

基于全景环带立体成像系统的深度信息估计

田延冰 白 剑 黄 治

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 提出了一种基于全景环形透镜(PAL)的全景环带立体成像系统的立体信息提取方法。该成像系统由两组共轴 PAL 单元构成,其成像圆为两内外相接的圆环,能够实时提取 360° 水平视场角物体的立体信息。基于该系统的成像原理,针对非单视点成像系统特点建立相机模型对系统进行标定,并验证了标定结果。将尺度不变特征变换(SIFT)算法应用到对应点匹配上,充分利用本系统的共线约束来提高匹配的速度和准确度。应用三角测量原理从捕获的图像中提取有效深度信息。进行立体信息提取实验,给出了结果和误差分析。该系统能有效获取场景深度信息,3 m 距离范围误差率在 $\pm 5.2\%$ 内,证明了该系统的可行性。

关键词 成像系统;深度信息估计;全景立体成像系统;相机标定;对应点匹配

中图分类号 TP391 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0611002

Depth Estimation with a Panoramic Stereo Imaging System

Tian Yanbing Bai Jian Huang Zhi

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University,
Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract An information extraction method based on a panoramic stereo imaging system with double coaxial panoramic annular lens (PAL) units is presented. Its imaging circles are concentric so that depth information of 360° horizontal field-of-view (FOV) object can be extracted in real time. Based on imaging principles, the system is calibrated with a model that can accommodate the characteristics of a non-single viewpoint system, and the calibration results are verified. The scale-invariant feature transform (SIFT) algorithm is applied to the corresponding point matching, and it makes full use of collinear constraint of the system to improve the matching speed and accuracy. Effective depth information is extracted from the captured image with applying triangulation principle. Depth information extraction experiments are performed, and the results and error analysis are given. This system can restore depth information effectively, and its error rate of 3-m distance range is within $\pm 5.2\%$, which proves the feasibility of this system.

Key words imaging systems; depth estimation; panoramic stereo imaging system; camera calibration; corresponding point matching

OCIS codes 100.6890; 150.6910

1 引 言

全景成像系统可以获得 360° 视场角的图像信息,被广泛应用于医疗、军事、测量和三维场景可视化等领域^[1~3]。如果能够实时地获取 360° 范围内的立体信息,应用会更加广泛。目前立体信息的获取方法种类很多,在传统领域中,立体信息通过两个或

以上的相机在不同视场获得二维图像的视差信息得到^[4]。与传统方法相比,另一种方法是利用单光学系统获得立体信息,例如使用双曲面反射镜全景成像系统^[5]、双反射面全景成像系统^[6]等单视点成像系统获得。这种方法的缺点是需要制造复杂精确的反射面,且对装配精度的要求比较高。相对于单视

收稿日期: 2013-01-10; 收到修改稿日期: 2013-03-06

基金项目: 国家自然科学基金(60877008)资助课题。

作者简介: 田延冰(1988—),女,硕士研究生,主要从事光学成像和图像处理等方面的研究。E-mail: tyb_zju@163.com

导师简介: 白 剑(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事二元光学、微光学、光电检测和全景成像等方面的研究。

E-mail: bai@zju.edu.cn

点成像系统,还有一种非单视点全景成像系统,其主要结构采用鱼镜头或全景环形透镜(PAL)镜头,例如双 PAL 透镜测量物体距离^[7]、鱼镜头和反射镜组合的全景系统^[8]。鱼镜头位于边缘的视场畸变极大,边缘信息压缩严重,而 PAL 镜头对于边缘畸变控制较好。

本文提出了一种基于双共轴的 PAL 透镜获取深度信息的光学系统。该系统不需要精确的反射面和复杂的安装工艺,可广泛应用于机器人视觉、管道测量和视频监控等领域。PAL 是一种由两个反射面和两个折射面构成的折反透镜^[9],它可以基于平面圆柱投影法(FCP),将透镜周围 360°的物体成像在电荷耦合器件(CCD)的二维平面上,并且系统景深为无穷远。双 PAL 光学系统的特点是可以将两个视场的物体信息同时呈现在同圆心并内外相接的两个环状像面上,通过对比同一物点在不同环中的半径计算深度,获取存在视差的图像对。将捕获的原始全景立体图像对投影变换为柱面全景立体图像对,利用物点匹配信息获取深度信息。分析影响获取立体信息精度的因素,对相机标定并验证标定结果,使用三角测量法获取图像立体信息,实验结果表明该系统能有效地获取立体信息。

2 双 PAL 全景环带立体系统成像原理

单 PAL 透镜的成像光路如图 1 所示,1,3 为反射面,2,4 为折射面,它的成像可以基于平面圆柱投影法,如图 2 所示,将光轴水平 360°的景物投影到二维平面, A 点与 B 点经过 2 次折射与反射成像在 CCD 上,如图 1 中 A' 点和 B' 点。成像点位置由视场角 α 决定, β 为盲区,与光轴成同一垂直视场角的物点在经过 PAL 系统后在 CCD 上成像形成同一半径的同心圆,若三维物点连线平行于光轴,则这些点在像面上的像在同一径向延长线上。所有物点在

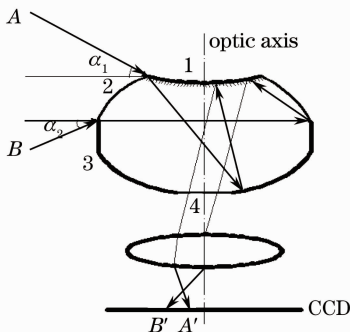


图 1 单 PAL 结构与成像光路

Fig. 1 Configuration of PAL and imaging optical path

CCD 上最终成环带像,水平视场角为 360°,垂直视场角范围为 $(-\alpha_2, \alpha_1)$ 。由于水平视场为 360°,下面讨论的视场角都是垂直视场角。

