

一种线结构光振镜扫描测量系统通用标定方法

李玥华¹, 赵勃冲¹, 胡泊², 刘小红¹, 杜仁杰³, 周京博^{1*}¹河北科技大学机械工程学院, 河北 石家庄 050018;²石家庄铁道大学机械工程学院, 河北 石家庄 050043;³河北博柯莱智能装备科技股份有限公司, 河北 邯郸 057150

摘要 线结构光振镜扫描测量系统通过单个反射镜片摆动实现被测对象三维面形的测量, 具有环境适应性强、测量速度快和结构紧凑等优点。为降低系统装调难度、提升标定方法的通用性, 提出了直接建立反射激光平面方程系数与振镜摆角关系的标定思路。考虑系统各元件间的相对位姿关系, 推导并得到了激光平面各系数与振镜摆角的一般表达式。根据特定摆角处得到的激光平面方程系数, 采用最小二乘方法得到该表达式中的待定系数。实验结果表明, 采用所提方法标定的测量系统对阶梯块高度测量的最大相对偏差为 -0.3029% , 成功实现了复杂曲面的多尺度特征获取。

关键词 机器视觉; 线结构光; 振镜扫描; 系统标定

中图分类号 TH741

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1015001

Universal Calibration Method for Line Structured Light Galvanometer Scanning System

Li Yuehua¹, Zhao Bochong¹, Hu Po², Liu Xiaohong¹, Du Renjie³, Zhou Jingbo^{1*}¹School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, Hebei, China;²School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, Hebei, China;³Hebei Boxline Intelligent Equipment Technology Co., Ltd., Handan 057150, Hebei, China

Abstract The line structured light galvanometer scanning system realizes three-dimensional profile measurement of the measured objects via swinging a mirror, which has the advantages of strong environmental adaptability, fast measurement speed and compact structure. To reduce the difficulty of system installation and improve the universality of calibration method, a calibration idea is proposed to directly establish the relationship between the coefficients of reflected laser plane equation and the swing angle of galvanometer. The general expressions of coefficients of the laser plane and the swing angle of the galvanometer are deduced and obtained by considering the relative position relationship between the components of the system. According to the coefficients of the laser plane equation obtained at the specific swing angles, the undetermined coefficients in the expressions are obtained by the least square method. The experimental results show that maximum relative height deviation of the steps measured by the measurement system calibrated by the proposed method is -0.3029% , and the multi-scale features of complex surface can also be acquired successfully.

Key words machine vision; line structured light; galvanometer scanning; system calibration

收稿日期: 2021-11-01; 修回日期: 2021-11-25; 录用日期: 2021-12-13

基金项目: 国家自然科学基金(51705130)、河北省重点研发计划项目(20311804D)、河北省自然科学基金项目(E2019210104)

通信作者: *zhoujingbo@hebust.edu.cn

1 引言

线结构光传感器基于激光三角原理,根据由被测表面反射的调制条纹图像、相机内参数和激光平面方程计算二维轮廓信息^[1],具有结构简单、非接触、成本低和效率高等优点,已被广泛应用于几何测量^[1-4]、质量评价^[5-6]和状态监测^[7-8]等领域中。传统线结构光传感器中激光平面与相机的相对位姿固定,仅需标定一次激光平面,标定方法已较为成熟^[9-10]。为得到表面三维点云,需增加运动坐标轴,使传感器与被测对象产生相对运动,进而完成扫描^[11-13]。此类系统的测量范围受限于坐标轴运动范围,且运动部件往往质量较大,扫描速度不高。

振镜扫描测量系统采用电机直接带动反射镜旋转的方式控制激光平面完成测量。反射镜片质量小,能够实现高频摆动,可显著提高测量速度。该测量系统的测量范围由振镜摆角和相机视野决定,不再受自身结构尺寸限制,可显著减小测量装置体积,满足大范围测量需求。根据摆动轴个数可将振镜扫描系统分为基于点激光的双摆轴测量系统和基于线结构光的单摆轴测量系统。前者根据每幅图片只能获得单个点的坐标值,测量速度较低^[14]。线结构光振镜扫描测量系统可单次获取二维轮廓,测量效率显著提高。然而,将振镜集成到线结构光测量系统中,也给系统的安装调试和标定带来了新的挑战。振镜摆动过程中反射激光平面和相机的相对位置在时刻变化,且受振镜安装、振镜与入射激光平面相对位置等多种因素影响,系统标定变得尤为复杂。

Chi 等^[15]开发了用于水下三维测量的线结构光振镜扫描系统,所提系统的标定方法要求入射激光平面与振镜转轴重合,故要严格保证各零部件的加工精度,并需对系统进行仔细的装调。然而,激光平面是不可触摸的,故满足上述模型要求较为困难。Yu 等^[16]建立了基于旋量理论的振镜扫描数学模型,该模型含有 11 个未知参数,建模和求解过程较为复杂。Mao 等^[17]提出了基于平面约束的线结构光标定方法,通过从不同的方向采集目标平面图像,利用单映性原理建立特定激光平面上像素坐标和测量坐标之间的关系,操作和运算比较简单,但只能获得所标定的特定摆角位置处的二维轮廓,无法得到被测件的密集点云数据。Yang 等^[18]提出了完整的振镜测量系统标定模型,基于上述模型完成了对相机、相机与振镜扫描系统间变换矩阵,以及修正参数的标定。该方法实现起来较为复杂,且需要精密运

动工作台进行辅助。杨林林等^[19]基于双重交比不变原理获取大量高精度标定点,然后利用神经网络对系统的图像坐标、光平面转角和三维世界坐标的映射关系进行非线性拟合,完成系统标定。在该方法中,为得到用于神经网络训练的高精度三维数据点,需要高精度直线工作台和标定靶标,且要求靶标平面与工作台运动方向垂直,故调整过程较为复杂,且精度不容易保证。王腾等^[20]建立了一维振镜扫描系统的误差模型,并通过补偿转角误差提升了测量精度。该方法对振镜的安装和调整要求较高,以降低非线性误差对测量结果的影响。

