

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA MECHATRONIKY A MEZIOBOROVÝCH
INŽENÝRSKÝCH STUDIÍ



AUTOREFERÁT
DISERTAČNÍ PRÁCE

Liberec 2008

Jakub Štilec

VYUŽITÍ POČÍTAČOVÉHO VIDĚNÍ V ROBOTICE

AUTOREFERÁT DISERTAČNÍ PRÁCE

Uchazeč: Ing. Jakub Štílec
Studijní program: P 2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: 2612V045 Technická kybernetika
Pracoviště: Ústav mechatroniky a technické informatiky,
Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií,
Technická univerzita v Liberci
Školitel: Doc. Václav Záda, CSc.

ROZSAH DISERTAČNÍ PRÁCE A PŘÍLOH

Počet stran: 128

Počet obrázků: 48

Počet tabulek: 12

Disertační práce je k nahlédnutí na děkanátu FM, TU v Liberci

Studentská 2, budova A, tel.: +420 485 353 110

Autoreferát dizertační práce

Využití počítačového vidění v robotice

© Ing. Jakub Štilec, 2008

Abstrakt

V mnoha případech musí být průmyslový i mobilní robot schopen vnímat a rozpoznat prostředí, ve kterém se nachází. Důležitým tématem v této oblasti jsou metody stereo vidění. Jedná se o proces konstrukce trojrozměrného modelu scény, založený na zpracování dvou a více obrazů této scény, nasnímaných z různých míst. Hlavním problémem je vytvoření mapy disparity (hloubkové mapy obrazu). Mnoho výpočetně rychlých metod není schopno zpracovat scény s nedostatečným, nebo žádným výskytem textury. Pro tento typ scén a také pro scény s překrývajícími se objekty, nebo odlesky dochází ke vzniku velkého počtu chyb. Tato práce se zaměřuje na komplexní proces stereo vidění. Je zde prezentována metoda automatické kalibrace kamer. Dále uvádíme implementaci metody stereo-vidění rozšířené o přidání filtru výsledné mapy disparity. Takto upravená metoda je schopna zpracovávat scény s nedostatkem textury a snížit množství výskytu chyb ve výstupní mapě disparity. Navíc bylo realizováno urychlení celé metody, pomocí generování počátečního odhadu mapy disparity, založeném na detekci uměle přidaných vizuálních značek do scény. V závěru práce je předvedena úprava použité metody stereo-vidění pro distribuovaný výpočet.

Abstract

In many cases, the industrial and mobile robots must be able to sense and recognize their environment. An important research topic in the field is stereo vision. Stereo vision is the process of constructing a three dimensional model of a scene through processing of two or more planar images of this scene. The main problem is the construction of a disparity map, because it is computationally intensive. Next problem is quality of output disparity map. Many of computationally relatively fast methods aren't able to process scenes with a lack of texture. Those produce big number of faults for these types of scenes and also for scenes with occlusion objects. This thesis is focused on the whole process of stereo vision. A method for automatic camera calibration is presented. We implemented method of stereo matching of rectified images and extended it by adding post processing of output disparity map. Extended method is able to process scenes with a lack of texture and decrease number of faults in disparity map. Additionally computational time was decreased by use of initial estimation based on detection of artificial visual targets in the scene. Finally we proposed a method for parallelization of stereo matching algorithm.

Obsah

| | |
|--------------------------------------|----|
| 1. Úvod | 1 |
| 2. Současný stav problematiky | 2 |
| 3. Cíle disertační práce | 5 |
| 4. Způsob řešení | 6 |
| 5. Dosažené výsledky disertace | 10 |
| 6. Závěr | 12 |
| 7. Literatura | 14 |
| 8. Vlastní publikace | 21 |

1. Úvod

Člověk vnímá své okolí prostřednictvím pěti smyslů. Zrak je z těchto smyslů nejvýznamnějším. Reprezentuje největší podíl informací, které přijímáme, podle kterých rozhodujeme a jednáme. Pro oblast robotiky je lidský zrak důležitou inspirací, kterou je značná snaha napodobit. Nahrazujeme oko průmyslovou kamerou a mozek výkonným procesorem. Přestože je lidský zrak již dlouhou dobu předmětem mnoha vědeckých studií a byl již poměrně dobře zdokumentován, stále zůstává mnoho nezodpovězených otázek a nejasností ohledně zpracování obrazové informace lidským mozkem.