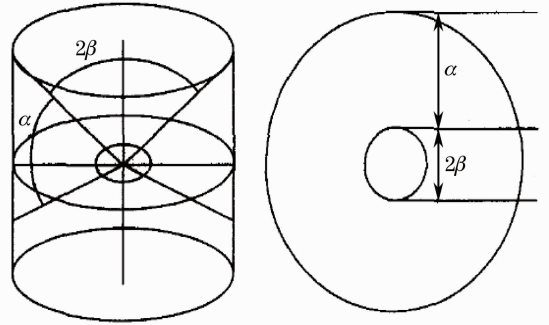


图 2 平面圆柱投影

Fig. 2 Flat cylinder perspective

由于单一的 PAL 透镜系统不能实时获取三维场中物点的立体信息,采用了基于双 PAL 透镜的全景系统,如图 3 所示。PAL_{up} 和 RL_{up} 是上方 PAL 部分和其后续镜组;PAL_{down} 和 RL_{down} 是下方 PAL 部分和其后续镜组;上方 PAL 系统利用下方 PAL 系统的盲区成像。上方 PAL 的成像视场角为 $(-\beta_{up}, \alpha_{up})$, 下方 PAL 的成像视场角为 $(-\beta_{down}, \alpha_{down})$ 。由此可见,立体信息只能从两个 PAL 单元重叠的区域提取。如图 3 中由 P 点出发的两条光线,一条以入射视场角 θ_{down} 进入下方的 PAL 系统,经过两次折射和反射,成像在 P₂ 点,另一条以入射视场角 θ_{up} 光线经过上方的 PAL 系统两次折射和反射后,利用下方 PAL 系统的盲区部分成像在点 P₁,不同的视场角在 CCD 成像的位置不同。

成像面如图 4 所示,外环带是下方 PAL 的成像区,内环带是上方 PAL 的成像区,中心圆区为盲区。

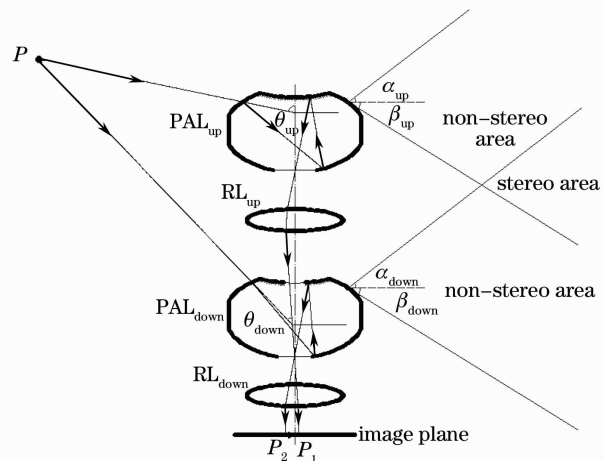


图 3 全景立体环带成像系统成像原理图

Fig. 3 Configuration of stereo PAL imaging system

Φ' 为物点 P 的方位角,它的大小与初始定义的 0° 方位有关。 P_1 和 P_2 都是 P 点的像,它们的半径分别为 r_{up} 和 r_{down} 。 $r_{down-max}$, $r_{down-min}$, r_{up-max} 和 r_{up-min} 分别为两个PAL单元成像环带边界。两个PAL单元与传感器中心共轴,同一物点在内外环带上的2个像点在同一径向射线方向上,但分别位于光轴的两侧,如空间物点 P 点,经过两个PAL系统的像 P_1 和 P_2 连线经过圆心。在不考虑畸变的情况下,PAL系统是一个 $f-\theta$ 的线性系统,径向半径由下式确定:

$$\begin{cases} r_{up} = f_{up} \cdot \theta_{up} \\ r_{up-max} = f_{up} \cdot \theta_{up-max} \\ r_{up-min} = f_{up} \cdot \theta_{up-min} \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} r_{down} = f_{down} \cdot \theta_{down} \\ r_{down-max} = f_{down} \cdot \theta_{down-max} \\ r_{down-min} = f_{down} \cdot \theta_{down-min} \end{cases}. \quad (2)$$

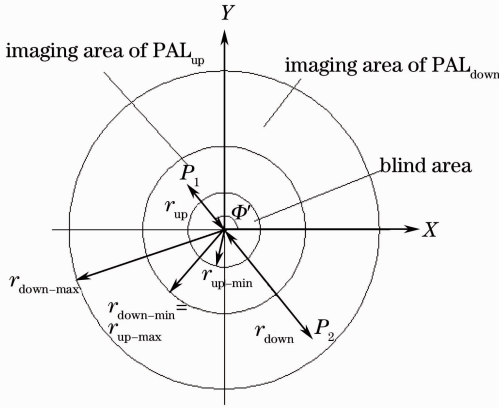


图4 全景环带立体成像系统像面图

Fig. 4 Annular image of stereo PAL imaging system

3 三角测量法提取深度信息

3.1 三角法原理

将本系统简化为单视点成像系统分析,如图5所示, Z 轴为光轴,物点 P 到光轴的距离定义为 S , θ_{up} 为上方入射角, θ_{down} 为下方入射角, O_1, O_2 分别为上下PAL光线入瞳中心, d 是两个PAL单元入瞳中心距离, θ_{up} 和 θ_{down} 可由 r_{up} 和 r_{down} 确定,物空间中的 X 轴, Y 轴与图4像空间中的 X' 轴, Y' 轴平行,因此 $\Phi = \Phi'$,将极坐标改成笛卡儿坐标, P 点的位置可以由下式确定:

$$S = \frac{d \sin \theta_{down} \sin \theta_{up}}{\sin(\theta_{up} - \theta_{down})}, \quad (3)$$

$$X = S \cos \varphi = \frac{d \sin \theta_{down} \sin \theta_{up}}{\sin(\theta_{up} - \theta_{down})} \cos \varphi, \quad (4)$$

$$Y = S \sin \varphi = \frac{d \sin \theta_{down} \sin \theta_{up}}{\sin(\theta_{up} - \theta_{down})} \sin \varphi, \quad (5)$$

