

doi: 10.3788/gzxb20164505.0512004

基于消失点约束的多相机标定方法

张超, 杨华民, 韩成, 杨帆

(长春理工大学 计算机科学技术学院, 长春 130000)

摘要:针对多摄像机一维标定算法精度低、抗噪性和稳定性差等问题,提出了基于消失点之间互相约束的多摄像机标定方法. 为了避免径向畸变对成像造成的影响,利用欧式空间位置约束的几何特性,进行畸变参数的求取. 通过靶标特征点约束结合摄像机的射影不变性排除杂点的干扰,再利用空间消失点之间夹角一致性,以及靶标特征点所构成的直线和消失点的反向射线平行性来求解摄像机的参数. 当一维靶标任意运动时,存在着无法区分靶标特征点对应的成像点临界问题,采取反推理论数学分析法可事先避免该问题的出现. 通过构建多摄像机系统进行标定实验,可以看出该方法具有较高的标定精度,且随着噪声的增加,标定结果具有一定的抗噪性和稳定性;由相对误差值可知,该方法可应用于多摄像机系统.

关键词: 机器视觉; 摄像机标定; 消失点; 一维靶标; 径向畸变; 射影不变性

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)05-0512004-7

Multi-Camera Calibration Based on Vanishing Point Constraint

ZHANG Chao, YANG Hua-min, HAN Cheng, YANG Fan

(School of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130000, China)

Abstract: As for the one-dimensional multi-camera calibration algorithm of low precision, anti-manic and poor stability, a multi-camera calibration algorithm was proposed based on the mutual constraint among vanishing points. In order to avoid the impact of radial distortion caused by the imaging, the geometric characteristics of position constrains in Euclidean space were used to calculate the distortion parameters. By combining the constraints of target feature points with projective invariance of camera to eliminate interference of miscellaneous points, then the consistency of angles in the space vanishing points, line which consisted of target feature points and the parallelism of the reverse-ray of the vanishing points were used to calculate the camera parameters. When one-dimensional targets move randomly, a critical problem is existed which is inability to distinguish the target feature points corresponding to the image points, this problem can be avoided by taking use of the inverse theory of mathematical analysis. By constructing the multi-camera system to calibrate the experiments, we can see that this method has a higher precision calibration, the calibration results have a certain degree of noise immunity and stability with the increasing of noise. The relative error value shows that this method can be applied in multiple camera systems.

Key words: Machine vision; Camera calibration; Vanishing point; One-dimensional targets; Radial distortion; Projective invariant

OCIS Codes: 120.0120; 150.0155; 150.1488; 150.1135

基金项目: 2015 年省级经济结构战略调整引导基金投资计划 (No. 2015N004)、吉林省科技发展计划项目 (Nos. 20130303011GX, 20140204050GX)、长春市科技计划项目 (No. 14KG013)

第一作者: 张超 (1985—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为图像处理、计算机视觉、增强现实等。Email: zhangchao511221@hotmail.com

导师: 杨华民 (1963—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为系统仿真、图像处理、机器视觉等。Email: yhm@cust.edu.cn

通讯作者: 韩成 (1978—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为图像处理、三维重建、机器视觉等。Email: hancheng@cust.edu.cn

收稿日期: 2015-10-14; **录用日期:** 2015-12-25

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

在计算机视觉中,为了还原真实场景的三维信息,需通过使用摄像机标定的方式来获取几何成像模型参数,再结合三角测量和透视投影原理解算出场景的三维坐标信息.摄像机标定技术是二维空间信息过渡到三维空间信息的桥梁,其广泛应用于工业检测、机器人定位导航、视觉监控等领域^[1].

传统摄像机标定是利用二维平面靶标中已知的特征信息,建立成像点和三维空间点之间的数学关系,求解摄像机的各个参数^[2].文献[3-4]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,但鲁棒性以及稳定性较差.而文献[5]为了提高摄像机的标定精度,提出了一种二维靶标特征点提取方法,虽然从一定程度上提高了摄像机的标定精度,但是对多个摄像机进行标定时需分组标定,因此存在累积误差.传统的二维靶标标定方法具有较高的可信度、普适性以及高精度性,而随着增强现实、注册跟踪等技术在多摄像机系统中的发展,当空间存在多方位的多摄像机时,传统的二维靶标会存在空间遮挡问题,因此希望一维靶标标定结果尽量接近二维靶标标定的参数值;而一维靶标相对于二维靶标而言具有构造成本低、适用环境广、操作方式简单等优势,使其在多摄像机系统中得到广泛研究.