针对线结构光振镜扫描系统标定中的问题,提出了直接建立摆角与反射激光平面方程系数关系的思路,给出了详细的理论推导,有效降低了标定的复杂性。所提方法只需要一个平面棋盘格靶标即可完成所有标定工作,对元件的加工和装配也没有特殊要求,具有良好的通用性。

2 测量原理

线结构光振镜扫描系统测量原理,如图 1 所示。线结构光振镜扫描测量系统主要由“一”字线激光器、相机、振镜和振镜驱动电机构成,激光器、相机和振镜驱动电机安装于同一个机架上。 $o-xyz$ 为振镜运动坐标系, x 轴与电机旋转轴重合, $o_c-x_c y_c z_c$ 为相机坐标系, $o_w-x_w y_w z_w$ 为世界坐标系, $o_i-x_i y_i z_i$ 为反射镜坐标系,且镜面与 $x_i o_i z_i$ 平面重合。测量时 $o_i-x_i y_i z_i$ 随反射镜绕 x 轴转动,实现光条对被测物体表面的扫描。

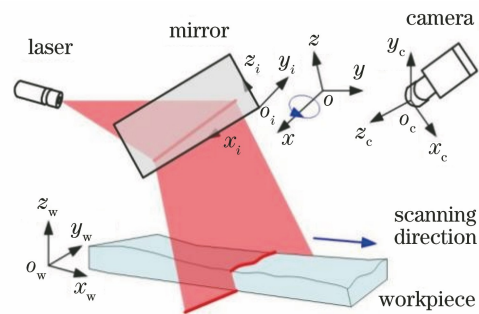


图 1 线结构光振镜扫描系统测量原理

Fig. 1 Measurement principle of line structured light galvanometer scanning system

设 P 为激光光条上的点, (x_c, y_c, z_c) 为其在相机坐标系中的坐标, P 在像素平面上归一化的投影坐标为

$$[x \ y]^T = [x_c/z_c \ y_c/z_c]^T. \quad (1)$$

考虑到径向和切向畸变后的投影坐标为

$$\begin{cases} x' = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2) \\ y' = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy \end{cases}, \quad (2)$$

式中: k_1, k_2 为径向畸变系数; p_1, p_2 为切向畸变系数; $r^2 = x^2 + y^2$ 。 P 的像素坐标为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: f_x, f_y 为焦距; u_0, v_0 为主像素点坐标。设当振镜电机摆动 i 步时, 反射后的激光平面在相机坐标系中的方程为

$$A_c^{(i)} x_c + B_c^{(i)} y_c + C_c^{(i)} z_c + D_c^{(i)} = 0, \quad (4)$$

式中: $A_c^{(i)}, B_c^{(i)}, C_c^{(i)}, D_c^{(i)}$ 为激光平面方程的系数; $i = 1, \dots, n$ 。

由于 P 位于激光平面上, 故当激光平面方程系数已知时, 即可通过联立式(1)、(4)计算任意光条中心点在相机坐标系中的坐标。因此, 实现振镜扫描测量的关键是得到任意振镜摆角所对应的反射激光平

面方程。

反射激光平面方程由入射激光平面、镜面和 x 轴间的相对位姿决定, 如图 2 所示。图 2(a)为它们之间理想的相对位姿, 此时 x 轴位于镜面上, 入射激光平面也通过 x 轴。由于反射镜在旋转轴上的安装误差和激光器与反射镜间的调整误差, 因此难以保证此理想状态。当 x 轴与镜面重合时, 入射激光平面可能与 x 轴平行或相交, 分别如图 2(b)、(c)所示。当 x 轴与镜面不重合时, 又存在三种情况: 1) 镜面与理想位置平行, 激光平面过 x 轴, 如图 2(d)所示; 2) 镜面与理想位置不平行, 激光平面过 x 轴, 如图 2(e)所示; 3) 镜面与理想位置不平行, 激光平面与 x 轴相交, 如图 2(f)所示。对于实际测量系统, 很难保证 x 轴与镜面重合, 更无法保证 x 轴线位于激光平面上。然而, 它们的相对位置关系直接决定着反射后的激光平面方程, 影响测量精度。需针对图 2(f)所示的一般情况, 建立通用反射激光平面方程计算模型。

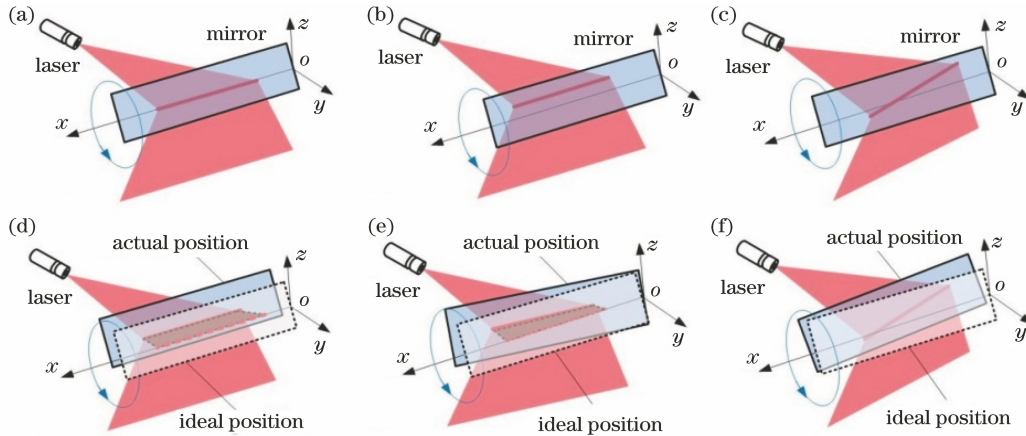


图 2 激光平面、镜面和旋转轴的相对位姿关系。(a)理想状态;(b)激光平面与 x 轴平行;(c)激光平面与 x 轴相交;(d)镜面与理想位置平行, 激光平面过 x 轴;(e)镜面与理想位置不平行, 激光平面过 x 轴;(f)镜面与理想位置不平行, 激光平面与 x 轴相交

