

基于对极约束的双目立体视觉标定精度评价方法

张青哲*, 王勇

长安大学道路施工技术装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064

摘要 为解决现有利用左右图像总残差的均值来评价双目立体视觉标定不够精确的问题,提出一种基于对极约束的双目立体视觉标定精度评价方法。该方法充分考虑双目立体视觉中左右图像特征的约束关系及相机标定参数的全局性特征。遵循最小匹配代价原则,该方法利用尺度不变特征变换立体特征匹配法来进行角点检测和匹配。通过左右图像平面上实测角点与其在相对图像平面上对应极线的匹配程度来评价双目立体视觉标定精度,并将这种算法加入到标定算法中,实现了在标定实验过程中对相机标定精度的实时评价。实验表明,该方法比总残差均值法精度更高,精度最高提高了 54.0%。

关键词 机器视觉; 立体视觉; 摄像机标定; 对极约束; 精度评价

中图分类号 TP391 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.231504

Binocular Stereo Vision Calibration Accuracy Evaluation Using Epipolar Constraint

Zhang Qingzhe*, Wang Yong

Key Laboratory of Road Construction & Equipment, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China

Abstract The accuracy of binocular stereo vision calibration obtained using the mean of total residuals of left and right images is unsatisfactory. To overcome this limitation, this study proposes a method for evaluating the accuracy of binocular stereo vision calibration based on the epipolar constraint. The proposed method considers the constraint relationship between left and right image features in binocular stereo vision and global characteristics of camera calibration parameters. Based on the principle of minimum matching cost, a stereo feature matching method based on scale-invariant feature transform is used for corner detection and matching. The accuracy of binocular stereo vision calibration is evaluated based on the matching degree of measured corner points on the left and right image planes with their corresponding epipolar lines on the relative image plane. This proposed algorithm is added to the calibration algorithm to realize real-time evaluation of camera calibration accuracy during the calibration experiment. Experiments demonstrate that the proposed method is more accurate than the method using the mean of residuals, with accuracy increased by up to 54.0%.

Key words machine vision; stereo vision; camera calibration; epipolar constraint; accuracy evaluation

OCIS codes 150.0155; 150.1488; 150.1135

1 引言

随着视觉三维(3D)测量、三维重建、深度估计等技术的发展,双目立体视觉研究由于其自身的优越性逐渐成为研究热点。而高效、高精度摄像机标

定方法^[1-4]是保证双目立体视觉实现精确定位^[5]、准确测量^[6-7]、三维重建^[8-9]等技术的核心。因此,能够更为直观、高效、精确地评价双目立体视觉系统标定精度显得尤为重要。

一般来讲,利用某一标定参数作为参考来评价

收稿日期: 2019-04-11; 修回日期: 2019-06-09; 录用日期: 2019-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(51208044)、陕西省自然科学基金基础研究计划(2017JM5105)、中央高校基本科研业务费专项基金(300102259108)

* E-mail: zqzh@chd.edu.cn

相机标定精度比较困难,国内外学者对双目立体视觉标定精度评价主要采用对标准件进行测量得到的测量精度、采用3D空间某一特征点三维重建的精度及通过标定实验测量得到的相机出厂参数进行间接评价,针对双目立体视觉标定精度评价仍没有高效、统一的评价方法。解则晓等^[10]利用单应性原理剖析标定姿态对标定精度的影响,通过对标准工件进行测量,得到测量精度来评定标定精度,该方法通过测量精度来间接评价标定精度,实验复杂、精度很难保证,而且只是进行事后分析,无法对标定实验进行实时修正。Tsai^[11]针对相机标定精度评估提出绝对3D坐标测量法、3D尺寸测量法、光线跟踪模糊区域半径法。前2种方法采用三维重建后的理论值和实测值进行对比,来评价标定精度,实验复杂,对相机配置有较高的要求,而第3种方法只适用于单目标定。曲华等^[12]提出以左右图像总残差的均值来评价标定精度,虽然提出了双目标定精度评价方法,但未考虑两幅图像特征的几何约束关系,精度评价不够精确。Weng等^[13]通过归一化处理误差与实测点的深度,计算出立体标定误差(NECE),这种方法虽然充分考虑了各因素对标定精度的影响,建立了误差评估模型,评价精确,但模型复杂,评价模型不够直观。