摄像机一维靶标标定法最早由 Zhang Z Y^[6]提出,通过固定一个靶标特征点,在不同姿态下采集多组图片,利用共线约束和射影几何关系求解摄像机的内部参数;首次解决了一维靶标对摄像机标定的难题,但是该方法需要固定一个顶点,因此普适性受到一定的影响.虽然文献[7-10]对文献[6]在抗噪能力和精度方面进行了相应的改进,但是都需以固定一个顶点为基础.文献[10]对文献[6]进行了本质上的分析,并提出了一维靶标平面移动标定方法,但是该方法适用范围仅限于平面移动,且标定重投影误差大.而文献[11]于2007年第一次提出了可以通过任意移动一维靶标进行摄像机标定,利用空间分层重建的思想将射影变换、仿射变换、欧式变换进行数学模型的转换;而文献[12-13]则直接将投影空间转换到欧式空间来求解多个摄像机的参数.文献[14-15]提出了利用两个正交的一维靶标进行摄像机的标定,该方法虽然能够快速的标定,但是需要正交这个先验知识要求比较严格,因此不适用于精度较高的多摄像机系统.

目前,一维靶标的标定值较二维靶标的标定结果有一定差距,一维靶标标定参数求解存在冗余,针对此问题本文提出了基于消失点约束的多相机标定方法.由于摄像机镜头不是理想化的平面镜,因此在成像时必然存在着畸变现象,而为了避免畸变对成像造成的

影响,利用欧式空间位置约束的几何特性,进行畸变参数的求取.通过靶标特征点的约束以及结合摄像机的射影不变性排除多摄像机系统中的噪声干扰,并利用空间消失点之间夹角一致性,以及靶标特征点所构成的直线和消失点的反向射线平行性对摄像机的参数进行求解.

1 摄像机成像模型

通常情况下,三维成像模型反映了二维图像坐标与三维世界坐标之间的映射关系,针孔模型被看作是摄像机的理想成像模型,而这种理想模型的映射关系是线性的^[16].根据摄像机的线性成像模型,得到二维图像坐标与三维世界坐标之间的映射关系为

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & c_u \\ 0 & f_v & c_v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [\mathbf{R} \quad \mathbf{T}] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} [\mathbf{R} \quad \mathbf{T}] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, (u, v) 为图像坐标; (X_w, Y_w, Z_w) 为世界坐标; f_u, f_v 分别表示成像平面坐标系 u 轴、 v 轴方向的有效焦距; (c_u, c_v) 为摄像机主点坐标; \mathbf{K} 表示摄像机内参矩阵; \mathbf{R}, \mathbf{T} 分别描述了摄像机坐标系与世界坐标系之间的旋转矩阵与平移向量.

一般来说,摄像机成像模型都存在一定程度的非线性畸变^[17],考虑径向畸变的非线性畸变方程为

$$\begin{cases} \Delta u = u(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ \Delta v = v(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ r^2 = u^2 + v^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中, k_1, k_2, k_3 为径向畸变系数.

由于三维成像模型引入了非线性畸变,因此需要建立参数优化的目标函数,最小重投影误差的目标函数为

$$\text{err}_{\min} \Rightarrow (\mathbf{K}, k_1, k_2, k_3, \mathbf{R}, \mathbf{T}) \quad (3)$$

因为 Levenberg-Marquadt 算法^[18-19]为参数优化过程提供了快速的正则化方法,所以选择收敛性较强的 Levenberg-Marquadt 算法来求解摄像机内、外参数.

2 多像标定原理

2.1 径向畸变参数求解

由于摄像机镜头会引起畸变现象,因此理论上的标定模型必定会产生相应的误差,而传统方法^[11]没考虑畸变问题直接对成像点进行三层重建模型转换,必然导致畸变累积误差的产生,因此必须对成像后的像素点进行理想化校正.

由于摄像机镜头在成像过程中的径向畸变对其干扰较大,而切向畸变相对而言影响较小,因此仅需进行径向畸变参数的求解.目前镜头畸变校正方式只是针

对单点进行简单修正,没有从多点之间的约束关系上进行考虑.因此基于点约束的径向畸变校正方式,充分结合多点的欧式空间中的位置关系,对成像点进行修正,其直接决定了摄像机内、外参标定的精度.如图1所示,因镜头畸变产生的成像点分别为 a_i, b_i, c_i, d_i ,其中 i 表示在第 i 个摄像机,设点 d_i 到成像点 a_i, b_i 构成的直线的距离为 l_{ab} ,点 d_i 到成像点 c_i, b_i 构成的直线的距离为 l_{cb} ,点 d_i 到成像点 a_i, c_i 构成的直线的距离为 l_{ac} .由欧式空间的几何约束性质,得到如式(4)形式的第 i 个摄像机的畸变系数优化方程.

$$\min(\|l_{ac} - l_{ab}\| + \|l_{ac} - l_{cb}\| + \|l_{cb} - l_{ab}\|) \quad (4)$$

式中 k_{ij} 表示第 i 个摄像机中畸变参数中第 j 个参数值,则结合式(2)即可对摄像机的畸变值进行相应的修正.

