

基于位姿约束的大视场双目视觉标定算法

张 超 韩 成* 杨华民 杨 帆

长春理工大学计算机科学技术学院, 吉林 长春 130000

摘要 为了提高大视场、远距离的双目摄像机标定精度,提出一种基于位姿约束的摄像机标定算法。该方法利用双目摄像机之间的三维位姿关系是刚体变换这一属性,标定出左、右摄像机相对位姿的外部参数。利用相对位姿为约束条件求取摄像机的初始内部参数,剔除较大的重投影误差值对应的标定图像组,重复迭代直至重投影误差平均值小于指定值,得到多个待优化的摄像机内部参数。再将最后标定图像组的角点坐标、待优化的摄像机内部参数和相应的外部参数,建立一个以角点三维重构坐标值与实际设定角点三维坐标值的模均值为最小的目标函数,求解出双目摄像机标定参数的最优解。该方法很好地解决了误差大的标定图像造成的影响,且充分利用了双目摄像机之间的位姿约束关系。通过仿真和标定实验可以看出,本文方法可以实现大视场双目摄像机的高精度标定。

关键词 机器视觉; 双目视觉; 位姿约束; 相机标定; 刚体变换; 重投影误差

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0115003

Large Field and Binocular Vision Calibration Algorithm Based on Position and Orientation Constraints

Zhang Chao Han Cheng Yang Huamin Yang Fan

*School of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130000, China*

Abstract In order to improve the accuracy of large field, far distant binocular camera calibration, a new calibration algorithm based on the constraints of camera position and orientation is proposed. As the three-dimensional position and orientation relationship between binocular cameras is a rigid transformation, the external parameters of relative pose of left and right cameras are targeted. By using the constraints of the relative position and orientation, internal parameters of the initial left and right cameras are calibrated. Excluding calibration image groups by large re-projection errors, repeating iterations until the mean of re-projection errors is less than the specified value, several camera internal parameters to be optimized is obtained. Then combining with the corner point coordinates of image groups, camera internal parameters to be optimized and corresponding external parameters, an objective function is established that the values of three-dimensional reconstruct corner point coordinates and the values of the actual three-dimensional corner point coordinates are the smallest. The optimal solution of binocular camera calibration parameters is solved. The proposed method is a good solution to the impact caused by the large error of calibration image, and makes full use of the constraint relationship between the binocular cameras position and orientation. Through simulation and calibration experiments, it can be seen that the proposed method can achieve a high precision calibration of large field binocular cameras.

Key words machine vision; binocular vision; pose constraints; camera calibration; rigid transformation; re-projection error

OCIS codes 150.0155; 150.1488; 150.1135

收稿日期: 2015-08-04; 收到修改稿日期: 2015-08-24

基金项目: 国家科技支撑计划重大项目课题(2012BAF12B22)、吉林省重大科技攻关项目(2012ZDGG004)、吉林省科技发展计划项目(20130303011GX)、长春市科技计划项目(14KG013)、吉林省科技发展计划项目(20140204050GX)

作者简介: 张 超(1985—),男,博士研究生,主要从事图像处理、计算机视觉、增强现实等方面的研究。

E-mail: zhangchao511221@hotmail.com

导师简介: 杨华民(1963—),男,博士,教授,主要从事系统仿真、图像处理、机器视觉等方面的研究。E-mail: yhm@cust.edu.cn

*通信联系人。E-mail: hancheng@cust.edu.cn

1 引 言

在计算机视觉与光学测量领域,双目视觉技术是一种具有仿生特性并充分利用双目视差原理的三维测量与感知方法,它采用三角测量和透视投影方法合理地刻画出客观三维景物的深度和距离信息,被广泛地应用于工业检测、机器人避障、汽车导航、三维重建等诸多领域。从三维测量的普适性角度看,双目视觉技术具有测量速度快、测量精度高、结构简单、自动化程度高、非接触性等优点而成为光学测量研究的热点问题之一。双目视觉技术的计算理论借助了摄像机标定过程得到的几何成像模型参数,通过左、右眼两幅图像中匹配点二维坐标的投影变换,解算得到空间点的三维世界坐标。因为双目视觉技术是通过左、右眼摄像机建立起三维空间的物像关系,从而将匹配的二维图像坐标恢复为三维世界坐标,所以双目视觉中摄像机参数标定的精准度直接影响着三维世界坐标的解算精度。摄像机参数的标定是双目视觉系统构建的重要环节,因此参数标定的可信性与准确性是双目视觉技术研究的重点。

目前摄像机标定方法中自标定法和传统标定法得到研究者的广泛研究。自标定方法是利用多幅图像之间的自身关系求解摄像机参数^[1-2]。Baataoui 等^[3]提出了一个 CCD 摄像机自标定方法,该方法最大限度地减少自标定约束;徐嵩等^[4-5]利用射影几何中消影点的特性进行摄像机自标定。自标定方法虽然具有灵活性强等优点,但稳健性较差,且不适用于大视场的摄像机标定。传统标定法需事先选取一个规定的标准参照物,通过建立已知的标准参照物中三维点和成像点之间的数学关系,求解摄像机的各个参数^[6-8]。Marita 等^[9]提出了一种远距离摄像机标定方法,其通过设定多个“X”形标定图像,将其固定在指定的位置上,利用透视投影原理对摄像机进行标定,然而该方法没有对摄像机的内部参数进行优化标定。孙军华等^[10]提出了一种将多个小平面标靶进行组合,通过确定其中的一个标靶为坐标系来约束各个标靶,建立相应的目标函数,但是该方法涉及到标靶的特征点较多,提取费时,而且在建立各个标靶之间的约束关系时也存在一定的误差,导致整个标定精度降低。霍炬等^[11]则提出了一种利用多个小标靶之间的刚体变换,把各个小标靶拼接成一个大标靶,然后进行摄像机的标定,但是该方法在求解的过程中需要进行多次非线性优化,算法的运行效率比较低。文献[10-13]都涉及到待标定视场较大时,在提取各个小的标靶的特征点的误差大,摄像机的标定精度无法得到保障,以及没有排除造成的标定精度误差大的图像组,且都没有考虑双目摄像机之间的刚性位姿关系。

