

文章编号: 0253-2239(2010)07-1984-05

一种通用的共轴全向立体系统极线校正方法

雷杰^{1,2} 杜歆^{1,2*} 刘济林^{1,2}

(¹ 浙江大学信息与通信工程研究所, 浙江 杭州 310027)
(² 浙江省综合信息网技术重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 对于全向立体视觉的三维环境测量系统,一般假设全向相机的光轴重合,即共轴立体。它具有径向上线性的对极几何关系,简化了立体匹配的搜索问题。但是在实际中,不可避免存在光轴之间的未对齐误差,从而降低了测量精度。为了补偿这种对齐误差,提出一种通用的共轴配置全向立体系统校正方法。推导并计算了泰勒模型下任意配置全向立体系统的本质矩阵。利用极曲线与其切空间的一一对应关系,将相机姿态校正到中心连线方向上,使得对应点被约束在径向直线上。图像重采样则保证图像对应点位于同一列上。算法只在图像平面上进行。最后的模拟和实验数据表明算法的有效性。

关键词 图像处理;极线校正;对极几何;全向立体视觉

中图分类号 TP317.4;TP391 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103007.1984

A Generalized Rectification Algorithm for Co-Axis Omni-Directional Stereo System

Lei Jie^{1,2} Du Xin^{1,2} Liu Jilin^{1,2}

¹ Institute of Information and Communication Engineering, Zhejiang University,
Hangzhou, Zhejiang 310027, China

² Zhejiang Provincial Key Laboratory of Information Network Technology, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract For an omni-directional stereo vision system, two omni-cameras are assumed to have a common optical axes, i.e. co-axis stereo. The epipolar geometry of the ideal configuration is linear along radial direction, which simplifies correspondence search. However, it is often violated in practice due to misalignment between optical axes, which reduces the measurement accuracy. In order to compensate this misalignment, a generalized rectification algorithm for omni-directional stereo system is proposed. The essential matrix is derived and computed for an arbitrary omni-directional stereo configuration based on Taylor model. Using the one-to-one corresponding relationship between epipolar curve and its tangential space, the system is rectified to the direction of the line connecting two cameras' centers. The corresponding points are constraint to the radial line, and image-resample makes them lie on the same scan column. The proposed algorithm is only performed on image plane. Finally, simulation and experimental results illustrate the effectiveness of the algorithm.

Key words image processing; rectification; epipolar geometry; omni-directional stereo vision

1 引言

基于全向视觉^[1]的立体系统可直接对水平360°范围的场景进行有效的三维测量。这种高精度大范围场景三维地图与结构的重建能力很大程度上满足了机器人导航和基于图像渲染等领域的需求。与传统立体视觉方法类似,为了进行有效的匹配以达到

重建的目的,需要对立体图像对进行外极线校正。传统的基于透视相机的立体视觉外极线校正方法主要可以分为线性和非线性二种方法。前者致力于找到一对单应性矩阵,经过变换使极点位于无穷远处^[2~5]。非线性方法的提出主要是为了解决当极点位于图像中或者离图像边界很近的情况^[6,7]。

收稿日期: 2009-06-26; 收到修改稿日期: 2009-10-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60534070)和国家自然科学基金重大计划(90820306)资助课题。

作者简介: 雷杰(1985—),男,博士研究生,主要从事图像处理与计算机视觉等方面的研究。E-mail: leijie@zju.edu.cn

导师简介: 刘济林(1947—),男,教授,博士生导师,主要从事机器视觉及自主车等方面的研究。E-mail: jlliu@zju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: duxin@zju.edu.cn

全向立体视觉系统的外极线具有更加复杂的性质。在满足单视点约束下, T. Svoboda 等^[8]在理论上推导了各种折反射模型对极几何的解析表达式。C. Geyer 等^[9]提出了基于保角映射的校正方法, 需要计算球面上的基本矩阵^[10]; 目前大多数的学者都采取了一种较为简单的立体视觉配置, 即假设全向立体视觉系统的光轴已经共轴对齐^[11~14]。此时, 外极线简化为一族放射状的直线, 从而可避免在非线性的极线上寻找对应点。但是, 这一假设过于理想, 在实际不可避免存在未共轴对齐的全向立体系统。除此之外, 这些系统都严重依赖于镜面模型、系统初始参数等, 而它们在实际中一般很难获取, 所以很难扩展到其他类型的系统。