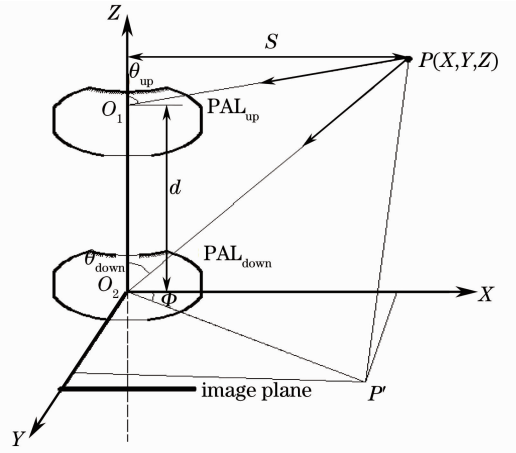


图5 三角测量原理图

Fig. 5 Schematic diagram of trigonometry

$$Z = O_{2z} + S / \tan \theta_{up} = O_{2z} + \frac{d \sin \theta_{down} \cos \theta_{up}}{\sin(\theta_{up} - \theta_{down})}. \quad (6)$$

因此在全景立体图像中寻找空间物点的两个对应像点,得到对应点在像面上的位置和入瞳距离,就可以获取立体信息。

3.2 深度信息提取的要点

3.2.1 入瞳中心距离 d 的准确性

从立体信息提取公式得知,入瞳距 d 的值对计算深度信息有很深的影响,因此精确测量 d 的值非常重要。但是PAL是非单视点成像系统,入瞳中心位置随着视场角的不同而漂移^[10],考虑到光学系统的旋转对称性,认为PAL入瞳中心位置并不固定,但应依旧处于光轴上,只是随着光线入射角的不同而沿轴移动。 d 的精确度会对测量造成影响,因而必须考虑。如图6所示,随着视场角的变化, P_1 和

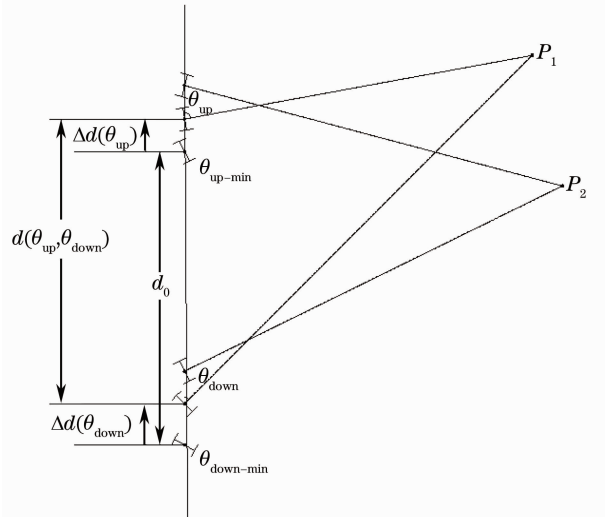


图6 入瞳漂移导致基线长度的变化示意图

Fig. 6 Change of base line with shift of pupils

P_2 入瞳沿着光轴移动,定义基准 d_0 为上下 PAL 都处于最小视场角时的入瞳中心间距。在 P_1 位置,上方 PAL 入瞳移动 $\Delta d(\theta_{up})$,下方入瞳移动 $\Delta d(\theta_{down})$,因此实际入瞳中心间距为

$$d(\theta_{up}, \theta_{down}) = d_0 + \Delta d(\theta_{up}) - \Delta d(\theta_{down}). \quad (7)$$

3.2.2 $r-\theta$ 的准确性

由深度信息提取的原理可见,影响测量准确度的因素,除基准间距 d 的准确性外,另一个重要的因素就是视场角 θ 的准确度。由于系统存在畸变,因而 $r-\theta$ 并不是线性关系,会影响到计算结果,因此实际入射视场角与物点在像面成像半径的关系,仍然需要通过标定来确定。

4 相机标定

相机标定是三维重建中非常重要的一步,常用

$$\theta_{up}(r_{up}) = a_1 + a_2 \cdot r_{up} + a_3 \cdot r_{up}^2 + \dots + a_{n_1} \cdot r_{up}^{n_1-1}, \quad (8)$$

$$\theta_{down}(r_{down}) = b_1 + b_2 \cdot r_{down} + b_3 \cdot r_{down}^2 + \dots + b_{n_2} \cdot r_{down}^{n_2-1}, \quad (9)$$

$$d(\theta_{up}, \theta_{down}) = d_0 + c_1 \cdot \theta_{up} + c_2 \cdot \theta_{up}^2 + \dots + c_{n_3} \cdot \theta_{up}^{n_3} + c_{n_3+1} \cdot \theta_{down} + c_{n_3+2} \cdot \theta_{down}^2 + \dots + c_{n_3+n_4} \cdot \theta_{down}^{n_4}. \quad (10)$$