本文提出一种基于对极约束的双目立体视觉标定精度评价方法,该方法通过左右图像平面上实测角点与其在相对图像平面上对应极线的匹配程度来评价双目标定系统的标定精度。该方法充分考虑了两幅图像特征之间的匹配对应关系。实验证明,该方法评价模型简单有效、精度高、稳健性好,满足工程应用要求。

2 基本原理

2.1 对极几何原理

如图1所示,左右相机的光心为 O_1 、 O_2 ,即左右相机独立的投影中心。下标 l,r 分别为左、右相机, π_l 和 π_r 分别为相机左、右图像平面,物点 N 在每个图像平面上的投影点记为 n_l 、 n_r 。连接左右相机投影中心的线为基线 $\overline{O_1O_2}$,基线 $\overline{O_1O_2}$ 与左右图像平面 π_l 、 π_r 相交的点称为极点,分别为 e_l 、 e_r 。左图像平面上的一个极点 e_l 为右相机光心 O_2 的一个像点,右极点同理。物点 N 和两个投影中心 O_1 、 O_2 所确定的面叫极平面,投影点 n_l 和对应极点 e_l 连线,以及投影点 n_r 和对应极点 e_r 的连线为极线,分别用 l_l 、 l_r 表示。

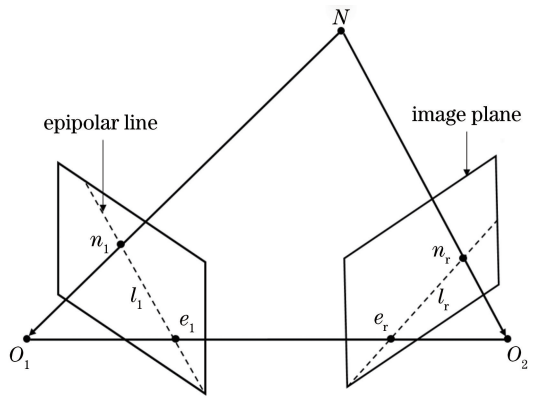


图1 对极约束关系

Fig. 1 Epipolar constraint relationship

物点 N 和它在左右图像平面上的投影点 n_l 、 n_r 都处于一张公共极面上,投影点 n_l 和光心 O_1 连线的投影必然会落在右图像平面的右极线 l_r 上,因此左投影点 n_l 在右图像平面上的对应点 n_r 必然在 l_r 上,右投影点 n_r 同理,这就是对极约束。对极约束充分反映了两幅图像中特征点和极线的匹配程度,基于这样的思想和方法来实现对双目立体视觉系统标定精度的实时评价。

2.2 左右极线的构造

在工程应用中通常只使用像素坐标,为分析两幅图像上像素坐标与其对应极线的关系,就需构造极线。设左右图像平面上的投影点 n_l 、 n_r 对应的像素坐标为 q_l 、 q_r ,对应的物理坐标为 p_l 、 p_r 。

设左右相机的内参矩阵为 M_l 、 M_r ,本征矩阵 $E=RS$,用 q_l 、 q_r 和相关的相机内参矩阵来表示物理坐标 p_l 、 p_r 。 $p_l=M_l^{-1}q_l$,其中 M_l 为相机的内参矩阵, p 、 q 分别表示投影点对应的物理坐标和像素坐标,则 q_l 、 q_r 满足

$$q_r^T(M_r^{-1})RSM_l^{-1}q_l=0, \quad (1)$$

式中, R 表示左相机坐标到右相机坐标的旋转矩阵,为 3×3 矩阵, S 表示从左相机到右相机平移向量 T 求出的反对称矩阵。旋转矩阵 R 和平移向量 T 由相机标定得出。

设 $T=(t_u, t_v, t_w)^T$,其中 (t_u, t_v, t_w) 表示左相机相对右相机在世界坐标中的相对位置, uvw 代表世界坐标系,则

$$S = \begin{bmatrix} 0 & -t_u & t_v \\ t_w & 0 & -t_u \\ -t_v & t_u & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

为简化表达式,定义基础矩阵 $F=(M_r^{-1})EM_l^{-1}$,整理(1)式得

$$q_r^T F q_l = 0, \quad (3)$$

式中, \mathbf{F} 为一个 3×3 的秩亏矩阵, 矩阵秩 $\text{rank}(\mathbf{F})=2$, \mathbf{F} 由双目立体视觉标定得出。

