

基于旋转平台的全空间单目光笔测量方法

于之靖¹, 李泽川², 李鑫¹, 徐鋆², 李雁玲¹, 吴军^{2,3*}

¹中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津 300300;

²中国民航大学航空工程学院, 天津 300300;

³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 针对单目光笔式三维测量系统测量范围小、无法实现全空间测量的问题,提出了一种基于精密旋转台的全空间光笔式单目视觉测量方法。将相机固定在精密旋转台上,在不同的角度对标定板进行拍摄,获取不同角度下相机光心在标定板坐标系下的位置。通过主成分分析(PCA)平面拟合获得相机光心所在平面和相机旋转运动的转轴方向矢量,使用空间最小二乘圆拟合获得相机旋转轴的位置。借助精密转台读数和罗德里格斯公式将转台的旋转角度变换为相机的旋转矩阵和平移向量。利用计算出来的变换矩阵将旋转一定角度后不同位置相机的测量数据转换到同一转台坐标系中,实现全空间测量。实验结果表明,在使用相同光笔的测量系统中,本文方法在基本达到传统单目光笔测量系统测量精度的前提下,可实现 360°全空间测量,极大地拓展了单目光笔的应用范围。

关键词 测量; 旋转平台; 单目视觉; 光笔; 相机标定

中图分类号 TP391.41

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2312001

Full Space Monocular Light Pen Measurement Method Based on Rotary Platform

Yu Zhijing¹, Li Zechuan², Li Xin¹, Xu Jun², Li Yanling¹, Wu Jun^{2,3*}

¹Electronic Information and Automation College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

²Aeronautical Engineering College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

³State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract Aiming at the problems that the measurement range of a monocular light pen three-dimensional measurement system is small and this system can not realize the full space measurement, a full space light pen monocular vision measurement method based on precision rotary platform is proposed. First, the camera is fixed on the precision rotary platform, and the calibration plate is photographed at different angles to obtain the position of the camera optical center in the calibration plate coordinate system under different angles. Second, through the plane fitting of principal component analysis (PCA), the plane where the camera optical center is located and the rotation axis direction vector of the camera rotation motion are obtained, and the position of the camera rotation axis is obtained by using the spatial least square circle fitting. Third, with the help of the precision rotary platform reading and Rodriguez formula, the rotation angle of the turntable is transformed into the rotation matrix and translation vector of the camera. Finally, the measurement data of the camera at different positions after rotating a certain angle are converted to the same rotary platform coordinate system by using the calculated transformation matrix to realize the full space measurement. Experimental results show that in the measuring system using the same light pen, the measurement method in this paper can almost achieve the same precision as that of the traditional monocular vision light pen measurement system, achieve 360° full space measurement, and greatly expand the scope of applications of the monocular light pen.

Key words measurement; rotary platform; monocular vision; light pen; camera calibration

OCIS codes 120.3930; 110.1758; 200.4560

收稿日期: 2020-06-15; 修回日期: 2020-07-24; 录用日期: 2020-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(52005500)、中央高校科研基本业务费(3122019088)、天津市教委科研计划项目(2018KJ242)、天津市研究生科研创新项目(2019YJSS080)

* E-mail: j_wu@cauc.edu.cn

1 引 言

大尺寸测量技术在大型装备制造^[1]中起着重要作用,如大飞机^[2]、大型船舶、火箭等装配过程中需要对各装配部件的尺寸和位置进行精确测量。传统的检测手段如激光跟踪仪^[3]、经纬仪^[4]、室内GPS^[5]存在设备造价昂贵、标定过程复杂、不具备多任务并行处理、便携性差等缺点,无法满足所有测量场景的需求。而视觉测量技术中的光笔测量方法具有成本低、高精度、便携性好等特点,是三维坐标测量技术的研究热点。

国内外关于光笔式^[6]视觉测量系统已经有一定的研究。挪威 Metronor 公司使用碳纤维和 LED 光源制作光笔,所设计的双目光笔测量系统的空间测量精度可达微米级别^[7]。华中科技大学的秦大辉^[8]设计的双目视觉光笔系统采用了 T 型 5 光点的笔身结构,精度可以达到 0.084 mm;但是该双目光笔系统在每次测量前都需要对双目系统进行外参数标定,而且受测量原理的限制,测量视场有限。相比于双目光笔,单目光笔不需要繁琐的外参标定,更具便捷性,更加适合工业现场测量。天津大学的黄风山^[9]等对 P3P(perspective-3-point)算法进行了深入的研究,研制了精度可达亚毫米的第一代单目光笔系统。北京航空航天大学研制出一种 L 型光笔,使用单目相机对物体进行了位姿测量^[10]。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的温卓漫^[11]对单目视觉测量进行了深入的研究,设计了两种靶标,姿态角测量精度可达 0.015°。虽然单目光笔视觉测量系统已经具有很高的精度,但是因为相机标准镜头视场角只有 45°左右,测量范围十分有限且受畸变影响严重,越到视场边缘测量精度越差,难以完成大型装备制造中的测量任务。