由此系统的实际情况可知, a_i, b_i 不可能同时为零, $i=1, 2, \dots, n$ 。为确定系数,用非线性最小二乘法来求取最优值。令

$$x_i = x_i(0) + \delta x_i, \quad (11)$$

式中 $x_i = a_1, \dots, a_{n_1}, b_1, \dots, b_{n_2}, c_1, \dots, c_{n_3}, d_1, \dots, d_{n_4}, d_0; i = 0, 1, 2, \dots, m; m$ 为所有系数之和, $m = n_1 + n_2 + n_3 + n_4$ 。

$x_i(0)$ 是给予拟合系数的初值,只要求得 δx_i ,

的标定方法有传统标定法、主动视觉标定法和自标定法。Zhang^[11]提出的标定法比较适用于标定单视点成像系统,因此本系统建立新模型进行标定。

考虑到该系统的旋转对称性,并且对于装配公差的要求较松,认定成像面环带中心与 PAL 镜轴线同在光轴上,这点通过成像图像的环带圆形检测可以证明。传感器中心与镜头轴线的安装误差较小,对获取立体信息精度影响较小,因此不予考虑。由上述分析可知,立体信息的获取只与半径方向畸变有关而与切向无关。径向畸变只与视场角有关,而立体信息获取不仅与视场角有关,还与入瞳中心距有关。在无畸变时 $r-\theta$ 关系可以用(1)式和(2)式来表示,在存在畸变时 $r-\theta$ 关系可以用上下 PAL 的视场角和入瞳中心距离 d 的多项式来表示:

就可以确定拟合系数。根据(3)式和(7)式,立体信息提取公式为

$$S(r_{up}, r_{down}, x) = \frac{d(\theta_{up}, \theta_{down}) \sin \theta_{down} \sin \theta_{up}}{\sin(\theta_{up} - \theta_{down})}. \quad (12)$$

在 $x_i(0)$ 附近对 $S(r_{up}, r_{down}, x)$ 作泰勒级数展开,并略去 δx_i 的高次项,当 $r_{up} = r_{upi}, r_{down} = r_{downi}$ 时有

$$\begin{aligned} S(r_{upi}, r_{downi}, x) = & S_0(r_{upi}, r_{downi}, x) + \left[\frac{\partial S_0(r_{upi}, r_{downi}, x)}{\partial a_1} \right] \delta a_1 + \dots + \left[\frac{\partial S_0(r_{upi}, r_{downi}, x)}{\partial a_{n_1}} \right] \delta a_{n_1} + \\ & \left[\frac{\partial S_0(r_{upi}, r_{downi}, x)}{\partial b_1} \right] \delta b_1 + \dots + \left[\frac{\partial S_0(r_{upi}, r_{downi}, x)}{\partial b_{n_2}} \right] \delta b_{n_2} + \left[\frac{\partial S_0(r_{upi}, r_{downi}, x)}{\partial c_1} \right] \delta c_1 + \dots + \\ & \left[\frac{\partial S_0(r_{upi}, r_{downi}, x)}{\partial c_{n_3}} \right] \delta c_{n_3} + \left[\frac{\partial S_0(r_{upi}, r_{downi}, x)}{\partial d_1} \right] \delta d_1 + \dots + \left[\frac{\partial S_0(r_{upi}, r_{downi}, x)}{\partial d_{n_4}} \right] \delta d_{n_4} + \\ & \left[\frac{\partial S_0(r_{upi}, r_{downi}, x)}{\partial d_0} \right] \delta d_0, \end{aligned} \quad (13)$$

式中

$$S_0(r_{upi}, r_{downi}, x) = S[r_{upi}, r_{downi}, a_1(0), \dots, a_{n_1}(0), b_1(0), \dots, d_{n_4}(0), d_0(0)], \quad (14)$$

$$\frac{\partial S_0(r_{upi}, r_{downi}, x)}{\partial x_i} = \frac{S[r_{upi}, r_{downi}, a_1(0), \dots, a_{n_1}(0), b_1(0), \dots, d_{n_4}(0), d_0(0)]}{\partial x_i}. \quad (15)$$

这样函数 $S(r_{upi}, r_{downi}, x)$ 就转化为一个关于 δx_i 的线性函数。给出一系列标定点 $(r_{upi}, r_{downi}, S_i), i = 1, 2, \dots, n$, 定义残差平方和为

$$I = \sum [S(r_{\text{upi}}, r_{\text{downi}}, x) - S_i]^2. \quad (16)$$

由以上分析可知,由(14)式和(16)式定义的 I 是 δx_i 的函数。根据最小二乘原理,确定 δx_i 时,应满足条件 $\frac{\partial I}{\partial \delta x_i} = 0$,得方程

$$\mathbf{A} \times \mathbf{C} = \mathbf{B}, \quad (17)$$

式中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & \cdots & a_{0m} \\ a_{10} & a_{11} & \cdots & a_{1m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m0} & a_{m1} & \cdots & a_{mm} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$\mathbf{B} = (b_0, b_1, b_2, \cdots, b_m)^T, \quad (19)$$

$$\mathbf{C} = (\partial a_1, \cdots, \partial a_{n_1}, \partial b_1, \cdots, \partial b_{n_2}, \partial c_1, \cdots, \partial c_{n_3}, \partial d_1, \cdots, \partial d_{n_4}, \partial d_0)^T, \quad (20)$$

式中

$$a_{jk} = \sum \left[\frac{\partial S_0(r_{\text{upi}}, r_{\text{downi}}, x)}{\partial x_j} \right] \left[\frac{\partial S_0(r_{\text{upi}}, r_{\text{downi}}, x)}{\partial x_k} \right], \quad (21)$$

