

一种新的全向立体视觉系统的设计¹⁾

苏连成^{1,2} 朱 枫¹

¹(中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110016)

²(中国科学院研究生院 北京 100049)

(E-mail: lcsu@sia.cn)

摘 要 介绍了用一个普通相机实现的全向立体视觉系统的设计, 系统的配置使得其具有结构和几何计算简单、对应点匹配容易、系统成像无遮挡的优点. 误差分析表明其具有较高的精度. 本系统可用于机器人探测障碍物、环境深度信息的自动获取以及其它要求实时性计算的机器视觉.

关键词 双曲面反射镜, 折反射系统, 全向立体视觉, 基线

中图分类号 TP242

Design of a Novel Omnidirectional Stereo Vision System

SU Lian-Cheng^{1,2} ZHU Feng¹

¹(Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

²(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(E-mail: lcsu@sia.cn)

Abstract An omnidirectional stereo vision system based on a single normal camera is presented. The configuration of it has the advantages of simple geometry, easy calculation and stereo matching, and imaging without occlusion. Analyse of error proves it has a higher precision. This proposed system can be used for detecting obstacle by mobile robots, automatic obtaining the depth information of environments, and machine vision where fast and real-time calculations are needed.

Key words Hyperboloid mirror, catadioptric system, omnidirectional stereo vision, baseline

1 引言

折反射系统由一个普通透视相机和曲面反射镜组成, 能够实时获取水平方向 360° 和垂直方向一定角度的全向图像. 由于折反全景成像系统具有实时大视场成像、价格较低的优点, 近年来发展较快.

当前获取全向立体图像的方法主要有旋转成像、多相机成像、鱼镜头成像和折反射成像四种. 旋转成像是相机绕通过其光心的轴旋转, 在旋转的各个角度拍摄多幅图像, 再将这些图像进行拼接或者重采样, 从而得到全景图像. Ishiguro^[1] 等和 Herman^[2] 采用一个

1) 国家自然科学基金 (60575024) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of P. R. China (60575024)

收稿日期 2004-12-30 收修改稿日期 2005-9-26

Received December 30, 2004; in revised form September 26, 2004

常规相机以半径 r 绕旋转中心旋转, 通过对旋转中不同位置拍摄的图像寻找对应点, 进行深度恢复. 这种方法旋转一周的时间大约是 10 分钟, 成像方式需要精确的旋转运动控制部件. 多摄像机成像则是采用朝向各个方向的多个相机来实现全向成像^[3], 将多个相机同时拍摄的图像进行融合, 生成全景图像. 但该成像系统若要满足单视点约束^[4], 各个摄像机的光学中心必须重合. 实际上由于各个相机的物理特性限制, 安装中不同相机的光学中心不可能重合. 而且这种成像方式成本高, 系统复杂.

鱼镜头能观察到接近半球面内的物体, 视场角接近 180° . 但这种成像存在较大的图像畸变, 且畸变模型不满足透视投影条件, 无法从所获取的图像中映射出无畸变的透视投影图像. 对于立体视觉, 这种系统存在的另一个问题是无法将两个相机镜头的焦点重合, 因此亦无法满足单视点约束. Shah 和 Aggarwal^[5] 利用鱼镜头变形模型进行图像校正, 然后使用常规的针孔模型进行深度计算, 但其成像区域仍然不大. 鱼镜头的另一缺陷是在用于全景成像时高分辨率区域往往是不重要的区域, 比如天空或摄像机支架底座.

