

文章编号 1004-924X(2016)02-0300-09

双目立体视觉测量系统的标定

杨景豪, 刘巍*, 刘阳, 王福吉, 贾振元
(大连理工大学 教育部精密特种加工实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:考虑传统的自标定方法虽然无需场景信息即可实现摄像机标定,但是标定精度较低,故本文提出了一种新的大视场双目视觉测量系统自标定方法。该方法无需高精度标定板或者标定物,仅需利用空间中常见的平行线和垂直线建立摄像机参数与特征线间的约束方程,即可实现摄像机的内参数与旋转矩阵标定;同时利用空间中距离已知的 3 个空间点即可线性标定两摄像机间的平移向量。通过标定实验对本文提出的方法进行了验证。结果表明:该方法标定精度能够达到 0.51%,可以较高精度地标定双目测量系统。由于避免了大视场测量系统标定中大型标定物制造困难,以及摄像机自标定过程中算法冗杂,标定精度不高等问题,该方法操作简便,精度较好,适用于大视场双目测量系统的在线标定。

关键词:视觉测量;大视场;立体视觉;双目视觉测量系统;摄像机标定

中图分类号:TP391;TB92 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162402.0300

Calibration of binocular vision measurement system

YANG Jing-hao, LIU Wei*, LIU Yang, WANG Fu-ji, JIA Zhen-yuan

(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

* Corresponding author, E-mail: lw2007@dlut.edu.cn

Abstract: When traditional self-calibration methods are used to calibrate the cameras without scene information, it usually shows lower calibration accuracy. In order to solve this problem, an improved self-calibration method for a binocular vision measurement system was proposed. Without high-accuracy calibration pattern, the proposed method could calibrate intrinsic parameters and rotation matrices only by using parallel and perpendicular lines to establishing the constraint equation between the camera parameter and the characteristic line. Meanwhile, the translation vector was calibrated by feature points with the known distances between them. The calibration experiment was conducted to verify the proposed method. It shows that the proposed method calibrates the binocular vision measurement system in high accuracy, the accuracy reaches to 0.51%. As the proposed method avoids the difficulties from the high-accuracy calibration pattern needed in the calibration of measuring system, and the complex algorithm and low calibration accuracy in camera self-calibration, it has advantages of easy operating and high accuracy.

收稿日期:2015-10-12;修订日期:2015-12-07.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 51375075);国家自然科学基金仪器专项基金资助项目(No. 51227004);国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2014CB46504);国家创新群体科学基金资助项目(No. 51321004);辽宁省自然科学基金资助项目(No. 20140128010)

Key words: vision measurement; large field of view; stereo vision; binocular vision measurement system; camera calibration

1 引言

视觉测量系统是工业测量中的重要手段^[1]。双目立体视觉测量是一种基于视差原理的三维非接触测量技术。由两台摄像机在不同的角度下同时获取待测目标的图像,然后利用特征点的图像坐标根据测量模型重建其三维坐标,最后通过拟合这些特征点获取待测目标的三维几何信息。双目立体视觉测量技术由于具有非接触、实时性强、精度高、信息量丰富等优点,而被广泛应用于工件、车身等的几何量测量中^[2-4]。

精度是双目立体视觉测量系统中需要解决的一个关键问题。而双目立体视觉测量系统的标定精度是影响测量系统精度的重要因素。双目立体视觉标定的根本任务就是确定二维投影图像坐标与三维世界坐标之间的关系^[5],包括摄像机内部的光学几何参数(内参数)以及描述摄像机间空间位置关系的参数(结构参数)^[6]。

作为视觉测量领域的研究热点,国内外众多学者提出了许多关于摄像机标定的方法^[7-13]。这些方法主要有基于精确靶标的标定,摄像机自标定以及基于精确运动的标定。其中,基于精确靶标的标定方法是通过建立标定参照物上一些已知点的二维图像坐标与三维坐标之间的对应关系,同时采用相应的计算方法和数学变换来标定双目立体视觉系统^[14]。例如 Tsai 在 1986 年提出的经典的两步标定法^[15-16],该方法首先利用径向一致约束来求解除摄像机光轴方向的平移外的摄像机外参数,然后再求解摄像机的其他参数。Abdal-Aziz 在 20 世纪 70 年代初提出了一种直接线性变换的摄像机标定方法^[17],该方法建立了摄像机成像几何的线性模型,从而可以线性地标定摄像机参数。微软视觉研究院的张正友提出了一种基于棋盘格模板的标定方法^[18],该方法因标定精度较高,而得到了广泛的应用。然而如果该方法的平面靶标在整个视场中所占比例过小,标定精度则会大幅下降。虽然传统的标定方法和标定算法已经成熟,且标定精度较高,但是它们的环境适应性较差。而且在标定大视场时,标定板的制作