$j, k = 0, 1, 2, \cdots, m;$

$$b_j = \sum \left[\frac{\partial S_0(r_{\text{upi}}, r_{\text{downi}}, x)}{\partial x_j} \right] [S_i - S_0(r_{\text{upi}}, r_{\text{downi}}, x)], \quad (22)$$

$j = 0, 1, 2, \cdots, m.$

由此可以确定多项式拟合系数。

使用棋盘标定块,令棋盘格线平行于光轴,这样在距离镜头轴线相同距离 S 下,获得许多不同视场角的标定点。在环绕透镜不同 S 的位置,拍摄多张照片,选取其中 9 张如图 7 所示。

检测每张棋盘图上交叉点在内外环带中对应点的位置,得到 n 个标定点的数据 $(r_{\text{upi}}, r_{\text{downi}}, S_i)$,给定 $x_i(0)$ 后,(18)式和(19)式中元素均能求出,这样

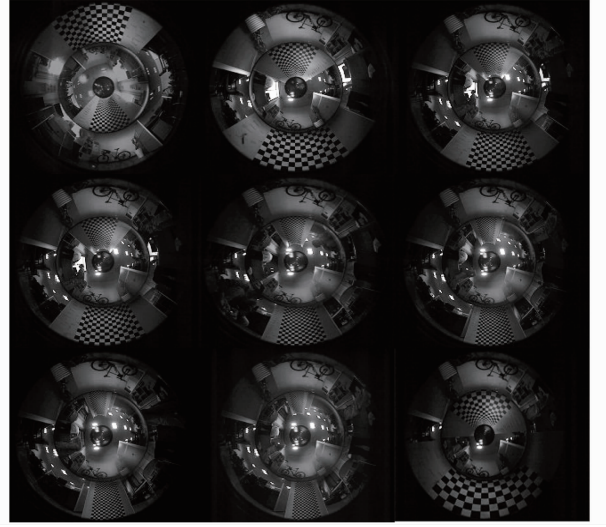


图 7 标定实验得到的图像

Fig. 7 Acquired images for calibration experiment

就能够通过求解(17)式得出 δx_i 的值。使用高斯-牛顿方法迭代优化最优值。在这种算法中初值的赋值是非常重要的,因此关于 $r-\theta$ 关系可以先根据无畸变线性情况下的 $r-\theta$ 关系拟合曲线,关于入瞳中心 $d(\theta_{\text{up}}, \theta_{\text{down}})$, d_0 可以使用设计值,其余参数置零。这样就避免了这种方法可能造成的参数不收敛的情况。为了计算最优多项式阶数 n ,从最初拟合的曲线阶数开始单步增加,由于最初是线性的,因此从 $n = 2$ 增加,计算残差平方和,当误差稳定且小于规定值时,算法停止。标定结果如图 8 所示,上方 PAL 标定值相对 $f-\theta$ 畸变最大偏差为 2.98%,下方 PAL 标定值相对 $f-\theta$ 畸变最大偏差为 1.95%。

相机标定后,根据三角测量法,可以获得物点立体信息,可以发现这种方法是不需要知道相机的内部参数的。

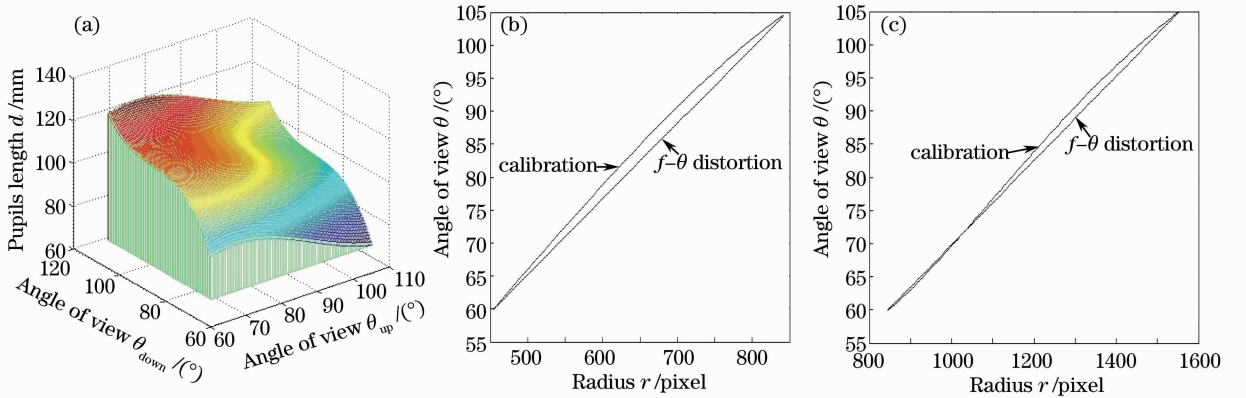


图 8 (a)入瞳中心间距与视场角关系;(b)上方 PAL $r-\theta$ 关系;(c)下方 PAL $r-\theta$ 关系

Fig. 8 (a) Relationship between pupil distance and viewing angle; (b) $r-\theta$ relationship of upper PAL; (c) $r-\theta$ relationship of lower PAL