Bez kvalitního zvládnutí metod počítačového vidění, které navíc bude i dostatečně rychlé pro použití v robotice, nebude nikdy možné vytvořit a masivně rozšířit autonomní roboty, schopné bezpečného pohybu v neznámém prostředí. Proto je právě téma stereo-vidění robotů aktuální a velmi důležité. Pomocí metod počítačového vidění je možné naplánovat trajektorii pohybu v prostoru s překážkami, manipulaci s objekty a v neposlední řadě lze také využít vizuální zpětné vazby. Tato schopnost je zásadní pro široké spektrum aplikací od průmyslových robotů, mobilních robotů až po inteligentní spotřebiče. Přitom je jediným požadovaným vstupem obraz z kamer, kde přes vysokou cenu průmyslových kamer, cena běžných počítačových kamer klesá a při použití vhodné metody zpracování, je jejich výstup postačující.

2. Současný stav problematiky

Proces stereo-vidění lze rozdělit do následujících samostatných kroků:

- rozpoznání bodů ve scéně pro následnou kalibraci
- kalibrace kamer
- prostorová rekonstrukce
- sestavení mapy disparity
- distribuovaný výpočet

Úloha detekce efektoru ramene robotu v nasnímaném obrazu je v oblasti robotiky velice důležitou. Lze jí využít nejen pro kalibraci kamer, kde je nezbytné získat n párů trojrozměrných souřadnic efektoru ramene robotu a jejich dvourozměrných souřadnic v nasnímaných projekcích, ale např. také pro vizuální zpětnou vazbu. Úlohu je možné řešit umístěním aktivních prvků na efektor ramene robotu, jejichž zpracování je výpočetně nenáročné. Další možností je použití pasivních prvků, které snímanou scénu neovlivňují, ale jejich detekce má vysoké nároky na výpočet.

Kalibrace kamery je podstatným krokem pro jakékoliv další zpracování obrazu. V posledních letech bylo publikováno mnoho studií týkajících se metod kalibrace. Množství publikací bohužel také ztížilo možnost orientace v této problematice. Proto je obtížné nalézt vhodnou metodu pro řešení daného problému a nalézt porovnání těchto metod. Přestože některé metody stereo vidění používají informace z nekalibrovaných kamer [18], je kalibrace důležitým krokem ve všech oblastech vyžadujících metrickou informaci. Použití precizně kalibrovaných kamer umožňuje měření vzdáleností v reálné scéně na základě projekcí z jednotlivých kamer na

dvojměrnou plochu jejich CCD. Uveďme například model kamery, který prezentoval Hall [35], Faugerass [19], nebo Toscani [38].

Prostorová rekonstrukce slouží k získání trojrozměrné informace scény snímané jednou pohybující se kamerou, nebo statickou strukturou složenou minimálně ze dvou kamer. Vzájemný vztah mezi rozdílnými pohledy na scénu lze popsat pomocí epipolární geometrie [58], [59]. Závěrů epipolární geometrie lze využít k rektifikaci vstupních obrazů pro následnou metodu stereo-párování. Jedná se o transformaci vstupních obrazů tak, aby si odpovídající pixely v obou obrazech ležely ve stejných řádcích resp. sloupcích. Transformované obrazy tak výrazně urychlí následnou metodu stereo-párování.

Úkolem metody stereo-vidění je ze vstupních obrazů vytvořit mapu disparity. Jedná se o matici D rozměru výšky a šířky vstupních obrazů v pixelech, kde hodnota prvku $D_{x_A y_A}$ odpovídá vzdálenosti pixelu o poloze (x_A, y_A) v prvním obraze od jeho párového pixelu v obraze druhém. Obecně lze metody stereo-vidění rozdělit podle způsobu a typu vyhledávaných oblastí. Vyhledávají se oblasti, které jsou ve vstupních projekcích neměnné. Nejvíce používanou metodou je detekce hran, které je definováno jako strmá změna intenzity v dané oblasti. Zmiňme např. hranové detektory: Sobelův, Laplacian of Gaussian (LOG), Cannyho atd. S ohledem na typ mohou být vyhledávané vlastnosti:

1. **numerické**
2. **symbolické**

V prvním případě mohou být algoritmy klasifikovány na korelační stereo metody, iterativní stereo metody a

konstruktivní stereo metody založené na dynamickém programování. Tato skupina je výpočetně rychlá, ale zatěžuje výstup vysokým množstvím chyb. U druhé skupiny dochází k vyhledávání celých objektů, tento přístup výrazně zlepšuje kvalitu výstupních dat, ale přináší vysokou výpočetní režii.