基于以上原因,本文提出了一种基于位姿约束的大视场双目视觉标定算法,它以双目摄像机的物理刚性关系为约束条件进行内、外参优化求解,避免了传统标定方法中内、外参迭代求解的过度优化问题。该算法首先通过标靶在空间中各个姿态的特征点三维坐标值与其在成像平面中成像点的关系,求解单个摄像机的外部参数,再利用左、右摄像机之间的刚体位姿变换关系,求解出另一摄像机的外部参数。将重投影误差值进行反复迭代求解多个左、右摄像机的待优化内部参数,最后通过三维重构的平均误差求解出最优摄像机参数。

2 双目视觉摄像机成像模型

摄像机的透视投影模型是指通过摄像机的镜头把外界场景透视投影在一个图像平面上,其理想情况下被称为针孔成像模型。在针孔成像模型中定义三个坐标系:全局的基准坐标系($O_w-X_wY_wZ_w$)、以摄像机光心为原点的坐标系($O_c-X_cY_cZ_c$)、成像平面坐标系(O_l-uv)。

设空间中点 P 在 $O_w-X_wY_wZ_w$ 坐标系下的坐标为 $P_{Glo}=[P_{Gx} P_{Gy} P_{Gz}]^T$,其在 $O_c-X_cY_cZ_c$ 坐标系下的点为 $P_{Cam}=[P_{Cx} P_{Cy} P_{Cz}]^T$,在 O_l-uv 坐标系下的齐次坐标为 $P_{img}=[P_u P_v 1]^T$ 。引入旋转矩阵 R_M 、平移矩阵 T_M 来描述 $O_w-X_wY_wZ_w$ 坐标系和 $O_c-X_cY_cZ_c$ 坐标系之间的相对位置和姿态关系,得到

$$\left\{ \begin{array}{l} R_M = \begin{bmatrix} R_{M1} & R_{M2} & R_{M3} \\ R_{M4} & R_{M5} & R_{M6} \\ R_{M7} & R_{M8} & R_{M9} \end{bmatrix}, T_M = [T_{Mx} \quad T_{My} \quad T_{Mz}]^T \\ P_M = \begin{bmatrix} P_{M1} & P_{M2} & P_{M3} & P_{M4} \\ P_{M5} & P_{M6} & P_{M7} & P_{M8} \\ P_{M9} & P_{M10} & P_{M11} & P_{M12} \end{bmatrix} = I_M \begin{bmatrix} R_M & T_M \\ O^T & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{Px} & 0 & C_{Px} & 0 \\ 0 & F_{Py} & C_{Py} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_M & T_M \\ O^T & 1 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} F_{Px} \times R_{M1} + C_{Px} \times R_{M7} & F_{Px} \times R_{M2} + C_{Px} \times R_{M8} & F_{Px} \times R_{M3} + C_{Px} \times R_{M9} & F_{Px} \times T_{Mx} + C_{Px} \times T_{Mz} \\ F_{Py} \times R_{M4} + C_{Py} \times R_{M7} & F_{Py} \times R_{M5} + C_{Py} \times R_{M8} & F_{Py} \times R_{M6} + C_{Py} \times R_{M9} & F_{Py} \times T_{My} + C_{Py} \times T_{Mz} \\ R_{M7} & R_{M8} & R_{M9} & T_{Mz} \end{bmatrix} \end{array} \right. , \quad (1)$$

式中 (F_{P_x}, F_{P_y}) 表示摄像机的焦距和成像单元尺寸的比值, (C_{P_x}, C_{P_y}) 为主点坐标, \mathbf{I}_M 为摄像机的内参矩阵, 而 \mathbf{P}_M 为摄像机的单应性矩阵。

由针孔成像模型的三角关系得到

$$\zeta \begin{bmatrix} P_u \\ P_v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{P}_M \times \begin{bmatrix} P_{G_x} \\ P_{G_y} \\ P_{G_z} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中比例因子 $\zeta \cong P_{G_z}$, 消除比例因子, 即可得到摄像机透视投影的线性方程^[14],

$$\begin{cases} P_u = \frac{(F_{P_x} R_{M1} + C_{P_x} R_{M7})P_{G_x} + (F_{P_x} R_{M2} + C_{P_x} R_{M8})P_{G_y} + (F_{P_x} R_{M3} + C_{P_x} R_{M9})P_{G_z} + F_{P_x} T_{Mx} + C_{P_x} T_{Mz}}{R_{M7} P_{G_x} + R_{M8} P_{G_y} + R_{M9} P_{G_z} + T_{Mz}} \\ P_v = \frac{(F_{P_y} R_{M4} + C_{P_y} R_{M7})P_{G_x} + (F_{P_y} R_{M5} + C_{P_y} R_{M8})P_{G_y} + (F_{P_y} R_{M6} + C_{P_y} R_{M9})P_{G_z} + F_{P_y} T_{My} + C_{P_y} T_{Mz}}{R_{M7} P_{G_x} + R_{M8} P_{G_y} + R_{M9} P_{G_z} + T_{Mz}} \end{cases} \quad (3)$$

把(3)式转换成矩阵的形式, 利用多个空间点即可求出摄像机的单应性矩阵, 也就是摄像机的内、外参矩阵。

利用摄像机的线性投影模型进行摄像机的标定, 得到左右摄像机的单应性矩阵,

$$\mathbf{P}_{ML} = \begin{bmatrix} P_{ML1} & P_{ML2} & P_{ML3} & P_{ML4} \\ P_{ML5} & P_{ML6} & P_{ML7} & P_{ML8} \\ P_{ML9} & P_{ML10} & P_{ML11} & P_{ML12} \end{bmatrix}, \mathbf{P}_{MR} = \begin{bmatrix} P_{MR1} & P_{MR2} & P_{MR3} & P_{MR4} \\ P_{MR5} & P_{MR6} & P_{MR7} & P_{MR8} \\ P_{MR9} & P_{MR10} & P_{MR11} & P_{MR12} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

