

基于共面法的结构光自扫描测量系统参数标定方法

解则晓 迟书凯* 王晓敏 潘成成 魏 征

中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266100

摘要 针对结构光自扫描测量系统参数标定问题,提出了一种基于共面法的高精度标定方法,能够同时标定系统的内外参数。建立了相机和系统模型,采用张正友方法标定相机和平面棋盘靶标内外参数,针对系统标定需求完成了靶标位置规划,在同一光平面下变换靶标位姿获取共面光条中心点,利用多组中心点数据分别求解各光平面方程。由于多个平面交线不唯一,定义了优化目标函数对振镜转轴在相机坐标系下的表达进行优化求解,求得振镜坐标系与相机坐标系的转换矩阵完成标定。该方法标定过程简单,算法运算量小,便于现场标定。结果表明,标定方法具有较高精度,能够满足测量要求。

关键词 测量; 结构光; 自扫描; 标定; 棋盘靶标; 单应性

中图分类号 TG806; TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0308003

Calibration Method for Structure-Light Auto-Scanning Measurement System Based on Coplanarity

Xie Zexiao Chi Shukai Wang Xiaomin Pan Chengcheng Wei Zheng

Engineering College, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China

Abstract For the issue of structure-light auto-scanning measurement system parameters calibration, a high precision calibration method based on coplanarity is proposed, and the internal and external parameters of the system are calibrated simultaneously. The camera model and the system model are established. The intrinsic and extrinsic parameters of camera and the planar chessboard target are calibrated with the Zhang method. In view of the system calibration requirements, the target location planning is completed, and the position and orientation of the target is changed in the same light plane to obtain coplanar light stripe center points. The light plane equations are solved separately in several light stripe center point data groups. Considering that cross lines of several light planes are more than one, an optimized objective function is defined to solve and optimize the galvanometer shaft expression in the camera coordinate system. The transformation matrix from galvanometer coordinate system to camera coordinate system is obtained. The calibration process is simple, and computation of the algorithm is small. It is suitable for calibration on spot. Results show that the high precision calibration method is able to meet the requirement.

Key words measurement; structure-light; auto-scanning; calibration; chessboard target; homography

OCIS codes 120.5800; 100.6890; 130.6010; 140.6910

1 引言

近年来,随着工业生产对机器视觉测量技术需求的增长,结构光测量在工业检测、逆向工程等三维测量领域得到了越来越广泛的应用^[1-2]。常用的结构光测量系统从结构形式上一般由相机与激光器组成,工作时常用三坐标测量机等精密仪器作为载体控制其运动完成对目标的扫描测量^[3],或将结构光系统固定,对经过其视场范围的对象进行测量^[4]。区别于传统的结构光测量系统,结构光自扫描测量系统^[5-6]加入了振镜,增加

收稿日期: 2015-10-10; 收到修改稿日期: 2015-11-09

基金项目: 国家自然科学基金(51509229,61571408)

作者简介: 解则晓(1968—),男,博士,教授,主要从事机器视觉、机器人控制方面的研究。E-mail: xiezexiao@ouc.edu.cn

*通信联系人。E-mail: chishukai@163.com

了系统自身的运动能力,扩展了系统的测量范围。

结构光测量系统的标定过程是求解空间被测点三维坐标、相机采集的图像信息以及结构光信息三者的函数关系的过程,这一函数关系的参数包括了相机参数、结构光传感器参数、相机坐标系与世界坐标系的转换关系等。近年来,国内外众多学者和科研机构针对传统的结构光测量系统的标定相关问题开展了大量的研究^[7-8],从标定所使用的靶标形式上看可以分为三维靶标^[9]和二维靶标^[10-11]两种,从所采用的方法上分类大体可以分成基于矩阵变换的摄影测量法^[12-13]、基于几何关系的三角测量法和多项式拟合法^[14]。由于结构光自扫描测量系统是一种新的结构形式,振镜的加入使得系统需要增加对振镜坐标系的标定,而标定操作是一项系统工作,需要保证系统的整体精度,目前针对结构光自扫描测量系统的整体标定算法研究还未见报道。