Fig. 2 Relative position relationship among laser plane, mirror and rotational axis. (a) Ideal state; (b) laser plane is parallel to x axis; (c) laser plane intersects x axis; (d) mirror is parallel to ideal position, and laser plane passes through x axis; (e) mirror is not parallel to ideal position, and laser plane passes through x axis; (f) mirror is not parallel to ideal position, and laser plane intersects x axis

3 反射激光平面方程

设相机坐标系中反射激光平面方程系数与振镜摆角间的关系为

$$\begin{bmatrix} A_c^{(i)} & B_c^{(i)} & C_c^{(i)} & D_c^{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_A(i\varphi) & f_B(i\varphi) & f_C(i\varphi) & f_D(i\varphi) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: φ 为步距角; f_A, f_B, f_C 和 f_D 为摆动角度与激光平面方程系数间的函数关系。当反射镜转动角

度 $i\varphi$ 已知时, 反射扫描模型建立的核心问题就是寻找式(5)的具体表达形式。

3.1 反射镜坐标系中的激光平面方程

设振镜摆动时由 $o-xyz$ 到 $o_i-x_i y_i z_i$ 坐标变换的旋转矩阵为 \mathbf{R}_i , 平移向量为 $\boldsymbol{\tau}_i$, 则

$$\mathbf{R}_i = \mathbf{R}_x \mathbf{R}_M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(i\varphi) & \sin(i\varphi) \\ 0 & -\sin(i\varphi) & \cos(i\varphi) \end{bmatrix} \mathbf{R}_M, \quad (6)$$

式中： \mathbf{R}_x 为绕转轴的旋转变换矩阵； \mathbf{R}_M 为初始位置时反射镜坐标系到振镜摆动坐标系的旋转变换矩阵， \mathbf{R}_M 由上述 $o\text{-}xyz$ 和 $o_i\text{-}x_iy_iz_i$ 的相对安装位姿决定，且安装后固定不变。

为便于分析，采用法向量及其上的点表示激光平面。在 $o\text{-}xyz$ 中，设 $\mathbf{n}_s = (A_s \ B_s \ C_s)^T$ 为入射激光平面单位法向量， $\mathbf{P}_s = (x_s \ y_s \ z_s)^T$ 为其上一点， $\mathbf{n}_s^{(i)}$ 和 $\mathbf{P}_s^{(i)}$ 分别为二者在 $o_i\text{-}x_iy_iz_i$ 中对应的法向量和点，则有

$$\mathbf{n}_s^{(i)} = \mathbf{R}_i \mathbf{n}_s, \quad (7)$$

$$\mathbf{P}_s^{(i)} = \mathbf{R}_i \mathbf{P}_s + \boldsymbol{\tau}_i. \quad (8)$$

镜片对激光平面的反射关系，如图3所示，反射后的激光平面等价于激光器在镜面镜像位置发射出的激光平面。

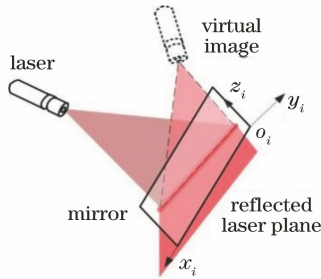


图3 反射变换

Fig. 3 Reflection transformation

设反射激光平面法向量为 $\mathbf{n}_m^{(i)}$ ， $\mathbf{P}_m^{(i)}$ 为反射激光平面上的点，其值可通过对入射激光平面进行镜像变换得到，即

$$\mathbf{n}_m^{(i)} = \mathbf{M}_r \mathbf{n}_s^{(i)}, \quad (9)$$

$$\mathbf{P}_m^{(i)} = \mathbf{M}_r \mathbf{P}_s^{(i)}, \quad (10)$$

式中： $\mathbf{M}_r = \text{diag}(1 \ -1 \ 1)$ 为镜像变换矩阵。

3.2 相机坐标系中的激光平面方程

为计算反射激光平面在相机坐标系中的方程，需将 $\mathbf{n}_m^{(i)}$ 、 $\mathbf{P}_m^{(i)}$ 先转换至运动坐标系 $o\text{-}xyz$ 中，再将转换后的结果转换至相机坐标系 $o_c\text{-}x_cy_cz_c$ 中。设 $\mathbf{n}_c^{(i)}$ 和 $\mathbf{P}_c^{(i)}$ 分别为相机坐标系中的激光平面法向量和对应点，则有

$$\mathbf{n}_c^{(i)} = \mathbf{R}_c \mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{n}_m^{(i)}, \quad (11)$$

$$\mathbf{P}_c^{(i)} = \mathbf{R}_c \mathbf{R}_i^{-1} [\mathbf{P}_m^{(i)} - \boldsymbol{\tau}_i] + \boldsymbol{\tau}_c, \quad (12)$$

式中： \mathbf{R}_c 、 $\boldsymbol{\tau}_c$ 分别为从 $o\text{-}xyz$ 到 $o_c\text{-}x_cy_cz_c$ 的旋转

变换矩阵和平移向量。由于 \mathbf{R}_x 和 \mathbf{R}_M 均为正交单位矩阵，将式(6)、(7)、(9)依次代入式(11)，整理可得

$$\mathbf{n}_c^{(i)} = \mathbf{R}_c \mathbf{R}_M^T \mathbf{R}_x^T \mathbf{M}_r \mathbf{R}_x \mathbf{R}_M \mathbf{n}_s, \quad (13)$$

其中，仅 \mathbf{R}_x 为含有振镜摆角的变量矩阵，其他矩阵均为常数矩阵，且

$$\mathbf{R}_x^T \mathbf{M}_r \mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - 2\cos^2(i\varphi) & -2\cos(i\varphi)\sin(i\varphi) \\ 0 & -2\cos(i\varphi)\sin(i\varphi) & 1 - 2\sin^2(i\varphi) \end{bmatrix}. \quad (14)$$