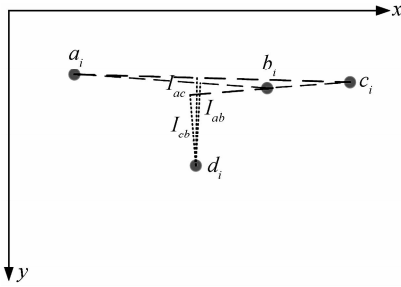


图1 成像畸变校正

Fig.1 Distortion correction of imaging

2.2 靶标位置分析

由于在多摄像机系统中,一维靶标由共线靶标特征点 A, B, C 和非共线靶标特征点 D 构成,其中靶标特征点 D 到共线特征点的垂点处于特征点 A, B 之间.在标定的过程中,需任意移动一维靶标,因此在某一临界位置会无法区分靶标特征点对应的成像点,则影响标定精度.如图2所示,当靶标在该位置时,由摄像机的针孔成像模型可得

$$\begin{cases} y_a = \frac{f(Y_B - d_{BC} \sin \omega)}{Z_B - d_{BC} \cos \omega} \\ y_b = \frac{fY_B}{Z_B} \\ y_c = \frac{f(Y_B - d_{AB} \sin \omega)}{Z_B + d_{AB} \cos \omega} \end{cases} \quad (5)$$

式中, y_a, y_b, y_c 分别为靶标特征点 A, B, C 在摄像机成像坐标系下的坐标值,而 Y_B, Z_B 则为靶标特征点 B 在世界坐标系下的坐标值分量, f 为摄像机的物理焦距, d_{AB}, d_{BC} 为靶标特征点中的空间距离, ω 为靶标与 Z_w 坐标轴的夹角,当无法区分靶标特征点和成像点时,必然有 $|y_a - y_b| - |y_b - y_c| = 0$,则可得到

$$Y_B = \frac{Z_B^3 \sin \omega (d_{AB} - d_{BC}) - Z_B \sin 2\omega d_{AB} d_{BC}}{2 \cos^2 \omega d_{AB} d_{BC} + Z_B \cos \omega (d_{AB} - d_{BC})} \quad (6)$$

为了估计出该特殊位置,可令 $Y_B = 0$,则有 $\cos \omega =$

$Z_B \frac{d_{AB} - d_{BC}}{2d_{AB}d_{BC}}$,也就是设置 Z_B 和靶标特征点之间的位置,使 $\cos \omega$ 无解时,可避免这一问题的出现.

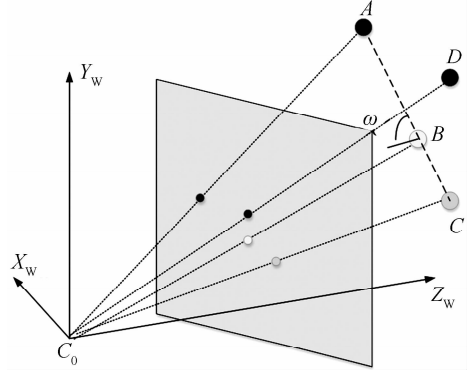


图2 一维靶标位姿

Fig.2 Pose of One-Dimensional target

2.3 摄像机参数求解

在多摄像机系统中,靶标中的四点 A, B, C, D 在空间中的位置关系,以及经过畸变校正后成像点的相对关系.当靶标在第 j 次移动时,靶标中的点 A_j, B_j, C_j, D_j 在摄像机中对应的畸变校正后的成像点为 a_j, b_j, c_j, d_j ,由摄像机的线性成像模型可得如式(7)的形式,其中 H_i 为第 i 个摄像机的单应性矩阵,对应的摄像机内参矩阵为 K_i 和外参矩阵 R_i, T_i .

$$\begin{cases} a_j = H_i A_j, b_j = H_i B_j, c_j = H_i C_j, d_j = H_i D_j \\ H_i = K_i [R_i \quad T_i] \end{cases} \quad (7)$$

由于摄像机具有射影变换保持交比不变性,可以通过点约束的方式去除噪声点的干扰,也就是利用成像点 d_j 到 a_j, b_j, c_j 成像构成的直线 L_{ajbjcj} 的距离交点具有交比不变性排除噪声点的干扰.设在空间中的任意共线三点 P_1, P_2, P_3 构成的直线对应的消失点为 V_p ,相应的在摄像机中的成像点 p_1, p_2, p_3, v_p ,则利用交比不变性有式(8)的形式^[20],其中 λ_1, λ_2 为正交比转换值.

$$\begin{cases} \text{Cross}(P_1, P_2, P_3) = \text{Cross}(P_1, P_2, P_3, V_p) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \\ \text{Cross}(p_1, p_2, p_3, v_p) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \end{cases} \quad (8)$$

