

文章编号 1004-924X(2016)08-1861-10

球形靶标中心成像点的高精度定位

刘书桂*, 宋宣晓, 韩振华

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要:为提高球形靶标中心在像平面上成像点的定位精度,研究了球形靶标成像理论及球心成像点定位方法。建立了空间球在摄像机系统下的投影模型,结合空间解析几何理论,证明了球形靶标的透视投影特性。推导出了球心成像点坐标的精确表达式,并结合测量实际给提出了球心成像点的高精度定位方法。利用仿真实验建立了球心投影畸变误差模型并分析了相关影响因素。最后,结合陶瓷标准球进行了视觉系统位姿参数标定实验。结果表明,该定位方法求得的空间球球心重投影误差比传统的球心成像坐标定位方法产生的重投影误差平均减少了 36%,位姿参数稳定性相对提高了 40%。得到的结果验证了该球形靶标中心成像点定位方法精度高,鲁棒性强,可应用于基于球形靶标的视觉标定或测量中。

关键词:球形靶标;视觉测量;球心成像定位;透视变换;相机标定

中图分类号:TP391;TP242.6 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162408.1861

High-precision positioning of projected point of spherical target center

LIU Shu-gui*, SONG Xuan-xiao, HAN Zhen-hua

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

* Corresponding author, E-mail: sgliu@tju.edu.cn

Abstract: To improve the positioning precision of the projected point for a spherical target center, the imaging theory of spherical target and positioning method of the spherical target center were investigated. By establishing the imaging model of spherical target and combining spatial analytic geometry theory, the perspective projection properties of spherical target were verified and an exact expression for the position of projection point of sphere center was deduced. Finally, by combining with an actual measurement, the precision positioning method for the projected point of spherical target center was given. Furthermore, an error model for projected spherical central distortion was established on the basis of the simulation experiment, and corresponding effect factors were analyzed. With the use of a ceramic standard ball, calibration experiments of the pose parameters of a vision system were implemented. It shows that the re-projected error of the spherical target center from the proposed method has less 36% averagely than that of the traditional method, and the stability of the pose parameters is

收稿日期:2016-04-27;修订日期:2016-06-14.

基金项目:天津市自然科学基金重点项目(No. 13JCZDJC34500);国防科工局技术基础渠道科研项目(No. JSJL2014206B001)

increased by 40% relatively. These results verify that the proposed positioning method for the projected point of spherical target center has high precision and robustness, and it can be widely used in visual calibration or measurement based on spherical targets.

Key words: spherical target; visual measurement; positioning of spherical center projection; perspective transformation; camera calibration

1 引言

随着现代化测量技术的不断发展,基于机器视觉的测量应用越来越广,这得益于其精度高、非接触、效率高等优点^[1]。在利用视觉系统进行高精度测量之前,必须精确地标定相机参数,因为标定精度直接影响系统的测量精度。球形靶标由于轮廓连续性好、对拍摄角度要求低、能适应一定的遮挡^[2]以及视觉测量特性良好,所以常常用来标定视觉系统参数^[3-5]。

文献[3]提出一种基于三坐标测量机(CMM)和标准球的相机内参标定法,通过将球靶标放在CMM测量平台上,相机由CMM测量臂带动进行精准位移并摄取球图像完成标定。在相机外参数即相机坐标系和其他坐标系的位姿转换关系标定中,球靶标也有着广泛应用,例如在多相机系统标定中,相机光轴间常常存在一定夹角^[6],利用球作为标定靶标,可以弥补平面靶标在标定中由于摆放位置或姿态导致的成像特征点提取性较差、定位精度低的缺陷,提升相机间位姿关系的标定精度。此外,在智能防碰撞CMM系统^[7-8]中,球形靶标可用于标定相机坐标系和CMM坐标系之间的旋转平移关系,通过拍摄若干幅CMM坐标系下精确定位的球并提取其中心像点位置,然后基于透视变换模型即可求得两坐标系之间的变换关系。

在利用球形靶标进行视觉标定和测量的应用中,球形靶标中心成像点的定位精度将直接影响系统的标定精度和测量精度。空间球在摄像系统中成像,只有当球心位于光轴上时,投影图像为标准圆,其他情况下为椭圆^[9],并且椭圆几何中心点和球心投影点并不重合,将这个偏差定义为球心投影畸变误差。然而大多数应用中,往往将空间球投影成像的椭圆中心作为球心的投影点^[3-5,8],忽略了球心投影畸变误差,这会给系统的精度造成一定的影响。文献[10]针对这种球心投