本文针对光笔测量系统测量视场小的问题,创新性地将精密旋转平台与单目光笔式视觉测量系统相结合,提出了一种全空间光笔式测量系统,弥补了单目光笔测量系统测量范围小的缺点,所提系统具有重要的应用价值。首先将相机固定在精密旋转台上,固定标定板,依次旋转相机,获得不同角度下相机光心的三维坐标,然后使用立体视觉算法将坐标转换到相机坐标系下,以方便后续计算。使用主成分分析(PCA)方法进行平面拟合,计算旋转转轴的方向矢量,即旋转面的法向量。使用三维空间最小二乘圆拟合方法计算得到相机旋转的中心。然后借助转台读数和罗德里格斯公式转换^[12]将转台的读

数变换为相机的旋转矩阵和平移向量。最后,利用计算出的变换矩阵将旋转一定角度后不同位置的相机测量数据转换到同一相机坐标系中,实现全空间测量。

2 全空间光笔式测量系统

2.1 全空间光笔式测量系统结构

在进行大视场测量工作时,单目光笔式视觉测量系统的测量范围往往不能满足待测物尺寸,因此经常给测量任务带来不便。通过将精密旋转平台引入测量系统,可以获取空间中 360°的数据,然后通过旋转角度将测量数据进行坐标转换,统一在同一个坐标系下,即可完成全空间三维坐标测量。

基于旋转平台的全空间光笔式单目视觉测量系统的结构如图 1 所示,系统包括工业 CCD 相机、安装有激光标志点的光笔、高精度转台等。相机固定在精密旋转台上,可以绕转台转轴旋转到任意角度,同时对装配有激光标志点的光笔靶标进行拍照,从而可获得光笔上特征点的世界坐标和像素坐标,然后根据 $PnP^{[13]}$ 算法即可计算出光笔在相机坐标系下的位姿矩阵,最终获得光笔笔尖处在相机坐标系下的三维坐标。根据转台旋转角度可以将该坐标转换到任意角度下的相机坐标系中。

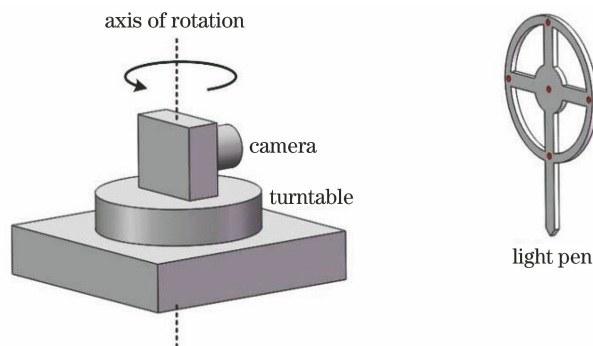


图 1 测量系统

Fig. 1 Measurement system

相机固定在转台上,在不同的角度采集光笔图像,将图片传送到计算机,计算出光笔笔尖处的三维坐标,然后根据转台旋转角度和刚体运动原理将不同位置处计算的坐标转换到同一坐标系下,即可完成全空间三维坐标测量。

2.2 全空间光笔式测量系统测量原理

如图 2 所示,由于生产制造和装配过程中会产生误差,在进行测量时转台的转轴并不是完全竖直的,而且因为相机与转台之间的安装也存在误差,所

以相机的光心也不经过旋转轴。因此在使用测量系统进行测量工作前要先标定出相机旋转的旋转轴方向和转轴位置,这样才可以进行后续的统一,从而实现全空间测量。

如图 2 所示, $O_w-X_wY_wZ_w$ 为世界坐标系。在对旋转参数进行准确的标定后,假设标定出的转轴法向量为 $N=(u,v,w)$, 转轴的位置 $O=(a,b,c)$, 其中, u,v,w 为向量 N 基底的有序实数组, a,b,c 为圆心 O 的三轴坐标, 当相机绕转轴旋转 θ 角后, 旋转后相机相对于旋转前相机的旋转矩阵^[14]为

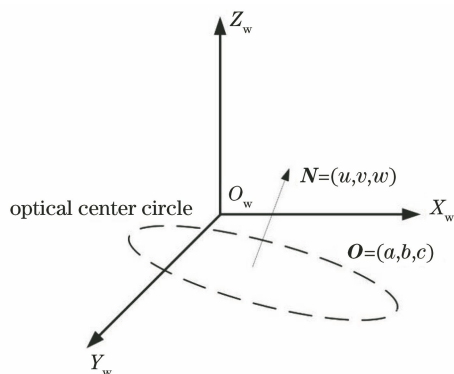


图 2 转轴示意图

Fig. 2 Schematic diagram of rotating shaft

$$R_\theta = \begin{bmatrix} u^2 + (v^2 + w^2)\cos\theta & uv(1 - \cos\theta) - w\sin\theta & uw(1 - \cos\theta) + v\sin\theta \\ uv(1 - \cos\theta) + w\sin\theta & v^2 + (u^2 + w^2)\cos\theta & vw(1 - \cos\theta) + u\sin\theta \\ uw(1 - \cos\theta) - v\sin\theta & vw(1 - \cos\theta) - u\sin\theta & w^2 + (u^2 + v^2)\cos\theta \end{bmatrix}. \quad (1)$$