困难且标定过程复杂,其精度难以保证。

基于精确运动的标定方法通过控制摄像机精确运动获取多幅图像,根据运动间的约束关系来标定摄像机参数^[19-21]。这种方法易于实现自动化,标定精度较高。但标定精度会受到执行机械平台精度的影响且标定流程复杂,标定过程较慢。因此,基于精确靶标和基于精确运动的摄像机标定方法均不适用于在线测量系统的摄像机标定。

摄像机自标定方法则利用摄像机参数自身存在的约束来标定双目测量系统,它实现了摄像机在运动任意以及场景未知的情形下进行标定^[22-23]。1992 年 Faugeras 首次提出了摄像机自标定的概念^[24],1997 年 Hartley 提出了 QR 分解法^[25]。霍炬等也提出了一种利用正交方向消隐点进行摄像机自标定的方法^[26]。摄像机自标定方法的标定过程简便,直接利用场景中的信息及摄像机内参数自身所存在的约束即可实现标定,无需复杂昂贵的摄像机标记点,标定响应快,适用于实时在线测量系统。因此,摄像机自标定技术具有很大的理论和实用价值。然而目前的摄像机自标定方法精度较低、鲁棒性较差,同时只能标定摄像机内参数,故此只能适用于精度要求不高的场合。

本文提出了一种大视场双目视觉测量系统标定方法。首先提出了一种基于消隐点的摄像机内参数标定方法。在此基础上,利用双目消隐点间性质,提出了一种双目系统旋转变换的标定方法,同时通过空间中特征点间距离约束标定出测量系统的平移向量参数。最后利用构建的实验系统进行了标定实验,以验证本文提出方法的精度。

2 摄像机模型

2.1 摄像机模型与双目立体视觉测量系统

摄像机通过成像透镜将三维场景投影到摄像机二维像平面上,这个投影可用成像变换来描述,即摄像机成像模型。

针孔成像模型是最常用的一种摄像机模型,空间任何一点 P 在图像中的成像位置可以用针孔成像模型近似表示,即任一点 P 在图像中的投

影位置 p 为光心与 P 点的连线 OP 与图像平面的交点,这种模型也称为线性摄像机模型,如图 1 所示。

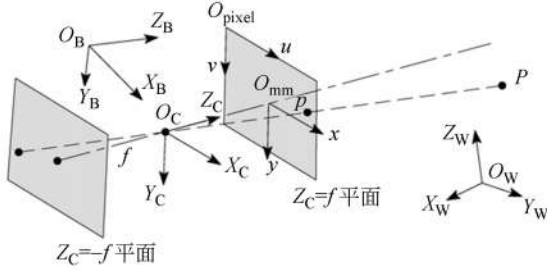


图 1 中心透视投影模型

Fig. 1 Perspective projection model

定义如下坐标系:以摄像机图像左上角为原点,横纵坐标分别为 x, y 方向的坐标系称为图像坐标系;以光轴与像平面交点为原点, x, y 轴分别为像平面水平轴和垂直轴的坐标系为像平面坐标系;以光心为原点,光轴为 Z 轴, x, y 轴分别平行于像平面的水平和垂直的轴为摄像机坐标;三维空间参考系为世界坐标系。由此可以推导出针孔摄像机下,空间点在世界坐标系下的坐标与其投影点在图像坐标系下的坐标间的映射关系为^[27]:

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_k \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: f_x, f_y 分别为摄像机的归一化焦距,也称为尺度因子; u_0, v_0 为摄像机主点,即光轴与像平面交点,这 4 个独立变量组成了摄像机内参数矩阵; \mathbf{R} 与 \mathbf{T} 构成了一个 3×4 的矩阵,称为摄像机外参数矩阵。其中 \mathbf{R} 为旋转正交阵, \mathbf{T} 为 3×1 的平移向量, \mathbf{R} 和 \mathbf{t} 共同表示了摄像机坐标系与世界坐标系之间的位置关系。式(1)构成了空间点的世界坐标与对应像点的图像坐标之间的映射关系。摄像机标定的主要任务就是求解摄像机的内外参数矩阵 $\mathbf{K}, \mathbf{R}, \mathbf{t}$ 。

双目立体视觉测量系统是利用两台摄像机模仿人眼的功能,利用空间点在两摄像机像面上的像点坐标来确定空间点的三维坐标,测量原理如图 2 所示。图中两条射线的交点即为空间点的三维坐标,空间三维坐标为:

$$\begin{cases} Z_{CL} \mathbf{p}_L = \mathbf{M}_L \mathbf{P}_w \\ Z_{CR} \mathbf{p}_R = \mathbf{M}_R \mathbf{P}_w \end{cases}, \quad (2)$$