设空间点 P 在左、右摄像机的成像坐标系下的齐次坐标为 $\mathbf{P}_{\text{imgL}}=[P_{ul} \ P_{vl} \ 1]^T$, $\mathbf{P}_{\text{imgR}}=[P_{ur} \ P_{vr} \ 1]^T$ 。双目摄像机的射线交互法基本原理是左、右摄像机镜头的投影中心分别与空间点在左、右成像图像中的成像点来构成两条射线, 这两条射线的交点便是空间点 P 。其数学模型可表示为

$$\begin{bmatrix} P_{ul} P_{ML9} - P_{ML1} & P_{ul} P_{ML10} - P_{ML2} & P_{ul} P_{ML11} - P_{ML3} \\ P_{vl} P_{ML9} - P_{ML5} & P_{vl} P_{ML10} - P_{ML6} & P_{vl} P_{ML11} - P_{ML7} \\ P_{ur} P_{MR9} - P_{MR1} & P_{ur} P_{MR10} - P_{MR2} & P_{ur} P_{MR11} - P_{MR3} \\ P_{vr} P_{MR9} - P_{MR5} & P_{vr} P_{MR10} - P_{MR6} & P_{vr} P_{MR11} - P_{MR7} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{ML4} - P_{ul} P_{ML12} \\ P_{ML8} - P_{vl} P_{ML12} \\ P_{MR4} - P_{ur} P_{MR12} \\ P_{MR8} - P_{vr} P_{MR12} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 $[X, Y, Z]^T$ 为点 P 在全球基准坐标系的坐标, 由于(5)式是超定方程组, 所以在求解的过程中使用最小二乘法求解。

3 标定原理

双目视觉摄像机标定与单目摄像机标定最大的区别是利用两个摄像机之间的约束关系进行摄像机标定, 因此双目视觉摄像机标定不能简单的看成两个独立的单目摄像机标定。由于双目视觉摄像机具有仿生的特性, 也就是双目摄像机之间具有固定的位姿这个物理属性关系, 然而传统的双目摄像机标定都是考虑左、右摄像机之间成像点的匹配关系, 并没有考虑双目摄像机之间的位姿约束关系。所以, 只有当双目摄像机之间的固定物理属性无限接近实际的物理属性值时, 双目摄像机其他参数才能得到保障。由于在大视场中, 标定空间范围较大, 所以在进行双目摄像机标定时, 需要在不同的方位采集多组标定图像。文献[15]分析了不同的标定姿态会对摄像机的标定造成一定影响, 并提出了五姿态集标定法, 然而在实际标定中, 无法避免这种现象, 因此需要在标定算法中排除影响较大的标定图像。

为此本文标定算法首先需要在三个方位或者多个方位采集标定图像组, 在不同的方位首先要保证标定板位于左、右摄像机的共同视场范围内, 使其在当前方位下具有前俯、后仰、左倾斜、右倾斜、正对等姿态, 多次拍摄标定板, 采集多组标定板图像。之后分别求解内、外参数, 实现大视场的双目摄像机标定, 即首先利用多组采集的实际三维点与其在摄像机中成像点的关系, 并结合双目摄像机之间的位姿约束关系, 获取左、右摄像机的各组外参矩阵。再利用三角测量关系和重投影误差值进行迭代计算, 得到多组待优化左、右摄像机的内部参数。最后利用三维重构角点的三维坐标值与实际设定的三维坐标值的误差来求解摄像机内部参数的最优解。

3.1 位姿约束的双目摄像机外部参数求解

在单目摄像机中, 设摄像机相对于标定板的三维姿态为旋转矩阵 \mathbf{R} 、平移矩阵 $\mathbf{T}=[T_x \ T_y \ T_z]^T$, 由于旋转矩

阵是正交矩阵,得到约束关系为

$$\begin{cases} r_{11}r_{11} + r_{12}r_{12} + r_{13}r_{13} = 1 \\ r_{21}r_{21} + r_{22}r_{22} + r_{23}r_{23} = 1 \\ r_{31}r_{31} + r_{32}r_{32} + r_{33}r_{33} = 1 \\ r_{11}r_{12} + r_{21}r_{22} + r_{31}r_{32} = 0 \\ r_{11}r_{13} + r_{21}r_{23} + r_{31}r_{33} = 0 \\ r_{12}r_{13} + r_{22}r_{23} + r_{32}r_{33} = 0 \end{cases}, \quad (6)$$

式中 $r_{ij}(i \leq 3, j \leq 3)$ 为 R 的第 i 行、第 j 列元素。摄像机的线性成像模型为

$$\begin{cases} P_u - C_x = -F \frac{r_{11}(P_{Gx} - T_x) + r_{21}(P_{Gy} - T_y) + r_{31}(P_{Gz} - T_z)}{r_{13}(P_{Gx} - T_x) + r_{23}(P_{Gy} - T_y) + r_{33}(P_{Gz} - T_z)} \\ P_v - C_y = -F \frac{r_{12}(P_{Gx} - T_x) + r_{22}(P_{Gy} - T_y) + r_{32}(P_{Gz} - T_z)}{r_{13}(P_{Gx} - T_x) + r_{23}(P_{Gy} - T_y) + r_{33}(P_{Gz} - T_z)} \end{cases}, \quad (7)$$

式中 $[P_{Gx}, P_{Gy}, P_{Gz}]^T$ 为标定板图像角点在世界坐标系下的坐标值, $[P_u, P_v]^T$ 为角点在图像坐标系的坐标值, $[C_x, C_y]^T$ 为主点坐标, F 为摄像机的焦距。