因为相机光心不过旋转轴,因此还会产生一定的平移,平移矩阵为

$$T_\theta = \begin{bmatrix} [a(v^2 + w^2) - u(bv + cw)](1 - \cos\theta) + (bw - cv)\sin\theta \\ [b(u^2 + w^2) - v(au + cw)](1 - \cos\theta) + (cu - aw)\sin\theta \\ [c(u^2 + v^2) - w(au + bv)](1 - \cos\theta) + (av - bu)\sin\theta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

当测量物体超出相机的视场或者系统处于大型装备内部时,首先将光笔笔尖对准被测物体的一端进行拍摄,计算出该点在当前相机坐标系下的三维坐标,然后旋转相机到可以拍摄被测物体的另一端的角度,获得该点在旋转后的相机坐标系下的三维坐标。根据旋转角度 θ 和(1)式和(2)式计算出的旋转前后的转换矩阵,即可将旋转后的测量数据转换到旋转前相机坐标系中,完成全空间三维坐标测量工作。整体流程图如图 3 所示。

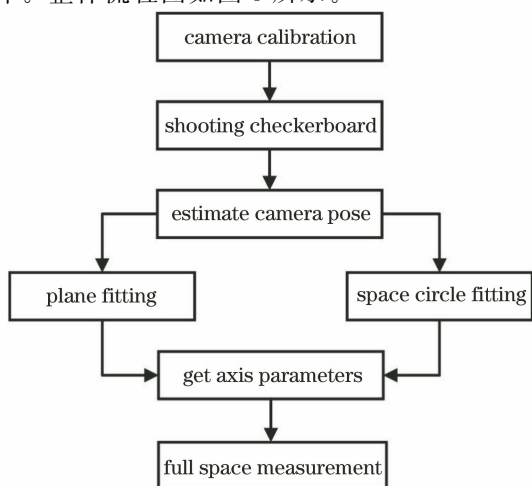


图 3 系统流程图

Fig. 3 System flow chart

3 转轴参数标定

转轴参数的标定包括转轴的方向向量和转轴位置的标定。精确地标定出转轴参数是进行准确全空间三维坐标测量的基础。本文的标定方法基于张正友相机标定方法^[15]和非线性优化算法,首先标定出相机的内参矩阵 K 和畸变矩阵 D 。然后固定标定板作为世界坐标系,如图 4 所示,不断旋转相机并对

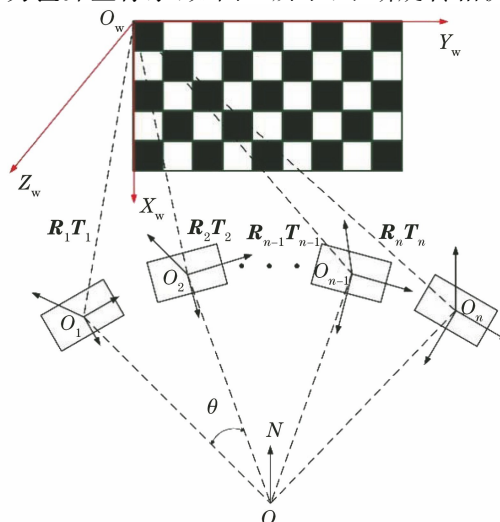


图 4 转轴标定示意图

Fig. 4 Turntable calibration diagram

标定板进行拍照,计算出不同角度的相机在标定板下的位姿。

图 4 中, O 为旋转中心, N 为转轴, $\mathbf{R}_1\mathbf{T}_1, \mathbf{R}_2\mathbf{T}_2, \dots, \mathbf{R}_n\mathbf{T}_n$ 为不同角度相机在标定板坐标系下的位姿参数,其中, n 为相机在不同位置拍摄标定板图片的数量, $\mathbf{R}_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为旋转矩阵, \mathbf{T}_i 为平移向量。由标定板上角点的世界坐标和像素坐标之间的单应性关系联合相机内参可得

$$s \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}[\mathbf{R}_i \mathbf{T}_i] \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: i 为不同位置的相机序号; s 为尺度因子; $[x_i \ y_i \ 1]^T$ 为标定板角点在像素坐标系下的齐次坐标; \mathbf{K} 为内参矩阵; (X_i, Y_i, Z_i) 为角点在标定板坐标系下的三维齐次坐标。相机绕 N 轴旋转到不同的角度并对标定板进行成像,然后利用(3)式计算获得图 4 中的 $\mathbf{R}_1\mathbf{T}_1, \mathbf{R}_2\mathbf{T}_2, \dots, \mathbf{R}_n\mathbf{T}_n$, 最终得到各个角度下相机坐标系与世界坐标系的关系。根据不同位置处相机相对于世界坐标系的外参可以将不同角度下的测量数据统一在同一个相机坐标系中,比如将不同角度的相机坐标系转换到第 1 个相机坐标系中,计算出第 i 个相机相对于第 1 个相机处的位姿为

$$\begin{cases} \mathbf{R}_{i1} = \mathbf{R}_i \times \mathbf{R}_1^{-1} \\ \mathbf{T}_{i1} = \mathbf{T}_i - \mathbf{R}_1\mathbf{R}_i^{-1}\mathbf{T}_i \end{cases}, \quad (4)$$