本文在泰勒模型^[15]的成像基础上, 提出了一种未对齐共轴的全向立体系统的通用校正方法。只在图像平面操作, 而且不需要显式地计算两个相机(或单个相机两个不同视角)相对位置关系和相机先验的精确模型参数, 只要计算泰勒模型下的本质矩阵, 就可以使得对应极线位于同一扫描列上, 从而可以直接在校正后的图像上计算三维场景深度。

2 泰勒模型和对极几何

在泰勒模型下, 所有的全向成像过程用一个泰勒级数来表示^[15]。图像平面点 $p_s = [u_s \ v_s]$ 与它对应镜面上的点 $p_m = [X_m \ Y_m \ Z_m]$ 关系为

$$p_m = \lambda [u_s \ v_s \ f(\rho_s)]^T = \lambda [u_s \ v_s \ a_N \rho^N + a_{N-1} \rho^{N-1} + \dots + a_1 \rho + a_0]^T, (1)$$

式中 $\rho_s = \sqrt{u_s^2 + v_s^2}$ 是图像点到投影中心的径向距离, $a_N, a_{N-1}, \dots, a_1, a_0$ 为镜面内参数。这种基于泰勒

级数的标定方法避开了精确求解镜面模型的问题, 得到的反射模型是一个虚拟的镜面。实际中, 根据重投影误差最小和三维点与图像点的一一对应关系, 只取泰勒级数的低次幂项, 引起的误差并不显著。

对于两个相机, 对极几何使得对应点的搜索从二维平面降低到一维直线或曲线上。假设左右全向图像上的匹配点 (x_1, x_2) , 在泰勒模型 f_1, f_2 下, 由(1)式, 镜面上的对应点为

$$p_1 = [x_1, f_1(|x_1|)]^T, \\ p_2 = [x_2, f_2(|x_2|)]^T. (2)$$

它们之间满足关系

$$p_1^T E p_2 = 0, (3)$$

式中 E 是两个相机之间的本质矩阵。全向立体视觉系统一共有两组四个极点, 它们分别位于本质矩阵 E 的左右零空间中

$$E N_{1j} = 0, \quad E^T N_{2j} = 0. (4)$$

当只考虑泰勒级数的二次项和常数项, 图像上的极曲线可用一个圆近似, 利用这种近似并不会引入过大的误差, 而且大大方便了对极线的分析。

3 基于极坐标的极线校正

共轴对齐全向立体系统的对极几何关系满足(3)式的约束。但它的极线退化为经过投影中心的径向直线簇, 如图 1(a)所示。未对齐共轴立体系统导致极点偏离投影中心。全向立体系统的配置关系使图像中只有一个极点, 如图 1(b)所示。以图 1(a)的共轴立体系统为参考标准, 将原始图像校正变换为相当于标准系统产生的一对立体图像上, 也就是说对应点都在同一条径向直线上。

