribution on the marker edge a new method increasing the achievable measurement precision with the use of marker brightness modulation was introduced. It has been shown that the developed method reduces the achievable uncertainty to one half compared to the position measurement uncertainty obtained when the proposed method was not applied. Position measurement uncertainty less than $\frac{1}{1000}$ pixel has been achieved during the real world measurement.

An optimized implementation of the centroid calculation algorithm allowing image data throughput up to 32 MPixel per second was introduced. A new algorithm with optimized object identification decision tree for multiple objects position measurement in a multi-object scene has been developed. Utilizing the developed algorithm the image data throughput of 18 MPixel/s can be theoretically achieved (assuming the average 10 % objects scene coverage and the smart camera hardware designed in this work).

9 RESUMÉ

Dizertačná práca sa zaoberá metódami presného merania polohy objektov na báze spracovania obrazovej informácie a ich optimálnou implementáciou do hardwarových štruktúr inteligentnej kamery.

V rámci riešenia práce bola na základe potreby hardwarovo a softwarovo otvoreného systému vyvinutá jednoduchá modulárna inteligentná kamera s digitálnym signálovým procesorom a obrazovým senzorom CMOS. Bolo navrhnuté a realizované meracie pracovisko, umožňujúce zmenu polohy meraných objektov s krokom $0,1\mu\text{m}$, ktoré v súčinnosti s navrhnutou inteligentnou kamerou vytvorilo platformu pre analýzu a verifikáciu metód presného merania so subpixelovým rozlíšením.

Identifikácia objektu záujmu v obrazovej scéne bola zjednodušená pridaním a priori informácie vo forme aktívneho markeru, čím bola zavedená normalizácia obrazovej informácie a úloha segmentácie obrazu zjednodušená do formy prahovania jasových hodnôt obrazových bodov.

Práca podrobne analyzuje vlastnosti algoritmu pre výpočet polohy objektu na základe obrazového ťažiska, pričom je hlavný záujem práce sústredený na optimalizáciu nastavenia hodnoty jasového prahu s ohľadom na dosiahnuteľné parametre merania polohy. Bola identifikovaná obecné nelineárna závislosť medzi hodnotou jasového prahu a neistotou merania polohy objektu vyznačujúca sa výraznými lokálnymi extrémami. Na základe analýzy množstva reálnych meraní bolo definované nové kritérium pre identifikáciu optimálneho nastavenia jasového prahu, ako aj nová metóda identifikácie rastu obrazových bodov neznámeho obrazového senzoru.

Na základe analýzy rozloženia jasu na hranách použitého markeru bola navrhnutá nová metóda zvýšenia presnosti merania polohy objektu moduláciou intenzity jasu markeru. Praktické merania ukázali zníženie neistoty merania polohy použitím navrhnutej metódy v priemer o polovicu v porovnaní s optimálne nastaveným meraním bez aplikácie tejto metódy. V reálnom prípade sa aplikáciou navrhnutej metódy podarilo dosiahnuť neistotu merania polohy nižšiu než $\frac{1}{1000}$ pixel.

V rámci riešenia práce bola predstavená optimálna implementácia algoritmu výpočtu obrazového ťažiska jedného objektu umožňujúca spracovanie až 32 MPixel obrazový dát za sekundu. Pre výpočet polohy viacerých objektov v multi-objektovej scéne bol navrhnutý nový algoritmus s optimalizovaným rozhodovacím stromom identifikácie objektov. Aplikáciou tohto algoritmu je možné pri priemernom 10 % pokrytí scény objektami, s inteligentnou kamerou navrhnutou v rámci riešenia tejto práce, dosiahnuť teoretickú priepustnosť obrazových dát 18 MPixel/s.