5 实验与数据分析

为证明此系统的可行性,建立实验系统如图 9 所示,使用 CCD 尺寸为 $24\text{ mm} \times 36\text{ mm}$,像元大小为 $7.4\text{ }\mu\text{m}$,图像尺寸为 $4880\text{ pixel} \times 3248\text{ pixel}$,上方 PAL 焦距 3.35 mm ,成像视场角范围为 $28^\circ \sim 105^\circ$,下方 PAL 焦距为 6.45 mm ,成像视场角范围为 $60^\circ \sim 105^\circ$ 。图 10 为此系统拍摄的一张室内照片,空间物点在内外环带中沿环带中心对称,内环带中视场角小于 60° 的景物并未成像在外环带中。只要确定物点在图像上匹配点的位置,就可以将物点的空间位置确定。

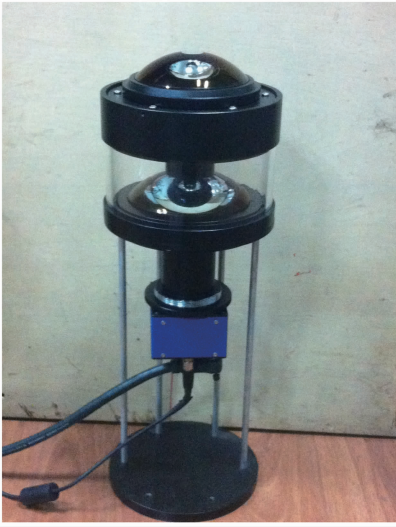


图 9 系统实物图
Fig.9 Prototype of system

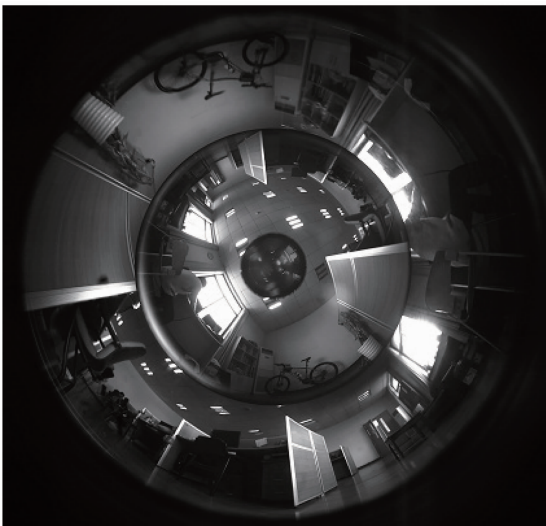


图 10 系统获取的全景成像图
Fig. 10 Stereo image captured by proposed system

5.1 标定结果准确性验证

本系统具有同一视场角的物点经过 PAL 后在

成像面上成同一半径同心圆的特点,因此同一光线物点成像点重合,如图 11 所示。

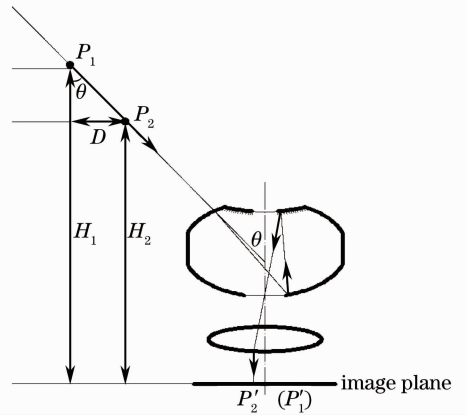


图 11 标定结果验证图

Fig. 11 Test chart for calibration results

物点 P_1 和 P_2 的成像点 P'_1 和 P'_2 重合,视场角可表示为

$$\theta = \arctan\left(\frac{D}{H_1 - H_2}\right). \quad (23)$$

在立体信息提取范围内随机采样, $r-\theta$ 标定准确性验证结果如图 12 所示,结果表明上下 PAL 标定视场角数值与实际测量值偏差在 2.5% 以内。

5.2 基于尺度不变特征变换(SIFT)匹配算法的立体信息提取

为了方便物点对的匹配,将捕获的原始全景立体图像对投影变换为柱面全景立体图像对,将图像切向展开^[12]。上下 PAL 的焦距不同,因此分别对内外环带进行展开,展开图像如图 13 所示。

由于该系统物点在上下 PAL 成像时视场点不同,上下 PAL 系统的畸变不同,所以物体在内外环带的大小、成像方向均不同。由于确定视场角对物点在图像上对应点的精确度要求比较高,但同时区域匹配等匹配算法精度不高,对于畸变、光照引起的匹配困难处理效果不好,因此使用 SIFT 算法进行匹配。

Lowe 等^[13,14]提出了 SIFT 特征检测与匹配算法,它特征点检测定位准确,不仅对图像缩放、平移和旋转变换具有不变性,而且对光照变化以及复杂的仿射和投影变换也具有部分不变性,具有一定的稳健性。SIFT 特征匹配采用了简单有效的方法,即当两幅图像关键点的 128 维描述向量之间的最小欧式距离与次小欧式距离的比值小于某个阈值时,认为特征对是匹配的。虽然 SIFT 算法具有较高的精确度,但是不可避免地有一些误匹配。使用传统 SIFT 匹配方法 BBF 算法对图 13 两幅展开图进行