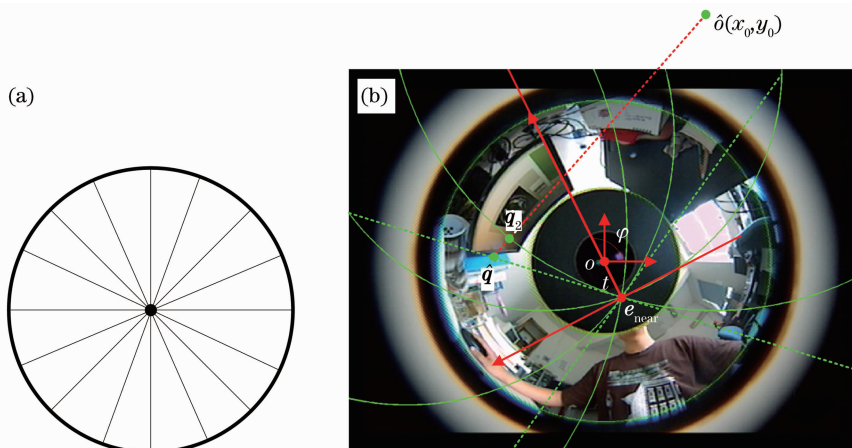


图 1 基于极坐标的极线校正和相关坐标系
Fig. 1 Polar based rectification and related coordinates system

3.1 参数化与校正图像尺寸

定义离投影中心近的叫近极点,反之叫远极点。以投影中心 O 为原始图像的坐标原点。以近极点 e_{near} 为中心建立极坐标系参数化校正图像。变换后投影中心与近极点重合,两个坐标系如图 1(b) 所示。所有极线都过极点,用极线在近极点处的切线等效校正后的径向直线。这种曲线与切线之间一一对应的关系保证了校正的合理性。

假设原始图像尺寸为 $w \times h$ 。图 1(a) 和 (b) 的近极点分别为 e_{near}^L 和 e_{near}^R 。为了最小化原始图像的信息丢失,而又最大程度降低未包含图像信息区域的处理成本,则校正后图像的最大径向距离为

$$\rho_{\text{max}} = \|e_{\text{max}}\| + s, \quad (5)$$

式中 $\|e_{\text{max}}\| = \max(\|e_{\text{near}}^L\|, \|e_{\text{near}}^R\|)$, $s = \min(w/2, h/2)$ 。为了方便后期的立体匹配,将极坐标系的校正图像变换到圆柱面上,则它的尺寸为 $2\pi\rho_{\text{max}} \times \rho_{\text{max}}$ 。

3.2 极线变换

以图 1(a) 为例,首先将图像变换到以近极点为中心的坐标系中,

$$\mathbf{R}^L = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}, \quad \mathbf{t}^L = [|e_{\text{near}}^L|, 0]^T, \quad (6)$$

式中 φ 是向量 $e_{\text{near}}^L - e_{\text{far}}^L$ 与原始图像坐标系 x 轴的夹角。原始图像中点 $\mathbf{q}_1 = [x_1, y_1]^T$, 在近极点坐标系中对应 $\mathbf{q}_2 = [x_2, y_2]^T$ 为

$$\mathbf{q}_2 = \mathbf{R}^L \mathbf{q}_1 + \mathbf{t}^L, \quad (7)$$

经过不同时共线的三点, \mathbf{q}_2 , e_{near}^L 和 e_{far}^L 能并且只能决定一个圆,理论上这个圆就是经过点 \mathbf{q}_2 的极圆。过 e_{near}^L 有并且只有这个圆的一条切线,

$$y_0 y_2 + x_0 x_2 = 0, \quad (8)$$

以其圆心 $O'(x_0, y_0)$ 为投影中心,将点 $\mathbf{q}_2 = [x_2, y_2]^T$ 投影到这条切线上,交点 $\mathbf{q}'(x', y')$ 为

$$x' = \frac{kx_0 y_0 - y_0^2}{x_0 + ky_0}, \quad y' = -\frac{x_0(kx_0 y_0 - y_0^2)}{y_0(x_0 + ky_0)},$$

$$k = \frac{y_2 - y_0}{x_2 - x_0}. \quad (9)$$

这样,极线上的点就一对一中心投影到与之对应的切线上,从而对应点都被约束在径向直线上。 $\mathbf{q}'(x', y')$ 变换到圆柱面上的坐标为 $[\sqrt{x'^2 + y'^2} \arctan(y'/x'), \sqrt{x'^2 + y'^2}]$ 。

3.3 图像重采样

极线变换使得极线上的点位于过近极点的直线上,还需要图像重新采样使得对应点位于同一条径向直线上。假设图 1(a) 中一点变换到极坐标系中的位置为 $\mathbf{p}_{\text{polar}}$, 经过它与原点的直线为 l_0 , 过原点、