式中: \mathbf{R}_{i1} 为第 i 个相机相对于第 1 个相机的旋转矩阵; \mathbf{T}_{i1} 为第 i 个相机相对于第 1 个相机的平移向量,即第 i 个相机光心在第 1 个相机坐标系下的三维坐标。

3.1 计算方向向量

由于转台精度和安装存在误差,图 2 所示的相机旋转的转轴并不是完全竖直的。因此需要准确地标定出转轴的参数才可以得到准确的相机的运动转换关系。根据不同位置处相机光心在第 1 个相机坐标系下的三维点坐标,可以拟合出相机光心所在平面在第 1 个相机坐标系下的方程,该平面的法向量即为相机旋转转轴的方向向量。本文使用 PCA^[16] 对相机的光心进行平面拟合,求取转轴的方向向量,PCA 算法具有很好的鲁棒性,可以有效地减少噪声点对拟合效果的影响。PCA 算法的主要思想是降维,其推导过程如下。

首先对三维点进行去中心化,即将每个维度的数据都减去该维度的均值,使每一个维度的数据均

值都变为 0,去中心后的三维点坐标矩阵可表示为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: $(x_1, \dots, x_n)^T$ 为所有三维点的 X 轴坐标; $(y_1, \dots, y_n)^T$ 为所有三维点的 Y 轴坐标; $(z_1, \dots, z_n)^T$ 为所有三维点的 Z 轴坐标。

三维点的协方差矩阵为

$$\begin{cases} \text{cov}(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{n-1} \\ \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \text{cov}(x, x) & \text{cov}(x, y) & \text{cov}(x, z) \\ \text{cov}(y, x) & \text{cov}(y, y) & \text{cov}(y, z) \\ \text{cov}(z, x) & \text{cov}(z, y) & \text{cov}(z, z) \end{bmatrix} \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $\text{cov}(\cdot)$ 为协方差; x 为三维坐标点 X 轴坐标; y 为三维坐标点 Y 轴坐标; z 为三维坐标点 Z 轴坐标; x_i 为 X 轴坐标上第 i 个点的坐标; y_i 为 Y 轴坐标上第 i 个点的坐标。

然后计算协方差矩阵 \mathbf{C} 的特征值和特征向量,所得最小特征值对应的特征向量就是所求平面的法向量。实验证明,即使在有噪声的情况下 PCA 也可以得到很好的拟合效果。

3.2 轴上点坐标计算

获得平面法向量即转轴方向向量后,还需知道转轴上一点的三维坐标才可以根据罗德里格斯公式计算出相机绕转轴旋转前后的转换矩阵。因为相机旋转的圆心在旋转平面和转轴的交点上,因此本文使用三维空间圆拟合^[17-18]的方法来获得圆心坐标即转轴上的点坐标。假设拟合出的平面方程为 $ux + vy + wz + d = 0$,其中 $\mathbf{N} = (u, v, w)$ 为平面的方向向量。将不同位置处相机光心的三维坐标 (x_i, y_i, z_i) 投影在平面上获得投影点 (x', y', z') ,即

$$\begin{cases} x'_i = uk + x_i \\ y'_i = vk + y_i \\ z'_i = wk + z_i \end{cases}, \quad (7)$$

式中: $k = -ux_i - vy_i - wz_i - d$ 。然后将三维点转化为二维点进行平面圆拟合。

取光心序列中的第一个点作为平面坐标系的原点,即 $X_0 = x'_0, Y_0 = y'_0, Z_0 = z'_0$ 。定义 X 轴的正方向为第一个相机光心点到第二个相机光心点的方向, Z 轴的正方向定义为所拟合平面的法向量方向,由确定的 X 轴和 Z 轴的方向即可确定 Y 轴的方向,即

$$\begin{cases} x_1 = x'_1 - x'_0 \\ y_1 = y'_1 - y'_0, \\ z_1 = z'_1 - z'_0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} x_3 = u \\ y_3 = v, \\ z_3 = w \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} x_2 = (-z_1 - y_1 y_2) / x_1 \\ y_2 = \frac{x_1 x_3 - x_3 z_1}{x_3 y_1 - x_1 z_3} \\ z_2 = 1 \end{cases} \quad (10)$$

假设三轴的单位向量分别为 $\mathbf{n}_1 = (n_{1x}, n_{1y}, n_{1z})$, $\mathbf{n}_2 = (n_{2x}, n_{2y}, n_{2z})$, $\mathbf{n}_3 = (n_{3x}, n_{3y}, n_{3z})$, 则二维坐标到三维坐标的转换矩阵为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} n_{1x} & n_{2x} & n_{3x} & X_0 \\ n_{1y} & n_{2y} & n_{3y} & Y_0 \\ n_{1z} & n_{2z} & n_{3z} & Z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