Mezi hlavní požadavky kladené na metody stereo-vidění pro použití v oblasti robotiky je vysoká rychlost zpracování. Tento požadavek eliminuje množství existujících metod, které jsou sice schopné podat kvalitní výstupy, ale ve velmi dlouhých výpočetních časech. Z tohoto důvodu se v robotice využívají spíše jednodušší a výpočetně nenáročné metody. Významné problémy také způsobují proměnlivé světelné podmínky, odlesky a překrývající se objekty v obraze (occlusion objekty), které způsobuje největší množství chyb. Dalším problémem mnoha metod je omezení maximální velikosti disparity, které může mít horní hranici pouze deset pixelů.

Problematika stereo-vidění je velice aktuální a v této oblasti je stále publikováno rozsáhlé množství prací. Na druhou stranu, ale nejsou jednotlivé postupy standardizovány ani přesně definovány a je obtížné se v takto rozsáhlém množství prací zorientovat. Více informací lze nalézt např. v [5] a [57]. Za zajímavost také stojí použití výpočetního výkonu GPU moderních grafických karet [3].

Velkým problémem metod počítačového vidění je jeho výpočetní náročnost. Aby bylo dosaženo co nejrychlejší výpočtu, je nutné použít metod paralelního výpočtu. Toto může být provedeno pomocí drahých výpočetních klastrů, nebo pomocí sítě běžných počítačů, které se v posledních letech výrazně zlevnily. Z tohoto důvodu se zdá být vhodným řešením zřetěžit výkon běžných počítačů a s jejich pomocí

vytvořit distribuovaný systém počítačového vidění. Postup úpravy metod stereo-vidění pro distribuované vidění je vždy specifický a závislý na konkrétní metodě. Pro komunikaci jednotlivých výpočetních jednotek lze však využít standardizovaných technologií jako je přímá socketová komunikace, remoting, nebo např. WCF (Windows Communication Foundation).

3. Cíle disertační práce

Jednotlivé části procesu stereo-vidění jsou ve většině případů v dostupné literatuře uváděny samostatně a vysvětleny jsou pouze na izolovaných případech. Právě z tohoto důvodu je cílem této práce, popsat celý proces stereo-vidění jako jediný celek, realizovaný pro konkrétní aplikaci s robotickým ramenem firmy ABB a statickou strukturou dvojice průmyslových kamer.

Rozpoznání polohy efektoru ramene robotu ve scéně nasnímané pomocí jednotlivých kamer je nezbytným krokem pro následný proces kalibrace. Cílem této práce je realizovat rychlou a zároveň jednoduchou metodu, založenou na použití aktivně řízených LED ve snímané scéně.

Kalibrace kamer je podstatným krokem pro jakékoliv další zpracování obrazu. Jedná se o oblast diskutovanou v mnoha vědeckých publikacích. Co zde, ale chybí je přehled některých metod vhodných pro použití v oblasti robotiky spolu s jejich porovnáním na konkrétním případě, ověřením kvality výstupu a určením přesnosti.

Přesto, že je epipolární geometrie velice dobře popsána, je důležité ji zmínit. Nebudeme se pouze zaměřovat na epipolární geometrii samotnou, ale zejména na její důsledky nutné pro prostorovou rekonstrukci a rektifikace obrazu.

Oblast problematiky hloubkového vnímání je komplexní a stále se rozvíjející. Z tohoto důvodu bude jako součást disertační práce uveden přehled existujících přístupů, jejich vlastností a možnosti použití omezení pro urychlení uvedených metod.

Získané rektifikovaných obrazy jsou vhodným vstupem pro metodu stereo-párování a sestavení výsledné mapy disparity. Cílem této práce je z rozsáhlé řady metod stereo-vidění vybrat tu nejvhodnější pro použití v oblasti robotiky. Mezi kritéria výběru bude patřit vysoká rychlost výpočtu a nízké omezení hodnoty disparity. Dále se zaměříme na zkvalitnění výstupu zvolené metody s ohledem na zachování nízkého výpočetního času a také na zrychlení metody pomocí vhodného počátečního odhadu.

Vzhledem k vysokým výpočetním časům metody stereo-vidění je nezbytné výpočet distribuovat. Cílem disertační práce je úprava metody stereo-vidění pro distribuovaný výpočet, zhodnocení vhodných komunikačních technologií a ověření výpočetní rychlosti.