在第 i 个摄像机,对应的靶标在第 j 次移动时,靶标特征点 A_j, B_j, C_j 构成的直线 L_{AjBjCj} 的消失点 V_{j1} ,其在摄像机成像平面中的消失点为 v_{j1} ,其中消失点 v_{j1} 的计算可通过式(8)计算得到.为了充分利用摄像机成像中的射影不变性,通过点约束构造多个消失点,也就是利用空间点到直线距离恒定这个特性,可以计算直线 L_{AjDj} 的消失点 V_{j2}, L_{BjDj} 的消失点 V_{j3}, L_{CjDj} 的消失点 V_{j4} .在摄像机中,任意两条直线的夹角与对应的成像中的两个消失点的夹角一致,因此可以得到

$$\begin{cases} \frac{(C_j - A_j)(D_j - A_j)}{\|A_j C_j\| \|A_j D_j\|} = \frac{\mathcal{V}_{j1}^T \bar{\omega}_i \mathcal{V}_{j2}}{\sqrt{(\mathcal{V}_{j1}^T \bar{\omega}_i \mathcal{V}_{j1})(\mathcal{V}_{j2}^T \bar{\omega}_i \mathcal{V}_{j2})}} \\ \frac{(C_j - A_j)(D_j - B_j)}{\|A_j C_j\| \|B_j D_j\|} = \frac{\mathcal{V}_{j1}^T \bar{\omega}_i \mathcal{V}_{j3}}{\sqrt{(\mathcal{V}_{j1}^T \bar{\omega}_i \mathcal{V}_{j1})(\mathcal{V}_{j3}^T \bar{\omega}_i \mathcal{V}_{j3})}} \\ \frac{(C_j - A_j)(D_j - C_j)}{\|A_j C_j\| \|C_j D_j\|} = \frac{\mathcal{V}_{j1}^T \bar{\omega}_i \mathcal{V}_{j4}}{\sqrt{(\mathcal{V}_{j1}^T \bar{\omega}_i \mathcal{V}_{j1})(\mathcal{V}_{j4}^T \bar{\omega}_i \mathcal{V}_{j4})}} \end{cases} \quad (9)$$

式中 $\bar{\omega}_i = K_i^{-T} K_i^{-1}$ 。由消失点不随着靶标移动而发生变化,因此其消失点的夹角也一直保持恒定^[21],因此在第 l 次的消失点的夹角和第 k 次的消失点的夹角关系为

$$\begin{cases} \frac{\mathcal{V}_{l1}^T \bar{\omega}_i \mathcal{V}_{l2}}{\sqrt{(\mathcal{V}_{l1}^T \bar{\omega}_i \mathcal{V}_{l1})(\mathcal{V}_{l2}^T \bar{\omega}_i \mathcal{V}_{l2})}} = \frac{\mathcal{V}_{k1}^T \bar{\omega}_i \mathcal{V}_{k2}}{\sqrt{(\mathcal{V}_{k1}^T \bar{\omega}_i \mathcal{V}_{k1})(\mathcal{V}_{k2}^T \bar{\omega}_i \mathcal{V}_{k2})}} \\ \frac{\mathcal{V}_{l1}^T \bar{\omega}_i \mathcal{V}_{l3}}{\sqrt{(\mathcal{V}_{l1}^T \bar{\omega}_i \mathcal{V}_{l1})(\mathcal{V}_{l3}^T \bar{\omega}_i \mathcal{V}_{l3})}} = \frac{\mathcal{V}_{k1}^T \bar{\omega}_i \mathcal{V}_{k3}}{\sqrt{(\mathcal{V}_{k1}^T \bar{\omega}_i \mathcal{V}_{k1})(\mathcal{V}_{k3}^T \bar{\omega}_i \mathcal{V}_{k3})}} \\ \frac{\mathcal{V}_{l1}^T \bar{\omega}_i \mathcal{V}_{l4}}{\sqrt{(\mathcal{V}_{l1}^T \bar{\omega}_i \mathcal{V}_{l1})(\mathcal{V}_{l4}^T \bar{\omega}_i \mathcal{V}_{l4})}} = \frac{\mathcal{V}_{k1}^T \bar{\omega}_i \mathcal{V}_{k4}}{\sqrt{(\mathcal{V}_{k1}^T \bar{\omega}_i \mathcal{V}_{k1})(\mathcal{V}_{k4}^T \bar{\omega}_i \mathcal{V}_{k4})}} \end{cases} \quad (10)$$

由于靶标中的特征点所构成的直线和消失点的反向射线平行^[22],可得

$$\begin{cases} (C_j - A_j) \otimes (K^{-1} \mathcal{V}_{j1}) = 0, (D_j - A_j) \otimes (K^{-1} \mathcal{V}_{j2}) = 0 \\ (B_j - D_j) \otimes (K^{-1} \mathcal{V}_{j3}) = 0, (C_j - D_j) \otimes (K^{-1} \mathcal{V}_{j4}) = 0 \\ \|C_j - A_j\| = L_{AC}, \|D_j - A_j\| = L_{AD} \\ \|B_j - D_j\| = L_{BD}, \|C_j - D_j\| = L_{CD} \end{cases} \quad (11)$$

将式(7)变换为 $A_j = H_i^{-1} a_j, B_j = H_i^{-1} b_j, C_j = H_i^{-1} c_j, D_j = H_i^{-1} d_j$,代入式(9)~(11)即可解算出摄像机参数。

在多摄像机系统中,上述解算出的摄像机参数只

是线性的求解,通常系统会受到加性噪声的影响,因此需进行摄像机参数的整体非线性优化,通常采用捆绑调整进行非线性优化,将所有摄像机和所有标定时的空间点以及成像点作为变量,使式(12)的重投影误差值达到最小。

$$\text{err}_{\min} \Rightarrow \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^k (\|a_{ij} - H_i A_j\|^2 + \|b_{ij} - H_i B_j\|^2 + \|c_{ij} - H_i C_j\|^2 + \|d_{ij} - H_i D_j\|^2) \quad (12)$$