由于式(14)中仅包含 $\cos^2(i\varphi)$ 、 $\sin^2(i\varphi)$ 和 $\cos(i\varphi)\sin(i\varphi)$ 三个变量，故 $\mathbf{n}_c^{(i)}$ 中的每个分量均可表示为关于这三个变量的多项式。此时， $\mathbf{n}_c^{(i)}$ 可以表示为

$$\mathbf{n}_c^{(i)} = \mathbf{M}_c [\cos^2(i\varphi) \ \sin^2(i\varphi) \ \cos(i\varphi)\sin(i\varphi) \ 1]^T, \quad (15)$$

式中： \mathbf{M}_c 为由多项式系数组成的 3×4 常数矩阵。设相机坐标系中反射形成的激光平面方程为 $A_c^{(i)}[x - x_c^{(i)}] + B_c^{(i)}[y - y_c^{(i)}] + C_c^{(i)}[z - z_c^{(i)}] = 0$ ，将方程展开为一般形式 $A_c^{(i)}x + B_c^{(i)}y + C_c^{(i)}z + D_c^{(i)} = 0$ ，则

$$D_c^{(i)} = [\mathbf{n}_c^{(i)}]^T \mathbf{P}_c^{(i)}, \quad (16)$$

式中：

$$\mathbf{P}_c^{(i)} = \mathbf{R}_c (\mathbf{R}_x \mathbf{R}_M)^{-1} [\mathbf{M}_r (\mathbf{R}_s \mathbf{R}_M \mathbf{P}_s + \boldsymbol{\tau}_i) - \boldsymbol{\tau}_i] + \boldsymbol{\tau}_c, \quad (17)$$

推导得

$$D_c^{(i)} = \mathbf{n}_s^T \mathbf{P}_s + \mathbf{n}_s^T \mathbf{R}_M^T (\mathbf{R}_x^T - \mathbf{R}_x^T \mathbf{M}_r^T) \boldsymbol{\tau}_i + [\mathbf{n}_c^{(i)}]^T \boldsymbol{\tau}_c, \quad (18)$$

式中：

$$\mathbf{R}_x^T - \mathbf{R}_x^T \mathbf{M}_r^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2\cos(i\varphi) & 0 \\ 0 & 2\sin(i\varphi) & 0 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

在式(18)中， \mathbf{n}_s 、 \mathbf{P}_s 、 \mathbf{R}_M 和 $\boldsymbol{\tau}_c$ 均为常数矩阵，且 $\mathbf{n}_c^{(i)}$ 的表达式已由式(15)给出。因此， $D_c^{(i)}$ 的多项式表达式中增加了 $\cos(i\varphi)$ 和 $\sin(i\varphi)$ 两个变量，故反射镜摆动角度之间的关系可表示为

$$D_c^{(i)} = \mathbf{M}_d [\cos^2(i\varphi) \ \sin^2(i\varphi) \ \cos(i\varphi)\sin(i\varphi) \ \cos(i\varphi) \ \sin(i\varphi) \ 1]^T, \quad (20)$$

式中： \mathbf{M}_d 为 1×6 常系数矩阵。此时，为得到振镜电机任意摆角所对应的相机坐标系下的反射激光平

面方程，只需要确定 \mathbf{M}_c 、 \mathbf{M}_d 的值。

3.3 计算激光平面方程系数

每个激光平面采用投射到不同基准面上的 q 条激光条纹来拟合得到,如图 4 所示。振镜摆角则直接由电机编码器得到。

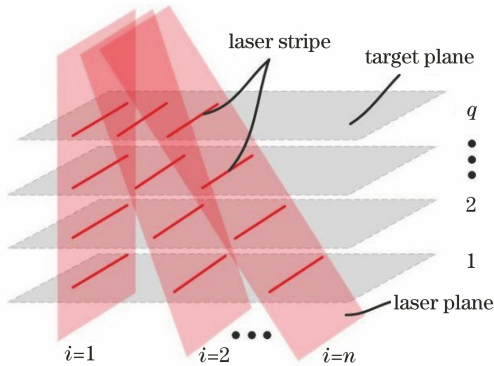


图 4 计算特定摆角处激光平面方程

Fig. 4 Computing laser plane equation at specific swing angle

根据图 4 所示的方法得到每个激光平面上 q 个不同位置的光条直线,采用最小二乘拟合得到激光平面方程,设第 i 个位置处的激光平面方程为

$$a_i x + b_i y + c_i z + d_i = 0. \quad (21)$$

对拟合得到的激光平面系数进行归一化处理,可得

$$\begin{bmatrix} v_1^{(i)} & v_2^{(i)} & v_3^{(i)} & v_4^{(i)} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2 + c_i^2}} [a_i \quad b_i \quad c_i \quad 1], \quad (22)$$

式中: $v_l^{(i)}$ 为第 i 个激光平面的第 l 个归一化系数, $l=1,2,3,4$ 。由于激光平面法向量系数表达式与常数项表达式不同,可参考文献[21]采用最小二乘法分别求解激光平面系数表达式的待定系数矩阵 \mathbf{M}_c 和 \mathbf{M}_d 。

4 系统标定

4.1 硬件组成

测量装置如图 5 所示,主要由“一”字线激光器 (ST-MT5i)、相机 (MV-GE130GM-T)、振镜单元和支架等组成。激光器波长为 650 nm,功率为 5 mW,在 200 mm 工作距离处的光条线宽约为 0.3 mm。相机分辨率为 1280 pixel×960 pixel。振镜单元由直流伺服电机 (RMD-S-5010) 驱动,采用 18 位绝对值编码器,角度误差约为 $\pm 0.01^\circ$,能够存储电机零点等信息,每次测量前能够准确实现回零动作。反射镜使用平面镀铝膜反射镜,对 650 nm 波长激光反射率大于 94%,其直接与电机输出轴相连,实现对激光平面的扫描控制。

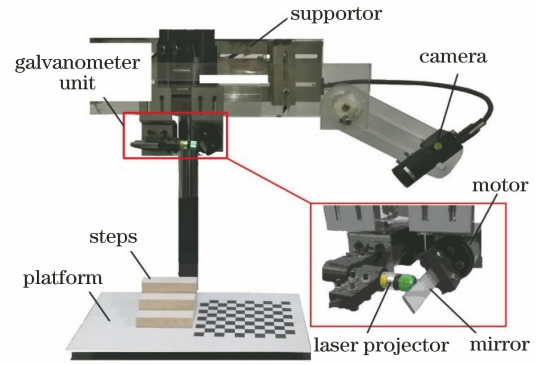


图 5 线结构光振镜扫描测量系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of line structured light galvanometer scanning system