远极点并且与直线 l_0 相切的圆存在,并且只有一个,圆心为 O_{circle} 。过 O_{circle} 和 $\mathbf{p}_{\text{polar}}$ 的直线 l_1 与圆 O_{circle} 的交点 $\mathbf{p}_{\text{sect}}^1$ 和 $\mathbf{p}_{\text{sect}}^2$, 取距离点 $\mathbf{p}_{\text{polar}}$ 最近的一点,

$$\mathbf{p}_{\text{sect}} = \min(\|\mathbf{p}_{\text{sect}}^1 - \mathbf{p}_{\text{polar}}\|, \|\mathbf{p}_{\text{sect}}^2 - \mathbf{p}_{\text{polar}}\|). \quad (10)$$

对于图 1(a) 中点 $\mathbf{p}_{\text{polar}}$, 变换到图像坐标系为 $\mathbf{p}_{\text{sect}}^{\text{im}}$, 利用泰勒标定模型,投影到镜面上,根据对极几何关系 \mathbf{E} , $\mathbf{p}_{\text{sect}}^{\text{im}}$ 在右镜面上对应一条极线

$$\mathbf{C}_{\text{conic}} = \mathbf{E}[\mathbf{p}_{\text{sect}}^{\text{im}} f(\|\mathbf{p}_{\text{sect}}^{\text{im}}\|)]^T. \quad (11)$$

$\mathbf{C}_{\text{conic}}$ 在图 1(b) 上的投影为一个圆,假设圆心 $O_{\text{sect}}^{\text{im}}$, 将其变换到以两个极点中点为圆心的坐标系中为 $O_{\text{circle}}^{\text{rect}}$ 。经过变换后的坐标原点(近极点)与圆 $O_{\text{circle}}^{\text{rect}}$ 相切的直线有且仅有一条 l_0^{rect} , 由于 l_0^{rect} 为经过原点的一条直线,所以还需要决定图 1(a) 中极线对应在 l_0^{rect} 上原点的哪一部分。根据图 1(a) 中极线的切线与 x 轴的夹角 δ , 得到 l_0^{rect} 的投影部分,

$$\cos \delta' = -\text{sgn}(\cos \delta) \frac{1}{\sqrt{1 + \kappa^2}}, \quad \kappa = -\frac{x_0^{\text{rect}}}{y_0^{\text{rect}}}. \quad (12)$$

这样,校正后图像的同列对应于原始图像中的两条满足对极几何的极线。

3.4 评估与讨论

引入图像局部抽样保持来评估图像变换前后信息的变化^[16], 原有图像中像素的变化可以用它在变换前后的雅可比(Jacobian)矩阵 $\vec{\mathcal{J}}$ 的行列式建模。 $\det(\vec{\mathcal{J}}) = 1$ 表示像素在变换前后守恒; $\det(\vec{\mathcal{J}}) < 1$ 则说明像素在变换前后有丢失; $\det(\vec{\mathcal{J}}) > 1$ 表明变换产生新的像素。

(7) 式表示原始图像中点 $\mathbf{q}_1 = [x_1, y_1]^T$ 经过欧氏变换,校正后为(9)式。则 Jacobian 矩阵

$$\vec{\mathcal{J}} = \frac{\partial(x', y')}{\partial(x_2, y_2)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x'}{\partial x_2} & \frac{\partial x'}{\partial y_2} \\ \frac{\partial y'}{\partial x_2} & \frac{\partial y'}{\partial y_2} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

行列式为

$$\det \vec{\mathcal{J}} = \frac{2x_0(2x_0 - x_2)[(2x_0 - x_2)^2 + y_2^2]^2}{[(2x_0 - x_2)^2 - y_2^2]^3}. \quad (14)$$