至此, 左右投影平面上点的像素坐标与其对应的极线关系得以确定, 则左右极线 l_1, l_r 的方程为

$$l_1 = \mathbf{F}^T \mathbf{q}_r, \quad (4)$$

$$l_r = \mathbf{F} \mathbf{q}_1. \quad (5)$$

上述只对对极几何原理及左右相机图像平面上的投影点与其对应极线关系进行了基本的介绍, 更详细的推导过程和理论分析请参考文献[14-15]。

3 基于对极约束的双目立体视觉标定精度实时评价方法

3.1 实测角点去畸变处理

相机透镜自身特殊的球形形状及相机装配误差、制造上的缺陷导致相机会产生畸变误差。相机标定的目的就是为了可以得到准确的相机畸变参数, 为后续相机使用时矫正做准备。为建立极线方程, 首先必须对实测角点进行去畸变处理, 使其变换到理想位置。

实测角点去畸变处理过程如下:

1) 先利用分步标定法^[12]对左右相机分别进行单目标定。为降低光照和噪声等因素对标定精度的影响, 标定时对图像进行二值化处理和滤波处理, 得到左右图像平面上具有亚像素精度的实测角点坐标, 及左右相机的内参数和畸变参数。

2) 利用畸变参数和相机内参数把实测角点转换到理想平面, 得到一系列理想点坐标。

综合考虑径向畸变和切向畸变, 设实测角点坐标为 (x_{oj}, y_{oj}) , 校正后理想点坐标为 (x_j, y_j) , 由于

$$\begin{bmatrix} x_j \\ y_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 + f_1 \frac{X_w}{Z_w} \\ c_r + f_r \frac{Y_w}{Z_w} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中, c_1, c_r 为左右相机主点坐标, f_1, f_r 为左右相机像素焦距, 主点坐标和像素焦距由标定得到,

$(\frac{X_w}{Z_w}, \frac{Y_w}{Z_w})$ 为实测角点在世界坐标系中的齐次坐标。则有

$$\begin{bmatrix} x_j \\ y_j \end{bmatrix} = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \begin{bmatrix} x_{oj} \\ y_{oj} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2p_1 x_{oj} y_{oj} + p_2 (r^2 + 2x_{oj}^2) \\ p_1 (r^2 + 2y_{oj}^2) + 2p_2 x_{oj} y_{oj} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中, $r^2 = x_{oj}^2 + y_{oj}^2$, k_1, k_2, k_3 代表相机透镜的径向畸变系数, p_1, p_2 代表相机透镜的切向畸变系数。

3.2 基于对极约束的标定精度实时评价方法

在对极约束下, 图像上一个特征点的理想位置本该在其对应的极线上, 而由于相机标定误差导致左(右)图像上的一个特征点未必在其对应的右(左)极线上, 因此利用两幅图像上特征点与其对应极线的约束关系来检查标定精度。要使两幅图像上一对特征点匹配得越精确, 就要控制两幅图像上所有相互匹配的特征点到其对应极线的距离最小, 最小距离为点到对应极线的垂直距离。

基于对极约束的双目立体视觉标定精度实时评价方法基本流程如下:

1) 利用左相机去畸变后得到的理想点坐标和基础矩阵 \mathbf{F} 建立右极线方程。同理, 建立左极线方程。

2) 利用对极约束对左图像平面上实测角点在右图像平面上对应的投影点进行修正, 得到位于右极线上距离最短的最优匹配点坐标。右图像平面上的实测角点对应的最优匹配点坐标对同理得到。

3) 计算左图像上所有实测角点在右图像上对应的投影点与其最优匹配点之间累计形成的距离绝对误差, 同理计算右图像上所有实测角点形成的距离绝对误差。通过左右图像平面上距离绝对误差均值的大小来描述两幅图像上实测角点与对应极线的匹配程度, 用匹配程度高低来评价双目立体视觉系统标定精度。

以左相机标定精度评价方法进行说明。图2为左图像实测角点与其对应右极线匹配关系示意图, 随机取一个投影点 \mathbf{q}_r 来说明标定精度评价方法。设 \mathbf{q}_r 为左图像实测角点 \mathbf{q}_1 在右投影平面上的投影点, 坐标为 $\mathbf{q}_r(x_s, y_s)$, 坐标由相机标定和对极约束得到(其中 s 代表实测角点)。 l_1, l_r 为左右极线, 过点 \mathbf{q}_r 引出 l_r 的垂线, 与 l_r 相交于 $\mathbf{q}'_r, \mathbf{q}''_r$ 即为 \mathbf{q}_r 在右投影平面上投影点的最优匹配点。 \mathbf{q}'_r 与右极线共线, 且满足对极约束条件。