本文采用平面棋盘靶标对系统内外参数进行标定。建立结构光自扫描系统数学模型,包括建立相机模型和系统坐标系,列出了需要通过系统标定求取的所有未知参数;在第3节中提出了系统参数的标定方法,激光平面与靶标平面相交形成光条,利用单应性原理求取光条中心点在相机坐标系下的坐标并拟合光平面,计算相机坐标系与振镜坐标系的转换矩阵;第4节给出了实验结果和分析。

2 系统结构与建模

2.1 系统结构

结构光自扫描测量系统由相机、激光器、振镜三部分组成,系统结构图如图1所示。振镜由计算机发出电压信号精确控制其转角,激光器发出的结构光经振镜反射之后与被测物体相交形成光条,振镜偏转角度精确可控,振镜以一定的步进角度旋转可以得到一系列的光条信息,通过对这些光条信息的计算^[15]可以获得被测物体表面的三维数据。

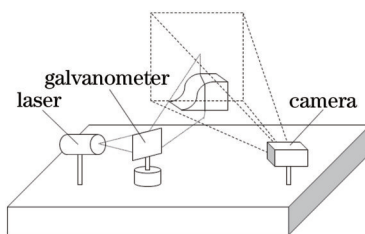


图1 结构光自扫描测量系统结构示意图

Fig.1 Structure-light auto-scanning measurement system structure schematic diagram

2.2 系统坐标系的建立

标定前首先建立系统的数学模型,系统坐标系的建立如图2所示。

- 1) 相机坐标系:以相机光心 o 为原点,光轴方向为 z 轴,建立相机坐标系 $oxyz$ 。
- 2) 像面坐标系:在 CCD 像面上建立像面坐标系 OXY ,光轴与 CCD 像面的交点为原点 O ,以平行相机坐标系两轴方向建立 X 和 Y 轴。
- 3) 图像坐标系:以图像左上角为坐标原点 o' ,像素行列方向分别为 u 、 v 轴,建立图像坐标系 $o'uv$ 。
- 4) 振镜坐标系:以振镜的旋转轴线方向为 x_z 轴,取 x_z 轴与相机坐标系 oyz 平面的交点作为振镜坐标系的原点 o_z ,取控制电压为 U_0 时的激光平面法线方向为 y_z 轴,由右手坐标系确定 z_z 轴,建立振镜坐标系 $o_zx_zy_zz_z$ 。

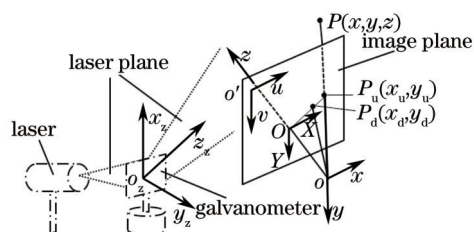


图2 系统坐标系建立示意图

Fig.2 System coordinate establishment schematic

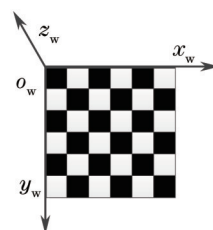


图3 相机标定时的世界坐标系

Fig.3 World coordinate system with camera calibration

5) 世界坐标系:在进行相机标定时,临时世界坐标系的建立如图3所示,以靶标左上角点为坐标系原点 o_w ,沿靶标方向横向向右建立 x_w 轴,垂直向下为 y_w 轴,右手法则确定 z_w 轴。在进行系统标定时,将世界坐标系与振镜坐标系重合,因此标定计算可转化成求解振镜坐标系与相机坐标系的转换矩阵。

2.3 相机模型参数

根据透视投影原理^[16]建立相机模型如图2所示。根据欧式坐标系间的刚性变换关系,从世界坐标系到相机坐标系的转换关系可以表示为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + \mathbf{T} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}. \quad (1)$$