图 1 呈现了双目视觉中刚性位姿约束关系对标定的影响,在理想的情况下双目摄像机之间的位姿关系为 $\langle O_L, O_R \rangle$, 空间中点对 (A, B) 在左、右成像平面中的点对分别为 (m, n) 、 (p, q) 。如果双目摄像机之间的位姿关系变成 $\langle O'_L, O'_R \rangle$, 则通过成像点对 (m, n) 、 (p, q) 计算出的三维空间点则为 (A', B') , 因此双目视觉中位姿约束的刚性物理属性直接影响着最终的标定结果。

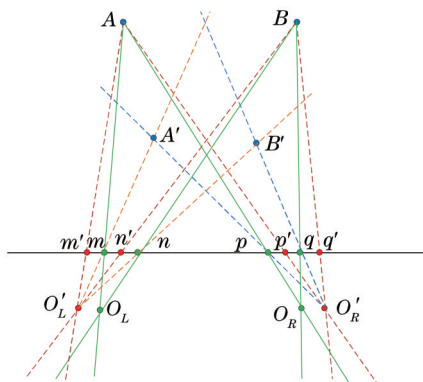


图 1 双目摄像机的位姿约束分析图

Fig.1 Pose constraints analysis of binocular camera

设左、右摄像机一共采集了 N 组标定图像, 其中每幅标定图像都具有 C_{num} 个角点, 把左摄像机采集的第 i 幅标定图像的所有角点坐标和对应的世界坐标系下的三维坐标带入(7)式, 并将(6)式作为约束关系, 可以求得第 i 幅标定图像相对于摄像机的外部参数 $R_i, T_i(i=1, 2, \dots, N)$ 。

由于左、右摄像机具有刚体不变的三维位姿关系,

$$R_i = R_L \cdot R_{ri}^T, T_i = T_L - R_L \cdot T_{ri}, \quad (8)$$

式中旋转矩阵 R_L 、平移矩阵 T_L 为双目摄像机的相对外部参数。利用位姿约束关系可以得到第 i 个标定图像相对于右摄像机的旋转矩阵 R_{ri} 、平移矩阵 T_{ri} 的表达式,

$$R_{ri} = R_{ri}^T \cdot R_L, T_{ri} = R_{ri}^T \cdot (T_L - T_i). \quad (9)$$

将(6)式和(7)式中的旋转、平移矩阵用(8)式表示, 同时代入右摄像机采集的 N 个标定图像的角点坐标和对应的世界坐标系下的三维坐标, 求解构成的方程组即可求得双目摄像机的相对外部参数 R_L, T_L 。再利用(9)式即可求解右摄像机相对于第 i 个标定图像的旋转矩阵 R_{ri} 、平移矩阵 T_{ri} 。

3.2 双目摄像机内部参数的迭代优化

双目摄像机的非线性畸变模型如(10)式所示, $[P_{Gxi}, P_{Gyi}, P_{Gzi}]^T$ 为第 i 组标定图像的世界坐标值, 其在左、右摄像机成像匹配点为 $P_{corli} = [P_{lxi}, P_{lyi}]^T, P_{corri} = [P_{rix}, P_{riy}]^T$, 左摄像机对应的 N 个外部参数 R_L, T_L 构成的外参矩阵为 $E_L = [R_L | T_L]$, 右摄像机对应的 N 个外部参数 R_{ri}, T_{ri} 构成的外参矩阵为 $E_{ri} = [R_{ri} | T_{ri}]$, 而其中 k_1, k_2 为摄像机的投影中心在横纵方

向上的径向畸变系数, Z_{lei}, Z_{rei} 为在摄像机坐标系下的深度信息, $(F_{lx}, F_{ly}, C_{lx}, C_{ly}), (F_{rx}, F_{ry}, C_{rx}, C_{ry})$ 为左、右摄像机的等效焦距和主点坐标,

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{lei} \left\{ \begin{array}{l} P_{lui} [1 + k_1(P_{lui}^2 + P_{lvi}^2) + k_2(P_{lui}^2 + P_{lvi}^2)^2] \\ P_{lvi} [1 + k_1(P_{lui}^2 + P_{lvi}^2) + k_2(P_{lui}^2 + P_{lvi}^2)^2] \\ 1 \end{array} \right\} \\ Z_{rei} \left\{ \begin{array}{l} P_{rui} [1 + k_1(P_{rui}^2 + P_{rvi}^2) + k_2(P_{rui}^2 + P_{rvi}^2)^2] \\ P_{rvi} [1 + k_1(P_{rui}^2 + P_{rvi}^2) + k_2(P_{rui}^2 + P_{rvi}^2)^2] \\ 1 \end{array} \right\} \end{array} \right. = \left[\begin{array}{ccc} F_{lx} & 0 & C_{lx} \\ 0 & F_{ly} & C_{ly} \\ 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc} R_{li11} & R_{li12} & R_{li13} \\ R_{li21} & R_{li22} & R_{li23} \\ R_{li31} & R_{li32} & R_{li33} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} T_{liX} \\ T_{liY} \\ T_{liZ} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} P_{GX_i} \\ P_{GY_i} \\ P_{GZ_i} \\ 1 \end{array} \right] \\ \left[\begin{array}{ccc} F_{rx} & 0 & C_{rx} \\ 0 & F_{ry} & C_{ry} \\ 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc} R_{ri11} & R_{ri12} & R_{ri13} \\ R_{ri21} & R_{ri22} & R_{ri23} \\ R_{ri31} & R_{ri32} & R_{ri33} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} T_{riX} \\ T_{riY} \\ T_{riZ} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} P_{GX_i} \\ P_{GY_i} \\ P_{GZ_i} \\ 1 \end{array} \right] \end{array} \quad (10)$$

双目摄像机内部参数迭代优化过程如下:

1) 将采集到的 N 组标定图像的角点坐标值, 及其对应世界坐标系下的坐标值和 N 组左、右摄像机的外参矩阵 E_{li}, E_{ri} , 代入(10)式可以求得双目摄像机的初始待优化内部参数 $M_{IPm} = [F_{lxm}, F_{lym}, C_{lxm}, C_{lym}, F_{rxm}, F_{rym}, C_{rxm}, C_{rym}, k_{1m}, k_{2m}]$, (m 为内部参数的迭代次数, 初始值为 1)。将 N 组标定板图像角点的世界坐标值, 对应的 N 组左、右摄像机的外参矩阵和待优化内部参数 M_{IPm} , 代入 (10) 式求出 N 组标定板图像的重投影角点坐标:

$$\hat{P}_{lWj} = [\hat{P}_{lWuj}, \hat{P}_{lWvj}]^T, \hat{P}_{rWj} = [\hat{P}_{rWuj}, \hat{P}_{rWvj}]^T, \text{ 其中 } j=1, 2 \dots C_{num}, W=1, 2 \dots N。$$

2) 计算第 W 组标定板图像角点的重投影误差

$$\zeta_w = \frac{\sum_{j=1}^{C_{num}} [(\hat{P}_{lWuj} - P_{lWuj}) + (\hat{P}_{lWvj} - P_{lWvj}) + (\hat{P}_{rWuj} - P_{rWuj}) + (\hat{P}_{rWvj} - P_{rWvj})]}{C_{num} \times 4}, \quad (11)$$

式中 $P_{lWj} = [P_{lWuj}, P_{lWvj}]^T$, $P_{rWj} = [P_{rWuj}, P_{rWvj}]^T$ 为第 W 组标定板图像的角点坐标, 则共得到 N 个重投影误差值构成的集合 $\zeta_w^m = \{\zeta_w | W = 1, 2 \dots N\}$, 计算 N 个重投影误差值的平均值 ζ_{avg}^m , 删除 ζ_w^m 中的最大值对应的一组标定板图像后重新计算, 直到 $\zeta_{avg}^m \leq \delta$, 并计算出第 S 组标定板图像角点对应的三维重构的世界坐标值 $\hat{P}_{GSj} = [\hat{P}_{GSXj}, \hat{P}_{GSYj}, \hat{P}_{GSZj}]^T$, 其中 $j=1, 2 \dots C_{num}, S=1, 2 \dots N$ 。

3) 计算 N 组标定板图像角点的三维重构误差值

$$\gamma_s^n = \frac{\sum_{j=1}^{C_{num}} [(\hat{P}_{GSXj} - P_{GSXj}) + (\hat{P}_{GSYj} - P_{GSYj}) + (\hat{P}_{GSZj} - P_{GSZj})]}{C_{num} \times 3}, \quad (12)$$

式中 $P_{GS} = [P_{GSXj}, P_{GSYj}, P_{GSZj}]^T$ 为第 S 组标定板图像角点的世界坐标值, 共得到 N 个三维重构误差值构成的集合 $\gamma^n = \{\gamma_s^n | S = 1, 2 \dots N\}$, 计算 N 个三维重构误差值的平均值 γ_{avg}^n , 并加入三维重构误差值的平均值 $\gamma_{avg}^n = \{\gamma_{avg}^n\}$, 则可以得到最小值 γ_{avg}^{\min} 对应的左、右摄像机内部参数 M_{IPmin} , 即为迭代求取的双目摄像机的内部参数。再将 M_{IPmin} 作为初值, 建立一个重投影误差平方和最小的目标函数

$$L_{min} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{C_{num}} \|A_{ij} - f(M_{IPmin})\|^2, \quad (13)$$

式中 A_{ij} 为检测得到的角点图像坐标, $f(M_{IPmin})$ 为摄像机成像模型投影得到的角点坐标, 采用 Levenberg-Marquardt 算法^[16]进行迭代求解最优解, 则此解即为双目摄像机的最优内部参数。

4 实验分析

双目视觉标定系统采用的工业摄像机的 CCD 像素尺寸为 $3.2 \mu\text{m} \times 3.2 \mu\text{m}$, 其分辨率为 $2048 \text{ pixel} \times 1536 \text{ pixel}$, 镜头焦距为 119.5 mm 。为了验证本文方法适合大视场双目视觉标定, 使双目视觉系统最佳对焦的工作距离为 36 m , 两个摄像机的公共视场为 $1700 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm}$ 。平面靶标采用黑白棋盘格, 通过多组标定实验验证该方法的有效性。