3 实验数据分析

为了充分验证本方法的性能,分别通过仿真模拟实验进行数据分析,通过在模拟实验中加入高斯噪声来验证本方法的抗噪性;由于在标定环境中,感光杂点影响着标定精度,因此进行杂点干扰分析对比实验;再进一步通过构建多摄像机系统,进行实际标定实验进行数据的分析对比,验证本方法在多摄像机系统中的有效性。

3.1 仿真模拟实验

仿真实验中,通过模拟的4个摄像机构成一个多摄像机系统,而这4个摄像机的内部参数均为:焦距 f 为 3 500 pixel;图像的分辨率为 1 024 pixel \times 768 pixel,摄像机的主点坐标为 (512, 384),摄像机的畸变系数为 $k_i = 3 \times 10^{-7}, (i=1, 2, 3)$ 。

为了验证本文中基于点约束的径向畸变校正方法,在模型系统中,首先模拟生成无畸变的靶标特征点的成像点,再利用畸变系数对成像点进行模拟摄像机

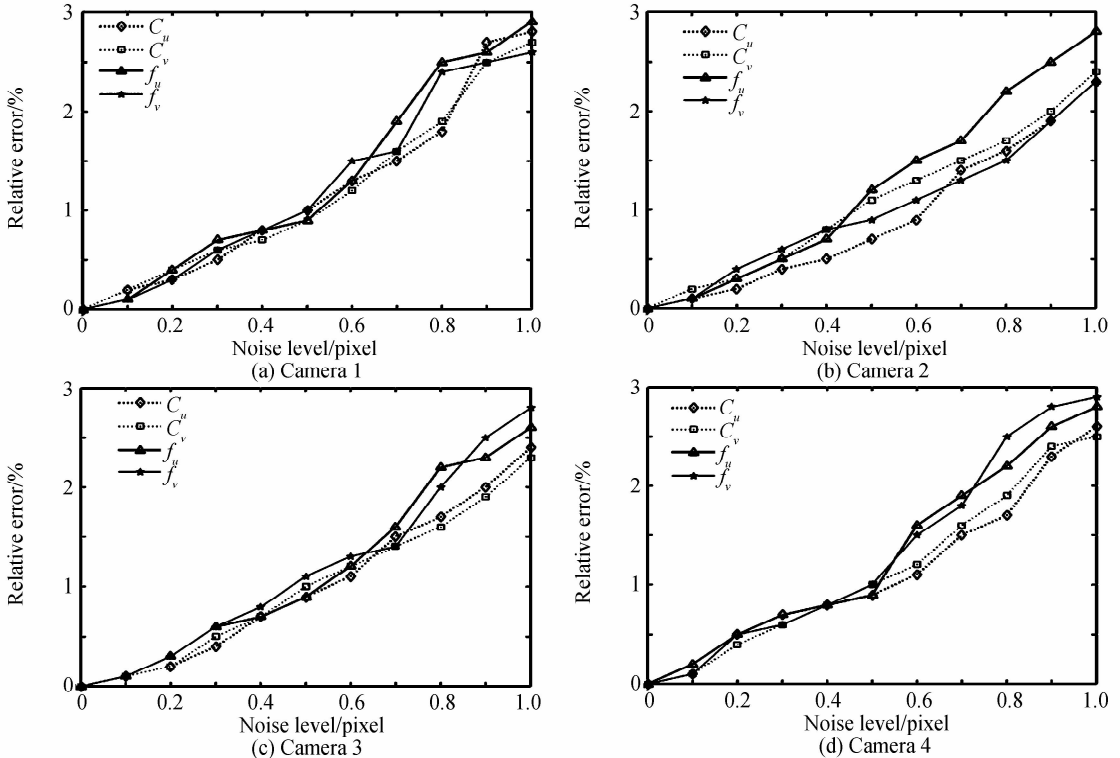


图3 摄像机标定参数的相对误差
Fig. 3 Relative errors of calibration parameters of the camera

的成像畸变过程;最后利用本方法的对畸变后的成像点进行畸变系数的求解, $\Delta k_i = 0.0023 \times 10^{-7}$ ($i=1,2,3$) 为解算出的畸变系数误差. 通过解算得到的畸变系数对成像图片进行畸变校正后,再进一步对模拟的4个摄像机的参数进行仿真验证,为了验证本方法具有较强的抗高斯噪声的干扰,在模拟系统中加入方差为 $0 \sim 1$ pixel,均值为0的高斯噪声,其中高斯噪声的步长为 0.1 pixel. 则得到4个模拟相机的各个参数相对误差(Relative error),如图3,其中 c_u, c_v 表示的是摄像机的主点坐标, f_u, f_v 表示的是摄像机的有效焦距值,实验采用类似文献[11]的方式,对模拟相机计算出的内参数值与给出的真实值的相对误差来度量抗噪性. 通过图3可以看出随着噪声等级从0变化到1时,误差曲线是呈线性变化,而且相对误差值基本在3%以下,因此可以看出本文的方法具有较强的抗噪性.