影定位误差提出了一种补偿模型,该模型是针对理想误差模型的一种近似,模型参数求解时需要提前拍摄至少6个空间位置已知的球,除此之外还要求球半径与球心到光心的距离比值在一定范围内,否则模型失效。这种方法不仅复杂、适用性差,而且精度不高。

本文通过建立空间球在摄像系统中的投影模型,结合空间解析几何相关理论,推导出球形靶标在像面上投影特性的一般性结论,提出了一种球心成像点高精度定位方法。该方法仅根据球形靶标图像的边缘信息,便可精确求出球心成像点坐标。对球心投影畸变误差模型及其影响因素进行了仿真分析,然后结合陶瓷标准球进行了视觉系统位姿参数标定实验。实验结果验证了该定位方法的可行性和正确性。

2 球形靶标成像模型

本文基于针孔成像原理建立了空间球在摄像系统中的投影模型,如图1所示。 O - XYZ 为摄像机坐标系,原点 O 为摄像机光心, OZ 为光轴, $X_U O_U Y_U$ 为像平面,记为 π ,原点 O_U 为光轴与像平面 π 的交点, X 、 Y 轴分别平行于像平面的横轴

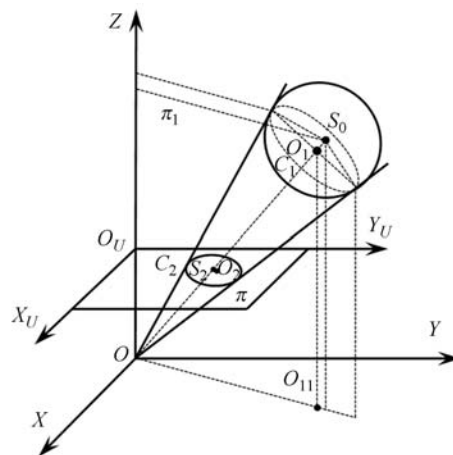


图1 空间球成像模型

Fig. 1 Imaging model of spherical target

面 π 内,椭圆 C 由椭圆 C_0 旋转 θ 得到, θ 记为转向角且 $\theta \in (-\pi, \pi]$, 逆时针为正。设 C_0 半长轴为 a , 半短轴为 b , 中心为 $(d, 0)$, 且 $d > 0$, 记为偏心距。将 C_0 绕原点旋转 θ , 结合坐标系旋转变换关系, 可得椭圆 C 方程为:

$$\frac{(x \cos \theta + y \sin \theta - d)^2}{a^2} + \frac{(y \cos \theta - x \sin \theta)^2}{b^2} = 1. \quad (4)$$

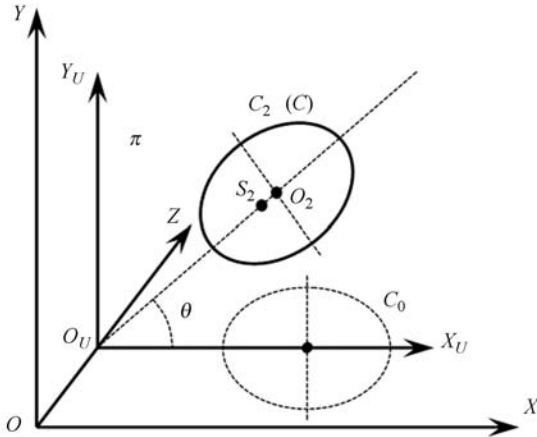


图 3 长轴所在直线过原点的椭圆

Fig. 3 Ellipse with major axis through origin

令椭圆 C 的参数为:

$$\begin{cases} a^2 = kL^2 \\ b^2 = k[L^2 - (m^2 + n^2)(L^2 + R^2)] \\ \cos \theta = \frac{m}{\sqrt{m^2 + n^2}} \\ \sin \theta = \frac{n}{\sqrt{m^2 + n^2}} \\ d = \frac{f(L^2 + R^2) \sqrt{m^2 + n^2} - (m^2 + n^2)^2}{L^2 - (m^2 + n^2)(L^2 + R^2)} \\ k = \frac{f^2 R^2}{[L^2 - (m^2 + n^2)(L^2 + R^2)]^2} \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)可得:

$$F(x, y) = a_{11} x^2 + 2a_{12} xy + a_{22} y^2 + 2a_{13} x + 2a_{23} y + a_{33} = 0,$$