匹配,有一些误匹配点,为清晰展示截取图像如图 14 所示。因此针对双 PAL 这种特殊的成像系统,将 SIFT 算法进行一些改进。

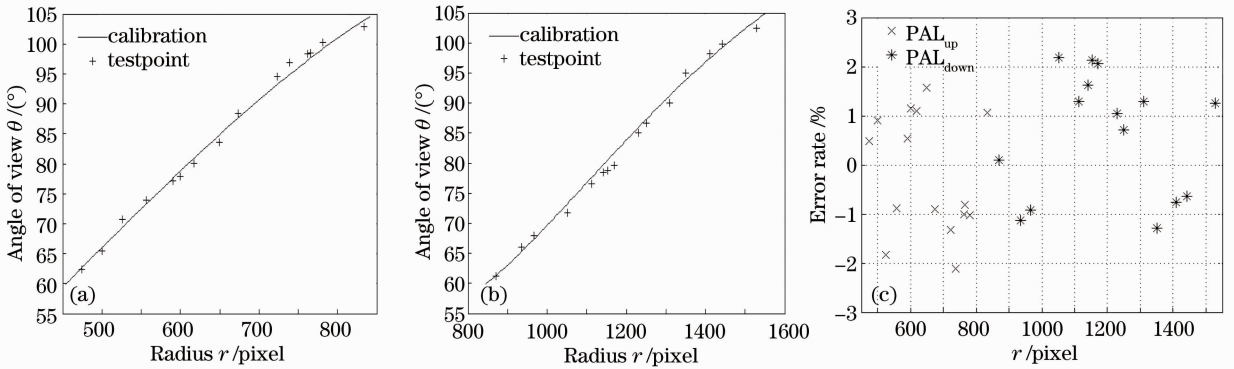


图 12 (a)上方 PAL $r-\theta$ 验证结果; (b)下方 PAL $r-\theta$ 验证结果; (c)视场角误差率

Fig. 12 (a) Test result of $r-\theta$ relationship of upper PAL; (b) test result of $r-\theta$ relationship of lower PAL; (c) error rate of viewing angle measurement

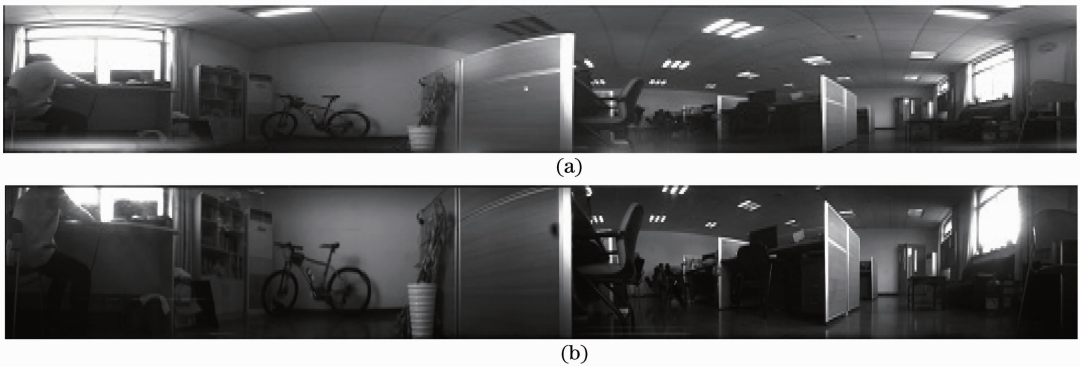


图 13 (a)图 10 内环带展开图; (b)图 10 外环带展开图

Fig. 13 Unwrapping images of (a) inner annular image and (b) outer annular image shown in Fig. 10

基于系统的成像特性,即空间物点在像面上成像是相对光轴对称的,如图 10 所示,因此可以不使用 SIFT 算法中使用的平衡二叉树的优化查找 (BBF) 算法匹配,而是利用系统的共线约束条件,即展开图上的物点逆映射回成像图上后,物点方向角 Φ 应当相差 π 。只对对应区域进行匹配搜索,不仅增加了匹配正确率并且加快了计算速度,增强了稳健性。匹配结果如图 15 所示,与图 14 相比,可以明显看出减少了很多误匹配。

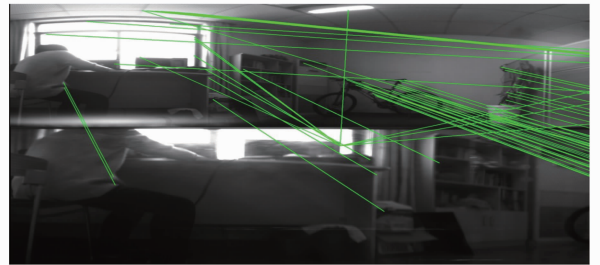


图 14 SIFT 特征点匹配图

Fig. 14 Image match result with SIFT algorithm

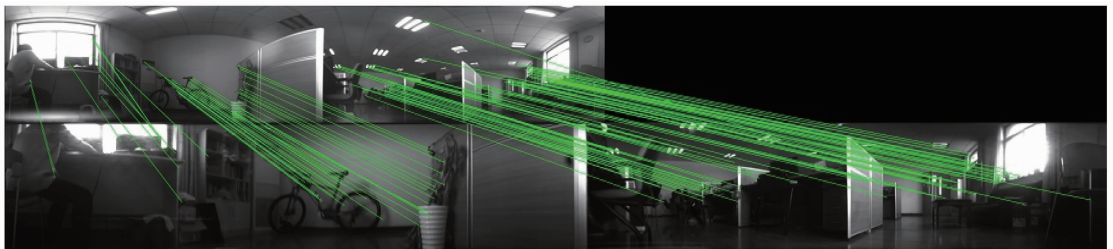


图 15 改进后 SIFT 特征点匹配结果

Fig. 15 Image match result with improved SIFT algorithm

5.3 立体信息提取实验结果

对距离系统 3 m 范围内的空间物体进行测距

实验,同一距离不同物体多次测量,同一物体上多点立体信息值取平均值,结果如表 1 所示。

表 1 全景环带立体成像系统测量物体距离的实验结果

Table 1 Experimental results of object distance measurement using stereo PAL imaging system