当 $x_2 = y_2 = 0$ 时, $\det(\vec{\mathcal{J}}) = 1$, 即在近极点处, 图像信息被保持。当 $x_2 \neq 0, y_2 \neq 0$ 时, 假设它位于一段半径 r , 圆心角 φ 的圆弧, 则它的弧长为 $r\varphi$, 它在切线上的投影长度为 $2r \tan(\varphi/2)$, 而 $2 \tan(\varphi/2) \geq \varphi$, 所以这种校正方法不会导致像素丢失。

4 实验结果

4.1 模拟数据

假设一个理想的由双曲镜面和透视相机组成的

折反射系统,用泰勒模型标定相机内参数。由两个相同的折反射相机组成一个非共轴的全向立体系统,即(1)式中 $f_1 = f_2$ 。两相机之间旋转和平移分别在表 1 列出。模拟产生全向立体系统所生成的图像对,如图 2(a),(b)所示,其中白色点表示了三维点在图像上的投影,深色对应点表示部分极份。计算本质矩阵如表 1 所示。极坐标系校正变换后的图像如图 2(d),(e)所示。此外,带有实心点的线段

表示对应点在校正后两幅图像上的位置,线段长度则表示视差。很明显,校正后对应点都处于图像的同一列。根据校正后得到的视差图,计算对应点的三维位置,根据视差重建的模拟点云如图 2(c)所示。已知基线,重建结果可以升级到真实的尺度空间。以对应点欧式距离的平方和为度量标准,所得结果为 0.005 m。与最小二乘法的数值误差相比,泰勒模型的低阶近似为该误差的主要来源。

表 1 非共轴全向立体系统参数

Table 1 Simulated parameters of misaligned co-axis omni-directional stereo system

Translation	Rotation	Estimated E
$T = [-0.07 \quad -0.07 \quad 0.25]$	$R = \begin{bmatrix} -0.9659 & -0.2588 & 0 \\ 0.2588 & -0.9657 & -0.0209 \\ -0.0054 & 0.0202 & -0.9998 \end{bmatrix}$	$E = \begin{bmatrix} -0.0645 & 0.2408 & 0.0491 \\ -0.2422 & -0.0631 & -0.0850 \\ -0.0645 & 0.0709 & 0.0018 \end{bmatrix}$