又由透视投影原理,从相机坐标系到像面坐标系的关系为

$$\rho \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad (2)$$

从像面坐标系到图像坐标系的关系为

$$\begin{cases} u = N_x X + u_0 \\ v = N_y Y + v_0 \end{cases}, \quad (3)$$

式中 N_x 、 N_y 分别为像面单位长度所对应的像素数,为已知量。 (u_0, v_0) 为主点坐标。

如图2所示, P 点为被测物体表面一点,其对应像面点应为 $P_u(X_u, Y_u)$,考虑畸变影响其实际坐标为 $P_d(X_d, Y_d)$,实际像面坐标与理想像面坐标的关系为

$$\begin{cases} X_u = X_d(1 + k_1 q^2 + k_2 q^4) \\ Y_u = Y_d(1 + k_1 q^2 + k_2 q^4) \end{cases}, \quad (4)$$

式中 $q^2 = X_d^2 + Y_d^2 = [(u_d - u_0)/N_x]^2 + [(v_d - v_0)/N_y]^2$, (u_d, v_d) 为考虑畸变影响的主点坐标, k_1 和 k_2 为2、4阶畸变系数。

联立(1)、(2)和(3)式可以得到理想相机模型为

$$\rho \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fN_x r_1 + r_7 u_0 & fN_x r_2 + r_8 u_0 & fN_x r_3 + r_9 u_0 & fN_x t_x + t_x u_0 \\ fN_y r_4 + r_7 v_0 & fN_y r_5 + r_8 v_0 & fN_y r_6 + r_9 v_0 & fN_y t_y + t_y v_0 \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

(4)和(5)式中,需要通过相机标定求取的未知参数包括焦距 f ,主点坐标 u_0 和 v_0 ,畸变系数 k_1 和 k_2 ,旋转矩阵项 r_1, r_2, \dots, r_9 ,平移矩阵项 t_x, t_y 和 t_z 。

2.4 系统模型参数

结构光自扫描测量系统完成测量任务需要获取被测目标各点的世界坐标,设振镜反射后的光平面在振镜坐标系下的方程为 $Ax_z + By_z + Cz_z + D = 0$ 。由振镜坐标系的定义易知,在振镜控制电压为 U_0 时出射光平面方程为 $y_z = 0$ 。振镜转角与控制电压为线性关系,设单位伏特电压对应移动的角度为 γ ,当控制电压为 U 时,入射激光平面转过的角度为 $\omega = (U - U_0)\gamma$,由折射定律易知出射光平面转过的角度为 $\varphi = 2\omega$,出射光平面在振镜坐标系下的方程为

$$y_z \cos \varphi + z_z \sin \varphi = 0. \quad (6)$$

相机坐标系与振镜坐标系的转换关系为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x_z \\ y_z \\ z_z \end{bmatrix} + \mathbf{T} = \begin{bmatrix} r_{z1} & r_{z2} & r_{z3} \\ r_{z4} & r_{z5} & r_{z6} \\ r_{z7} & r_{z8} & r_{z9} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_z \\ y_z \\ z_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_z & y_z & z_z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_z & y_z & z_z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_z & y_z & z_z & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{M}, \quad (7)$$

式中参数矩阵 $\mathbf{M} = [r_{z1} \ \dots \ r_{z9} \ t_1 \ t_2 \ t_3]^T$ 。

由图2小孔成像模型的关系为

$$\begin{cases} \frac{z}{f} = \frac{x}{u} \\ \frac{z}{f} = \frac{y}{v} \end{cases} \quad (8)$$

联立(6)、(7)和(8)式可得

$$\begin{cases} u(r_7x_z + t_1 + r_8y_z + t_2 + r_9z_z + t_3) = f(r_1x_z + t_1 + r_2y_z + t_2 + r_3z_z + t_3) \\ v(r_7x_z + t_1 + r_8y_z + t_2 + r_9z_z + t_3) = f(r_4x_z + t_1 + r_5y_z + t_2 + r_6z_z + t_3) \\ y_z \cos \varphi + z_z \sin \varphi = 0 \end{cases} \quad (9)$$

求解(9)式可以得到目标点在振镜坐标系下的坐标。因此,要完成系统的整体标定所需的所有参数包括相机内参数焦距 f , 主点坐标 u_0 和 v_0 , 畸变系数 k_1 和 k_2 , 系统参数矩阵 \mathbf{M} 。