其中:

$$\begin{cases} a_{11} = k[L^2 - m^2(L^2 + R^2)] \\ a_{12} = -kmn(L^2 + R^2) \\ a_{22} = k[L^2 - n^2(L^2 + R^2)] \\ a_{13} = -kfm\theta(L^2 + R^2) \\ a_{23} = -kfn\theta(L^2 + R^2) \\ a_{33} = kf^2[(m^2 + n^2)(L^2 + R^2) - R^2] \end{cases}, \quad (6)$$

比较椭圆参数式(3)和式(6)可知, 它们只差一个系数 k 。若 $k \neq 0$, 则说明 C_2 为一长轴所在直线过原点的特征椭圆。

图 2 中, $\angle OO_1 N = 90^\circ$, 则 $\angle O_1 O_1 N = \varphi$, 又 $\sin \varphi = z_0/L = \sqrt{1 - m^2 - n^2}$, 所以 $\cos \varphi = \sqrt{m^2 + n^2}$, 此时 $L^2 - (m^2 + n^2)(L^2 + R^2) = (L \sin \varphi - R \cos \varphi)(L \sin \varphi + R \cos \varphi)$ 。过 N 做 $O_1 O_1$ 的垂线 NM , 垂足为 M , 则 $L \sin \varphi - R \cos \varphi = MO_1$ 。根据成像模型, M 点应位于像平面 $z = f$ 之外, 所以 $L \sin \varphi - R \cos \varphi > f > 0$, 又因为 $\varphi \in (0, \pi/2)$, $L \sin \varphi + R \cos \varphi > 0$, 所以 $L^2 - (m^2 + n^2)(L^2 + R^2) > 0$, 由此可证明 $k \neq 0$ 。

综上所述, 空间球像面投影为一长轴所在直线经过像面中心的椭圆, 长轴所在直线为 $y = x \tan \theta$, 由式(5)可知 $\theta = \arctan(n/m)$ 。当像面中心点位于成像椭圆内时, 则它位于长轴线段上; 当像面中心点位于成像椭圆外时, 则它位于椭圆长轴的延长线上。

球心 S_0 的空间坐标为 $(x_{s_0}, y_{s_0}, z_{s_0})$, 设其投影点 S_2 坐标为 (x_{s_2}, y_{s_2}, f) , 根据投影关系有:

$$\frac{y_{s_2}}{x_{s_2}} = \frac{y_{s_0}}{x_{s_0}} = \frac{y_0}{x_0} = \frac{n}{m} = \tan \theta.$$

由于球心投影点肯定在椭圆内, 所以 S_2 位于椭圆 C_2 的长轴线段上。

证毕。

3 球形靶标中心成像点定位

上节得到的球形靶标成像特性对球心成像点定位算法具有指导意义。基于上述定理的定位思路为: 首先对球形靶标成像边缘点进行长轴所在直线过原点的特征椭圆拟合, 得到特征参数 (a, b, θ, d) ; 然后根据这些参数并结合透视投影几何模型, 求出位于长轴线段上的球心成像点位置。

如图 1 所示, O_{11} 为 O_1 在面 XOY 上的投影点, 则有 $\angle XOO_{11} = \theta$, 说明椭圆 C_2 的长轴在平面 π_1 内。设长轴两端点分别为 P, Q , 由上文知球心投影点 S_2 位于长轴线段 PQ 上, 如图 4 所示, 其中 O_2 是椭圆 C_2 的形心, 线段 PQ 的中点。

若特征椭圆参数: 半长轴 $|PO_2| = |QO_2| = a$, 转向角 θ 、偏心距 $|O_U O_2| = d$ 均已求得, 设原点 O_U 到 S_2 的距离 $|O_U S_2| = l$, 因为 OS_2 是 $\angle POQ$ 的角平分线, 则有:

$$l = f \tan \left[\frac{1}{2} \left(\arctan \frac{d+a}{f} + \arctan \frac{d-a}{f} \right) \right]. \quad (7)$$

由于球心投影点 S_2 位于直线 $y = x \tan \theta$ 上, 所以其坐标为:

$$\begin{cases} x_{S_2} = l \cos \theta \\ y_{S_2} = l \sin \theta \end{cases}. \quad (8)$$

式(7)和式(8)即为球形靶标中心投影点坐标的理论表达式。

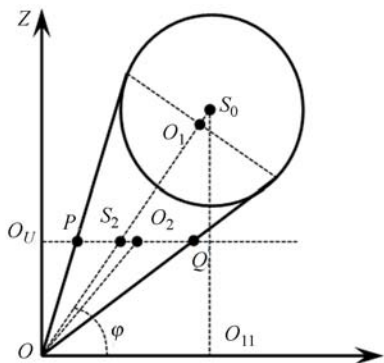


图 4 球心投影点和椭圆形心的位置关系

Fig. 4 Position relationship between projection point of sphere center and center of projection ellipse