其中: $\mathbf{p}_L, \mathbf{p}_R$ 分别为空间点在左、右摄像机像面上的成像点在图像像素坐标系下的坐标, $\mathbf{M}_L, \mathbf{M}_R$ 分别为左、右摄像机的投影矩阵, \mathbf{P}_w 为空间点在世界坐标系下的坐标。

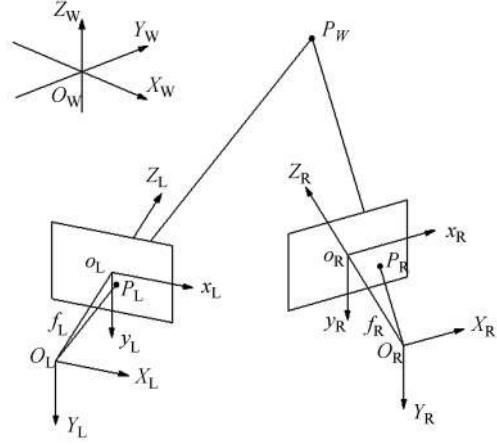


图 2 空间点三维重建模型

Fig. 2 3D reconstruction model of spatial point

一般来说为了计算方便,将世界坐标系与其中一个摄像机坐标系重合。当世界坐标系与左摄像机坐标系重合时,则左、右侧摄像机的投影矩阵分别为:

$$\mathbf{M}_L = \mathbf{K}_L [\mathbf{I} | \mathbf{0}], \quad (3)$$

$$\mathbf{M}_R = \mathbf{K}_R [\mathbf{R} | \mathbf{t}], \quad (4)$$

其中: $\mathbf{K}_L, \mathbf{K}_R$ 分别为左、右侧摄像机的内部参数矩阵; \mathbf{I} 为 3×3 的单位矩阵; \mathbf{R}, \mathbf{t} 称为测量系统的结构参数,表示两摄像机坐标系间的旋转矩阵和平移向量。利用一定的标定方法获得两台摄像机的内部参数和外部参数之后,即可以根据左、右图像中的匹配像点重建出对应空间点的三维坐标。此时,摄像机标定的任务就是求解左右摄像机内的参数以及结构参数。

2.2 消隐点的几何性质以及优化求解方法

直线上无穷远点的图像称为该直线的消隐点。由射影几何理论可知,平行直线与无穷远平面相交于同一个无穷远点,因此,平行直线具有同一个消隐点,即消隐点只与直线的方向有关而与直线的位置无关。因此,消隐点通常也说成是直线方向的消隐点,如果摄像机矩阵为 $\mathbf{P} = (H_\infty, p_4)$,则直线上的消隐点可以由下式计算得出^[26]:

$$\mathbf{v} = H_\infty \mathbf{d}, \quad (5)$$

其中: \mathbf{v} 是直线上的消隐点, \mathbf{d} 为直线方向。

消隐点(极点)的求解基于主动视觉的摄像机

标定方法。然而由于图像中存在噪声,摄像机镜头存在畸变等原因,使得像平面本应相交的多条直线事实上不能相交于唯一一点。而处于主点附近区域内的像点畸变较小,可以忽略不计。因此利用平移运动前、后图像中均在主点附近的特征点来求取消隐点。选取运动前后两幅图像中到主点的距离之和最小的两个特征点,这样就能减少由于畸变引起的消隐点偏差。

特征点 P_1 在摄像机运动前后拍摄图像中对应的像点连线的方程为:

$$y = a_1 x + b_1. \quad (6)$$

特征点 P_2 在摄像机运动前后拍摄图像中对应的像点连线的方程为:

$$y = a_2 x + b_2, \quad (7)$$

其中 $a_i, b_i (i=1, 2)$ 为特征点所在直线的系数。

两直线的交点即为消隐点,可以利用形如 $\mathbf{AX} = \mathbf{b}$ 的形式进行求解,即:

$$\begin{bmatrix} a_1 & -1 \\ a_2 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -b_1 \\ -b_2 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

3 双目立体系统标定方法

3.1 内参数标定方法

由摄影几何学原理可知,对于某一组空间平行线的消隐点,它与摄像机光心的连线必与该组空间平行线平行^[25]。因此,如果空间中存在两组平行线 $L_1 // L_2, L_3 // L_4$ 。假设 L_1, L_2 的消隐点为 M, L_3, L_4 的消隐点为 N ,则摄像机光心 O 与两正交消隐点 M, N 的连线分别平行于相应的空间平行线,即 $OM // L_1 // L_2, ON // L_3 // L_4$,如图3所示。由此可知,摄像机光心连线间的夹角与空间平行线夹角相同,即 $\angle L_{13} = \angle MON$ 。