三维相机光心转化为二维坐标的转换矩阵为 $\mathbf{H}_{H_inv} = \mathbf{H}^{-1}$ 。

将三维光心点转化为二维点:

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H}_{H_inv} \begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

然后使用最小二乘法进行平面圆拟合, 目标函数为

$$\min U = \sum_{i=0}^{N'-1} [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - R^2]^2, \quad (13)$$

式中: N' 为三维点的数量。

令 $\frac{\partial U}{\partial a} = \frac{\partial U}{\partial b} = 0$, 可得

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial a} = -4 \sum_{i=0}^{N'-1} \{ [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - R^2] (x_i - a) \} = 0 \\ \frac{\partial U}{\partial b} = -4 \sum_{i=0}^{N'-1} \{ [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - R^2] (y_i - b) \} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

通过求解方程即可获得圆心的二维坐标, 使用转换矩阵 \mathbf{H} 可以将二维坐标转换为平面上的三维圆心坐标。

4 实验结果与分析

如图 5 所示, 本文基于旋转平台的全空间单目视觉测量系统包括一台工业 CCD 相机、精密旋转台、计算机以及带有激光特征点的光笔。相机采用 MindVision, 分辨率为 $2592 \text{ pixel} \times 1944 \text{ pixel}$, 转台精度为 0.02° 。实验中采用棋盘格角点作为特征点, 每个方格的长度和宽度均为 20 mm , 在场景中的图像如图 5 所示。

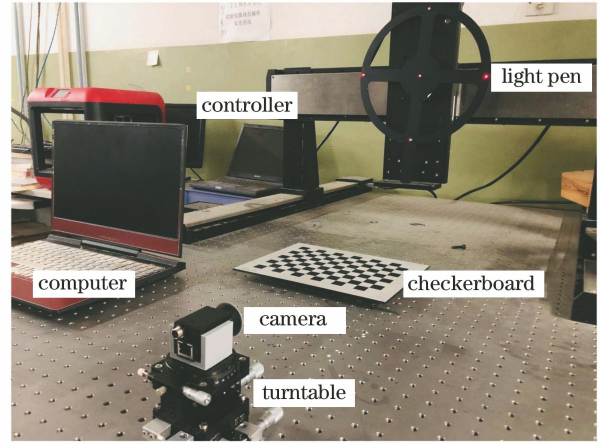


图 5 测量实验系统

Fig. 5 System for measurement experiment

图 5 中的 light pen 为本文设计的光笔, 光笔上分布了 5 个激光标志点, 圆心处的标志点为坐标系原点, 坐标为 $(0, 0, 0)$, 剩余 4 个标志点的坐标分别为 $(-150 \text{ mm}, 0 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$, $(0 \text{ mm}, 150 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$, $(150 \text{ mm}, 0 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$, $(0 \text{ mm}, -150 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$ 。根据光笔上 5 个标志点的坐标和它们在图像上的像素坐标并使用 PnP (perspective- n -point) 算法计算出光笔在相机坐标系下的位姿, 即光笔笔尖处的三维坐标。

4.1 转轴参数标定

首先对相机进行内参标定, 同时获取 CCD 相机内参矩阵和相机在标定板坐标系下的位姿, 然后固定标定板不动, 每次旋转 1° , 用 CCD 相机采集棋盘格图像, 一共采集 30 张照片。图 6 为固定棋盘格不动, 相机在不同角度下采集的棋盘格图像。

根据(3)式并利用相平面和棋盘格平面的单应性关系计算出不同角度下相机坐标系与世界坐标系的转换矩阵, 再根据(4)式计算获得第 i 个相机坐标系相对于第 1 次拍摄时相机坐标系的转换矩阵 \mathbf{R}_{i1} 和平移矩阵 \mathbf{T}_{i1} , 以第 2 个相机坐标系为例, 其转换矩阵即在第 1 次拍摄时的相机坐标系下的位姿为

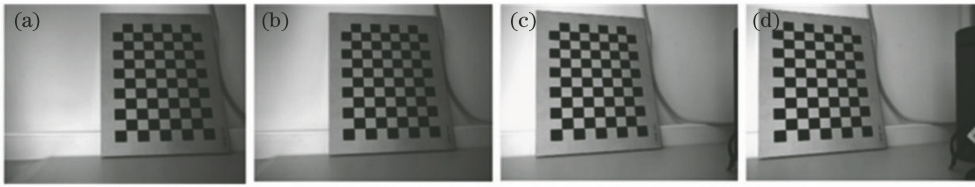


图 6 不同角度下拍摄的棋盘格图像。(a)棋盘格位置 1;(b)棋盘格位置 2;(c)棋盘格位置 3;(d)棋盘格位置 4
Fig. 6 Checkerboard images from different angles. (a) Checkerboard position 1; (b) checkerboard position 2;
(c) checkerboard position 3; (d) checkerboard position 4