由于特征椭圆参数的求解需要椭圆的轮廓信息, 所以靶标图像边缘提取精度直接影响到球心成像点的定位精度, 因此高精度的边缘提取至关重要。一般用于视觉系统标定的球靶标常常选取面型精度较高的陶瓷标准球, 如图 5 所示。



图 5 陶瓷标准球

Fig. 5 Ceramic standard ball

根据光学系统的成像特性, 球形靶标成像椭圆边缘灰度值变化理论上服从高斯分布^[11], 所以采用高斯插值思想提取椭圆边缘信息。首先进行像素级边缘定位, 利用 Canny 算法对目标椭圆进行边缘检测, 然后用轮廓跟踪法将边缘信息提取

出来。然后进行亚像素提取, 对 Canny 算法提取的像素级边缘点及其沿梯度方向的邻近点进行灰度值的高斯曲线拟合, 求出亚像素级边缘坐标, 并进行曲率滤波^[12], 剔除边缘噪声点, 进而实现椭圆边缘的高精度定位。图像边缘定位结果如图 6 所示。

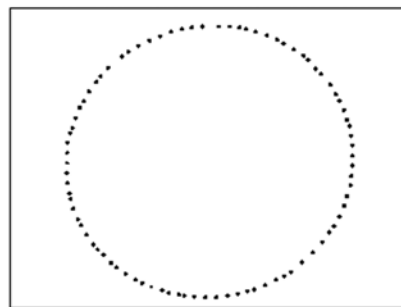


图 6 球形靶标图像边缘定位

Fig. 6 Edge positioning of spherical target image

综上所述, 球形靶标中心成像点定位方法的步骤如下:

- (1) 处理图像, 基于高斯插值算法提取椭圆边缘亚像素坐标, 并进行相机畸变补偿;
- (2) 根据边缘坐标拟合长轴所在直线过原点的特征椭圆, 标准方程为式(4), 采用基于广义逆的最小二乘算法求解特征椭圆参数 (a, b, θ, d) ;
- (3) 结合相机焦距 f , 代入式(7)和式(8)求解球心投影的精确坐标值。

4 球心投影畸变误差仿真

由于空间球与摄像机光心组成的空间曲面是一个正圆锥, 其投影图像可视为该正圆锥内任意位置内切球的图像, 所以正圆锥的形状参数半顶角 α 是影响球心投影畸变误差的一个重要参数。由上节可知, 半顶角 $\alpha = \arcsin(R_0/L_0)$, 其大小由空间球的半径和它到相机的距离决定, 此外, 空间球相对摄像机的视场位置也会影响球心投影畸变误差。

基于针孔成像模型, 分别仿真半径为 10, 20 mm 的球在距离相机 1 mm 处平面内, 以及半径为 20 mm 球在距相机 1.5 m 处平面内时, 球心投影畸变误差的情况。相机焦距 f 设为 8 mm, 仿真结果如图 7 所示, x 轴和 y 轴代表球所处的视场位置, 横纵视场角在 $[-\pi/4, \pi/4]$, z 轴代表畸

变。可以看出,仿真条件下球心投影畸变误差平均能达到 μm 级,与目前常用图像传感器的像元尺寸是同一个数量级,所以要实现精准测量和标定,球心投影畸变误差不可忽视。

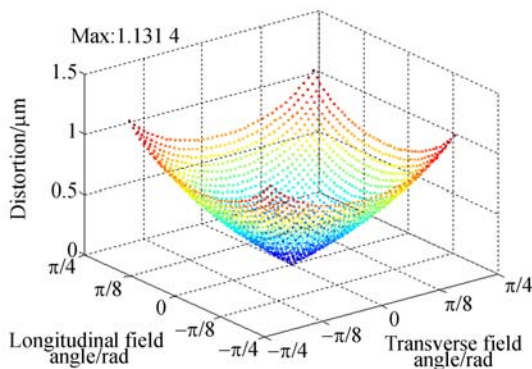
通过比较图 7(a),7(b)和 7(c)可知:

(1)当空间球大小和其与相机的距离固定时,球心投影畸变大小与其所处视场角有关,视场角越大,畸变越大;

(2)当空间球与相机距离及所处视场角一定时,球的半径越大,球心投影畸变越大;