4. Způsob řešení

Druhá kapitola disertační práce popisuje realizaci rychlé a zároveň jednoduché automatizované metody detekce polohy efektoru ramene robotu pro konkrétní aplikaci s ramenem robotu společnosti ABB. Realizovaná metoda umožňuje

snadné a automatizované nasnímaní množiny párů trojrozměrných pozic efektoru ramene robotu a jejich dvourozměrných pozic v nasnímaném obraze. Získaná data jsou určena pro kalibraci jednotlivých kamer. Použitá metoda je založena na detekci polohy aktivních LED umístěných na efektoru ramene robotu, kde trojrozměrná poloha LED je dobře známa a detekuje se pouze poloha jednotlivých LED v nasnímaném obraze. Ověřili jsme vysokou odolnost vůči chybám způsobených nedokonalostí nasnímaného obrazu a díky proměnlivým světelným podmínkám.

Kalibrace kamer je podstatným krokem pro jakékoliv další zpracování obrazu. Jedná se o oblast diskutovanou v mnoha vědeckých publikacích. Co zde, ale chybí je přehled některých metod vhodných pro použití v oblasti robotiky spolu s jejich porovnáním na konkrétním případě. Právě z tohoto důvodu byly v třetí kapitole disertační práce realizovány tři metody kalibrace kamery a to metoda Hallova, Faugerasova a Faugerasova se zkrácením. Jednotlivé metody byly popsány spolu s použitým matematickým aparátem, tak aby je bylo možné znovu snadno implementovat. Na závěr byla ověřena a porovnána přesnost všech zmíněných metod na reálných datech z robotické scény.

Čtvrtá kapitola disertační práce popisuje možnosti hloubkové rekonstrukce a epipolární geometrii. Nezaměřujeme se pouze na epipolární geometrii samotnou, ale zejména na její důsledky nutné pro prostorovou rekonstrukci a rektifikaci nasnímaných obrazů. V rámci této kapitoly byla vytvořena vlastní implementace metody rektifikace, která je důležitým předpokladem pro následující metodu stereo-párování.

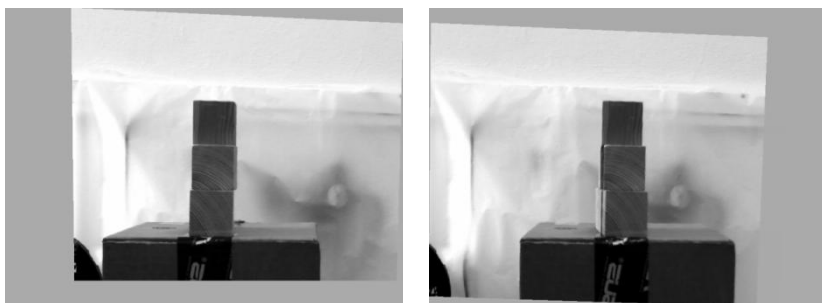
Oblast problematiky hloubkového vnímání je komplexní a stále se rozvíjející, proto pátá kapitola disertační práce obsahuje shrnutí existujících metod, jejich vlastností a možnosti použití omezení pro urychlení uvedených metod. Součástí textu je množství referencí, které se dají dobře použít pro další výzkum v oblasti stereo-vidění.

Získané rektifikované obrazy jsou vhodným vstupem pro metodu stereo-párování a sestavení výsledné mapy disparity. V rámci této práce byla v šesté kapitole disertační práce úspěšně implementována metoda stereo-párování, založená na dynamickém programování a zjednodušeném korelování na okolí pixelů [57]. Metoda byla dále vylepšena o filtr výstupní mapy disparity, tak aby došlo k odstranění chyb a doplnění informací v místech obrazu s nedostatečnou, nebo žádnou texturou. Použitý filtr byl navržen takovým způsobem, aby nebyl výpočetně příliš náročný. Součástí řešení je také experimentální ověření funkce metody na několika rozdílných typech scény. Z výsledků je patrné, že metoda byla schopna zpracovat komplexní scény a produkovat kvalitní mapu disparity. Příklad výstupu metody stereo-vidění pro jednu z testovaných scén lze nalézt na Obr. 1 a Obr. 2, kde první obsahuje dvojici rektifikovaných obrazů a na druhém lze nalézt výslednou mapu disparity. Světlejší barva značí vyšší hodnotu disparity a odpovídající vyšší vzdálenost objektu.