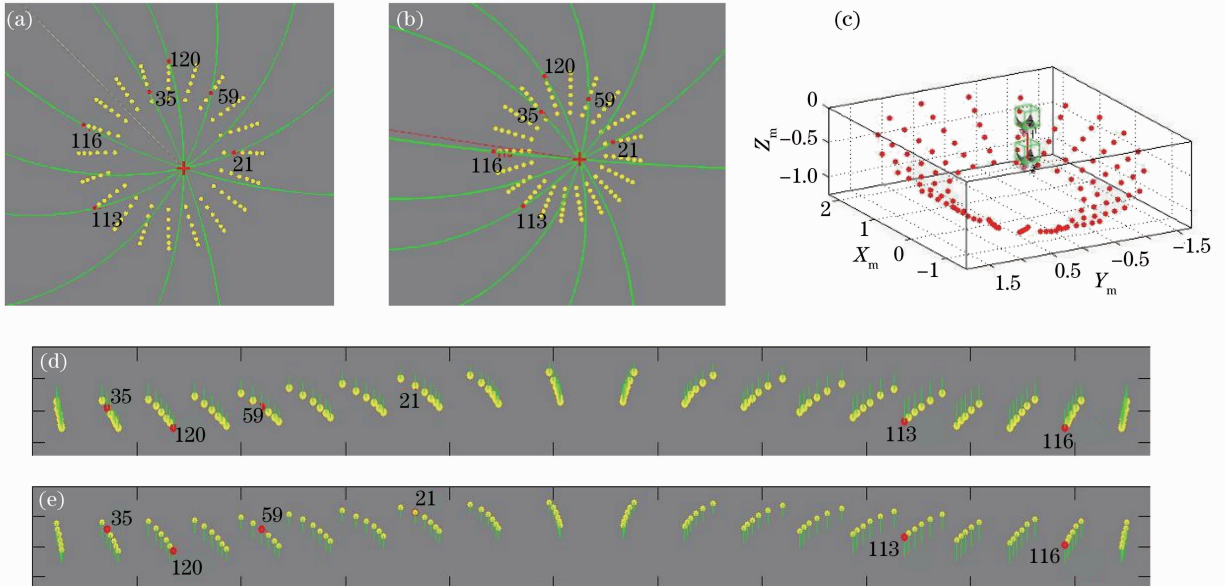


图 2 模拟数据测试结果

Fig. 2 Test results of simulation data

4.2 实际图像

用 SONY-RPU-C251 全向相机产生真实图像,经过泰勒模型标定后的相关参数在表 2 中列出。

表 2 SONY-RPU-C251 相机的泰勒级数模型参数

Table 2 Talor series model parameters of SONY-RPU-C251 camera

Image size / (pixel × pixel)	640 × 480
Taylor model	$f(\rho) = 0.0032\rho^2 - 105.3535$
Projection model	(320, 3386, 240, 0196)

用单个全向相机运动来等效未对齐共轴立体系

统。图 3(a)和(b)则画出了部分匹配点与其对应的极线,图 3(d)为校正后的圆柱全景立体图像。由视差所得的三维重建结果在图 3(c)中给出。

为了验证校正后图像匹配点的对齐程度,定义如下度量函数

$$\Delta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \| (p_1^i)_x - (p_2^i)_x \|, \quad (15)$$

式中 $(p_1^i)_x, (p_2^i)_x$ 表示 p_1^i, p_2^i 点的 x 坐标。标记图像中的一些特征点 (p_1, p_2) , 按照(15)式计算得到 $\Delta = 0.1874$ 。图 3(c)给出了部分直线连接的对应特征点。