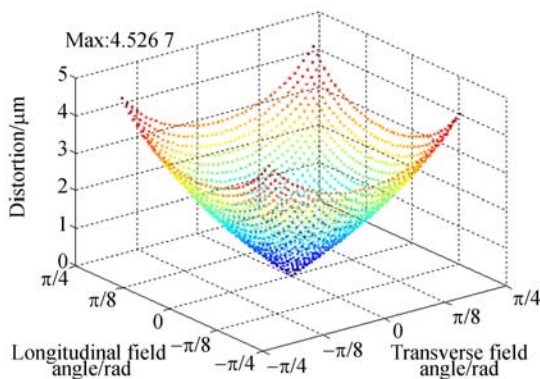
(3)当空间球尺寸及所处视场角一定时,球与相机的距离越小,球心投影畸变越大。

根据上述仿真结果,并结合基于球形靶标的测量和标定,可以得到以下结论:(1)测量或标定过程中,应当尽量减小空间球所处的视场角,一方面是由于视场角较小时,球形畸变误差本身会比较小;另一方面,相机镜头在小视场处的畸变较



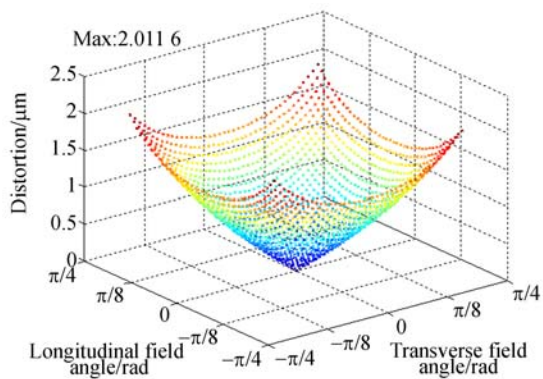
(a) 空间球半径为 10 mm,距离相机 1 m

(a) Sphere radius of 10 mm and distance to camera of 1 m



(b) 空间球半径为 20 mm,距离相机 1 m

(b) Sphere radius of 20 mm and distance to camera of 1 m



(c) 空间球半径为 20 mm,距离相机 1.5 m

(c) Sphere radius of 20 mm and distance to camera of 1.5 m

图 7 球心投影畸变误差仿真

Fig. 7 Simulation of projection distortion error of sphere center

小,有助于提高精度。(2)虽然减小球半径和增大球到相机的距离会减小球心投影畸变误差,但同时会造成空间球在像面上的投影范围过小,参与成像的有效像元数较少,图像边缘信息受噪声影响相对较大,球心投影点定位精度也将受到影响。所以当系统精度要求较高,需要对球形靶标中心投影误差进行精确补偿时,除了要尽量减小视场角外,还可以在不影响测量的条件下适当增大球半径或减小球到相机的距离,使空间球在像面上的投影范围增大,获得丰富的图像信息,以便于椭圆边缘的准确提取及球心投影点的精确定位。

5 实验

为验证本文球心投影定位方法的效果,进行了相机和三坐标测量机位姿关系的标定实验,标定系统示意图如图 8 所示。相机采用德国 Ximea 的 MQ013MG-E2,分辨率为 $1\ 280 \times 1\ 024$,镜头型号为 VTS0614-M,标称焦距为 6 mm,相机内参提前完成标定^[14];CMM 平台是海克斯康公司的 Global classic SR07-10-07,测量范围为 $700\ \text{mm} \times 1000\ \text{mm} \times 660\ \text{mm}$;靶标球采用的是直径为 25 mm 的 RENISHAW 陶瓷标准球,直径变动量小于 $0.5\ \mu\text{m}$ 。



图 8 相机和三坐标测量机位姿关系标定系统示意图
Fig. 8 Schematic diagram of calibration system for altitude relation between camera and CMM

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \cos \beta \sin \gamma & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma \\ -\sin \beta & \sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中: (α, β, γ) 为旋转角, (t_x, t_y, t_z) 为平移量。式(9)可表述为,以右手螺旋方向为正旋转 CMM 坐标系,先绕 x 轴旋转角度 α ,再绕 y 轴旋转角度 β ,最后绕 z 轴旋转角度 γ ,再沿当前坐标系平移 $(-t_x, -t_y, -t_z)$,此时 CMM 坐标系与相机坐标系重合。由于:

$$\begin{bmatrix} x_{U_i} \\ y_{U_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{C_i} \\ y_{C_i} \end{bmatrix} \frac{f}{z_{C_i}}, \quad (10)$$