4.1 标定实验数据分析

实验中将平面靶标放置在双目摄像机的共同视场内, 进行不同姿态的变换, 提取平面靶标的角点坐标,

利用 3.1 节的方法计算出双目摄像机的相对外参矩阵,然后迭代求取双目摄像机的内部参数。

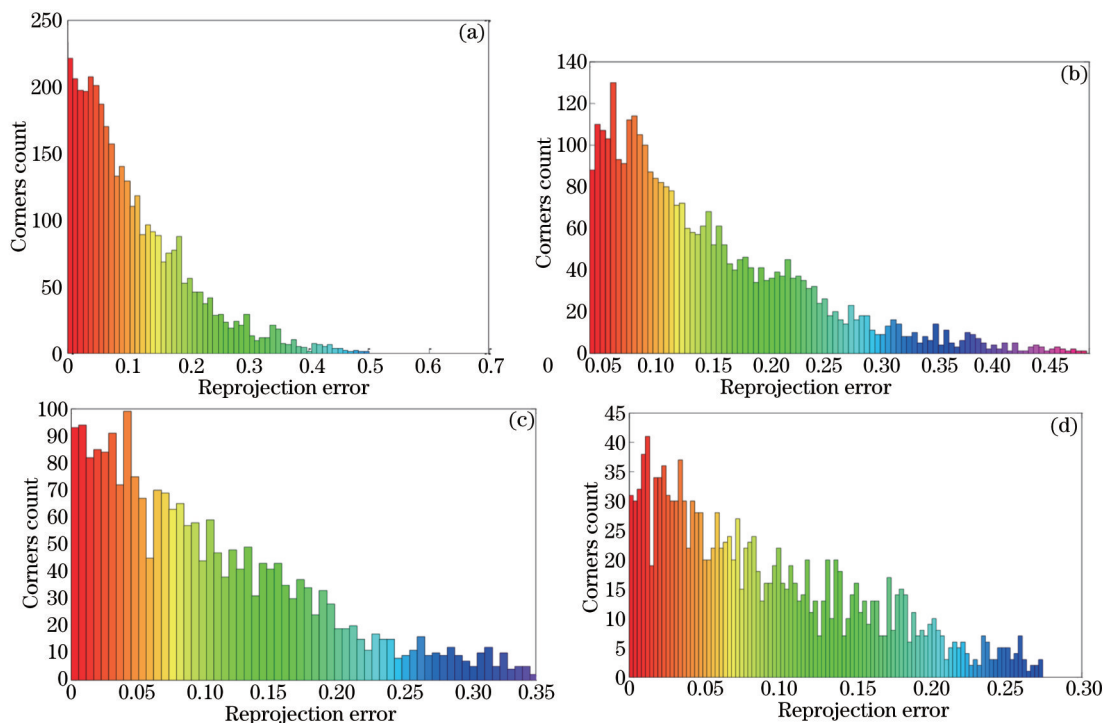


图 2 内参迭代优化中重投影误差变化图。(a)优化前;(b)剔除 $\delta>0.45$ 后的重投影误差;(c)剔除 $\delta>0.35$ 后的重投影误差;(d)优化后
Fig.2 Chart of re-projection error in internal reference iterative optimization process. (a) Before optimization; (b) re-projection error after eliminating $\delta>0.45$; (c) re-projection error after eliminating $\delta>0.35$; (d) after optimization

图 2 描述的是一组标定图像的内部参数在迭代优化过程中重投影误差的变化情况,其中横坐标表示的是重投影误差值,纵坐标表示的是特征点个数。由图 2 可知,每剔除一定的标定图像后角点的重投影误差逐渐减小,当重投影误差达到一定值时,摄像机的内参基本保持稳定状态。图 3(a)描述标定前采集的靶标其在空间中位姿分布图,图 3(b)为优化完成后剩余的靶标图像组其在空间中的姿态分布,由图 3 可知,优化完成后的靶标图像组在待标定空间中均匀分布。

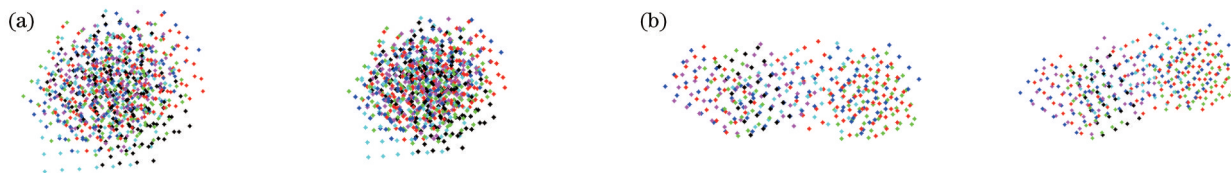


图 3 靶标特征点分布图。(a)初始分布情况;(b)优化后分布情况

Fig.3 Distribution of feature points on the target.(a) Initial distribution; (b) optimized distribution

为了进一步验证本文算法的稳定性,通过 50 次的标定实验,每次标定实验采集 25 组靶标图像,以双目摄像机之间的固有物理属性为约束条件,进行左、右摄像机内参的迭代优化,设定重投影误差值的平均值小于 $\delta=0.3$ 为迭代终止条件。图 4 描述了双目摄像机主点在 x, y 坐标轴的数值分布,横坐标表示标定实验的索引值,纵坐标表示的是主点坐标在图像平面上的像素值。图 5 为双目摄像机焦距在 x, y 坐标轴的数值分布,横坐标表示标定实验的索引值,纵坐标表示摄像机焦距所代表的像素个数。由于本文算法以双目摄像机固有物理属性为位姿约束条件进行优化标定,所以在 50 次的标定实验中得到的摄像机主点坐标值和焦距坐标值分布非常稳定。

任选其中三组进行双目摄像机标定数据的可靠性分析,得到的外参矩阵如表 1 所示。由于左、右摄像机之间的相对位姿只有平移,所以表 1 中的旋转矩阵接近单位矩阵,而平移向量中的第一个值其物理意义是左、右摄像机成像光心之间的距离,该系统的双目摄像机之间的距离为 185 mm,可以看出标定的相对外参矩阵非常接近双目视觉的固定物理属性。