3 系统标定

在系统测量范围内不同位置和角度获取完整靶标图像和光条图像,采用张正友方法^[17]完成相机标定。通过相机标定可以求得相机内参数 f 、 u_0 、 v_0 、 k_1 和 k_2 , 由于世界坐标系建立在靶标平面,因此标定过程中每个不同位姿下靶标都会得到一组相应的变换矩阵,记第 i 个位置得到的变换矩阵为 \mathbf{R}_i 、 \mathbf{T}_i 。

进行结构光标定时,靶标位置规划依照以下步骤:

- 1) 振镜控制电压为 U_0 时保持激光平面出射角度不变,在系统测量范围内不同位置和角度放置靶标,分别获取不少于 2 幅靶标图像及相应位置的激光光条图像;
- 2) 改变控制电压,在每次改变光平面角度后获取 2 幅以上的靶标图像及相应激光光条图像;
- 3) 在相机视场不同位置以不同姿态放置靶标依次获取多幅靶标图像。

所获取的靶标图像用于标定相机内参数和相机与靶标的外参数,步骤 1)和 2)中所获取的激光光条图像用于标定系统参数,即相机坐标系与振镜坐标系的转换矩阵。系统标定如图 4 所示。

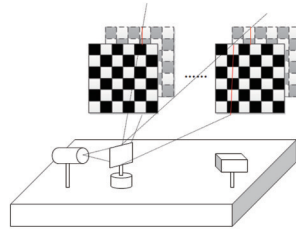


图 4 系统标定示意图

Fig.4 System calibration schematic

3.1 相机参数标定

用 OPENCV 中的 cvCalibrateCamera2()函数^[18]求取相机内参数,包括相机焦距 f , 主点坐标 u_0 和 v_0 , 以及畸变系数 k_1 和 k_2 。此外标定相机内参数过程中所获得的相机与靶标的外参数 \mathbf{R}_i 、 \mathbf{T}_i 用于系统转换矩阵的计算。

3.2 结构光自扫描系统参数标定

采取重心法对图像光条进行提取,可以得到各光条中心点的图像坐标。由相机标定时世界坐标系的定义可知靶标平面上所有点 $z_w = 0$, 而所有光条中心点都位于靶标平面,因此(5)式可改写为

$$\rho \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fN_x r_{i1} + r_{i7} u_0 & fN_x r_{i2} + r_{i8} u_0 & fN_x r_{i3} + r_{i9} u_0 & fN_x t_{ix} + t_{iz} u_0 \\ fN_y r_{i4} + r_{i7} v_0 & fN_y r_{i5} + r_{i8} v_0 & fN_y r_{i6} + r_{i9} v_0 & fN_y t_{iy} + t_{iz} v_0 \\ r_{i7} & r_{i8} & r_{i9} & t_{iz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中 $r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{i9}, t_{ix}, t_{iy}$ 和 t_{iz} 为第 i 个位置处的靶标与相机外参数矩阵 \mathbf{R}_i 、 \mathbf{T}_i 元素。根据(1)式有

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{R}_i \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + \mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} r_{i1} & r_{i2} & r_{i3} \\ r_{i4} & r_{i5} & r_{i6} \\ r_{i7} & r_{i8} & r_{i9} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_{ix} \\ t_{iy} \\ t_{iz} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

联合(10)和(11)式求解可以得到光条中心点在相机坐标系下的坐标,用最小二乘法拟合光平面,求取其在相机坐标系下的表达。

设光平面方程为 $z = Ax + By + C$, 由最小二乘法可求得平面参数 (A, B, C) , 平面法向量 $\mathbf{n} = (j, k, l)$ 可由

$$\begin{cases} j = \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2 + 1}} \\ k = \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2 + 1}} \\ l = \frac{-1}{\sqrt{A^2 + B^2 + 1}} \end{cases} \quad (12)$$