设 \mathbf{q}'_r 坐标为 (x, y) , 由于左投影平面 π_1 上点 \mathbf{q}_1 坐标和基础矩阵 \mathbf{F} 已知, 由(5)式可知, 右极线方程为 $l_r = \mathbf{F} \mathbf{q}_1 = (A, B, C)^T$, 极线系数 A, B, C 代表标定结果, 将极线系数参与运算, 能更为准确地反映左右图像平面上特征点的像素坐标与其对应极线的关系。则设 l_r 方程为 $Ax + By + C = 0$ 。

取畸变得到的位于 l_r 上的两个互异点 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$, 带入 l_r 极线方程, 可得

$$\begin{cases} Ax_1 + By_1 + C = 0 \\ Ax_2 + By_2 + C = 0 \end{cases}, \quad (8)$$

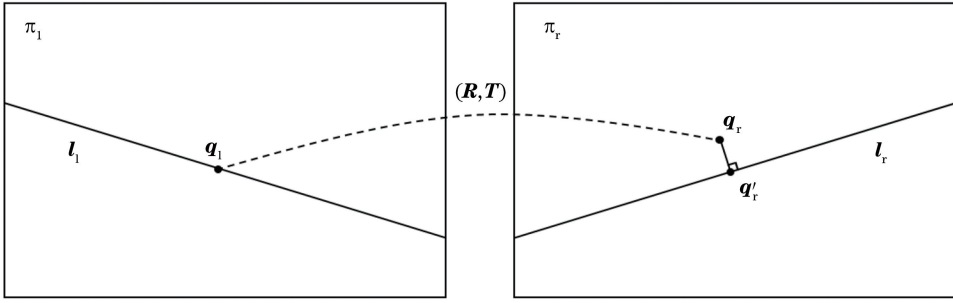


图2 左图像实测角点与其对应右极线匹配关系

Fig. 2 Matching relationship between measured corner points of left image and its right epipolar line

整理得 $A(x_1 - x_2) + B(y_1 - y_2) = 0$

线 $\overline{q'_l q_r}$ 垂直于线 $A(x_1 - x_2) + B(y_1 - y_2) = 0$, 则过点 $(x - x_s, y - y_s)$ 的直线平行于线 $A(x_1 - x_2) + B(y_1 - y_2) = 0$, 又因为 $q'_r(x, y)$ 在右极线 l_r 上, 则联立方程组得

$$Ax + By + C = 0 \quad \frac{x - x_s}{A} = \frac{y - y_s}{B}, \quad (9)$$

把(9)式变为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ B & -A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -C \\ Bx_s - Ay_s \end{bmatrix}, \quad (10)$$

由(10)式得到 $q'_r(x, y)$ 的值。

综合考虑左右图像平面, 用 δ 表示左右图像平面上所有实测角点的距离绝对误差均值, 则

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n [\sqrt{(x_{li} - x_{sli})^2 + (y_{li} - y_{sli})^2} + \sqrt{(x_{ri} - x_{sri})^2 + (y_{ri} - y_{sri})^2}]}{2n}, \quad (11)$$

式中, n 为检测到的实测角点个数, i 为左右图像平面上第 i 个实测角点, $(x_{sli}, y_{sli}) [(x_{sri}, y_{sri})]$ 为左(右)图像平面上实测角点对应在右(左)图像平面上的投影点坐标, (x_{li}, y_{li}) 、 (x_{ri}, y_{ri}) 为经过对极约束修正后位于极线上的最优匹配点坐标。