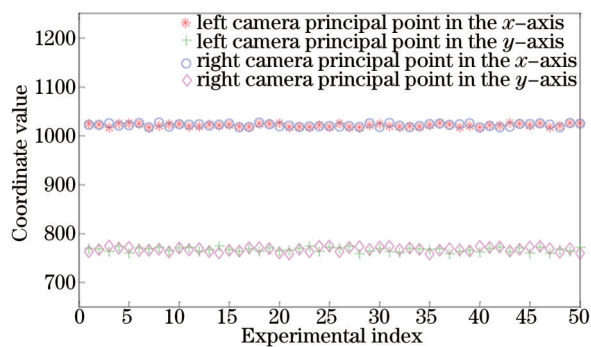


图4 双目摄像机的主点分布

Fig.4 Main points distribution of binocular camera

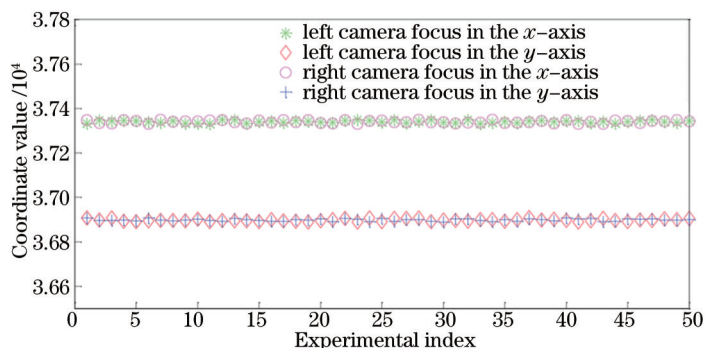


图5 双目摄像机的焦距分布

Fig.5 Focal length distribution of binocular camera

表1 双目摄像机外部参数标定结果

Table 1 Calibration results of extrinsic parameter for binocular camera

NO.	Rotation matrix	Translation vector
1	$R = \begin{bmatrix} 0.999728 & -0.011818 & -0.020093 \\ 0.011117 & 0.999337 & -0.034658 \\ 0.020489 & 0.034425 & 0.999197 \end{bmatrix}$	$T = \begin{bmatrix} -183.744536 \\ 2.151407 \\ 87.786677 \end{bmatrix}$
2	$R = \begin{bmatrix} 0.999423 & -0.013121 & -0.011413 \\ 0.013214 & 0.999337 & -0.023692 \\ 0.011431 & 0.023724 & 0.999085 \end{bmatrix}$	$T = \begin{bmatrix} -184.527311 \\ 2.147814 \\ 86.323473 \end{bmatrix}$
3	$R = \begin{bmatrix} 0.999641 & -0.031628 & -0.040093 \\ 0.031415 & 0.999641 & -0.056452 \\ 0.040321 & 0.056475 & 0.999434 \end{bmatrix}$	$T = \begin{bmatrix} -186.134156 \\ 2.445312 \\ 87.013621 \end{bmatrix}$

三组标定实验求取的左、右摄像机的内部参数如表2所示,由于该系统采用的分辨率为2048 pixel×1536 pixel,所以左、右摄像机标定出来的主点坐标应该接近图像的中心,即(1024,768),通过表2可以看出本文方法标定出来的结果非常接近实际的物理刚性要求,本文方法标定结果有较高的可信度。

表2 双目摄像机内部参数标定结果

Table 2 Calibration results of internal parameter for binocular camera

NO.	Camera	f_x	f_y	c_{lx}	c_{ly}	k_1	k_2
1	left camera	37340.289	36899.637	1023.937	768.512	0.07397	0.00175
	right camera	37343.979	36905.058	1017.012	760.897	0.08297	-0.00293
2	left camera	37339.453	36905.544	1026.223	769.121	0.06062	0.00146
	right camera	37340.184	36895.618	1021.609	759.258	0.07085	-0.00206
3	left camera	37337.613	36894.919	1023.730	767.388	0.07197	0.00157
	right camera	37335.233	36907.783	1021.734	760.739	0.07642	-0.00235

4.2 实验对比分析

为了评估本文方法的有效性和高精度性,在同一视场、相同距离下,分别进行了三组实验进行对比分

析:第一组实验采用基于位姿约束的大视场摄像机标定方法,第二组实验利用传统方法^[6]进行摄像机标定,第三组实验采用文献[13]中多个小靶标进行拼接的方法。为确保三组实验中靶标特征点提取精度的一致性,均采用 cvFindChessboardCorners 函数结合 cvFindCornerSubPix 函数进行特征点的亚像素提取,三组标定实验结果如表 3 所示。通过 4.1 节的标定实验数据分析可知,本文方法标定得到的内、外参数与摄像机的实际物理属性值非常接近,传统方法和文献[13]方法没有考虑双目摄像机的位姿约束,导致外部参数值较偏离双目摄像机的刚性物理值。

表 3 标定实验结果

Table 3 Results of calibration experiments

	Left camera	Right camera
Proposed method	$f_x=37340.017, f_y=36897.061, c_x=1023.891, c_y=768.821, k_1=0.09109, k_2=0.00283$	$f_x=37338.212, f_y=36919.204, c_x=1023.717, c_y=767.196, k_1=0.09169, k_2=-0.00331$
	$R = \begin{bmatrix} 0.998921 & -0.037163 & -0.031461 \\ 0.011916 & 0.999719 & -0.015246 \\ 0.037032 & 0.106712 & 0.999505 \end{bmatrix}, T = \begin{bmatrix} -185.757906 \\ 2.871562 \\ 86.891631 \end{bmatrix}$	
Traditional method	$f_x=37331.062, f_y=36875.902, c_x=1020.069, c_y=764.731, k_1=-0.133097, k_2=0.419537$	$f_x=37328.067, f_y=36874.518, c_x=1021.114, c_y=762.877, k_1=-0.127184, k_2=0.380124$
	$R = \begin{bmatrix} 0.837813 & 0.377015 & 0.351518 \\ -0.451072 & 0.927063 & -0.100012 \\ -0.312101 & 0.130201 & 0.882743 \end{bmatrix}, T = \begin{bmatrix} -174.731938 \\ 14.721823 \\ 103.629460 \end{bmatrix}$	
Ref.[13] method	$f_x=37334.615, f_y=36877.017, c_x=1021.585, c_y=761.281, k_1=-0.173041, k_2=0.380159$	$f_x=37336.537, f_y=36881.162, c_x=1020.927, c_y=763.791, k_1=-0.151023, k_2=0.224074$
	$R = \begin{bmatrix} 0.819823 & -0.320408 & 0.320147 \\ 0.375912 & 0.899714 & -0.127201 \\ -0.308015 & 0.165814 & 0.879013 \end{bmatrix}, T = \begin{bmatrix} -171.211894 \\ 25.390321 \\ 98.856307 \end{bmatrix}$	