Test point	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀
Real distance /cm	50	80	110	140	170	200	230	250	280	300
Computed distance /cm	48.24	76.86	106.15	145.5	164.74	208.9	220.04	240.93	265.56	287.96
Error /cm	-1.76	-3.14	-3.85	5.5	-5.26	8.9	-9.96	-9.07	-14.44	-12.04
Error rate /%	-3.52	-3.92	-3.5	3.9	-3.09	4.45	-4.33	-3.62	-5.15	-4.01

距离测量误差率如图 16 所示,在 50~300 cm 距离范围内,实验距离与实测距离最大偏差为 5.15%,最小偏差为 3.5%,符合该系统设计需要达到的提取立体信息精度。由实验数据可知,物点距离系统越远,误差越大。这是由于距离越远, θ_{up} 和 θ_{down} 越接近,对变化越敏感。因此距离越远越不准确,此系统不适宜远程测量。

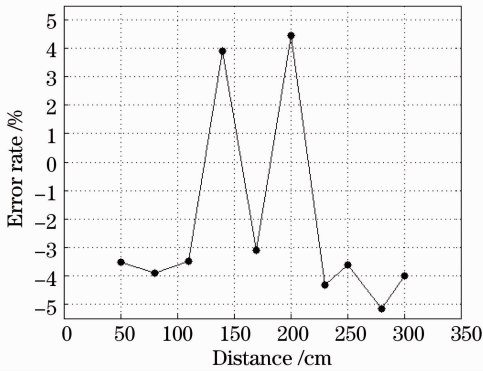


图 16 距离测量误差率

Fig. 16 Error rate of distance measurement

6 结 论

将一种全景立体成像系统应用于获取物体的距离信息,介绍了该系统的成像原理,针对非单视点系统特点建立了相机模型的标定方法和提取有效深度信息的方法。充分利用系统的共线约束来提高匹配的速度和准确度,简化了点对点的匹配,为后续的立体图像处理提供了极大的方便。实验结果和误差分析表明,本系统能获取 360°水平视场角场景的深度信息,3 m 距离范围实验误差率小于±5.2%,有效地获取了近距离物体立体信息,证明了系统获取立体信息的可行性。该方法可被广泛地应用于各种工业检测、军事侦察、地理勘测、保安识别、航空导航、机器人视觉、虚拟现实、人体测量和无人驾驶车辆等应用领域。

参 考 文 献

- Xiao Xiao, Yang Guoguang. A present and development of panoramic imaging technique [J]. *Optical Instrument*, 2007, **29**(4): 84~89
肖 潇, 杨国光. 全景成像技术的现状和进展[J]. *光学仪器*, 2007, **29**(4): 84~89
- Wu Xianxiang, Guo Baolong, Wang Juan. Cylindrical panoramic image automatic mosaic algorithm based on phase correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1824~1829
吴宪祥, 郭宝龙, 王 娟. 基于相位相关的柱面全景图像自动拼接算法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1824~1829
- Zeng Jiyong, Su Xianyu. Catadioptric omnidirectional system with undistorted imaging for horizontal scene [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 636~640
曾吉勇, 苏显渝. 水平场景无畸变的折反射全景成像系统[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 636~640
- Lei Yanzhang, Zhao Huijie, Jiang Hongzhi. A three-dimensional measurement method by combining binocular and monocular vision systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1339~1342
雷彦章, 赵慧洁, 姜宏志. 一种单双目视觉系统结合的三维测量方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1339~1342
- E. L. L. Cabral, J. C. S. Junior, M. C. Hunold. Omnidirectional stereo vision with a hyperbolic double lobed mirror [C]. *Proceedings of International Conference on Pattern Recognition*, 2004, **1**: 1~9
- Chen Lidong, Wang Wei, Zhang Maojun *et al.*. Design analysis of a complementary double mirror catadioptric omnidirectional imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3478~3494
陈立栋, 王 炜, 张茂军等. 双反射面互补结构的折反射全向成像系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3478~3494
- Z. Zhu, K. D. Rajasekar. Panoramic virtual stereo vision of cooperative mobile robots for localizing 3D moving objects [C]. *IEEE Workshop on Omnidirectional Vision*, 2000. 29~36
- W. Li, Y. F. Li. Single-camera panoramic stereo imaging system with a fisheye lens and a convex mirror [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(7): 5855~5867
- Xiao Xiao, Yang Guoguang, Bai Jian. Panoramic-annular-lens distortion correction based on spherical perspective projection constraint [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 675~682
肖 潇, 杨国光, 白 剑. 基于球面透视投影约束的全景环形透镜畸变校正[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 675~682
- G. N. E. Weech, J. A. Gilbert, D. R. Matthys. A stereoscopic system for panoramic measurement [C]. *Proceedings of the 2001 SEM Annual Conference and Exposition*, 2001. 199~202
- Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, **22**(11): 1330~1334
- Zhu Fangming, Yang Guoguang, Yao Weiyong *et al.*.

- Linearization of annular image of panoramic annular lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(9): 1111~1114
朱方明, 杨国光, 姚炜勇 等. 全景环形透镜形像的线性化研究 [J]. *光子学报*, 2001, **30**(9): 1111~1114
- 13 D. G. Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *International J. Computer Vision*, 2004, **60**(2): 91~110
- 14 Wei Hu, Zhang Liyan, Liu Shenglan *et al.*. An algorithm on registration of multi-view range images based on SIFT feature matching [J]. *J. Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2010, **22**(4): 654~661
韦 虎, 张丽艳, 刘胜兰 等. 基于 SIFT 图像特征匹配的多视角深度图配准算法 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2010, **22**(4): 654~661

栏目编辑：李文喆