由(11)式可知, δ 越小, 两幅图像上的实测角点与其对应极线匹配程度越高, 双目立体视觉系统标定精度越高。

4 实验验证与分析

4.1 实验设置

为验证基于对极约束的双目立体视觉标定精度实时评价方法的有效性和稳健性, 搭建了双目立体标定系统对本文方法进行实验验证。系统软件环境为 windows7 系统, 采用 VS2013 开发平台, + OpenCV2.49 版本进行算法编写。该系统硬件环境由两个 CCD 相机(QR-3D-1MP02-V92)、相机支架、棋盘格标定板及计算机组成。相机像素为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$, 采样频率为 60 Hz , 相机像元尺寸为 $3.75 \mu\text{m} \times 3.75 \mu\text{m}$, CCD 的感光面积为 $4.8 \text{ mm} \times 3.6 \text{ mm}$, 对角线为 6 mm , 采用轴线平行式手动调焦双目相机, 基线长度为 60 mm 。实验采用棋盘格为

10 mm 和 20 mm 的两种张正友标定板, 分别代表两种标定系统, 格数都为 14×13 格, 高清打印后粘在平整的画板上。为降低光照和噪声等因素对标定精度的影响, 标定时对图像进行二值化处理 and 滤波预处理, 加强黑白棋盘格及其边缘纹理信息。为解决手动调焦双目相机标定实验复杂、难度大等问题, 将本文所述标定精度评价算法加入到标定算法中, 实现了在标定实验过程中对相机标定精度的实时评价, 相机标定精度的实时评价如图 3 所示。

4.2 实验与结果分析

为保证标定精度, 实验采用文献[10]所述五姿态标定法选择标定图像姿态。为保证两个相机不失焦, 合理放置相机与标定板的距离, 降低系统结构对标定精度的影响。为保证边缘信息质量, 标定板图像应该铺满整个视场。

采用改良张正友标定法的分步标定法^[12]对相机进行标定。通过不同相机焦距下的标定实验来进行分组, 实验分为 5 组, 每组实验拍摄 20 组标定板图像。对 20 mm 的标定板进行 3 组相机标定分析, 对 10 mm 的标定板进行 2 组相机标定分析, 实验均处于同样的光源、噪声等环境条件下, 为保证图像上角点检测的精确性, 仅仅对相机焦距进行适当的调