得到。设振镜坐标系 x_z 轴方程为 $\frac{x-x_0}{a} = \frac{y-y_0}{b} = \frac{z-z_0}{c}$, 用最小二乘法对得到的所有平面方程拟合求解可得到 x_z 轴上的一点 (x_0, y_0, z_0) 。由振镜坐标系定义可知,光平面法向量与振镜转轴方向垂直,以光平面法向量与振镜转轴方向向量点乘值为优化目标,定义目标函数为 $F = \sum_{i=1}^n (j_i, k_i, l_i) \cdot (a, b, c)$, 取任意两光平面交线 $|\mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_2|$ 为初值对 F 进行优化使其值最小,可以得到 x_z 轴方向向量 (a, b, c) 。

实验首个光平面的振镜控制电压为 U_0 , 由振镜坐标系定义可知 y_z 轴的向量表示为 $|\mathbf{n}_1|$, z_z 轴的向量表示为 $x_z \times y_z$, o_z 在相机坐标系下的坐标为 $(0, y_0 - \frac{b}{a}x_0, z_0 - \frac{c}{a}x_0)$ 。将原点坐标、三坐标轴的单位向量代入(7)式可求得参数矩阵 \mathbf{M} 。

4 实验与分析

标定实验系统如图5所示,标定完成后通过对标准球的扫描测量实验完成标定结果验证。

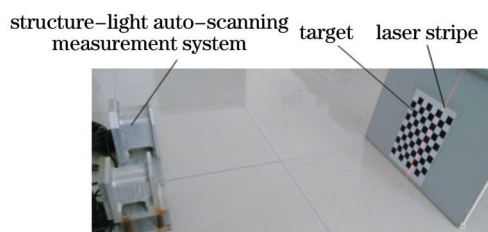


图5 标定实验系统

Fig.5 Calibration experiment system

4.1 系统标定实验

结构光自扫描测量装置由一个工业相机、振镜系统及激光器组成。系统采用了日本 Watec 公司生产的 WAT-902B 工业级低照度模拟相机和 Computar 1214-MP 百万像素级镜头。振镜系统选用北京世纪索尼公司的 TS8720 光学振镜,激光器选用加拿大 Stocker Yale 公司的 LASIRIS 系列线性激光器。系统结构如图6所示。



图6 结构光自扫描测量装置

Fig.6 Structure-light auto-scanning measurement equipment

相机 CCD 传感器阵列分辨率为 $752 \text{ pixel} \times 582 \text{ pixel}$, 像面单位像素尺寸为 $8.6 \mu\text{m} \times 8.3 \mu\text{m}$, 拍摄得到的图像分辨率为 $768 \text{ pixel} \times 576 \text{ pixel}$, 可以得到

$$\begin{cases} N_x = \frac{768}{752 \times 8.6 \times 10^{-3}} = 118.7530952 \\ N_y = \frac{576}{582 \times 8.3 \times 10^{-3}} = 119.2398459 \end{cases} \quad (13)$$

振镜系统由计算机中的 DA 转换卡输出 -10 V~+10 V 电压信号控制,可以完成±20°范围的扫描,控制精度可以达到 8 μrad。控制振镜在同一角度,在视场内移动靶标至 3 个不同位置,设置图像采集卡的参数为合适值分别采集包含和不包含光条数据的 3 幅图像(实验中采集光条数据时对比度设置为-200,采集靶标数据时对比度为 200,两种情况下的增益设置为 800,偏移量为-120),控制振镜转过一定角度再次移动靶标至 3 个不同位置并完成图像采集,可以得到分属 2 个光平面的激光条数据和 6 幅不同位姿的靶标数据。继续移动靶标完成 10 个不同位姿的图像采集。

经过标定,得到的各系统参数为

$$\begin{cases} f = 13.017298 \text{ mm} \\ (u_0, v_0) = (383.640295, 243.365097) \\ R = \begin{bmatrix} 0.999950 & 0.005330 & 0.008475 \\ -0.008121 & 0.926883 & 0.375262 \\ -0.005855 & -0.375312 & 0.926880 \end{bmatrix} \\ T = \begin{bmatrix} -1.601639 \\ -340.391432 \\ 198.596298 \end{bmatrix} \\ k_1 = 0.002058 \end{cases} \quad (14)$$