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{R}_{21} = \begin{bmatrix} 0.9993 & 0.0002 & -0.0304 \\ -0.0001 & 1.0000 & 0.0008 \\ 0.0364 & -0.0008 & 0.9993 \end{bmatrix} \\ \mathbf{T}_{21} = \begin{bmatrix} -1.6593 \\ -0.1076 \\ 0.0172 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (15)$$

各个角度下相机光心在第 1 个相机坐标系下的平移参数如表 1 所示。

表 1 相机平移参数

Table 1 Parameters of camera translation

Angle / (°)	X /mm	Y /mm	Z /mm
2	-1.65	-0.10	0.01
4	-3.27	-0.06	0.11
6	-4.90	-0.06	0.22
⋮	⋮	⋮	⋮

获得不同角度下相机的平移向量后,使用平面拟合算法和空间圆拟合算法计算得到的相机的旋转参数如表 2 所示。

表 2 转轴参数

Table 2 Rotor parameters

Rotor parameter	Experimental result	Error /mm
Plane equation	$-0.10629x - 6.5193y - 0.83029z - 1 = 0$	0.22
Direction of vector	$(-0.0162, -0.9919, -0.1263)$	0.31
Rotor position	$(-0.2737, -6.10252, 53.1738)$	

从表 2 中的转轴参数可以看出,本文的转轴标定算法中的平面拟合误差为 0.22 mm,圆心拟合误差为 0.31 mm,两个误差均达到了亚毫米级,可以满足测量要求。

4.2 全空间大尺度测量仿真

首先,为了验证本文算法在多次大角度旋转后针对全空间的测量结果依然有很高的准确性和鲁棒

性,设计一个仿真,仿真结果和误差大小证明了本文测量系统的可靠性。因为转轴拟合和成像过程中存在一定的误差,为了还原真实场景,在仿真中加入了模拟实际成像误差的高斯白噪声。

仿真系统中相机和光笔参数与实际实验保持一致,如图 7 所示。

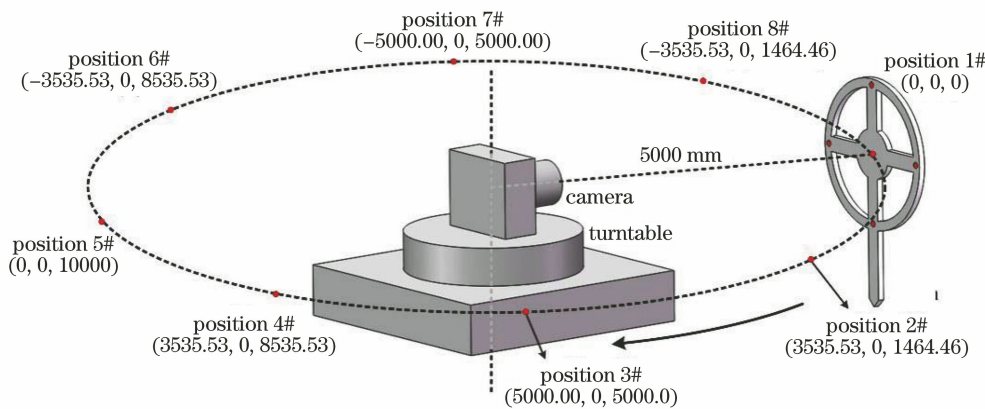


图 7 仿真系统

Fig. 7 Simulation system

图 7 中光笔绕相机光心做半径为 5000 mm 的圆周运动,光笔每次运动绕圆心转动 45°。同时相机也每次在转动 45°后拍摄光笔,计算出光笔中心点的位置。设初始时刻相机坐标系为世界坐标系,相机正前方为 Z 轴正方向,右方和上方分别为 X,Y 轴正方向,则初始时刻光笔中心激光标志点的坐标为(0,0,5000),初始时刻的相机位姿为

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (16)$$

式中: \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 分别为旋转矩阵和平移矩阵。

如图 7 所示,光笔以 45°的步长在半径为 5000 mm 的圆上运动,相机也每次转动 45°,然后测量光笔在转动后的相机坐标系下的坐标,将每次测量结果换算至初始相机坐标系,并与实际坐标进行对比。为了还原真实场景,设此时相机旋转的转轴为实际实验标定的转轴,参数如表 2 所示。根据罗德里格斯公式^[19]可以求得相机旋转前后的变换矩阵,从而求得此时相机的位姿,然后计算出移动后的光笔标志点在旋转后相机坐标系下的坐标,再将该坐标反转回初始相机坐标系。仿真误差结果如图 8 所示。

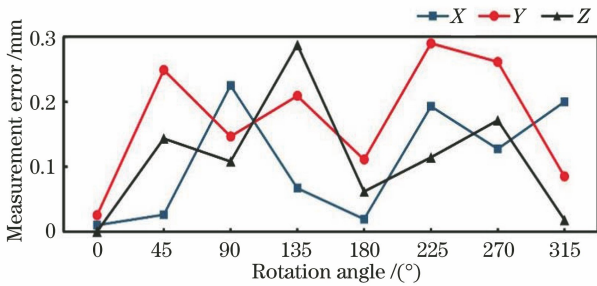


图 8 仿真误差

Fig. 8 Simulation error

图 8 中 X,Y,Z 三条折线分别记录了转动不同角度后根据本文算法计算出的光笔中心标志点在 X,Y,Z 三个方向的三维坐标和真实世界坐标的误差绝对值。从图中可以看到,在大尺寸全空间移动的仿真中加入方差为 0.3 mm 的高斯白噪声的情况下,误差最大为 0.28 mm,最小为 0.02 mm,平均误差为 0.19 mm,均方根误差为 0.24 mm。