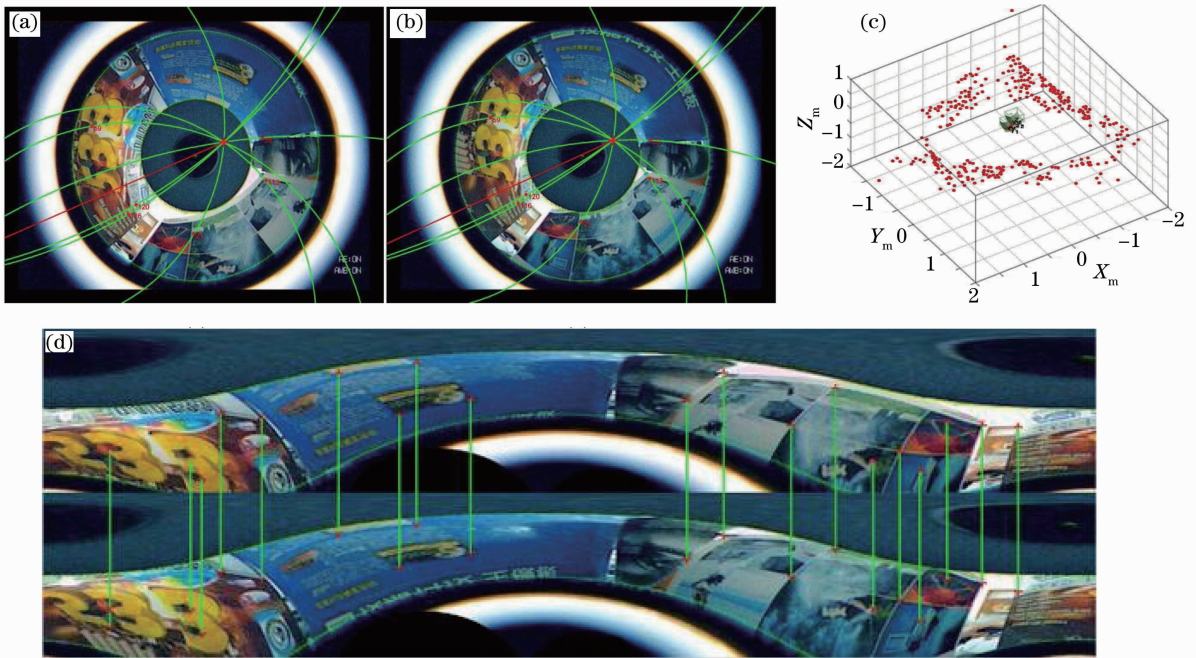


图3 非共轴对齐立体系统。(a),(b)部分对应点的极线;(c)由视差重建的三维结构;
(d)校正立体图像与同一列上匹配的特征点

Fig.3 Misaligned co-axis stereo system. (a),(b) epipolar curves of some corresponding points; (c) 3D reconstruction based on estimated disparity; (d) rectified stereo images and matching points along the same columns

5 结 论

提出了一种基于泰勒模型的未对齐共轴全向立体系统的校正方法,将极曲线变换到对应的切线空间中,使得极点与投影中心重合,图像重采样保证了对应点约束在过极点的同一直线上,从而满足了标准共轴立体系统的要求。算法只在图像平面上进行,避免在三维空间中显式计算欧氏变换时多次引入投影误差。本文是对泰勒模型后续工作的进一步发展,所提算法可以适应各种类型未知参数的全向系统,而全向立体系统校正的研究并不如普通透视相机多,所以本文的结果可以扩展经典透视立体视觉算法在全向立体视觉上的应用。

参 考 文 献

- Zeng Jiyong, Su Xianyu. Hyperboloidal catadioptric omnidirectional imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9): 1138~1142
曾吉勇, 苏显渝. 双曲面折反射全景成像系统[J]. *光学学报*, 2003, **23**(9): 1138~1142
- C. Loop, Z. Y. Zhang. Computing rectifying homographies for stereo vision [C]. Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 1999, **1**: 125~131
- R. Hartley, A. Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004
- A. Fusiello, L. Irsara. Quasi-euclidean uncalibrated epipolar rectification [C]. International Conference on Pattern Recognition (ICPR), 2008
- H. P. Wu, Y. H. Yu. Projective rectification with reduced

- geometric distortion for stereo vision and stereoscopic video [J]. *J. Intelligent and Robotic Systems*, 2005, **42**(1): 71~94
- S. Roy, J. Meunier, I. J. Cox. Cylindrical rectification to minimize epipolar distortion [C]. Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, 1997. 393~399
- M. Pollefeys, R. Koch, L. Gool. A simple and efficient rectification method for general motion [C]. Proc. IEEE Conf. Computer Vision, 1999, **1**: 496~501
- T. Svoboda, T. Pajdla. Epipolar geometry for central catadioptric cameras [J]. *Int. J. Computer Vision*, 2002, **49**(1): 23~37
- C. Geyer, K. Daniilidis. Conformal rectification of omnidirectional stereo pairs [C]. Workshop on Ominidirectional Vision and Camera Networks, 2003
- C. Geyer, H. Stewenius. A nine-point algorithm for estimating para-catadioptric fundamental matrices [C]. Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, 2007. 1~8
- S. S. Lin, R. Bajcsy. High resolution catadioptric omnidirectional stereo sensor for robot vision [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2003. 1694~1699
- L. He, C. Luo, F. Zhu *et al.*. Depth map regeneration via improved graph cuts using a novel omnidirectional stereo sensor [C]. In Proc. 7th Workshop on Omnidirectional Vision, 2007
- G. Jang, S. Kim, I. Kweon. Single-camera panoramic stereo system with single-viewpoint optics [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(1): 41~43
- S. Y. Yi, N. Ahuja. An omnidirectional stereo vision using a single camera [C]. International Conference on Pattern Recognition, 2006, (4): 861~865
- D. Scaramuzza, R. Siegwart. A new method and toolbox for easily calibrating omnidirectional cameras [C]. Proc. International Conference on Computer Vision Systems, Workshop on Camera Calibration Methods for Computer Vision Systems, 2007
- J. Gluckman, S. K. Nayar. Rectifying transformations that minimize resampling effects [C]. Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, 2001, (1): 111~117