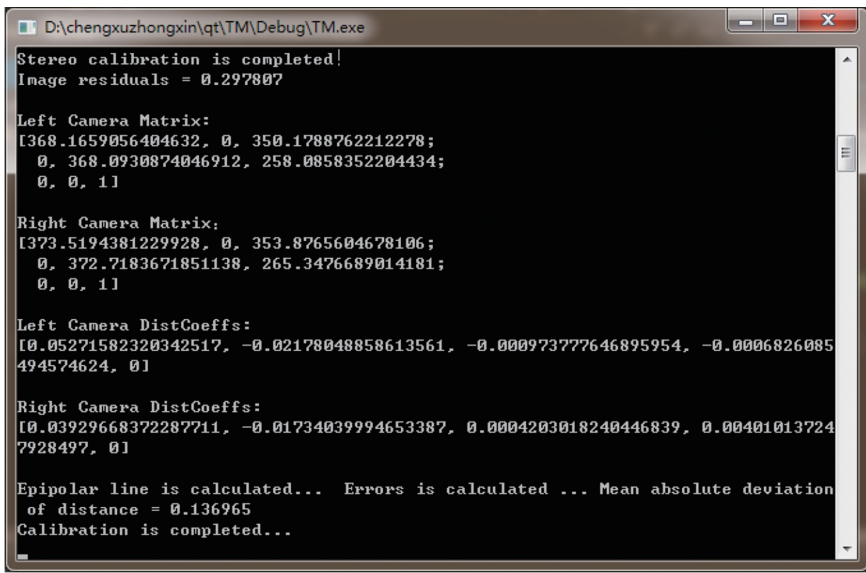


图 3 相机标定精度的实时评价

Fig. 3 Real-time evaluation of camera calibration accuracy

表 1 5 组标定实验结果

Table 1 Results of five sets of calibration experiments

Calibration sample (chess board size)	Camera	f /pixel	(c_1, c_r)	k_1	k_2	p_1	p_2
1(10 mm)	Left	(368.165,368.093)	(350.178,258.085)	0.0527	-0.0217	-0.0009	-0.0006
	Right	(373.519,372.718)	(353.876,265.347)	0.0392	-0.0173	0.0004	0.0040
2(10 mm)	Left	(371.442,371.330)	(346.833,255.428)	0.0539	0.0301	-0.0010	-0.0009
	Right	(366.330,365.744)	(354.867,265.233)	0.0340	0.0342	-0.0007	0.0042
3(20 mm)	Left	(362.349,362.997)	(346.067,258.233)	0.0273	-0.0245	0.0007	0.0001
	Right	(368.832,369.370)	(353.880,266.318)	0.0312	-0.0383	0.0011	0.0010
4(20 mm)	Left	(370.017,370.576)	(349.697,259.817)	0.0288	-0.0363	0.0004	0.0001
	Right	(371.448,371.956)	(354.044,264.984)	0.0340	-0.0460	0.0007	0.0010
5(20 mm)	Left	(366.331,366.959)	(348.547,258.587)	0.0273	-0.0161	0.0009	0.0004
	Right	(372.603,373.075)	(353.470,265.876)	0.0374	-0.0404	0.0009	0.0011

整。标定实验结果如表 1 所示。

为进一步验证本文方法的有效性、稳健性、优越性,首先,通过文献[12]的方法,计算出 5 组标定实验左右图像总残差的均值,然后分别计算出 5 组实

验的距离绝对误差均值,最后由 5 组标定实验分别测量出两相机间的基线长度,对比两种方法在同一相机基线测量结果下误差的大小。实验结果如表 2 所示。

表 2 两种标定精度评价方法测量结果对比

Table 2 Comparison of measurement results by two methods of camera calibration accuracy evaluation

Calibration sample (chess board size)	Image residual /pixel	Mean absolute deviation of distance /pixel	Camera baseline /mm	Measurement error /mm
1(10 mm)	0.2978	0.1369	60.26	0.26
2(10 mm)	0.2635	0.1643	61.11	1.11
3(20 mm)	0.1879	0.1468	60.42	0.42
4(20 mm)	0.2079	0.1584	60.91	0.91
5(20 mm)	0.2125	0.1721	61.21	1.21

结合表 1,2 可知:

第一,由 5 组实验测得的基线长度分别为 60.26,61.11,60.42,60.91,61.21 mm,与相机出厂参

数的基线长度 60 mm 基本一致,符合预期,证实了基于对极约束的双目立体视觉精度评价方法具有有效性。

第二,验证本文方法的稳健性。如图4、5和表1所示,在5组两种棋盘格单元格大小、不同的像素焦距下,每组实验选取20种不同棋盘格姿态图像进行标定实验精度评价。在这些实验条件下,这5组实验得到的距离绝对误差均值和相机基线长度,均满足本文标定精度评价指标中距离绝对误差均值越小,相机基线长度与理想值越接近的条件。进一步,



图4 棋盘格的标定姿态(20 mm)

Fig. 4 Calibration poses of 20 mm chessboard



图5 棋盘格的标定姿态(10 mm)

Fig. 5 Calibration poses of 10 mm chessboard

第三,进一步验证本文方法的优越性。相机标定的目的是为获得准确的相机畸变参数及相机内外参数,用标定误差大小来反映相机畸变的大小及相机内外参数误差。如表2所示,在相同实验条件下,以第5列相机基线测量误差为基准,通过分别评价5组实验中第2列总残差均值方法得到的标定误差数据,第3列本文方法得到的标定误差数据和第5列基线测量误差数据的吻合程度,来对比两种标定精度评价方法的精度。通常用相关系数来评价两组数据的吻合程度,在10 mm棋盘格下进行的2组实验中,得到本文方法的相关系数为1,而总残差均值方法的相关系数为-1。在20 mm棋盘格下进行的3组实验中,得到的本文方法的相关系数为0.982,而总残差均值方法的相关系数为0.97。综合考虑5组实验数据的相关系数可知,采用本文方法得到的标定误差数据与基准值更为吻合,本文双目标定精度评价方法精度更高。对比表2中第2列和第3列的误差数据,可知采用本文评价方法比采用总残差均值方法精度分别提高了54.0%、37.6%、21.9%、23.8%、19.0%。

5 结 论

为提高双目立体视觉标定精度,提出一种基于极线约束的双目立体视觉标定精度评价方法。该方法基于尺度不变特征变换立体特征匹配法,通过左

从下文所述的第三点分析可知,5组实验中,总残差均值方法得到的标定误差数据与基准值基线测量误差数据的相关性出现了负相关,即在标定精度评价过程中,出现标定误差减少,评价指标反而变大的现象。而采用本文方法得到的相关系数高达0.982,与基准值高度吻合。因此,本文精度评价方法具有较好的稳健性。