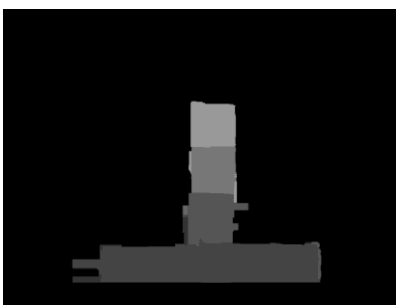
Dalším bodem, kterým jsme se zabývali, je generování počátečního odhadu pro metodu stereo-párování, založeném na detekci pozice a orientace vizuálních značek umístěných ve scéně ramene robotu. Jedná se o specifický případ, který si v námi uvažovaném případě scény ramene robotu můžeme dovolit. Počátečního odhadu bylo úspěšně využito pro

AUTOREFERÁT DISERTAČNÍ PRÁCE

urychlení metody stereo-párování. Příklad scény s použitím vizuálních značek lze nalézt na Obr. 3.



Obr. 1: Dvojice rektifikovaných obrazů



Obr. 2: Výsledná mapa disparity

Sedmá kapitola disertační práce je odpovědí na vysokou výpočetní náročnost metod počítačového vidění a zavádí vlastní řešení distribuovaného výpočtu. Tento problém je řešen poněkud netradičním způsobem. Jedná se o kombinaci řízeného jazyka C# na platformě .NET, který řeší veškeré otázky komunikace a neřízeného jazyka C++ na platformě Win32, který zajišťuje výpočet (jako DLL knihovna). V této kapitole jsou diskutovány rozdílné možnosti přístupu k řešení a záměrem je snaha o použití moderních technologií. Metoda byla navržena takovým způsobem, kde s rostoucím počtem

výpočetních strojů dochází k přibližně lineárnímu nárůstu výpočetního výkonu.



Obr. 3: Příklad scény s vizuálními terčičky

5. Dosažené výsledky disertace

Realizovaná metoda stereo-vidění byla schopná podat v prostředí ramene robotu velice kvalitní výsledky. Chyby, vzniklé v průběhu výpočtu, byly z velké části odstraněny následnou aplikací navrženého filtru na vypočítané mapě disparity. Algoritmus byl schopen korektně zpracovat nejen kruhové a válcové objekty, ale byl schopen zpracovat i scénu, ve které došlo ke vzájemnému překrývání jednotlivých objektů (occlusion objekty). Ke kvalitnímu výstupu metody došlo i v případě nedostatečně texturované scény.

V případě, kdy bylo použito generování počátečního odhadu pomocí jedné vizuální značky, došlo k urychlení výpočtu z 20.7s na 16.2s. Z tohoto výsledku lze předpokládat, že v případě použití větší počtu vizuálních značek dojde k výraznějšímu

AUTOREFERÁT DISERTAČNÍ PRÁCE

zkrácení doby výpočtu. Metoda vizuálních značek je také schopna napravit chyby u problematických objektů, které jinak způsobují vysoké množství chyb a to jednoduchým překrytím problematických částí plochou vizuálního terčiku. Problémem ovšem zůstává, že tento přístup nelze aplikovat vždy.

V tabulce Tab. 1 lze nalézt výpočetní časy metody stereo-vidění (M1) a metody s použitím počátečního odhadu (M2) vzhledem k rozlišení vstupních párů obrázků.

| Rozlišení [px] | Doba výpočtu M1 [s] | Doba výpočtu M2 [s] |
|-----------------------|----------------------------|----------------------------|
| 800x600 | 20.7 | 16.2 |
| 640x480 | 14.2 | 12.1 |
| 320x240 | 3.4 | 2.9 |
| 160x120 | 0.9 | 0.8 |

Tab. 1: Tabulka porovnání výpočetních časů v závislosti na rozlišení vstupních obrazů

Časy výpočtu se mohou zdát poměrně vysoké, je ale potřeba si uvědomit, že maximální hodnota disparity jako vstup algoritmu byla nastavena na vysokou hodnotu sedmdesát pixelů. Samozřejmě s klesajícím nastavením hodnoty maximální disparity klesá i výpočetní náročnost algoritmu, ovšem na úkor rozlišení metody.

| Počet použitých výpočetních klientů | Doba výpočtu [s] |
|--|-------------------------|
| 1 | 21.2 |
| 2 | 11.3 |
| 3 | 7.8 |
| 4 | 6.1 |

Tab. 2: Tabulka výpočetních časů distribuované metody

V tabulce Tab. 2 lze nalézt výpočetní časy distribuované metody stereo-vidění vzhledem k počtu použitých výpočetních klientů. Rozlišení použitých vstupních obrazů před rektifikací je 800x600.