折反射全向成像系统是当前计算机视觉的一个研究热点^[6~8]. Roland Bunschoten^[9] 利用安装在机器人上的单个双曲面反射镜利用机器人运动的图像序列实现多基线立体视觉, 即其立体图对通过机器人的运动来获取. 此类方法需要机器人装有精确的码盘等导航传感器, 且只适用于平整的地面等理想情况, 不适用于在室外等自然环境下的障碍物探测和导航. 贾云得等^[10] 利用两个双曲面镜和透视相机组成水平基线的全向立体视觉系统, 此系统可对机器人前后的障碍物进行检测, 但水平基线立体视觉的测量精度很不均匀, 而且由于系统本身的遮挡对两侧场景不能进行感知. 另外全向图像的外极线是二次曲线^[11], 对应点计算复杂. Gluchkman 和 Nayer^[12] 使用两个由抛物面反射镜、Y. Shirai^[13] 用两个双曲面镜和正交投影镜头组成垂直基线的全向立体视觉系统. 此类系统把两个摄像机上下共轴放置, 此时外极线成为一系列放射线, 全向图像 (Omnidirectional image) 被投影成全景图像 (Panoramic image) 后, 外极线成为一系列垂直平行线, 对应点的计算简化为在垂直的像素点中寻找. 这种配置使摄像机之间的相互遮挡减少了, 但仍不能根本解决. M. F. D. Southwell^[14], L. Conroy^[15] 和 Eduardo L. L. Cabral^[16] 利用一个透视相机和两个反射镜面连在一起的反射镜组成全向立体视觉系统, 使用一个相机实现全向立体视觉. 此类系统成像为两个同心圆, 空间同一点经两镜面的反射后分别成像在从像平面中心往外发散的半径的不同位置上, 这类系统具有 [12,13] 中对应点求解容易的优点, 且只用一个相机降低了系统的复杂性, 系统安装也更加紧凑, 但由于系统的基线太短 (只有十几个毫米), 计算结果具有很大的误差.

针对以上系统的不足, 我们设计了一种新的全向立体视觉光学系统 (Omnidirectional stereo vision optical device, OSVOD), 除具有 [15,16] 中只使用一个相机和对应点匹配简单的特点外, 由于使系统基线增长, 减小了系统误差.

2 系统设计

本文的全向立体视觉光学系统 (OSVOD) 由两个双曲面镜和一个普通透视相机组成. 其中两个双曲镜面上下同轴、间隔一定距离固定在一个玻璃筒内, 两镜面的共同轴和相机镜头的光轴共线, 共同焦点和镜头的光心重合, 上镜面通过下镜面中间的洞在相机像平面上成像. F_a, F_b 是上下双曲镜面的焦点, 相当于两相机的虚拟光心, 两点间的距离 bl 即相当于垂直基线双目视觉的基线长. 由系统的轴对称特性, 定义二维空间坐标系的原点 o 为相机的光心, z 轴正方向指向镜头光轴的方向, 见图 1. 则两双曲面镜的镜面方程可表示为

$$\frac{(z-c)^2}{a^2} - \frac{r^2}{b^2} = 1 \quad (1)$$

折反射系统具有大的视场角, 但成像分辨率低, 且越远处的物体其成像变形越严重. 本系统选择在 0.75 米的高处时其对地面的成像范围为半径 2.5 米的圆, 以使在较大视场角同时保证不错的成像质量, 由系统成像范围可确定两镜面的参数.

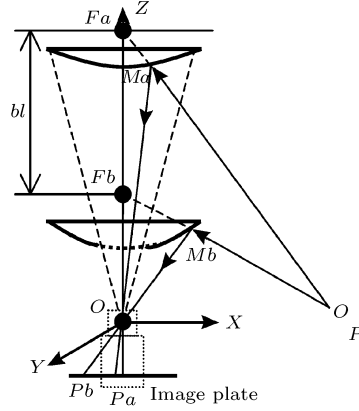


图 1 镜面和相机配置结构图

Fig. 1 The mirrors and camera are aligned coaxially and vertically

3 几何分析

立体视觉系统中两双曲镜面的焦点 $Fa = (0, 2c_a)$, $Fb = (0, 2c_b)$ 坐标已知, 参见图 1. 过空间点 $P = (r, z)$ 的入射光线分别交上镜面和下镜面于点 Ma, Mb , 经镜面反射后分别成像于 $Pa = (v_a, -f)$, $Pb = (v_b, -f)$. 由 Pa, Pb 的坐标已知, 直线 $PaMa, PbMb$ 的方程可表示为:

$$\frac{r}{v_a} = \frac{z}{(-f)} \quad (2)$$

$$\frac{r}{v_b} = \frac{z}{(-f)} \quad (3)$$

由点 Ma 在直线 $PaMa$ 和上镜面的交线上, 点 Mb 在 $PbMb$ 和下镜面的交线上, 因此其坐标 $Ma = (r_a, z_a)$ 和 $Mb = (r_b, z_b)$ 可分别由方程组 (4) 和 (5) 解得.

$$\begin{cases} \frac{a}{v_a} = \frac{z}{(-f)} \\ \frac{(z-c_a)^2}{a^2} - \frac{r^2}{b_a^2} = 1 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \frac{a}{v_b} = \frac{z}{(-f)} \\ \frac{(z-c_b)^2}{a_b^2} - \frac{r^2}{b_b^2} = 1 \end{cases} \quad (5)$$

由解出的 Ma, Mb 点的坐标, 可列写直线 FaP, FbP 的方程如下

$$\begin{cases} \frac{r_a}{r} = \frac{(z_a - 2c_a)}{(z - 2c_a)} \\ \frac{r_b}{r} = \frac{(z_a - 2c_b)}{(z - 2c_b)} \end{cases} \quad (6)$$

解方程组 (6), 可得 P 点的空间坐标 (r, z) , 我们由 z 可得 P 点的高度信息, 即可判断是否是障碍物, 由 r 可得 P 点的深度信息.

4 误差分析

由于工艺的限制, 系统的加工和安装都有一定的误差, 图像处理也会引入不大于半个像素 $\frac{1}{2}\Delta p$ 的误差.

4.1 加工和安装误差

系统已知的镜面面形精度 $0.5\mu\text{m}$, 光洁度 $0.02\mu\text{m}$; 机构安装误差的镜面同轴误差是 0.01mm , 焦点位置上下误差是 0.01mm . 由此知相对于安装误差, 加工误差可以忽略. 由 (6) 可得

$$z = f(r_a, z_a, r_b, z_b) = \frac{r_a c_a (z_b - c_b) - r_b c_b (z_a - c_a)}{r_a (z_b - c_b) - r_b (z_a - c_a)} \quad (7)$$

令

$$\begin{aligned} \Delta f &= \left(\frac{\partial f}{\partial r_a}, \frac{\partial f}{\partial z_a}, \frac{\partial f}{\partial r_b}, \frac{\partial f}{\partial z_b} \right), \delta X = (\delta r_a, \delta z_a, \delta r_b, \delta z_b) \\ \Delta z &= \nabla f \cdot \delta X' + O(\Delta X^2) \approx \nabla f \cdot \delta X' = \frac{\partial f}{\partial z_a} \delta z_a + \frac{\partial f}{\partial r_b} \delta r_b + \frac{\partial f}{\partial z_b} \delta z_b \leq \\ &\left(\left| \frac{\partial f}{\partial r_a} \right| \delta r_a + \left| \frac{\partial f}{\partial z_a} \right| \delta z_a + \left| \frac{\partial f}{\partial r_b} \right| \delta r_b + \left| \frac{\partial f}{\partial z_b} \right| \delta z_b \right) \end{aligned} \quad (8)$$