右图像平面上实测角点与其在相对图像平面上对应极线的匹配程度来评价双目标定系统标定精度。通过在相机不同焦距下进行5组标定实验,得到的相机基线长度均符合预期,证实本文方法的稳健性和有效性。实验表明,本文标定精度评价方法均比现有总残差均值的评价方法的精度更高,精度最高提高了54.0%。并将该评价方法加入到双目标定算法中,实现了对标定精度的实时评价。该方法评价模型简单、有效,精度能满足较多情况下工程测量要求,解决了现有评价方法实验复杂、精度低的问题,为后续相机实现三维重建、精确测量、定位打下坚实的基础。

参 考 文 献

- [1] Jiang T, Cheng X S, Cui H H, *et al.* Calibration method of binocular vision system with zoom lens based on homography matrix[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0315005.
姜涛, 程筱胜, 崔海华, 等. 基于单应性矩阵的变焦双目视觉标定方法[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0315005.
- [2] Zhu F, Yu F S, Wu Y M, *et al.* Analysis of attitude calibration precision of P4P camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(11): 1115005.
朱帆, 于芳苏, 吴易明, 等. P4P法相机姿态标定精度分析[J]. *光学学报*, 2018, 38(11): 1115005.

- [3] Zou P P, Zhang Z L, Wang P, *et al.* Binocular camera calibration based on collinear vector and plane homography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1115006.
邹朋朋, 张滋黎, 王平, 等. 基于共线向量与平面单应性的双目相机标定方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1115006.
- [4] Kawabata S, Kawai Y. Plane based multi camera calibration under unknown correspondence using ICP-like approach [C]//Proceedings of the 21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR2012), November 11-15, 2012, Tsukuba, Japan. New York: IEEE, 2012: 3700-3703.
- [5] Zhang G L, Yao E L, Lin Z L, *et al.* Fast binocular SLAM algorithm combining the direct method and the feature-based method[J]. *Robot*, 2017, 39(6): 879-888.
张国良, 姚二亮, 林志林, 等. 融合直接法与特征法的快速双目 SLAM 算法[J]. *机器人*, 2017, 39(6): 879-888.
- [6] Zhang B S, Zhang Q Z, Wang Y S, *et al.* The method of solving the non-coplanar perspective-four-point (P4P) problem [C]//Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference, July 28-30, 2014, Nanjing, China. New York: IEEE, 2014: 1039-1043.
- [7] Guo Y J, Bai F Z, Zhang T Y, *et al.* Ring object diameter measuring method based on Radon transform and gray gravity algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(8): 081501.
郭延杰, 白福忠, 张铁英, 等. 基于 Radon 变换与灰度重心法的环形目标直径测量方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(8): 081501.
- [8] He J M, Qiu J, Liu C. Fusing feature point density and edge information for scene depth estimation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 071101.
何建梅, 邱钧, 刘畅. 融合特征点密度与边缘信息的场景深度估计[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 071101.
- [9] Wong K H, Yu Y K, Fung H Y, *et al.* Robust and efficient pose tracking using perspective-four-point algorithm and Kalman filter [C]//2017 International Conference on Mechanical, System and Control Engineering (ICMSC), May 19-21, 2017, St. Petersburg, Russia. New York: IEEE, 2017: 240-244.
- [10] Xie Z X, Lu W J, Wang X M, *et al.* Analysis of pose selection on binocular stereo calibration [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(2): 0208003.
解则晓, 陆文娟, 王晓敏, 等. 双目立体标定的姿态选择分析[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0208003.
- [11] Tsai R. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 1987, 3(4): 323-344.
- [12] Qu H, Wu Z N. Step calibration and accuracy analysis of binocular stereo vision [J]. *Journal of Tianjin Polytechnic University*, 2018, 37(3): 67-71.
曲华, 吴朝娜. 双目立体视觉分步标定及精度分析[J]. *天津工业大学学报*, 2018, 37(3): 67-71.
- [13] Weng J, Cohen P, Herniou M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(10): 965-980.
- [14] Wu F Z. *Mathematical methods in computer vision* [M]. Beijing: Science Press, 2008: 63-67.
吴福朝. *计算机视觉中的数学方法* [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 63-67.
- [15] Hartley R, Zisserman A. *Multiple view geometry in computer vision* [M]. UK: Cambridge University Press, 2004: 158-179.