4.2 标定步骤

系统标定的目标就是要确定 \mathbf{M}_c 和 \mathbf{M}_d 。详细步骤为:

1) 标定相机的内参数。采用如图 6(a) 所示的棋盘格靶标标定相机内参数,棋盘格角点数为 9×9 ,每个棋盘格大小为 10 mm×10 mm,采集的靶标图像为 20 幅。采用张氏标定法完成标定^[22],得到的相机内参数分别为 $f_x = 1573.7562$ 、 $f_y = 1572.8889$ 、 $u_0 = 588.7821$ 、 $v_0 = 448.8817$,畸变参数分别为 $k_1 = -0.2076$ 、 $k_2 = 0.4455$ 、 $p_1 = 1.0719 \times 10^{-2}$ 、 $p_2 = -5.3939 \times 10^{-3}$;

2) 确定扫描初始位置。为充分利用相机视野,将反射线结构光的初始位置设定在相机视野的上极限位置,终止位置选择在相机视野的下极限位置,每个摆动角度都以初始位置为参考计算;

3) 计算特定摆角处的激光平面方程。同样采用图 6(a) 所示的棋盘格靶标标定激光平面方程。将靶标放置于测量台面上,调整相机曝光时间,先拍摄清晰的棋盘格图像,再缩短曝光时间以保证光条图像质量。此时,振镜电机从初始位置开始每旋转 0.05 rad 采集一幅激光条纹图像,如图 6(b) 所示。在完成采集后,将靶标平面向上平移至第二个位置,振镜电机从相同的初始位置开始,以相同的步距角摆动,完成对应的光条图像的采集。依次类推,采集靶标平面在不同位置处的 8 组激光条纹图像。根据已知的相机内参数和棋盘格尺寸参数,即可求出该平面上激光光条上任意点在相机坐标系中的坐标值;

4) 计算待定系数。同一个振镜摆角对应相同的激光平面,再根据 3.3 节中的分析过程得到 \mathbf{M}_c 和 \mathbf{M}_d 。为验证待定系数的正确性,将求解的激光平面系数与根据标定结果和系数表达式(15)、(20)计算得到的激光平面系数进行对比,如图 7 所示。

可以看出标定值与求解值的变化规律相同,且基于所建模型得到的激光平面系数变化更加平稳,为整

体最优解,能够降低单个激光平面的标定误差对标定系数的影响。

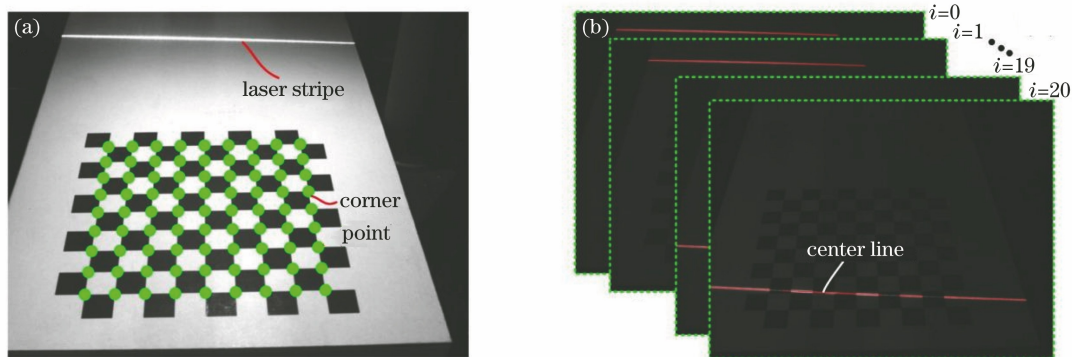


图 6 激光平面标定。(a)棋盘图像;(b)不同摆角处棋盘上的激光条纹

Fig. 6 Calibration of laser plane. (a) Image of chess board; (b) laser stripes on chess board at different swing angles

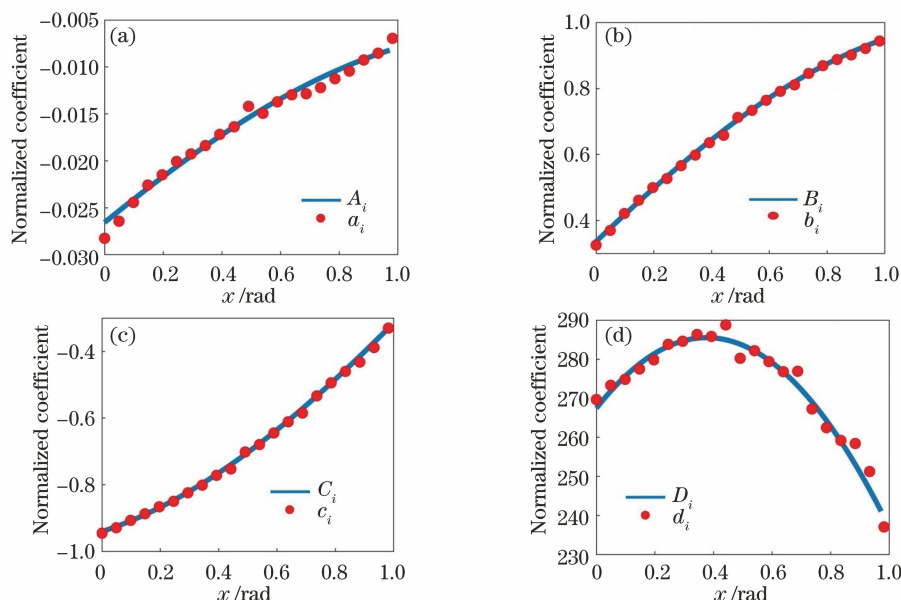


图 7 反射激光平面方程系数的标定值与模型值对比。(a)系数 A;(b)系数 B;(c)系数 C;(d)系数 D

Fig. 7 Comparison of coefficients of reflected laser plane between calibrated and model results. (a) Coefficient A; (b) coefficient B; (c) coefficient C; (d) coefficient D