对 (7) 各参数求偏导得

$$\begin{aligned} \frac{\partial z}{\partial r_a} &= \frac{c_a(z_b - c_b)(r_a(z_b - c) - r_b(z_a - c_a)) - (z_b - c_b)(r_a c_a(z_b - c_b) - r_b c_b(z - c_a))}{(r_a(z_b - c_b) - r_b(z_a - c_a))^2} \\ \frac{\partial z}{\partial z_a} &= \frac{-r_b c_b(r_a(z_b - c_b) - r_b(z_a - c_a)) + r_b(r_a c_a(z_b - c_b) - r_b c_b(z_a - c_a))}{(r_a(z_b - c_b) - r_b(z_a - c_a))^2} \\ \frac{\partial z}{\partial r_b} &= \frac{c_b(c_a - z_a)(r_a(z_b - c_b) - r_b(z_a - c_a)) - (z_a - c_a)(r_a c_a(z_b - c_b) - r_b c_b(z_a - c_a))}{(r_a(z_b - c_b) - r_b(z_a - c_a))^2} \\ \frac{\partial z}{\partial z_b} &= \frac{r_a c_a(r_a(z_b - c_b) - r_b(z_a - c_a)) - r_a(r_a c_a(z_b - c_b) - r_b c_b(z_a - c_a))}{(r_a(z_b - c_b) - r_b(z_a - c_a))^2} \end{aligned}$$

系统测量范围内各偏导值如下表.

表 1 系统测量范围内的个参数的偏导值

Table 1 The values of the parameters for partial differential in the system detecting range

| | 0.99 米 | 1.5 米 | 1.8 米 | 2.4 米 |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $\frac{\partial z}{\partial r_a}$ | -442.0615 | -306.9133 | -151.2372 | -229.8378 |
| $\frac{\partial z}{\partial z_a}$ | -305.2334 | -336.3005 | -212.2284 | -402.9526 |
| $\frac{\partial z}{\partial r_b}$ | 653.0936 | 481.4917 | 232.9080 | 367.1172 |
| $\frac{\partial z}{\partial z_b}$ | 555.4784 | 621.0098 | 404.3091 | 765.9658 |

由表 1 可知系统在 0.99 米处的误差最大, 将其值代入式 (8), 取 $\delta r_a = \delta z_a = \delta r_b = \delta z_b = 0.01\text{mm}$, 可得误差 $\Delta z \leq 19.5587\text{mm}$.

4.2 图像处理误差

系统成像见图 3, 两同心圆的外圆为下镜面成像, 内圆为上镜面成像. 假设上、下镜面成像的图像处理误差都为 $\frac{1}{2}\Delta p$, 则在系统成像范围内为对系统精度的影响见表 2.

表 2 图像处理误差在成像范围内对系统精度的影响

Table 2 The system precision impacted by the image process error in the mapping scale

| | I | II | III | IV |
|--------|----------|---------|----------|---------|
| 0.99 米 | -13.6740 | 45.7805 | -49.3706 | 13.3858 |
| 1.2 米 | -11.9754 | 43.1214 | -45.7237 | 12.2731 |
| 1.5 米 | -10.8810 | 41.4748 | -43.7429 | 11.3008 |
| 1.8 米 | -10.9659 | 40.8794 | -44.2717 | 10.2719 |
| 2.1 米 | -10.9179 | 41.5668 | -45.2700 | 10.0327 |
| 2.4 米 | -10.7896 | 43.0249 | -46.5430 | 10.2789 |

其中 I、下镜面成像误差多, 上镜面成像误差多; II、下镜面成像误差多, 上镜面成像误差少; III、下镜面成像误差少, 上镜面成像误差多; IV、下镜面成像误差少, 上镜面成像误差少.

5 结论

由误差分析可知, 机械加工和安装误差相对于和图像处理误差对全向立体视觉光学系统 (OSVOD, 见图 2) 的精度影响较小, 提高图像处理的精度是提高系统精度的关键. 二者综合起来系统误差在 70mm 之内, 此精度对于有一定越障能力的移动机器人来说符合要求. 和当前的单相机的立体视觉系统相比, 本系统两镜面之间的间隔安装将系统的等效基线从十几个毫米增大到两百多毫米, 极大地提高了系统的精度. 本系统可用于移动机器人障碍物探测、导航及其他要求实时性三维建模的场合.