其中 f 为相机焦距。联立式(9)和式(10),基于广义逆的最小二乘算法可求得相机坐标系和 CMM 坐标系之间的旋转平移关系 $[\mathbf{R} | \mathbf{T}] = (\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z)$,完成标定。

5.1 定位方法精度实验

保持 CMM 工作平台位于相机视场内,依次调整相机位姿重复 10 组标定实验,分别利用传统方法(忽略球心投影畸变误差)和本文方法定位球心投影点坐标,参与求解相机和 CMM 之间的位姿关系。

根据标定出的位姿关系,可求解出各标准球球心依次在相机坐标系下的坐标:

$$\begin{bmatrix} x_{C_i} \\ y_{C_i} \\ z_{C_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 x_{M_i} + r_2 y_{M_i} + r_3 z_{M_i} + t_x \\ r_4 x_{M_i} + r_5 y_{M_i} + r_6 z_{M_i} + t_y \\ r_7 x_{M_i} + r_8 y_{M_i} + r_9 z_{M_i} + t_z \end{bmatrix}.$$

定义标准球球心在像面上的重投影误差为:

首先,调整相机位姿使 CMM 工作区位于相机视场内,然后把标准球依次摆放于 CMM 平台上 10 个位置,使其均布于相机视场内,并用 CMM 对每个位置下的球心坐标 $(x_{M_i}, y_{M_i}, z_{M_i})$ ($i=1, 2, \dots, 10$) 进行精确的定位测量,同时拍摄各个位置下球靶标的图像,提取球心在像面的投影点坐标 (x_{U_i}, y_{U_i}) ($i=1, 2, \dots, 10$)。

设相机和 CMM 坐标系之间的旋转平移矩阵分别为 \mathbf{R}, \mathbf{T} ,球心在相机坐标系下的坐标为 $(x_{C_i}, y_{C_i}, z_{C_i})$,则有:

$$\begin{bmatrix} x_{C_i} \\ y_{C_i} \\ z_{C_i} \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x_{M_i} \\ y_{M_i} \\ z_{M_i} \end{bmatrix} + \mathbf{T}, \text{其中: } \mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix},$$

$$F_{RT} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} \sqrt{\left(\frac{x_{C_i}}{z_{C_i}} f - x_{U_i} \right)^2 + \left(\frac{y_{C_i}}{z_{C_i}} f - y_{U_i} \right)^2}.$$

计算球心重投影误差 F_{RT} ,实验结果如图 9 所示。

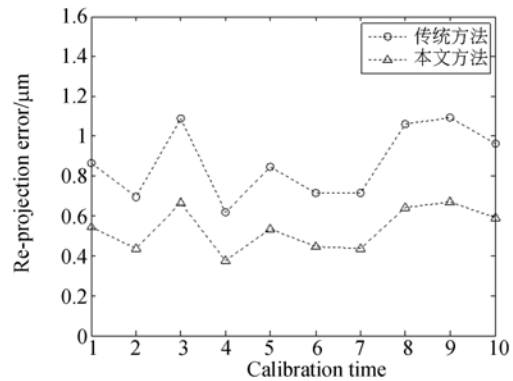


图 9 球心重投影误差

Fig. 9 Re-projection error of sphere center

从图 9 可以看出,本文的球心成像点定位方法要比传统定位方法的重投影误差小。经计算,基于传统定位方法求出的平均重投影误差为 $0.916 \mu\text{m}$,基于本文方法求出的平均重投影误差为 $0.585 \mu\text{m}$,平均误差减少了 36% 左右。

实际上, F_{RT} 大小同时反映了两坐标系之间位姿关系求解的精度高低, F_{RT} 越小,位姿参数求解精度越高。上述实验验证了在相同测量条件

下,本文定位方法的精度明显优于传统方法。

5.2 定位方法重复性实验

保持相机位姿固定,即其与 CMM 坐标系的旋转平移关系保持不变,重复 10 组标定实验,组与组之间保证球的位置随机分布。然后,分别采用本文方法和传统方法求解相机和 CMM 坐标系之间的位姿关系,并求取 10 组 $[\mathbf{R}|\mathbf{T}] = (\alpha, \beta, \gamma,$

$t_x, t_y, t_z)$ 各个参数的标准差 ($\sigma_\alpha, \sigma_\beta, \sigma_\gamma, \sigma_{t_x}, \sigma_{t_y}, \sigma_{t_z}$)。定义位姿参数稳定性为:

$$\sigma_{RT} = (\sqrt{\sigma_\alpha^2 + \sigma_\beta^2 + \sigma_\gamma^2}, \sqrt{\sigma_{t_x}^2 + \sigma_{t_y}^2 + \sigma_{t_z}^2}),$$