4.2 标定结果验证

在完成了系统的标定工作后,对图 7 所示的半径为 20.02575 mm 的标准球进行测量,估计并分析系统测量误差,验证标定结果。

将标准球放置在系统测量范围内的不同位置完成 10 次测量,球心坐标的 z_z 轴方向沿结构光系统工作深度方向,它的值可以反映球心到系统世界坐标系原点的距离。10 次测量的球心 z_z 坐标值范围约为 617~1000 mm。图 8 为不同位置测得的点云拟合球体半径与标准球真实半径的对比,测得的标准球半径值范围为 20.0056~20.0771 mm,误差值范围为-0.02015~0.05125 mm。



图 7 实验用标准球

Fig.7 Standard ball in experiment

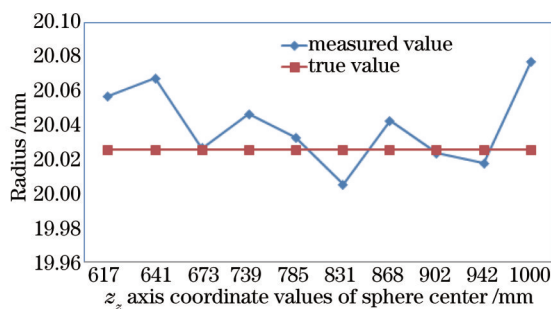


图 8 不同位置测得的标准球半径

Fig.8 Standard ball radius measurements in different locations

用 imageware 软件对 10 次不同位置上测得的点云数据拟合分析得到点云在拟合球面的正负法向量方向上的最大偏差值的分布图如图 9 所示。其中,球心 z_z 坐标值为 868 时的点云误差分布图如图 10 所示。

4.3 误差分析

系统误差分析所采用的指标为点云拟合球的半径以及球面点云数据的误差,这些都是从大量的离散数据点得到的。造成系统测量误差的主要原因是标定误差,在实际测量时以下因素也会对测量造成误差:

- 1) 相机、激光器参数影响。不同的外部光环境将引起图像对比度、清晰度各方面差异,需对应调整相机增益、偏移量、对比度等参数以及激光强度以改善光条质量从而提高测量精度。
- 2) 线结构光与球面角度影响。当线结构光与球面切线夹角较小时,线结构光与球面相交形成的光条宽

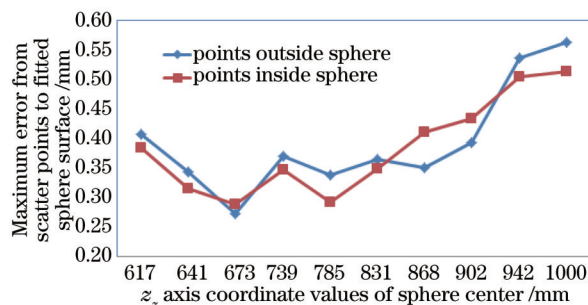


图9 不同位置测得的点球面法向误差

Fig.9 Sphere normal error of point cloud in different locations

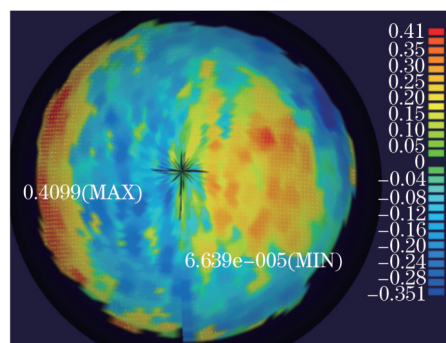


图10 球面误差分布图

Fig.10 Spherical error schematic

度变大长度变小,这对光条中心的提取有较大的影响,从点云误差图容易看到误差较大的点出现在球面两侧位置。

3) 目标在相机视场中的位置影响。系统的测量范围为振镜运动范围与相机视场相交的区域,当被测目标位于测量范围的极限位置时,目标像素位于相机采集图像的边缘,测量精度受到影响。从实验结果来看,当球心 z_s 值较大或较小时测量误差较大。

5 结 论

针对结构光自扫描系统特性提出的基于平面棋盘靶标的标定方法,利用单应性原理求解振镜坐标系与相机坐标系的转换矩阵,从而完成系统标定。标定方法操作简便,运算量小,能够同时完成系统的内外参数的标定。标定及测量验证实验结果表明利用该方法标定的结构光自扫描测量系统在较远的测量距离(600~1000 mm)对较小目标(半径为 20.02575 mm 的标准球)的测量,其测量结果精度可以满足实际测量需求,标定方法可行。