图 2 全向立体视觉光学系统 (OSVOD)

Fig. 2 The system of OSVOD



图 3 OSVOD 成像示意图

Fig. 3 Image gained by the OSVOD

References

- 1 Ishiguro H, Yamamoto M, Tsuji S. Omni-directional stereo. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(2): 257~262

- 2 Peleg S, Herman J. Panoramic mosaics by manifold projection. In: Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1997
- 3 Shimada D, Tanahashi H, Kato K, Yamamoto K. Extract and display moving object in all directions by using stereo omnidirectional system (SOS). In: Proceedings of International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, Quebec City, Canada: IEEE Computer Society, 2001. 42~47
- 4 Baker S, Nayar S K. A theory of single-viewpoint catadioptric image formation. *International Journal of Computer Vision*, 1999, **35**(2): 175~196
- 5 Shah S, Aggarwal J. Intrinsic parameter calibration procedure for a (high-distortion) fish-eye lens camera with distortion model and accuracy estimation. *Pattern Recognition*, 1996, **29**(11): 1775~1788
- 6 Chahl J G, Srinivassan M V. Reflective surfaces for panoramic imaging. *Applied Optics*, 1997, **36**(31): 8275~8285
- 7 Yamazawa K, Yagi Y, Yachida M. Omnidirectional imaging with hyperboloidal projection, In: Proceedings of IEEE/RSJ International Conference Intelligent Robots and Systems, Yokonama, Japan, 1993. 1029~1034
- 8 Gaspar J G, Deccó C, Okamoto Jr J, Victor J S. Constant resolution omnidirectional cameras, In: Proceedings of the 2nd Workshop on Omnidirectional Vision, Camera Networks and Non-classical cameras, Copenhagen, Copenhagen, Denmark: 2002. 27~34
- 9 Roland Bunschoten, Ben Krose. Robust scene reconstruction from an omnidirectional vision system. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2003, **19**(2): 351~357
- 10 Ma Jian-Guang, Jia Yun-De. Wavelet-based resolution enhancement of omnidirectional images. In: Proceedings the 15th International Conference on Vision Interface. Calgary, Canada: 2002. 125~132
- 11 Tom' A S Svoboda, Tom' A S Pajdla. Epipolar geometry for central catadioptric cameras. *International Journal of Computer Vision*, 2002, **49**(1): 23~37
- 12 Gluckman J, Nayar S K, and Thorek K, Real-time omnidirectional and panoramic stereo, In: Proceedings of DARPA Image Understanding Workshop, Washington, DC, USA: Publisher IEEE Computer Society, 1998. 1: 299~303
- 13 Koyasu H, Miura J, Shirai Y. Recognizing moving obstacles for robot navigation using real-time omnidirectional stereo vision. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2002, **14**(2): 147~156
- 14 Southwell M F D, Basu A, Reyda J. Panoramic stereo. In: Proceedings of International Conference on Pattern Recognition, Vienna, Austria: 1996. 378~382
- 15 Conroy L, Moore J B. Resolution invariant surfaces for panoramic vision systems. In: Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision, Kerkyra, Corfu, Greece: 1999. 392~397
- 16 Eduardo L L, Cabral José C, de Souza Junior, Marcos C. Hunold, Omnidirectional stereo vision with a hiperbolic double lobed mirror. In: Proceedings of IEEE International Conference on Pattern Recognition, Cambridge, United Kingdom: 2004. 1~4

苏连成 博士生, 研究领域机器视觉, 图象分析, 移动机器人.

(**SU Lian-Cheng** Ph.D. candidate in Optical-electric Information Laboratory at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interests include computer vision, image process, and mobile robots.)

朱 枫 研究员, 研究领域机器视觉, 图像处理, 智能机器人.

(**ZHU Feng** Professor in Optical-electric Information Laboratory at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interests include computer vision, image analysis, and intelligence robots.)