5 测量实验和分析

5.1 高度测量实验

采用三个不同高度的矩形块验证测量系统精度,如图 8(a)所示。矩形块按不同次序组合成台阶,顶面为被测平面,底面为计算高度的参考平面。采用坐标测量机(GLOBAL STATUS 777)在参考平面上绕阶梯块一周打点测量,并拟合得到参考平面方程,再在每个被测阶梯面各取 20 个点,以点到参考平面距离的均值作为该阶梯高度的参考值,三个矩形块的高度分别为 $H_1 = 14.6516 \text{ mm}$, $H_2 =$

29.4961 mm , $H_3 = 44.6330 \text{ mm}$ 。在线结构光振镜扫描测量实验中同样以参考平面为基准,拟合得到参考平面方程,将每个阶梯上测量点到拟合平面的距离的均值作为该阶梯的高度值。为使测量结果更具说服力,改变矩形块的排列次序,并对其进行扫描测量,结果如图 8(b)~(f)所示。不同位置处三个阶梯高度测量值和相对误差(R_1, R_2, R_3)的结果,如表 1 所示。可见,每个阶梯块的高度值在多次测量中均保持了较好的稳定性,测量结果的最大相对偏差为 -0.3029% ,表明所提的标定方法能够实现线结构光振镜测量系统的准确标定。

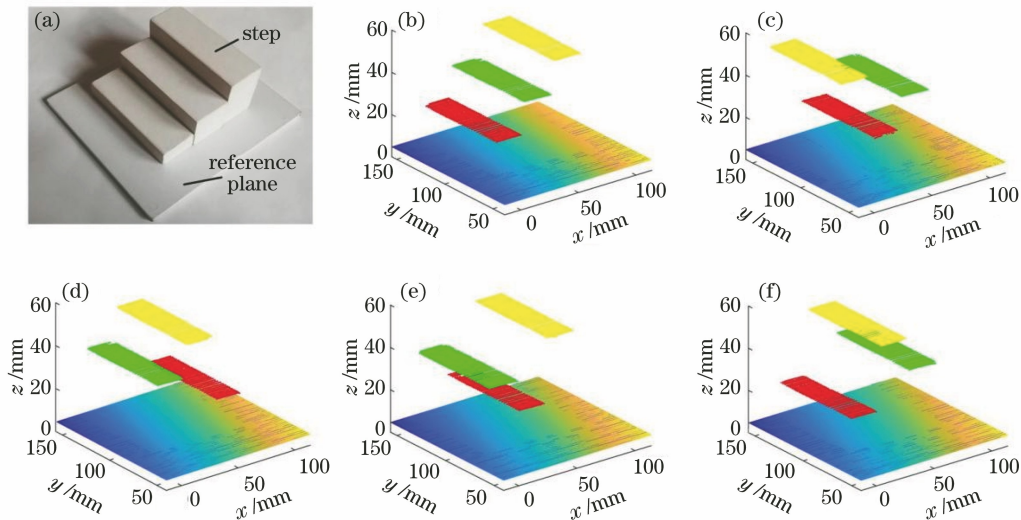


图 8 台阶示意图和高度测量结果。(a)台阶示意图;(b)~(f)台阶不同摆放次序的测量结果

Fig. 8 Schematic diagram of steps and height measurement results. (a) Schematic diagram of steps; (b)~(f) measurement results under different arrangements of steps

表 1 台阶高度测量结果和相对误差

Table 1 Step height measurement results and relative error

Arrangement of steps	H_1/mm	$R_1/\%$	H_2/mm	$R_2/\%$	H_3/mm	$R_3/\%$
Fig. 12(b)	14.6414	-0.0695	29.4291	-0.2271	44.5262	-0.2392
Fig. 12(c)	14.6159	-0.2435	29.4595	-0.1241	44.5168	-0.2603
Fig. 12(d)	14.6198	-0.2169	29.4867	-0.0319	44.4978	-0.3029
Fig. 12(e)	14.6126	-0.2660	29.4796	-0.0559	44.5304	-0.2298
Fig. 12(f)	14.6309	-0.1411	29.4524	-0.1482	44.5089	-0.2780

5.2 复杂表面测量实验

为进一步验证所提标定方法的实用性,对具有复杂曲面特征的石膏像进行了测量,如图 9(a)所示。该石膏像的直径为 160 mm,实验中在测量范围内采集 200 个截面轮廓,测量得到的点云数据如图 9(b)所示。对点云数据进行三角剖分,以得到石膏像的三维面形,如图 9(c)所示。可以发现,被测件表面的形状信息被完整还原,并且在当前测量密度下被测件上较小的特征也能够被完整呈现,如图 9(d)所示。

5.3 误差分析

对精密陶瓷板进行测量,得到一系列二维轮廓点,采用三角剖分重建三维表面,如图 10(a)所示。可以发现,各条轮廓上点高低起伏不大,而各轮廓之间有较为明显的变化,该陶瓷板平面度的峰谷值优于 0.01 mm,相较于上述起伏变化可暂不予考虑。为进一步分析测量结果,分别统计各轮廓上点的均值和方差,如图 10(b)所示。光条中心像素坐标到相机坐标的变换为连续变换,不会引起单个轮廓上点的起伏变化。单个轮廓上点的高低变化主要由光条中心提取误差决定,该项误差主要由光条质量和中