参 考 文 献

- 1 Hsieh T H, Jywe W Y, Huang H L, *et al.*. Development of a laser-based measurement system for evaluation of the scraping workpiece quality[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(8): 1045-1053.
- 2 Niola V, Rossi C, Savino S. A new real-time shape acquisition with a laser scanner: First test results[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2010, 26(6): 543-550.
- 3 Bešić I, Van Gestel N, Kruth J P, *et al.*. Accuracy improvement of laser line scanning for feature measurements on CMM[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(11): 1274-1280.
- 4 Xie Z, Zhu W, Zhang Z, *et al.*. A novel approach for the field calibration of line structured-light sensors[J]. *Measurement*, 2010, 43(2): 190-196.
- 5 Shang Dawei, Xie Zexiao, Wang Haoyuan, *et al.*. Research of a laser projector self-scanning measurement system[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Magazine*, 2010, 27(10): 30-33.
商大伟, 解则晓, 王浩元, 等. 一种线结构光自扫描测量系统的研究[J]. *机电工程*, 2010, 27(10): 30-33.
- 6 Xie Zexiao, Li Xuyong, Xin Shaohui, *et al.*. Underwater line structured-light self-scan three-dimension measuring technology[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(8): 2010-2014.
解则晓, 李绪勇, 辛少辉, 等. 水下线结构光自扫描三维测量技术[J]. *中国激光*, 2010, 37(8): 2010-2014.
- 7 Su Xianyu, Zhang Qican, Chen Wenjing. Three-dimensional imaging based on structured illumination[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0209001.
苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209001.
- 8 Zou Yuanyuan, Zhao Mingyang, Zhang Lei. Direct calibration method of laser stripe vision sensor based on gauge block[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(11): 1108002.
邹媛媛, 赵明扬, 张雷. 基于量块的线结构光视觉传感器直接标定方法[J]. *中国激光*, 2014, 41(11): 1108002.
- 9 Wei Z, Zhang G, Xu Y. Calibration approach for structured-lighted-stripe vision sensor[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*,

- 2005, 41(2): 210-214.
- 10 Xu Li, Zhang Zhijiang. Error propagation analysis of structured light system[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(2): 306-313.
许 丽, 张之江. 结构光测量系统的误差传递分析[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(2): 306-313.
- 11 Chen Tianfei, Zhao Jibin, Wu Xiang. New calibration method for line structured light sensor based on planar target[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 35(1): 0112004.
陈天飞, 赵吉宾, 吴 翔. 基于共面靶标的线结构光传感器标定新方法[J]. 光学学报, 2014, 35(1): 0112004.
- 12 Zhang S, Huang P S. Novel method for structured light system calibration[J]. Optical Engineering, 2006, 45(8): 083601.
- 13 Falcao G, Hurtos N, Massich J. Plane-based calibration of a projector-camera system[J]. VIBOT Master, 2008, 9(1): 1-12.
- 14 Liu Shuntao, Luo Huafen, Chen Xuemei, *et al.*. Review of calibration method for structured light measurement[J]. Laser Technology, 2015, 39(2): 252-258.
刘顺涛, 骆华芬, 陈雪梅, 等. 结构光测量系统的标定方法综述[J]. 激光技术, 2015, 39(2): 252-258.
- 15 Cai Huaiyu, Feng Zhaodong, Huang Zhanhua. Centerline extraction of structured light stripe based on principal component analysis[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0308006.
蔡怀宇, 冯召东, 黄战华. 基于主成分分析的结构光条纹中心提取方法[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0308006.
- 16 Xie Z, Zhang C, Zhang Q. A simplified method for the extrinsic calibration of structured-light sensors using a single-ball target[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(11): 1197-1203.
- 17 Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- 18 Gary Rost Bradski. Learning OpenCV[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009: 427-432.
盖瑞·罗斯特. 学习 OpenCV[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 427-432.

栏目编辑: 张 雁