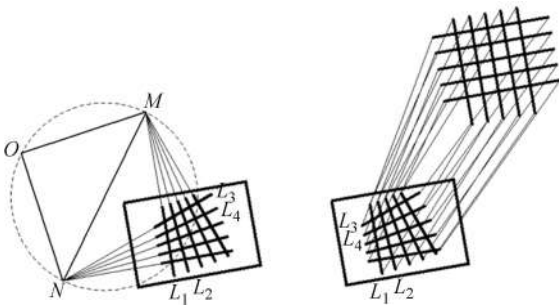


图3 标定投影示意图

Fig. 3 Schematic diagram of calibration projection

若有 $L_1 \perp L_3$,如图3所示则消隐点 M, N 为正交消隐点对,由前面的分析可以得到:

$$\mathbf{OM} \cdot \mathbf{ON} = 0, \quad (9)$$

其中:

$$\mathbf{OM} = ((m_1 - u_0)d_x, (n_1 - v_0)d_y, f)^T, \quad (10)$$

$$\mathbf{ON} = ((m_2 - u_0)d_x, (n_2 - v_0)d_y, f)^T, \quad (11)$$

其中: (u_0, v_0) 为摄像机主点坐标, d_x, d_y 为摄像机尺度因子, f 为摄像机焦距; $(m_i, n_i), i=1, 2$ 为正交消隐点对 M, N 的坐标。联立式(9)~式(11)可得:

$$(m_1 - u_0)(m_2 - u_0)d_x^2 + (n_1 - v_0)(n_2 - v_0)d_y^2 + f^2 = 0. \quad (12)$$

由式(12)可知,如果已知4组非共线的正交消隐点对,则可以得到关于摄像机内参数的4个线性方程,即可求解摄像机的内参数:

$$(m_{11} - u_0)(m_{12} - u_0)d_x^2 + (n_{11} - v_0)(n_{12} - v_0)d_y^2 + f^2 = 0, \quad (13)$$

$$(m_{21} - u_0)(m_{22} - u_0)d_x^2 + (n_{21} - v_0)(n_{22} - v_0)d_y^2 + f^2 = 0, \quad (14)$$

$$(m_{31} - u_0)(m_{32} - u_0)d_x^2 + (n_{31} - v_0)(n_{32} - v_0)d_y^2 + f^2 = 0, \quad (15)$$

$$(m_{41} - u_0)(m_{42} - u_0)d_x^2 + (n_{41} - v_0)(n_{42} - v_0)d_y^2 + f^2 = 0, \quad (16)$$

其中: $(m_{ij}, n_{ij}) (i=1, 2, 3, 4; j=1, 2)$ 为每组消隐点对的坐标。

3.2 外参数标定方法

假设空间点 \mathbf{P} 是平面 π 上任意一点, \mathbf{p}_L 与 \mathbf{p}_R 为两摄像机对应像点,则在标定板坐标系下,空间平面 π 与两个像平面之间存在矩阵 $\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2$,使得:

$$\mathbf{p}_L = \mathbf{H}_L \mathbf{P}, \quad (17)$$

$$\mathbf{p}_R = \mathbf{H}_R \mathbf{P}. \quad (18)$$

因此,图像点 \mathbf{p}_L 与 \mathbf{p}_R 之间也必然存在二维射影变换矩阵 \mathbf{H}_{1R} ,使得^[25]:

$$\mathbf{p}_R = \mathbf{H}_{1R} \mathbf{p}_L. \quad (19)$$

这种二维射影变换矩阵 \mathbf{H} 实现了从第一个像平面的图像点到第二个平面图像点的变换,称为由平面 π 诱导的单应矩阵,如式(20)所示:

$$\mathbf{H} = \mathbf{K}_R (\mathbf{R} + t\mathbf{n}_d^T) \mathbf{K}_L^{-1}, \quad (20)$$

其中: $\mathbf{K}_L, \mathbf{K}_R$ 分别为左右摄像机的内参数, (\mathbf{R}, t) 表示双目测量系统的结构参数, $\mathbf{n}_d = \mathbf{n}/d$ 。

由无穷远平面所诱导的两幅图像的单应矩阵,简称为无穷远单应矩阵。无穷单应 \mathbf{H}_{∞} 映射

了两幅图像之间对应的消隐点对 (v, v') , 如式(21)所示。由于无穷远平面相对于像平面的距离为无穷大, 因此无穷远单应矩阵与测量系统参数的关联模型为:

$$v' = H_{\infty} v, \quad (21)$$

$$H_{\infty} = K_R R K_L^{-1}. \quad (22)$$

式(22)说明无穷单应矩阵与两摄像机之间的平移无关, 因此如果已知左右摄像机内参数以及相对应的 3 组非共线的正交消隐点对, 即可利用式(21)和式(22)求解两摄像机间的旋转矩阵 R 。