其中: $\sqrt{\sigma_\alpha^2 + \sigma_\beta^2 + \sigma_\gamma^2}$ 为旋转角度稳定性, $\sqrt{\sigma_{t_x}^2 + \sigma_{t_y}^2 + \sigma_{t_z}^2}$ 为平移量稳定性。标定实验结果如表 1 所示。

表 1 本文方法 RT 标定结果

Tab. 1 Calibration results of RT by proposed method

次数	α/rad	β/rad	γ/rad	t_x/mm	t_y/mm	t_z/mm
1	1.574 126	-0.013 892	-0.008 066	-94.124 026	-394.649 285	445.509 945
2	1.574 094	-0.014 236	-0.008 083	-93.922 324	-394.731 441	445.661 089
3	1.573 942	-0.013 700	-0.008 085	-94.181 636	-394.778 566	446.123 585
4	1.573 509	-0.014 054	-0.008 086	-94.038 935	-394.805 228	446.314 284
5	1.573 186	-0.014 031	-0.008 072	-94.016 987	-395.124 168	446.680 617
6	1.573 937	-0.014 415	-0.008 095	-93.972 214	-394.735 178	446.189 288
7	1.574 636	-0.013 972	-0.008 120	-94.060 876	-394.412 263	446.181 191
8	1.574 410	-0.014 229	-0.008 115	-93.989 035	-394.527 122	446.549 220
9	1.573 907	-0.014 158	-0.008 148	-93.980 177	-394.776 939	447.174 987
10	1.573 760	-0.014 076	-0.008 131	-94.038 639	-394.796 885	447.196 245
RMS	$1.722\ 5 \times 10^{-7}$	$3.991\ 2 \times 10^{-8}$	$7.294\ 3 \times 10^{-10}$	0.005 8	0.035 4	0.314 7

表 2 传统方法 RT 标定结果

Tab. 2 Calibration results of RT by conventional method

次数	α/rad	β/rad	γ/rad	t_x/mm	t_y/mm	t_z/mm
1	1.574 489	-0.013 780	-0.008 067	-94.129 119	-394.594 734	444.809 068
2	1.574 214	-0.014 467	-0.008 076	-93.909 753	-394.692 998	444.898 481
3	1.574 005	-0.013 680	-0.008 086	-94.191 872	-394.768 731	445.426 444
4	1.573 496	-0.014 041	-0.008 083	-94.051 540	-394.954 279	445.676 016
5	1.573 000	-0.014 025	-0.008 068	-94.019 230	-395.163 683	446.099 772
6	1.573 997	-0.014 471	-0.008 095	-93.872 331	-394.744 788	445.576 383
7	1.574 700	-0.013 965	-0.008 137	-94.063 272	-394.372 969	445.636 437
8	1.574 443	-0.014 233	-0.008 141	-93.988 167	-394.498 226	445.951 103
9	1.573 937	-0.014 156	-0.008 159	-93.981 207	-394.764 524	446.621 463
10	1.573 441	-0.014 068	-0.008 141	-94.045 966	-395.030 041	447.092 273
RMS	$2.815\ 5 \times 10^{-7}$	$6.655\ 7 \times 10^{-8}$	$1.236\ 7 \times 10^{-9}$	0.009 0	0.058 2	0.497 7

根据表 1 数据并结合上述稳定性指标的定义计算得出,本文定位方法 RT 参数稳定性为 $(1.768 \times 10^{-7} \text{ rad}, 0.317 \text{ mm})$,传统定位方法 RT 参数稳定性为 $(2.893 \times 10^{-7} \text{ rad}, 0.501 \text{ mm})$ 。对比两组数据,相同测量条件下,本文方法求解出的旋转参数和平移参数稳定性较传统方法均大约提升了 40%,由此表明该定位方法的鲁

棒性较强。

6 结 论

本文建立了球形靶标在摄像机系统下的透视投影模型,结合空间解析几何理论,证明了空间球像面投影为一长轴所在直线过图像中心的特征椭

圆,并且球心投影点位于长轴上;推导出球心投影点坐标的计算公式,然后结合测量实际提出球形靶标中心成像点的高精度定位方法;仿真分析了球心投影畸变误差的影响因素;最后进行了相机坐标系与CMM坐标系之间的位姿关系标定实验。实验结果表明,相同测量条件下,与传统球心投影点定位方法相比,本文方法的球心重投影平均误差减少了36%,位姿参数稳定性提高了40%。该定位方法具有精度高、鲁棒性强的优点。