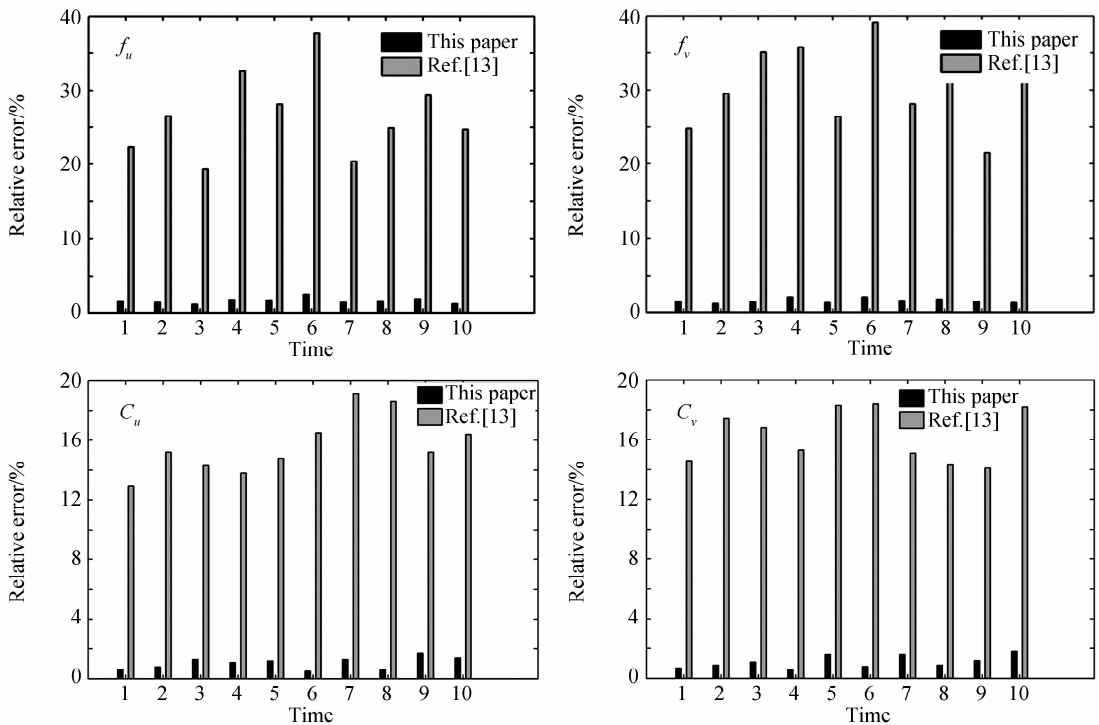


图4 相对误差比较

Fig. 4 Comparison of relative error

3.2 实际对比分析实验

在多摄像机系统中,三维数据的计算极大程度地依赖于多个摄像机参数的准确性,只有获得正确、可靠的参数值,才能够从根本上保证计算数据的有效性. 为

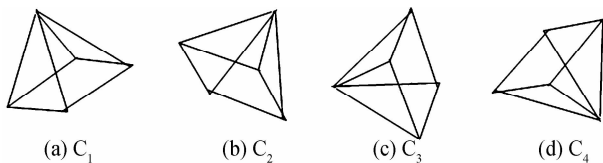


图5 摄像机位姿关系

Fig. 5 Camera pose relationship

文献[13]采用基础矩阵求解单应性矩阵后,再将单应性矩阵在投影空间和欧式空间之间进行转换,得到摄像机的参数关系式进行标定求解. 由于本标定系统采用的靶标特征点为感光材质,其在相机中的成像为高光圆形,因此当标定环境中存在着感光杂点,且在相机成像中类似高光圆形,则文献[13]的方法就无法排除感光杂点对标定系统的影响,也就是当一个感光杂点和其中靶标中的一个特征点位置非常接近时,误差值进行累积计算,导致标定精度降低. 通过10次仿真实验,且在每次实验中加入相同的感光杂点,得到相对误差平均值如图4,图4中的横坐标表示仿真次数,纵坐标则为多相机系统标定仿真的内参数值与给出的真实值的相对误差平均值. 通过图4可以看出本文方法不会受到感光杂点的干扰,因此可以看出基于点约束的一维靶标标定方法具有较强的抗干扰性.

了验证本方法在多摄像机系统环境下的实用性,采用由OptiTrack公司生产的Flex3型号摄像机,构建一个多摄像机系统,其由4个摄像机构造组成,空间位姿关系如图5所示,其中:Flex3摄像机的CCD分辨率为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$,摄像机的理想焦距为 750 pixel .

为了验证本方法的有效性,采用文献[23]的经典二维平面靶标对多摄像机系统进行标定,由于二维靶标存在遮挡问题,因此利用分步多次进行逐个相机的标定;再采用文献[11]经典的一维靶标标定方法和本文方法对多摄像机系统进行标定,三种方法得到的标定结果如表1.