由三维重构原理可知, 摄像机参数与空间中三维点的关系为:

$$\begin{bmatrix} m^{2T} & -vm^{3T} \\ m^{1T} & -um^{3T} \\ m'^{2T} & -v'm'^{3T} \\ m'^{1T} & -u'm'^{3T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = 0. \quad (23)$$

$$\text{其中: } M = K_L [I \ 0] = \begin{bmatrix} m^{1T} \\ m^{2T} \\ m^{3T} \end{bmatrix}, M' = K_R [R \ t] =$$

$$\begin{bmatrix} m'^{1T} \\ m'^{2T} \\ m'^{3T} \end{bmatrix} \text{ 分别为左右摄像机矩阵, } K_L, K_R \text{ 分别为左}$$

右摄像机的内参数, R 为两摄像机坐标系间的旋转矩阵, t 为两摄像机坐标系间的平移向量。

若 K_L, K_R 和 R 已知, 则可以建立两摄像机间平移向量 t 与空间点三维坐标间的关联模型。因此利用上述获得的内参数和两摄像机间的旋转矩阵, 通过式(23)建立两摄像机间平移向量 t 与三维空间点间距离的关联模型, 再利用空间中 3 个点间距离的约束, 即可求解两摄像机间的平移向量 t 。

3.3 摄像机畸变标定

本文提出的方法理论上可以实现摄像机的标定。然而, 在实际使用的过程中, 摄像机成像模型并不完全符合小孔成像模型, 如图 4 所示。摄像机畸变导致实际像点坐标相对于线性模型下理想

成像点发生了一定程度的偏移, 最终导致标定精度下降。

因此在精度要求较高的场合, 如果仅线性标定摄像机, 则难以保证摄像机的标定精度。为了提高摄像机的标定精度, 摄像机畸变的准确标定就成为了关键。

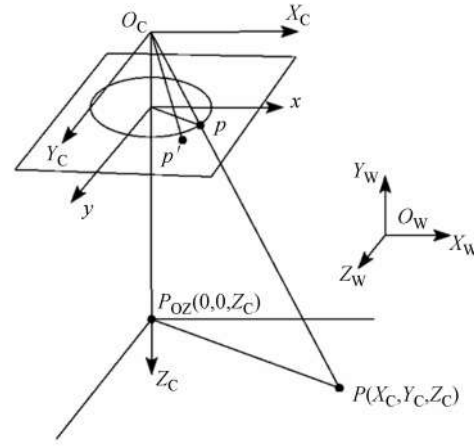


图 4 光学畸变误差示意图

Fig. 4 Schematic diagram of optical distortion error

摄像机畸变主要包括径向畸变, 切向畸变以及薄棱镜畸变, 如图 5 所示。理想成像点与实际成像点间的偏移系数可以利用摄像机的非线性模型表示, 如式(24)所示。

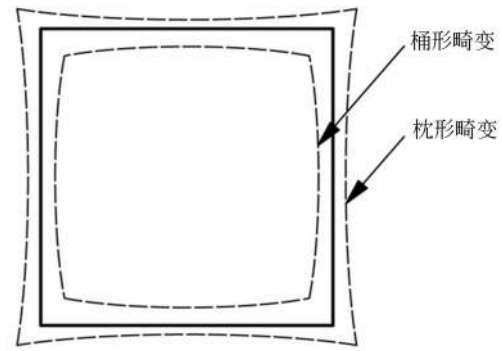


图 5 径向畸变的类型图

Fig. 5 Types of radial distortion

$$\begin{cases} u = u' + [k_1 \tilde{u}_d r_d^2 + k_2 \tilde{u}_d (r_d^2)^2 + k_3 \tilde{u}_d (r_d^2)^3] + [2p_1 \tilde{u}_d \tilde{v}_d + p_2 (r_d^2 + 2\tilde{u}_d)] + s_1 r_d^2 \\ v = v' + [k_1 \tilde{v}_d r_d^2 + k_2 \tilde{v}_d (r_d^2)^2 + k_3 \tilde{v}_d (r_d^2)^3] + [p_1 (r_d^2 + 2\tilde{v}_d^2 + 2p \tilde{u}_d \tilde{v}_d) + s_1 r_d^2] \end{cases}, \quad (24)$$