参考文献:

- [1] 张业鹏,何涛,文昌俊,等. 机器视觉在工业测量中的应用与研究[J]. 光学精密工程, 2001, 9(4): 324-329.
ZHANG Y P, HE T, WEN CH J, *et al.*. Applications and research of machine vision in industrial measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(4): 324-329. (in Chinese)
- [2] 赵云涛,孙军华,陈勳,等. 基于球几何特征的摄像机内参分步标定方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(4): 558-563.
ZHAO Y T, SUN J H, CHEN X, *et al.*. Camera calibration from geometric feature of spheres [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014, 40(4): 558-563. (in Chinese)
- [3] 黄凤山,钱惠芬. 三坐标测量机驱动的摄像机标定技术[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 952-957.
HUANG F SH, QIAN H F. Camera calibration technology driven by three-coordinate measuring machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 952-957. (in Chinese)
- [4] SHEN E, HORNSEY R. Multi-camera network calibration with a non-planar target [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 1(10): 2356-2364.
- [5] ZHANG H, WONG K Y, ZHANG G. Camera calibration from images of spheres [J]. *Pattern Analysis & Machine Intelligence IEEE Transactions on*, 2007, 29(3): 499-503.
- [6] 肖志涛,张文寅,耿磊,等. 双目视觉系统测量精度分析[J]. 光电工程, 2014(2): 6-11.
XIAO ZH T, ZHANG W Y, GENG L, *et al.*. Accuracy analysis of binocular vision system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014(2): 6-11. (in Chinese)
- [7] 刘书桂,余飞,韩振华. 基于OpenCasCade的虚拟三坐标测量机碰撞检测[J]. 纳米技术与精密工程, 2016; 10. 13494/j. npe. 20150133.
LIU SH G, YU F, HAN ZH H. Collision detection of virtual coordinate measuring machine based on OpenCasCade [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2016; 10. 13494/j. npe. 20150133. (in Chinese)
- [8] 赵英剑,王建利,马新辉,等. 三坐标测量机智能技术[J]. 计量学报, 2001, 22(3): 164-167.
ZHAO Y J, WANG J L, MA X H, *et al.*. Coordinate measuring machine intelligence technology [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2001, 22(3): 164-167. (in Chinese)
- [9] 魏振忠,张广军. 透视投影变换中椭圆中心畸变误差模型及其仿真研究[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(2): 160-164.
WEI ZH ZH, ZHANG G J. A distortion error model of the perspective projection of ellipse center and its simulation [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2003, 24(2): 160-164. (in Chinese)
- [10] 谷飞飞,赵宏,卜鹏辉,等. 用于相机标定的球靶标投影误差分析与校正[J]. 光学学报, 2012(12): 209-215.
GU F F, ZHAO H, BU P H, *et al.*. Analysis and correction of projection error of camera calibration ball [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012(12): 209-215. (in Chinese)
- [11] 刘勇,王卫华,李志刚,等. 基于亚像素边缘检测的PCR芯片参数测量系统[J]. 仪表技术与传感器, 2014(2): 65-67.

- LIU Y, WANG W H, LI ZH G, *et al.*. Parameter measurement system of PCR chip based on sub-pixel edge detection[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2014(2):65-67. (in Chinese)
- [12] 张虎, 达飞鹏, 邢德奎. 光学测量中椭圆圆心定位算法研究[J]. *应用光学*, 2008, 29(6):905-911.
- ZHANG H, DA F P, XING D K. Algorithm of center location of ellipse in optical measurement [J]. *Journal of Applied Optic*, 2008, 29(6):905-911. (in Chinese)
- [13] 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.*. Self-calibration of probe tip center for 3D vision coordinate measuring system in portable light pen [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2):259-265. (in Chinese)

作者简介:



刘书桂 (1954—), 男, 湖南华容人, 教授, 博士生导师, 1982 年于陕西机械学院获得学士学位, 1988 年于日本东京工业大学获得博士学位, 主要从事智能坐标测量、自动测量与控制、传感与信息处理等方面的研究。E-mail: sgliu@tju.edu.cn



宋宣晓 (1992—), 男, 河南新乡人, 硕士研究生, 2014 年于长春理工大学获得学士学位, 主要从事机器视觉、大尺寸坐标测量方面的研究。E-mail: songxuanxiao@tju.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)