表 1 三种方法标定结果

Table 1 Calibration results of three methods

No.	Method	f_u	f_v	c_u	c_v
Camera1	Our method	758.645	759.645	310.685	223.473
	Wang's 1D	775.285	779.117	302.317	204.381
	Zhang's 2D	753.367	752.452	314.984	227.023
Camera2	Our method	745.159	744.527	307.473	229.547
	Wang's 1D	741.047	738.687	304.371	217.147
	Zhang's 2D	748.385	749.934	312.021	233.346
Camera3	Our method	731.011	730.287	301.274	212.987
	Wang's 1D	726.042	725.169	302.571	206.404
	Zhang's 2D	734.038	738.368	307.487	213.064
Camera4	Our method	748.571	747.368	311.258	215.674
	Wang's 1D	740.368	738.217	308.354	210.657
	Zhang's 2D	751.632	753.548	313.396	216.046

由于二维靶标标定结果具有较高的可靠性,因此将二维靶标的标定结果作为理想参数值,对本方法和文献[11]进行比较,可以看出基于消失点约束的一维靶标标定方法非常接近二维靶标的标定方法.表 2 描述的为本文方法的标定结果和文献[11]的标定结果与二维靶标的标定结果的相对误差值,可以看出本文方法的相对误差值较文献[11]低,因此本文方法在多摄像机系统具有较强的实用性.

表 2 相对误差

Table 2 Relative error

No.	Method	f_u	f_v	c_u	c_v
Camera1	Our method	0.70%	0.96%	1.36%	1.56%
	Wang's 1D	2.91%	3.54%	4.02%	9.97%
Camera2	Our method	0.43%	0.72%	1.46%	1.63%
	Wang's 1D	0.98%	1.50%	2.45%	6.94%
Camera3	Our method	0.41%	1.09%	2.02%	0.04%
	Wang's 1D	1.09%	1.79%	1.60%	3.13%
Camera4	Our method	0.41%	0.82%	0.68%	0.17%
	Wang's 1D	1.50%	2.03%	1.61%	2.49%

为了进一步验证本方法的精确性和实用性,用三种方法分别对棋盘格的角点坐标和重投影角点坐标进行实际测量比较,提取部分实验数据如表 3.

表 3 三组实验的测量结果

Table 3 Measurement results of three group experiments

Corner coordinates/mm	Proposed method/mm	Zhang's 2D method/mm	Wang's 1D method/mm
(465.86,188.56)	(466.57,188.44)	(466.36,188.43)	(467.06,188.72)
(338.34,236.01)	(339.11,236.53)	(338.95,236.41)	(339.64,236.33)
(292.20,150.72)	(293.23,152.42)	(292.74,151.85)	(293.52,154.54)
(296.27,280.81)	(296.94,281.14)	(296.88,281.13)	(297.37,281.24)
(249.96,195.54)	(250.67,195.85)	(250.38,195.74)	(251.36,195.66)
(205.25,153.88)	(205.83,154.03)	(205.59,154.19)	(206.16,154.12)
(212.69,370.17)	(213.14,370.33)	(213.06,370.35)	(213.58,370.31)
(164.46,242.27)	(165.17,242.37)	(164.93,242.36)	(165.26,242.57)
(119.02,157.42)	(119.52,157.50)	(119.71,157.49)	(119.82,157.67)
(126.92,372.98)	(127.14,373.33)	(127.02,373.01)	(127.78,372.42)

统计三种方法角点坐标和重投影角度坐标的平均误差值,其中本方法的平均误差值大致在 0.622 mm 到 0.973 mm 之间,二维靶标标定方法的平均误差值大致在 0.314 mm 到 0.553 mm 之间,文献[11]的平均误差值大致在 1.357 mm 到 1.682 mm 之间,可以看出本方法的准确性和实用性.

4 结论

本文对多摄像机系统的一维标定进行了研究,提出了一种基于消失点约束的一维靶标摄像机标定方法.由于镜头的径向畸变直接影响着成像点之间的约束关系,因此该方法首先采用多点的欧式空间的位置约束关系对镜头的径向畸变进行校正;再利用一维靶标中的消失点之间的夹角恒定性,结合消失点的反向射线平行性对摄像机的各个参数进行求解.在仿真模拟实验,可以看出该方法具有较强的抗噪性,以及较强的抗干扰特性,再通过构建多摄像机系统,进行多组对比实验,充分验证该方法的高精度性.