4.3 大尺寸测量实验

为了验证本文测量方法在真实场景中的有效性

和可行性,搭建如图 9 所示的大尺寸测量实验系统^[20]。

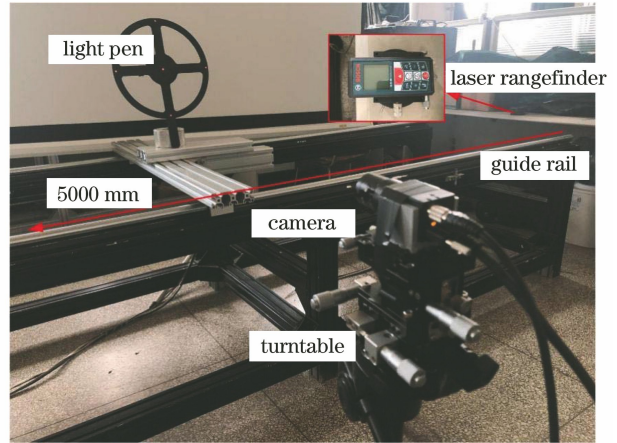


图 9 大尺寸测量

Fig. 9 Large scale measurement

如图 9 所示,该测量系统包括相机、转台、光笔、导轨和激光测距仪,其中导轨长 5 m,激光测距仪选用 BOSCH GLM80,其测距精度在多次测量后可达 0.2 mm。光笔固定在一个滑块上,滑块可以在导轨上滑动。每次滑块滑动约 500 mm,滑动前后分别对光笔进行拍摄,计算出光笔移动距离,同时使用激光测距仪测量滑块移动距离,将计算结果与本文方法所得结果进行对比。激光测距仪下方安装转台,调整激光方向使其与导轨移动方向平行。同时,为了对比引入精密转台前后光笔测量系统的精度,在实验中分别使用传统光笔式测量系统和本文全空间光笔式测量系统进行测量,由于传统光笔测量角度有限,为保证测量距离的可比性,将传统光笔测量系统放置于导轨初始位置,本文所提全空间光笔式测量系统放置于导轨中间位置。

表 3 中记录了传统方法和本文方法对大尺寸装备的测量结果,其中 Method 1 是传统光笔测量方法,Method 2 为本文测量方法。从表中可以看到,由于相机视场角较小,超出一定的范围后,传统光笔测量系统无法进行测量。从与激光测距仪的对比实验中可以看出,传统光笔测量系统的最小测量误差为 0.16 mm,最大测量误差为 0.23 mm,平均误差为 0.18 mm。本文测量系统的最小误差为 0.16 mm,最大误差为 0.34 mm,平均误差为 0.22 mm,均方根误差为 0.24 mm。由实验结果可知,本文方法的测量精度基本可达到传统方法的测量精度,但传统方法的测量范围十分有限,无法满足大型装备制造业对大尺寸、全空间测量的需求。

表 3 大尺寸测量实验的测量结果

Table 3 Measured results of large scale measurement experiments

mm

Measured result of laser rangefinder	Measured result of method 1	Measured result of method 2	Error of method 1	Error of method 2
500.80	500.62	500.52	0.18	0.28
1000.60	1000.77	1000.39	0.17	0.21
1499.80	1499.64	1499.60	0.16	0.20
2000.60	2000.83	2000.36	0.23	0.24
2500.30	Can't measure	2500.46	Can't measure	0.16
2999.50	Can't measure	2999.67	Can't measure	0.17
3500.20	Can't measure	3500.39	Can't measure	0.19
4000.00	Can't measure	4000.25	Can't measure	0.25
4499.30	Can't measure	4499.64	Can't measure	0.34
5000.20	Can't measure	4999.94	Can't measure	0.26

5 结 论

针对传统单目光笔式视觉测量系统的小视场问题,提出了一种基于精密旋转台的全空间单目光笔式测量系统。对 CCD 相机和转台参数进行标定,获取相机内参、转台转轴参数以及旋转圆心,并结合激光测距仪进行对比验证。实验和仿真结果表明基于精密旋转台的全空间单目光笔式测量系统的测量结果与激光测距仪的测量结果相差极小,而且采用该系统进行大尺度装备测量工作时也具有很高的精度,这证明了本文实验系统的有效性。所提方法可以有效地扩大单目光笔测量系统的测量范围,增强光笔测量系统的鲁棒性并扩展其应用场景,有很好的实用性。