Práce se od ostatních prací v oboru liší v následujících bodech:

- Použití jednoduchého filtru výstupní mapy disparity, který výrazně nezvyšuje celkový výpočetní čas, ovšem zlepšuje kvalitu výstupních dat jednoduché a výpočetně nenáročné metody stereo-vidění.
- Úprava metody pro zpracování vysokých hodnot disparity, včetně experimentálního ověření. Ostatní metody v tomto případě zpracovávají vstupní obrazy s velmi omezujícím limitem na rozsah disparity.
- Návrh počátečního odhadu pomocí detekce vizuálních značek ve snímané scéně. Pro detekci bylo použito metod z oblasti augmented reality. Použitý postup je v oblasti stereo-vidění nový a v ostatních pracích nevyzkoušený.
- Pojetí celého procesu stereo-vidění robotů jako propojeného celku. Ostatní práce se zabývají vždy jenom izolovanou oblastí.

6. Závěr

Výsledky disertační práce poskytují dobrý základ pro další výzkum v oblasti počítačového vidění, kde již není nutné pracně procházet množství existujících publikací a získat tak dostatečné množství informací nutných pro realizaci celého komplexního procesu stereo-vidění. Práce dále zavádí rozšíření

metody stereo-vidění o generování počátečního odhadu pomocí detekce vizuálních značek ve scéně, které může být zajímavým řešením pro průmyslové aplikace. Polohu a orientaci vizuálního terčíku je možné detekovat v reálném čase a doba výpočtu mapy disparity na okolí vizuálního terčíku je minimální.

Pro budoucí pokračování je zajímavým řešením implementace námi navržené metody pro GPU moderních grafických karet [3], která by výrazným způsobem urychlila celkovou dobu výpočtu. Další možností je úprava metody pro použití nejenom s robotickým ramenem, ale také s mobilními roboty. Použití vizuálních terčíků nabízí také další možnost rozvoje, kde by docházelo k trojrozměrné rekonstrukci objektů s umístěným terčíkem a uložením jejich geometrie do databáze. V dalším zpracování by pak již bylo možné okamžitě načíst hloubkovou informaci celého objektu a dopočítat pouze zbytek snímané scény,

Závěrem je možné říci, že se povedlo úspěšně realizovat jednotlivé procesy počítačového vidění, sestavit je do funkčního celku použitelného v rámci počítačového vidění robotů a zavést několik zajímavých inovací oproti stávajícím metodám. Celý proces stereovidění je navíc řešen pomocí vlastní implementace a kromě vývojového SDK Unifeye firmy Metaio (detekce vizuálních značek ve scéně) a open source knihovny pro matematické výpočty není použito žádných jiných SDK ani dalších nástrojů.

7. Literatura

- [1] J. Kostková, J. Čech, R. Šára. Feasibility Boundary in Dense and Semi-Dense Stereo Matching. CVPR 2007 IEEE Conference. 2007.
- [2] V. Kolmogorov, A. Criminisi, A. Blake, G. Cross, C. Rother. Bi-layer segmentation of binocular stereo video, US Proc. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, 2005.
- [3] R. Yang, L. Wang, G. Welch, M. Pollefeys. Stereovision on GPU. Workshop on Edge Computing Using New Commodity Architectures, 2006.
- [4] A. Blake, P. H.S. Torr, I. Cox, A. Criminisi. Estimating uncertainty in dense stereo disparity maps, Cambridge, 2003.
- [5] J. Kostková, R. Šára. Stratified Dense Matching for Stereopsis in Complex Scenes. British Machine Vision Conference. 2003.
- [6] H. Ishikawa , D. Geiger. Occlusions, discontinuities, and epipolar lines in stereo. ECCV. 1998.
- [7] Wesley E. Snyder, Hairong Qi. Cambridge Machine Vision, University Press. 2004. ISBN 052183046X
- [8] Jorge L C Sanz. Advances in Machine Vision. Springer, 1989. ISBN 0387968229
- [9] Michael Jenkin, Laurence Hartus. Spatial Vision in Humans and Robots. Cambridge University Press, 1994. ISBN 0521430712