参考文献

- [1] HUO Ju, YANG Ning, YANG Ming. Attitude measurement of spatial moving object based on vectors of light beams[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **7**(44):0712001. 霍炬, 杨宁, 杨明. 基于光束向量的空间运动目标姿态测量[J]. *光子学报*, 2015, **7**(44):0712001.
- [2] BAATAOUI A, 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.
- [3] XU Song, SUN Xiu-xia, 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.
- [4] CAI Ming, SUN Xiu-xia, LIU Shu-guang, *et al.* An accurate and real-time focal-length self-calibration method based on infinite homography between vanish points [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(5): 0515003. 蔡鸣, 孙秀霞, 刘树光, 等. 基于消隐点无穷单应的摄像机焦距精确自标定方法[J]. *光学学报*, 2014, **34**(5): 0515003.
- [5] LI Lu-lu, ZHAO Wen-chuan, WU Fan, *et al.* Analysis and improvement of characteristic points extraction algorithms in camera calibration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(5): 0515002. 李璐璐, 赵文川, 伍凡, 等. 摄像机标定中的特征点提取算法研究与改进[J]. *光学学报*, 2014, **34**(5): 0515002.
- [6] ZHANG Z Y. Camera calibration with one-dimensional objects [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, **26**(7): 892-899.
- [7] FRANCA J, STEMMER M R, FRANCA M B M, *et al.* Revisiting Zhang's 1D calibration algorithm [J]. *Pattern Recognition*, 2010, **43**(3): 1180-1187.
- [8] WANG L, DUAN F, LU K. An adaptively weighted algorithm for camera calibration with 1D objects [J]. *Neurocomputing*, 2015, **149**: 1552-1559.
- [9] WANG Liang, DUAN Fu-qing, LV Ke. Camera calibration with one-dimensional objects based on the heteroscedastic

- error-in-variables model [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(4): 643-652.
- 王亮,段福庆,吕科. 基于 HEIV 模型的摄像机一维标定[J]. 自动化学报, 2014, **40**(4):643-652.
- [10] WU F C, HU Z Y, ZHU H J. Camera calibration with moving one-dimensional objects [J]. *Pattern Recognition*, 2005, **38**(5): 755-765.
- [11] WANG Liang, WU Fu-chao. Multi-camera calibration based on 1D calibration object[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(3): 225-231.
- 王亮,吴福超. 基于一维标定物的多摄像机标定[J]. 自动化学报, 2007, **33**(3): 225-231.
- [12] FU Zhong-liang, ZHOU Fan, XIE Yan-fang, *et al.* One-dimensional multi-camera calibration based on fundamental matrix[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(6):0615003.
- 付仲良,周凡,谢艳芳,等. 基于像对基础矩阵的多像一维标定方法[J]. 光学学报, 2013, **33**(6):0615003.
- [13] FRANÇA J A D, STEMMER M R, FRANÇA M B M, *et al.* A new robust algorithmic for multi-camera calibration with a 1D object under general motions without prior knowledge of any camera intrinsic parameter [J]. *Pattern Recognition*, 2012, **45**(10): 3636-3647.
- [14] MIYAGAWA I, ARAI H, KOIKE H. Simple camera calibration from a single image using five points on two orthogonal 1-D objects[J]. *Image Processing*, 2010, **19**(6): 1528-1538.
- [15] XUE Jun-peng, SU Xian-yu. Camera calibration with single image based on two orthogonal one-dimensional objects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0115001.
- 薛俊鹏,苏显渝. 基于两个正交一维物体的单幅图像相机标定[J]. 光学学报, 2012, **32**(1):0115001.
- [16] RAHMAN T, KROUGLICOF N. An efficient camera calibration technique offering robustness and accuracy over a wide range of lens distortion [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, **21**(2): 626-637.
- [17] WAND Gui-ping, WAND Hui-feng, LIU Pan-zhi, *et al.* A distortion field-calibrating method based on feature parallel lines of image. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(1):0111001.
- 汪贵平,王会峰,刘盼芝,等. 特征平行直线的成像畸变现场校正[J]. 光子学报, 2014, **43**(1):0111001.
- [18] SHAWASH J, SELVIAH D R. Real-time nonlinear parameter estimation using the levenberg-marquardt algorithm on field programmable gate arrays [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, **60**(1): 170-176.
- [19] PLASENCIA M, PEDERSEN A, ARNALDSSON A, *et al.* Geother-mal model calibration using a global minimization algorithm based on finding saddle points and minima of the objective function[J]. *Computers & Geosciences*, 2014, **65**(7): 110-117.
- [20] LI Jin-ming, LIN Yi. Method for camera calibration based on cross-ratio invariability [J]. *Computer Engineering and Design*, 2011, **32**(3):1126-1129.
- 李进明,林意. 基于交比不变性的摄像机标定方法[J]. 计算机工程与设计, 2011, **32**(3):1126-1129.
- [21] DENG Xiao-ming, WU Fu-chao, DUAN Fu-qing, *et al.* Catadioptric camera calibration with one-dimensional objects [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2007, **30**(5):737-747.
- 邓小明,吴福朝,段福庆,等. 基于一维标定物的反射折射摄像机标定方法[J]. 计算机学报, 2007, **30**(5): 737-747.
- [22] HONG Lei, TIAN Qi-liang, JI Bao-jian. A calibration method for line structured-light parameters based on homography matrix [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **10**(23):1-5.
- 洪磊,田啟良,嵇保健. 基于单应性矩阵的线结构光参数标定法[J]. 光子学报, 2015, **10**(23):1-5.
- [23] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11):1330-1334.