为了进一步验证三组标定结果的精度,对双目视觉测量值误差进行比较,利用三组实验的标定结果分别多次测量实际长度为 1800 mm 的标准杆件,得到测量值和测量误差,如表 4 所示。利用表 4 的测量值和真实值得到标准差和均方根误差值,利用测量误差得到最大值误差和均值误差,如表 5 所示。通过表 5 可以看出,本文方法的标定精度明显优越于传统方法和文献[13]的方法,且能够在大视场、远距离中实现高精度标定。

表 4 三组实验的测量结果

Table 4 Measurement results of three group experiments

True value/mm	Proposed method/mm	Error/mm	Traditional method /mm	Error/mm	Ref.[13]/mm method	Error/mm
1800	1800.17	0.17	1801.09	1.09	1801.37	1.37
1800	1799.86	-0.14	1801.14	1.14	1801.26	1.26
1800	1800.19	0.19	1800.87	0.87	1800.78	0.78
1800	1800.23	0.23	1801.35	1.35	1801.32	1.32
1800	1800.18	0.18	1801.63	1.63	1799.29	-0.71
1800	1800.21	0.21	1798.96	-1.04	1798.73	-1.27
1800	1799.85	-0.15	1801.73	1.73	1799.28	-0.72
1800	1800.26	0.26	1798.99	-1.01	1799.12	-0.88
1800	1800.22	0.22	1801.43	1.43	1801.47	1.47
1800	1800.28	0.28	1800.61	0.61	1801.75	1.75
1800	1799.77	-0.23	1799.13	-0.87	1798.73	-1.27
1800	1800.27	0.27	1801.36	1.36	1801.43	1.43
1800	1800.29	0.29	1801.82	1.82	1801.33	1.33
1800	1800.26	0.26	1799.03	-0.97	1800.83	0.83
1800	1800.18	0.18	1801.61	1.61	1800.64	0.64

表 5 重建精度评估

Table 5 Evaluation of reconstruction accuracy

Error	Proposed method	Traditional method	Ref.[13] method
Mean /mm	0.15	0.72	0.49
STD /mm	0.17	1.10	1.11
RMS /mm	0.22	1.28	1.18
Max /mm	0.29	1.82	1.75

5 结 论

提出了一种利用双目摄像机的位姿约束关系的大视场摄像机标定算法,该方法将双目摄像机之间的固有不变的物理属性为约束条件,结合靶标中的特征点重投影误差进行迭代优化摄像机的内、外参数,其避免了传统方法中在求解内外参的过度优化性问题。通过标定实验数据分析验证了本文方法标定结果的可信性、稳定性,以及高精度性,且适合在大视场中进行双目视觉摄像机的标定。

参 考 文 献

- 1 Maybank S J, Faugeras O D. A theory of self-calibration of a moving camera[J]. International Journal of Computer Vision, 1992, 8(2): 123-151.
- 2 Wu L, Cao X, Foroosh H. Camera calibration and geo-location estimation from two shadow trajectories[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2010, 114(8): 915-927.
- 3 Baataoui A, El Akkad N, Saaidi A, *et al.*. Spherical self-calibration of cameras characterized by varying intrinsic parameters[J]. International Journal of Software Engineering and its Applications, 2014, 8(7): 23-40.
- 4 Xu Song, Sun Xiuxia, Liu Xi, *et al.*. Geometry method of camera self-calibration based on a rectangle[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1115002.
徐 嵩, 孙秀霞, 刘 希, 等. 基于矩形的摄像机自标定几何方法[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1115002.
- 5 Huo Ju, Yang Wei, Yang Ming. A self-calibration technique based on the geometry property of the vanish point[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(2): 465-472.
霍 炬, 杨 卫, 杨 明. 基于消失点几何特性的摄像机自标定方法[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 465-472.
- 6 Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 2000, 22(11): 1330-1334.
- 7 Zhang X, Zhu Z, Yuan Y, *et al.*. A universal and flexible theodolite-camera system for making accurate measurements over large volumes [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(11): 1611-1620.
- 8 Liu Y, Su X. Camera calibration with planar crossed fringe patterns[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2012, 123(2): 171-175.
- 9 Marita T, Oniga F, Nedeveschi S, *et al.*. Camera calibration method for far range stereovision sensors used in vehicles[C]. Intelligent Vehicles Symposium, 2006: 356-363.
- 10 Sun Junhua, Liu Zhen, Zhang Guangjun, *et al.*. Camera calibration based on flexible 3D target[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3433-3439.
孙军华, 刘 震, 张广军, 等. 基于柔性立体靶标的摄像机标定[J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3433-3439.
- 11 Huo Ju, Yang Ning, Yang Ming, *et al.*. Calibration of camera with wide field-of-view based on spliced small targets[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(6): 1474-1479.
霍 炬, 杨 宁, 杨 明, 等. 基于小靶标拼接的大视场摄像机标定方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1474-1479.
- 12 Yang Bowen, Zhang Liyan, Ye Nan, *et al.*. Camera calibration technique of wide-area vision measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0915001.
杨博文, 张丽艳, 叶 南, 等. 面向大视场视觉测量的摄像机标定技术[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0915001.
- 13 Liu Zhen, Shang Yanna. Novel calibration method for stereo vision sensor using flexible target[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0315001.
刘 震, 尚砚娜. 立体视觉传感器的一种灵活靶标新标定方法[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0315001.
- 14 Xu Yong, Guo Pengyu, Long Gucan, *et al.*. Research on fully automatic camera calibration method[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6):

0612007.

许 勇, 郭鹏宇, 龙古灿, 等. 摄像机全自动标定方法研究[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0612007.

15 Xie Zexiao, Lu Wenjuan, Wang Xiaomin, *et al.*. Analysis of pose selection on binocular stereo calibration[J], Chinese J 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.

16 Zhang L, Zheng S, Chai X, *et al.*. Optimization of projection matrix between cameras based on Levenberg-Marquardt algorithm[J]. J Inf Comput Sci, 2015, 12(4): 1607-1614.

栏目编辑: 苏 岑