- [10] Reinhard Klette, Shmuel Peleg, Gerald Sommer. Robot Vision. Springer, 2001. ISBN 3540416943
- [11] J. Pauli. Learning-Based Robot Vision. Springer, 2001. ISBN 3540421084
- [12] M. Hebert. Active and passive range sensing for robotics. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000.
- [13] Nicholas Ayache. Artificial Vision for Mobile Robots. Cambridge, 1991. ISBN 0262011257
- [14] E. Trucco and R. B. Fisher. Acquisition of consistent range data using local calibration. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1994.
- [15] R. A. Brooks. Intelligence without representation. Artificial Intelligence Journal, 1991.
- [16] M. A. Rodrigues, Y. F. Li, M. H. Lee, J. J. Rowland, and C. King. Robotic grasping of complex objects without full geometrical knowledge of shape. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1995.
- [17] A. Hoover, G. Jean-Baptiste, X. Jiang, P. J. Flynn, H. Bunke, D. B. Goldgof, K. Bowyer, D. W. Eggert, A. Fitzgibbon, and R. B. Fisher. An experimental comparison of range image segmentation algorithms. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996.
- [18] R. I. Hartley. Euclidean Reconstruction from Uncalibrated Views. Second European Workshop on Applications of Invariance in Computer Vision, 1993.

- [19] O. D. Faugeras. Three-dimensional computer vision. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1993.
- [20] R. M. Haralick and L. G. Shapiro. Computer and robot vision. Addison-Wesley Publishing Company, 1992.
- [21] R. Ahlers and J. Lu. Stereoscopic Vision - An Application Oriented Overview. SPIE - Optics, Illumination, and Image Sensing for Machine Vision IV, 1989.
- [22] J. Batlle, E. Mouaddib and J. Salvi. A Survey: Recent Progress in Coded Structured Light as a Technique to Solve the Correspondence Problem. Pattern Recognition, 1989.
- [23] R. A. Jarvis. A Perspective on Range Finding Techniques for Computer Vision. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1983.
- [24] T. S. Newman. A Survey of Automated Visual Inspection. Image Understanding, 1995.
- [25] A. Broggi. Vision-Based Driving Assistance in Vehicles of the Future. IEEE Intelligent Systems, 1998.
- [26] A. Casals. Sensor devices and systems for robotics. Springer-Verlag. NATO ASI Series, Berlin Heidelberg, 1989.
- [27] L. Charbonnier and A. Fournier. Heading Guidance and Obstacles Localization for an Indoor Mobile Robot. IEEE International Conference on Advanced Robotics, 1995.

- [28] D. Khadraoui, G. Motyl, P. Martinet, J. Gallice and F. Chaumette. Visual Servoing in Robotics Scheme Using a Camera/Laser-Stripe Sensor. IEEE International Journal on Robotics and Automation, 1996.
- [29] R. K. Lenz and R. Y. Tsai. Calibrating a Cartesian Robot with Eye-on-Hand Configuration independent of Eye-to-Hand Relationship. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989.
- [30] M. Li. Camera Calibration of a Head-Eye System for Active Vision. European Conference on Computer Vision, 1994.
- [31] M. Ito. Robot Vision Modelling - Camera Modelling and Camera Calibration. Advanced Robotics, 1991.
- [32] R. K. Lenz and R. Y. Tsai. Techniques for Calibration of the Scale Factor and Image Center for High Accuracy 3D Machine Vision Metrology. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1988.
- [33] Y. Liu, T. S. Huang and O. D. Faugeras. Determination of Camera Location from 2-D to 3-D Line and Point Correspondences. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990.
- [34] C. C.Wang. Extrinsic Calibration of a Vision Sensor Mounted on a Robot. IEEE Int. Journal on Robotics and Automation, 1992.
- [35] E. L. Hall, J. B. K. Tio, C. A. McPherson and F. A. Sadjadi. Measuring Curved Surfaces for Robot Vision. Computer Journal, 1982.