参 考 文 献

- [1] Yin S B, Ren Y J, Liu T, et al. Review on application of machine vision in modern automobile manufacturing[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0815001.
尹仕斌,任永杰,刘涛,等. 机器视觉技术在现代汽车制造中的应用综述[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0815001.
- [2] Liu H. Study on key techniques of visual positioning and its application in aircraft assembly [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019: 10-16.
刘华. 视觉定位关键技术及其在飞机装配中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019: 10-16.
- [3] Chen H F, Tang L, Shi Z Y, et al. ZEMAX simulation method of laser tracing system using a dual-wavelength method to compensate for the refractive index of air[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0104009.
陈洪芳,汤亮,石照耀,等. 基于双波长法补偿空气
- [4] Yang X L, Yin C Y, Fang S P, et al. Three-dimensional measurement of large-scale objects using photogrammetry based on total station[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(10): 101505.
杨谢柳,尹晨宇,方素平,等. 基于全站仪的大型三维形貌摄影测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(10): 101505.
- [5] Wu J, Zhu J G, Yu Z J, et al. A total station spatial positioning method based on rotary laser scanning and ultrasonic ranging [J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(11): 115104.
- [6] Xie Z X, Jin M, Xin Y X. Study on 3D-coordinate measurement technology using light-pen based on binocular stereoscopic vision system [J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(8): 896-899.
解则晓,金明,辛悦向. 基于双目立体视觉的光笔式三坐标测量系统[J]. 中国机械工程, 2008, 19(8): 896-899.
- [7] Beijing Representative Office of Medono Measurement System Co., Ltd. Measuring instrument of metronor and its application in aviation industry [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(S1): 104-106.
挪威迈卓诺测量系统有限公司北京代表处. 迈卓诺光笔测量仪及其在航空工业中的应用[J]. 航空制造技术, 2008, 51(S1): 104-106.
- [8] Qin D H. Research on the technology and system of portable light pen coordinate measurement system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009: 10-16.
秦大辉. 便携式光笔三维坐标测量技术与系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009: 10-16.
- [9] Huang F S. Study on the key technique of single camera 3D coordinate vision measurement system using a light pen [D]. Tianjin: Tianjin University,

2005.
黄风山. 光笔式单摄像机三维坐标视觉测量系统关键技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [10] Feng P, Wei Z Z. Light probe based large FOV 3D vision measurement system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(9): 2217-2224.
冯萍, 魏振忠. 光笔式大视场三维视觉测量系统[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(9): 2217-2224.
- [11] Wen Z M. Accurate and fast identification and localization of a cooperative target in complex background[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, 2017: 1-20.
温卓漫. 复杂场景下合作靶标的准确快速识别与定位[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017: 1-20.
- [12] Zhou J H, Miao Y H, Wang M H. Attitude representation using Rodrigues parameter[J]. *Journal of Astronautics*, 2004, 25(5): 514-519.
周江华, 苗育红, 王明海. 姿态运动的 Rodrigues 参数描述[J]. *宇航学报*, 2004, 25(5): 514-519.
- [13] Zhu F, Yu F S, Wu Y M, et al. Analysis of attitude calibration precision of P4P camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(11): 1115005.
朱帆, 于芳苏, 吴易明, 等. P4P 法相机姿态标定精度分析[J]. *光学学报*, 2018, 38(11): 1115005.
- [14] Zhao X T, Wang J J, Wang C G. Calibration of multiple degrees of freedom binocular stereo vision system based on axis parameters [J]. *Optical Technique*, 2018, 44(2): 140-146.
赵显庭, 王晋疆, 王陈光. 基于转轴参数的多自由度双目视觉系统标定[J]. *光学技术*, 2018, 44(2): 140-146.
- [15] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [16] Fu D D, Zhou S G, Xu Y, et al. Point cloud plane fitting technology based on principal component analysis[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2014, 23(4): 20-23.
浮丹丹, 周绍光, 徐洋, 等. 基于主成分分析的点云平面拟合技术研究[J]. *测绘工程*, 2014, 23(4): 20-23.
- [17] Zhang X, Zhu Y J, Lan H, et al. A spatial circle fitting algorithm based on radius constraint and its application in spline assembly [J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2019, 46(6): 69-72.
张曦, 朱永吉, 兰浩, 等. 基于半径约束的空间圆拟合算法及其花键装配上的应用[J]. *计量与测试技术*, 2019, 46(6): 69-72.
- [18] Gander W, Golub G H, Strebel R. Least-squares fitting of circles and ellipses[J]. *BIT*, 1994, 34(4): 558-578.
- [19] Yue X K, Hou X J. Vision-based relative position and attitude determination using Rodrigues parameters [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(3): 753-757.
岳晓奎, 侯小娟. 基于 Rodrigues 参数的视觉相对位姿确定算法[J]. *宇航学报*, 2010, 31(3): 753-757.
- [20] Wu J, Li Z C, Zheng J W, et al. Three-point light pen space coordinate measurement based on light field epipolar plane image ranging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(5): 0512002.
吴军, 李泽川, 郑建文, 等. 基于光场极平面图像测距的三点式光笔空间坐标测量[J]. *光学学报*, 2020, 40(5): 0512002.