其中: $\tilde{u}_d = u' - u_0$, $\tilde{v}_d = v' - v_0$, $r_d = \sqrt{\tilde{u}_d^2 + \tilde{v}_d^2}$, (u_0, v_0) 为摄像机的主点坐标; k_1, k_2, k_3 为径向畸

变参数; p_1, p_2 为离心畸变参数; s_1, s_2 为薄棱镜畸变参数。

本文提出了一种基于图像校正的摄像机畸变标定方法。由射影变换不变性可知:当摄像机无畸变时,空间中的直线经过射影变换依然为直线,同时空间中的正交线经过射影变换依然互相垂直。因此,本文通过修正共线点的直线度及正交线的垂直度来标定摄像机的畸变系数,实现摄像机的畸变校准。修正指标函数为:

$$F(k) = S_1 + S_2, \quad (25)$$

$$S_1 = \sum_{i=1}^n (v_i - \tilde{v}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (v_i - \tilde{a} - \tilde{b}u_i)^2, \quad (26)$$

$$S_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (l_{1i}l_{2j} + 1), \quad (27)$$

其中:\$(u_i, v_i)\$为空间点的图像坐标,\$a, b\$为图像点所在直线\$ax + by + 1 = 0\$的直线系数,\$\tilde{v}_i = \tilde{v}_i|_{u=u_i} = a + bu_i\$, \$v_i - \tilde{v}_i\$为\$u_i\$处的残差;\$l_{1i}, l_{2j}\$分别代表不同方向直线的斜率;\$k\$为摄像机的畸变系数。Tasi曾指出虽然非线性模型的引入能够提高摄像机的标定精度,但是非线性模型中如果包含过多的非线性畸变参数则极易引起标定结果的不稳定,反而导致标定精度下降。因此这里针对摄像机中引起畸变的主要因素,引入了一阶径向畸变及两阶切向畸变,即\$\mathbf{k} = [k_1, p_1, p_2]\$。利用Levenberg-Marquardt算法优化上述目标函数,求解摄像机的畸变系数。

4 标定实验及精度评价

实验采用本文提出的方法对一套双目立体视觉测量系统进行了标定。该系统由两台分辨率为\$6\,576 \times 4\,384\$的黑白CCD摄像机和一台图形工作站组成,如图6所示。



图6 双目立体视觉测量系统

Fig. 6 Binocular vision measurement system

为了验证本文提出的标定方法,利用该测量系统拍摄不同方位下随机摆放的4幅标定模板图像。目标距离为7 m,测量视场为\$8\text{ m} \times 5\text{ m}\$。标定结果如表1~表3所示。



图7 双目视觉测量系统标定过程

Fig. 7 Calibration process of binocular vision measurement system

表1 双目立体视觉系统内参数标定结果

Tab. 1 Results of inner parameter calibration for binocular vision measurement system

内参数	f_x	f_y	u_0	v_0
左摄像机	6 388.6	6 470.4	3 307.3	2 183.2
右摄像机	6 407.3	6 407.3	3 293.4	2 195.6

表2 摄像机畸变标定结果

Tab. 2 Results of camera distortion calibration

畸变系数	k_1	p_1	p_2
左摄像机	-9.64×10^{-11}	9.91×10^{-8}	1.36×10^{-6}
右摄像机	-1.33×10^{10}	-6.18×10^{-9}	-1.22×10^{-6}

表3 双目立体视觉系统外参数标定结果

Tab. 3 Results of outer parameter calibration for binocular vision measurement system

\mathbf{R}	$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.98 & -2.58 \times 10^{-3} & 0.22 \\ 2.22 \times 10^{-2} & 1.00 & -8.75 \times 10^{-2} \\ -0.22 & 9.03 \times 10^{-2} & 0.97 \end{bmatrix}$
\mathbf{t}	$\mathbf{t} = [-2\,615.0 \quad -108.3 \quad 49.9]$

为了验证本文提出标定方法的精度,在测量系统视场内不同位置任意摆放一个具有8个重建标记点(从上至下进行编号①~⑧)的标尺5次,利用标定后的测量系统重建不同靶标之间的距离

离,得出 140 个距离值,并利用重建结果与真实值的误差评价标定结果。标记点间的距离真值如表 4 所示,标定评价过程如图 8 所示,标定精度评价结果如图 9 所示。

表 4 不同靶点间的距离真值

Tab. 4 True values of distances between different targets (mm)