- [36] J. Batista, H. Araújo and A. T. de Almeida. Iterative Multistep Explicit Camera Calibration. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999.
- [37] G.-Q. Wei and S. De Ma. Implicit and Explicit Camera Calibration: Theory and Experiments. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994.
- [38] O. D. Faugeras and G. Toscani. The Calibration Problem for Stereo. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1986.
- [39] R. Y. Tsai. A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses. IEEE International Journal on Robotics and Automation, 1987.
- [40] Z. Hong and J. Yang. An Algorithm for Camera Calibration Using a Three-Dimensional Reference Point. Pattern Recognition, 1993.
- [41] S. Kamata, R. O. Eason, M. Tsuji and E. Kawaguchi. A Camera Calibration Using 4 Points Targets. International Conference on Pattern Recognition, 1992.
- [42] C. C. Slama, C. Theurer and S. W. Henriksen. Manual of photogrammetry. American Society of Photogrammetry, 1992.
- [43] J. Weng, N. Ahuja and T. S. Huang. Matching Two Perspective Views. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992.

- [44] G.-Q. Wei and S. De Ma. Implicit and Explicit Camera Calibration: Theory and Experiments. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994.
- [45] J. Salvi, J. Batlle and E. M. Mouaddib. A Robust-Coded Pattern Projection for Dynamic 3D Scene Measurement. Pattern Recognition Letters, 1998.
- [46] R. Deriche, Z. Zhang, Q.-T. Luong and O. Faugeras. Robust Recovery of the Epipolar Geometry for an Uncalibrated Stereo Ring. European Conference on Computer Vision, 1994.
- [47] M. Bober, N. Georgis and J. Kittler. On Accurate and Robust Estimation of Fundamental Matrix. Computer Vision and Image Understanding, 1998.
- [48] P. H. S. Torr and A. Zisserman. MLESAC: A New Robust Estimator with Application to Estimating Image Geometry. Computer Vision and Image Understanding, 2000.
- [49] B. Julesz. Foundations of Cyclopean Perception. University of Chicago Press, 1971.
- [50] Y. Ruichek and J.-G. Postaire. A neural matching algorithm for 3-D reconstruction from stereo pairs of linear images. Pattern Recognition Letters, 1996.
- [51] Thomas Babu, B. Yegnanarayana, and Sukhendu Das. Stereo-correspondence using Gabor logons and neural networks. In Proceedings of the International Conference on Image Processing, 1995.

- [52] A. Zanela and S. Taraglio. Sensing the third dimension in stereo vision systems: a cellular neural networks approach. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 1998.
- [53] A.V. Oppenheim and R.W. Schaer. Discrete-Time Signal Processing. Prentice Hall, 1989.
- [54] W. Von Seelen et al. A Neural Architecture for Autonomous Visually Guided Robots- results of the NAMOS Project, 1995.
- [55] M. Adjouadi, F. Candocia, and Riley J. Exploiting Walsh-based attributes to stereo vision. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996.
- [56] D. G. Jones and J. Malik. Computational framework for determining stereo correspondence from a set of linear spatial filters. Image and Vision Computing, 1992.
- [57] S. Birchfield and C. Tomasi. Depth discontinuities by pixel-to-pixel stereo. Technical Report TAN-CSTR- 96-1573, Stanford University, 1996.
- [58] H. S. M. Coxeter. Projective Geometry. University of Toronto, 1974.
- [59] Z. Zhang and G. Xu. Epipolar Geometry in Stereo, Motion and Object Recognition. Kluwer Academic Publishers, 1996.

8. Vlastní publikace

Štílec J.: DIRECTX FOR ROBOT VISION. In: 4th International PhD Conference on Mechatronical Engineering 2006. Plzeň, 2006. pp. 95-96. ISBN 80-7043-486-4.

Štílec J., Holada M., Kopetschke I., Pirkl P., Pelc M., Matela L., Horčíčka J.: THE PROTOTYPE OF HUMAN - ROBOT INTERACTIVE VOICE CONTROL SYSTEM. In: Proc. of the Fourth International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2007), Angers, France, 2007. vol. RA-1, pp. 307-310. ISBN: 978-972-8865-83-2

Štílec J., Holada M., Pelc M., Kopetschke I., Pirkl P., Matela L., Horčíčka J.: VOICE INTERACTIVE CONTROL SYSTEM FOR ROBOTS WITH DISTRIBUTED COMPONENTS. In: ECMS 2007 & Doctoral School (EDSYS, GEET). Liberec, 2007. pp. 160-164. ISBN 978-80-7372-218-0.

Štílec J.: PARALLEL STEREO VISION FOR ABB ROBOTS. In: ECMS 2007 & Doctoral School (EDSYS, GEET). Liberec, 2007. pp. 170-174. ISBN 978-80-7372-218-0.