心提取算法决定。

各条轮廓间的高低起伏变化可能是由反射镜摆角误差引起的,如图 11(a)所示。对于理想测量平面,计算光条位置时按照实际光条中心和理想光条平面方程计算。当实际激光平面相对理想位置偏左时,得到的激光轮廓存在正偏差 Δz_p 。当实际激光平面相对理想位置偏右时,计算得到的轮廓存在负偏差 Δz_n 。电机摆角误差约为 $\pm 0.01^\circ$,故反射的激光平面角度误差约为 $\pm 0.02^\circ$ 。相机光心相对被测平面的位置可由计算激光平面方程时的靶标外参得到,其中相机光心在 yoz 坐标系中的坐标为 (209, -61) mm,理想平面距 y 轴的距离为 212 mm。振镜最大摆角误差所对应的测量轮廓上下跳动误差曲线如图 11(b)所示,展示了当最大摆角误差为 $\pm 0.01^\circ$ 时,每个测量轮廓所对应的最大误差值。该最大误差值与反射激光平面和被测平面间的夹角相关,由正负摆角误差导致的正负轮廓误差变化规律基本一致,且 Δz_n 的数值略大于 Δz_p ,它们的变化范围为 0.052~0.063 mm,与图 10(b)测量得到的轮廓高低跳动误差相当,表明摆角误差对测量结果产生较为显著的影响。从另外的角度表明所提标定方

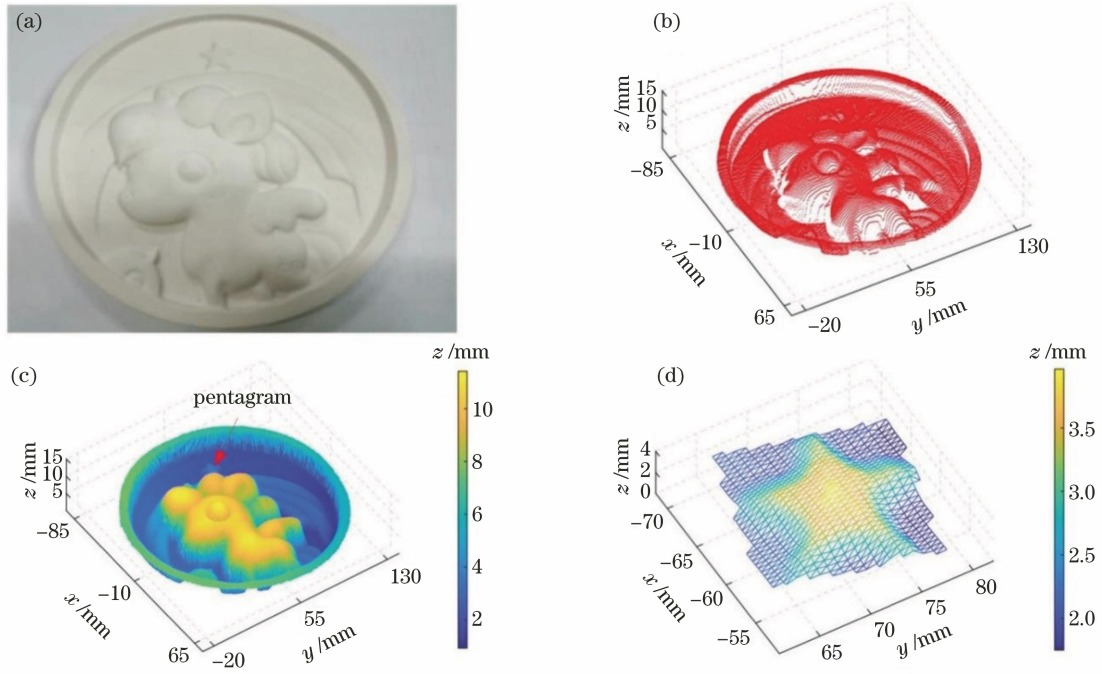


图 9 多尺度特征表面和测量结果。(a)被测表面实物图;(b)测得的点云;(c)测得的曲面;(d)五角星特征
Fig. 9 Surface with multi-scale features and measurement results. (a) Physical diagram of measured surface;
(b) measured points; (c) measured surface; (d) pentagram feature

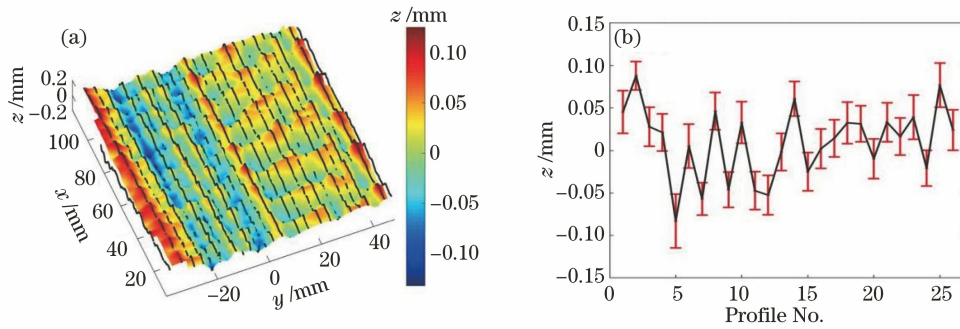


图 10 平面测量结果。(a)三维表面;(b)轮廓结果分析
Fig. 10 Measurement results of plane. (a) Three-dimensional surface; (b) profile result analysis

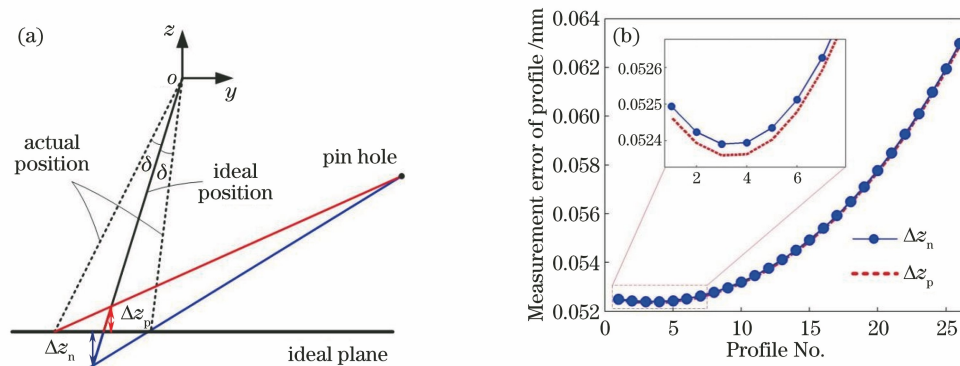


图 11 摆角误差与测量误差的关系。(a)计算原理;(b)摆角误差导致的最大测量误差
Fig. 11 Relationship between swing angle error and measurement error. (a) Computation principle;
(b) maximum measurement error induced by swing angle error