靶点 序号	距离真值	靶点 序号	距离真值
①—②	322.5	③—⑤	689.0
①—③	657.0	③—⑥	1008.0
①—④	993.0	③—⑦	1334.0
①—⑤	1346.0	③—⑧	1703.0
①—⑥	1664.5	④—⑤	353.5
①—⑦	1990.5	④—⑥	672.0
①—⑧	2359.0	④—⑦	998.0
②—③	334.5	④—⑧	1367.0
②—④	670.0	⑤—⑥	318.5
②—⑤	1023.5	⑤—⑦	645.0
②—⑥	1342.0	⑤—⑧	1014.0
②—⑦	1668.0	⑥—⑦	326.5
②—⑧	2037.0	⑥—⑧	695.0
③—④	336.5	⑦—⑧	369.0



图 8 标定精度评价

Fig. 8 Accuracy verification

图 9 中,黑色标记点代表每一个位置下不同重建的距离,共 140 个。由于重建距离的不同,导致不同重建距离的相对误差有所波动,因此标定误差在一定范围内上下波动。由图 9 可知,本文提出的标定方法的标定误差最大值为 1%,最小值为 0,平均误差为 0.51%。实验结果表明:本文提出的方法的平均标定误差为 0.51%,能够实现双目立体视觉测量系统的精确标定。与传统的

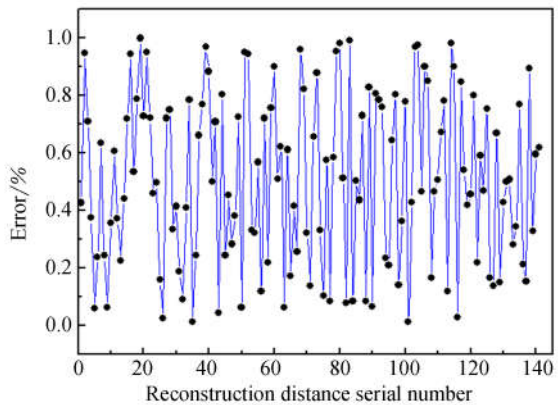


图 9 标定精度结果

Fig. 9 Accuracies of proposed calibration method

张氏标定法相比较,本文提出的方法无需已知空间中准确的标定点坐标,减弱了在标定过程中对其他标定物及测量设备的依赖,降低了测量设备的成本。同时在实际应用中,厂房、测量车间等场景中均具有大量的正交平行线,因此该方法更适用于双目视觉在线测量系统,能够实现测量系统的在线标定。

5 结 论

本文提出了一种适用于大视场视觉测量系统的标定方法,该方法无需高精度标定板或者标定物,仅需利用空间中常见的平行线和垂直线建立摄像机参数与特征线间的约束方程,即可实现摄像机的内参数与旋转矩阵的标定。同时,利用空间中距离已知的 3 个空间点即可线性标定两摄像机间的平移向量。该方法避免了大视场测量系统标定中大型标定物制造困难的问题,具有算法简单、易于实现、无需依赖外界测量设备及成本较低等优点,适用于例如高温极寒等恶劣复杂环境下大视场测量系统的现场在线标定。本文提出的方法引入了非线性模型,在标定摄像机线性模型的同时标定出摄像机的畸变系数,克服了摄像机自标定过程中算法冗杂、标定精度不高等问题,实现了对摄像机较高精度的标定。实验结果表明,本文提出的方法的平均标定误差为 0.51%,精度较好且操作简便,适用于标定大视场视觉测量系统。

参考文献:

- [1] 解则晓,韩振华,高翔. 光笔式单目视觉测量系统的关键技术[J]. 中国光学, 2013, 6(5):780-787.
XIE Z X, HAN ZH H, GAO X. Key technologies of monocular vision measurement system with light pen [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5):780-787. (in Chinese)
- [2] JIA Z, WANG B, LIU W, *et al.*. An improved image acquiring method for machine vision measurement of hot formed parts[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(2): 267-271.
- [3] 刘建伟,梁晋,梁新合,等. 大尺寸工业视觉测量系统[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 126-134.
LIU J W, LIANG J, LIANG X H, *et al.*. Industrial vision measuring system for large dimension work-pieces [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1):126-134. (in Chinese)
- [4] 孙军华,张广军,魏振忠,等. 大型自由曲面移动式三维视觉测量系统[J]. 仪器仪表学报, 2007, 27(12): 1688-1691.
SUN J H, ZHANG G J, WEI ZH ZH. Mobile 3D vision measurement system for large-scale free form surface[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 27(12): 1688-1691. (in Chinese)
- [5] 马颂德,张正友. 计算机视觉: 计算理论与算法基础[M]. 北京:科学出版社, 1998.
MA S D, ZHANG ZH Y. *The Computer Vision—Computation Theory and Fundamental Algorithm* [M]. Beijing: The Science Press, 1998. (in Chinese)
- [6] 张广军. 视觉测量[M]. 北京:科学出版社, 2008.
ZHANG G J. *Vision Measurement* [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
- [7] ZHANG Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]. *The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, IEEE, 1999, 1: 666-673.
- [8] HEIKKILA J, SILVÉN O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction [C]. 1997 *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE, 1997: 1106-1112.
- [9] 刘书桂,姜珍珠,董英华,等. 采用移动光靶标的分区域相机标定[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2):259-265.
LIU SH G, JIANG ZH ZH, DONG Y H, *et al.*. Sub-regional camera calibration based on moving light target [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 259-265. (in Chinese)
- [10] 徐巧玉,叶东,车仁生. 基于光学参考棒的立体视觉测量系统现场标定技术[J]. 光学学报, 2008, 28(1): 81-86.
XU Q Y, YE D, CHE R SH. On-line calibration of stereo vision measurement system based on optical reference bar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(1): 81-86. (in Chinese)
- [11] 黄凤山,刘恩福,方忆湘,等. 基于智能三坐标测量机的零件位姿单目立体视觉识别[J]. 光学精密工程, 2013, 21(5): 1326-1332.
HUANG F SH, LIU E F, FANG Y X, *et al.*. Single camera stereo vision recognition for Parts' pose based on intelligent three coordinate measuring machine[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5):1326-1332. (in Chinese)
- [12] 王向军,王晶,刘峰,等. 野外大视场双目视觉物体定位监测系统的单参数快速标定[J]. 光学精密工程, 2013, 21(10):2664-2670.
WANG X J, WANG J, LIU F, *et al.*. Fast calibration for binocular vision measuring system with a large field [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(10):2664-2670. (in Chinese)
- [13] 周富强,郝继贵,杨学友,等. CCD摄像机快速标定技术[J]. 光学精密工程, 2000, 8(1):96-100.
ZHOU F Q, ZHU J G, YANG X Y, *et al.*. A high speed CCD camera calibration technique [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(1): 96-100. (in Chinese)
- [14] FAIG W. Calibration of close-range photogrammetric systems: Mathematical formulation [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1975, 41(12): 1479-1486.
- [15] TSAI R Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision[C]. *Proceeding IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE, 1986:364-374.
- [16] TSAI R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1987, 3(4): 323-344.
- [17] ABEL-AZIZ Y I, KARARA H M. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates[J]. *Urbana, IL: American*

- can Society of Photogrammetry, 1971: 1-18.
- [18] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [19] HARTLEY R I. Self-calibration of stationary cameras [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 22(1): 5-23.
- [20] MA S D. A self-calibration technique for active vision systems[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1996, 12(1): 114-120.
- [21] 雷成, 吴福朝. 一种新的基于主动视觉系统的摄像机自标定方法[J]. *计算机学报*, 2000, 23(11): 1130-1139.
- LEI CH, WU F CH. A new camera self-calibration method based on active vision system [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2000, 23(11): 1130-1139. (in Chinese)
- [22] MERRAS M, EL AKKAD N, SAAIDI A, et al.. Camera self calibration with varying parameters by an unknown three dimensional scene using the improved genetic algorithm[J]. *3D Research*, 2015, 6(1): 1-14.
- [23] ZHAO Y, XU L. Self-calibration of monocular vision system based on planar points[C]. *International Society for Optics and Photonics, IS&T/SPIE Electronic Imaging*, 2015: 94050H-94050H-9.
- [24] FAUGERAS O D, LUONG Q T, MAYBANK S J. Camera self-calibration: Theory and experiments[C]. *Computer Vision—ECCV92, Springer Berlin Heidelberg*, 1992: 321-334.
- [25] HARTLEY R. In defense of the eight-point algorithm[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1997, 19(6): 580-593.
- [26] 霍炬, 杨卫, 杨明. 基于消隐点几何特性的摄像机自标定方法[J]. *光学学报*, 2010, 30(2): 465-472.
- HUO J, YANG W, YANG M. A self-calibration technique based on the geometry property of the vanish point[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2): 465-472. (in Chinese)
- [27] 吴福朝. 计算机视觉中的数学方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- WU F CH. *Mathematical Methods in Computer Vision*[M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)

作者简介:



杨景豪(1990—),男,辽宁大连人,博士研究生,2012年于东北大学获得学士学位,主要从事视觉测量技术及摄像机标定方法的研究。E-mail: eeycn@mail.dlut.edu.cn

通讯作者:



刘巍(1979—),男,内蒙古林东人,博士,副教授,博士生导师,2002年于华北电力大学获得学士学位,2007年于大连理工大学获得博士学位,主要从事基于视觉的几何量精密测试技术以及精密加工过程中的测控技术的研究。E-mail: lw2007@dlut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)