法能够实现线结构光振镜扫描系统的高精度标定,且通过提升振镜系统中角度传感器的精度,能够进一步提升测量精度。

6 结 论

提出了一种通用线结构光振镜扫描测量系统标定方法。通过直接建立反射激光平面系数与振镜摆角间的关系模型,得到任意振镜摆角所对应的激光平面方程,再结合相机内参数和畸变参数,实现轮廓坐标的求解。所建立的反射激光平面系数与振镜摆角间的关系模型基于各元件间的安装关系,考虑了反射激光平面与振镜转轴间的安装误差、入射激光平面与镜面间的安装误差,能够显著降低元件间的调整难度,得到的反射激光平面方程表达式具有通用性。各表达式的待定系数采用最小二乘法求得,降低了单个激光平面标定误差对测量的影响。由实验可知,采用所提方法标定的测量系统对阶梯块测量的最大相对误差为 -0.3029% ,且能够在较大范围实现表面多尺度特征测量。通过分析平面测量结果,进一步验证了所提方法能够实现对线结构光振镜扫描测量系统的高精度标定。

参 考 文 献

- [1] Usamentiaga R, Garcia D F. Multi-camera calibration for accurate geometric measurements in industrial environments [J]. *Measurement*, 2019, 134: 345-358.
- [2] Guo X Z, Shi Z Y, Yu B, et al. 3D measurement of gears based on a line structured light sensor [J]. *Precision Engineering*, 2020, 61: 160-169.
- [3] Li Y H, Zhou J B, Mao Q W, et al. Line structured light 3D sensing with synchronous color mapping[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(17): 9796-9805.
- [4] 王乐, 方玥, 王胜春, 等. 基于偏振融合的钢轨廓形线结构光成像方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(22): 2211001.
Wang L, Fang Y, Wang S C, et al. Line-structured light imaging method of rail profile based on polarization fusion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(22): 2211001.
- [5] Lü X, Gu D X, Wang Y D, et al. Feature extraction of welding seam image based on laser vision [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(11): 4715-4724.
- [6] 韩家杰, 周建平, 薛瑞雷, 等. 线结构光管道焊缝表面形貌重建与质量评估[J]. *中国激光*, 2021, 48(14): 1402010.
Han J J, Zhou J P, Xue R L, et al. Surface morphology reconstruction and quality evaluation of pipeline weld based on line structured light [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(14): 1402010.
- [7] Mao Q Z, Cui H, Hu Q W, et al. A rigorous fastener inspection approach for high-speed railway from structured light sensors [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 143: 249-267.
- [8] 王乐, 周谦, 方玥, 等. 基于线结构光的钢轨扣件紧固状态检测方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(16): 1612002.
Wang L, Zhou Q, Fang Y, et al. Detection method of rail fastener fastening state based on line structured light [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(16): 1612002.
- [9] Zhou F Q, Zhang G J. Complete calibration of a structured light stripe vision sensor through planar target of unknown orientations [J]. *Image and Vision Computing*, 2005, 23(1): 59-67.
- [10] 周京博, 李玥华, 秦志英, 等. 基于参考靶标的线结构光传感器标定 [J]. *光学学报*, 2019, 39(4): 0412005.
Zhou J B, Li Y H, Qin Z Y, et al. Calibration of line structured light sensor based on reference target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(4): 0412005.
- [11] 解则晓, 张安祺. 超大尺度线结构光传感器内外参数同时标定 [J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0315001.
Xie Z X, Zhang A Q. Simultaneous calibration of the intrinsic and extrinsic parameters of ultra-large-scale line structured-light sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0315001.
- [12] Apolar J, Rodríguez M. Three-dimensional microscope vision system based on micro laser line scanning and adaptive genetic algorithms [J]. *Optics Communications*, 2017, 385: 1-8.
- [13] Xiao J, Hu X G, Lu W X, et al. A new three-dimensional laser scanner design and its performance analysis [J]. *Optik*, 2015, 126(7/8): 701-707.
- [14] Ahmed H, Mohsin A, Hong S C, et al. Robotic laser sensing and laser mirror excitation for pulse-echo scanning inspection of fixed composite structures with non-planar geometries [J]. *Measurement*, 2021, 176: 109109.
- [15] Chi S K, Xie Z X, Chen W Z. A laser line auto-scanning system for underwater 3D reconstruction [J]. *Sensors*, 2016, 16(9): 1534.
- [16] Yu C Y, Chen X B, Xi J T. Modeling and calibration of a novel one-mirror galvanometric laser scanner [J]. *Sensors*, 2017, 17(12): 164.
- [17] Mao Y, Zeng L C, Jiang J, et al. Plane-constraint-based calibration method for a galvanometric laser

- scanner [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, 10(5): 1-11.
- [18] Yang S M, Yang L L, Zhang G F, et al. Modeling and calibration of the galvanometric laser scanning three-dimensional measurement system [J]. *Nanomanufacturing and Metrology*, 2018, 1(3): 180-192.
- [19] 杨林林, 杨树明. 基于神经网络的振镜式线结构光三维测量系统的标定[J]. *工具技术*, 2019, 53(10): 97-102.
- Yang L L, Yang S M. Calibration of galvanometric line-structured light based on neural network [J]. *Tool Engineering*, 2019, 53(10): 97-102.
- [20] 王腾, 杨树明, 李述胜, 等. 振镜激光扫描测量系统误差分析与补偿[J]. *光学学报*, 2020, 40(23): 2315001.
- Wang T, Yang S M, Li S S, et al. Error analysis and compensation of galvanometer laser scanning measurement system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(23): 2315001.
- [21] Li Y H, Zhao B C, Zhou J B, et al. A universal method for the calibration of swing-scanning line structured light measurement system [J]. *Optik*, 2021, 241: 166930.
- [22] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.