

面向点结构光测量系统的两轴转台标定

关棒磊^{1,2} 周朗明^{1,2} 杨 夏^{1,2} 张小虎^{1,2}

(¹ 国防科学技术大学航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)
(² 图像测量与视觉导航湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要 针对传统点结构光测量系统的标定方法难以满足远距离、高精度的测量需求,提出了一种基于单目视觉的两轴转台标定新方法。在激光测距仪绕旋转轴转动过程中利用标定墙和拦截面分别拦截激光射线形成激光光斑,通过单目视觉定位计算激光光斑的空间坐标,进而差分得到激光测距仪虚拟出光点的位置,最终拟合出旋转轴方向矢量和轴上定点坐标。利用虚拟出光点进行标定减少了激光光斑空间坐标误差对旋转轴标定的影响,大幅提高了转台的标定精度。在对转台的两个转轴精确标定的基础上,利用激光指向和测距信息可实时解算出目标三维坐标。实验证明,坐标测量中误差维持在 0.5 mm 以内,所提出的标定方法简单可靠,并适用于其他转台测量系统。

关键词 测量;三维测量;点结构光;单目视觉;旋转轴标定;两轴旋转

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.s112008

Two-Axis Turntable Calibration in Dot Structured Light Measurement System

Guan Banglei^{1,2} Zhou Langming^{1,2} Yang Xia^{1,2} Zhang Xiaohu^{1,2}

¹ College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China

² Hunan Key Laboratory of Videometrics and Vision Navigation, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract A new calibration method using monocular vision is proposed to calibrate the dot structured light measurement system. Let the laser rangefinder circle around the rotation axis and use two planes to intercept laser beam respectively in order to form the laser spot. Three-dimensional coordinates of the laser spot is obtained by monocular vision, the virtual output light spot of laser rangefinder is got by calculating the difference of the two laser spots. Direction vector of the rotation axis is fitted and point coordinate in the rotation axis is fixed. The use of virtual output light spot in the calibration improves the accuracy of rotation axis, so the rotation axis at any position can be calculated easily. The three-dimensional coordinates of target can be calculated by dot structured light measurement system though accurately calibrating the two axes of the turntable. The experiments show that the measuring precision of the system is within 0.5 mm at present, this calibration method is simple, reliable and can be used in other measuring system with a turntable.

Key words measurement; three-dimensional measurement; dot structured light; monocular vision; rotation axis calibration; two-axis rotation

OCIS codes 120.3940; 280.3400; 150.1488; 150.5670

1 引 言

基于点结构光的测量技术是解决非接触测量问

题的一个有效途径,它弥补了传统的接触式测量过程中损伤物体表面和不能测量柔性表面物体的缺

收稿日期: 2014-01-22; 收到修改稿日期: 2014-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(11072263, 11272347)

作者简介: 关棒磊(1991—),男,博士研究生,主要从事位姿估计、计算机视觉等方面的研究。

E-mail: banglei0909@126.com

导师简介: 于起峰(1958—),男,教授,博士生导师,中国科学院院士,主要从事空天图像测量与视觉导航方面的研究。

E-mail: yuqifeng@vip.163.com

陷,同时克服了其他一些传感器使用条件受限的不足,可实现对各种被测物体空间坐标的测量^[1-3]。这种非接触测量技术具有快速、自动化、较高精度等特点,而且不受电磁干扰、温湿度等的影响,在工业生产和现实生活中有着广泛的应用^[4-6]。

单纯的点结构光系统仅能产生空间中单条的射线,若能同数控转台进行结合能扩展其测量范围和测量手段,其关键之处在于对转台进行标定,从而得到转台的位姿参数。针对多轴转台的标定,传统的方法主要是手眼标定方法^[7-9],需要转台带动摄像机做运动参数精确已知的可控运动,但是在转台仅存在旋转运动时,模型存在退化,标定精度较低,不能满足高精度测量的应用需求。文献^[10-11]设计了两轴数控转台测量系统,并相应提出了转台轴线的精确标定方法,但是这些系统均使用标定球对转台轴线位置进行标定,该标定方法需要在测量前加工若干个标准的标定球,并要解决其在转台上装夹的问题,增加了测量前的准备工作及测量成本。文献^[12]提出了一种利用圆形标记点对数控转台两个旋转轴位置标定的方法。该方法要在转台上粘贴3个以上圆形标记点,通过双目立体视觉测量圆心的三维坐标。文献^[13]通过重建“投影仪-摄像机-参考平面”三者的空间关系,求取摄像机光心和投影仪光心的世界坐标进行标定。文献^[12-13]的标定过程操作复杂,花费时间较长。文献^[7-13]中设计的系统适用于近距离测量,在远距离条件下精度明显降低。

本文通过将激光测距仪和摄像机固联安装在两轴数控转台上,设计了一套基于两轴转台的点结构光测量系统,并针对该系统提出了一种基于单目视觉的两轴转台位姿标定新方法,该标定方法数学模型精密且精度高,满足近、远场高精度测量需求。

2 基于两轴转台的点结构光测量系统

如图1所示,基于两轴转台的点结构光测量系统主要由激光测距仪、CCD摄像机、两轴精密转台和计算机组成。其中CCD摄像机为Pointgrey公司的Grasshopper数字摄像机,最大分辨率为2448 pixel×2048 pixel,镜头为Kowa的25mm定焦镜头。激光测距仪为Dimetix公司的Dls-B15型激光测距仪,最大测距为200 m,最小测距为0.2 m,最大测量频率为25 Hz。两轴转台为Flir公司的PTU-D48E型电动二维转台,可通过编程控制其转动参数。计算机为Adlink公司的工业控制计算机。



图1 基于两轴转台的点结构光测量系统

Fig. 1 Dot structured light measurement system using two-axis turntable

激光测距仪、摄像机固联在精密转台上,其中转台在计算机控制下可绕水平旋转轴和垂直旋转轴两个方向旋转,实时反馈两个转轴旋转角度信息。激光测距仪在转台的带动下对空间目标进行测量,CCD摄像机仅用于对转台进行标定,并不参与实际测量过程。基于两轴转台的点结构光测量系统的工作步骤可分为三个阶段:1)采集激光测距仪不同角度下激光光斑的空间坐标和实时反馈的距离信息;2)根据本文推导的标定方法对激光测距仪的激光光束与转台的相对关系,以及初始激光方向进行标定;3)在实际测量过程中,根据两轴转台的转角信息,实时更新激光光束的方向,再结合激光测距仪的测距信息,计算被测目标的三维空间坐标。点结构光测量系统的测量精度取决于转台转动角度的精确控制及旋转轴的精确位姿。因此,对转台旋转轴位姿的标定将直接影响系统的测量精度。

3 基于单目视觉的两轴转台标定

3.1 两轴转台的几何模型

系统采用两轴转台作为旋转平台,每个旋转轴的数学模型可由轴上的一个定点 S 及单位方向向量 N 表达,其几何模型如图2所示。

设空间中一点 P ,绕该轴作纯旋转变换后得到 P' 。根据解析几何的知识, P 点与 P' 点的坐标存在如下变换关系^[14]:

$$\mathbf{X}_P = \mathbf{R}(\mathbf{N}, \theta) \mathbf{X}_{P'}, \quad (1)$$

式中旋转矩阵 \mathbf{R} 的参数由旋转轴的方向向量 \mathbf{N} (N_x, N_y, N_z)及旋转角度 θ 构成,具体形式为

$$\mathbf{R}(\mathbf{N}, \theta) = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

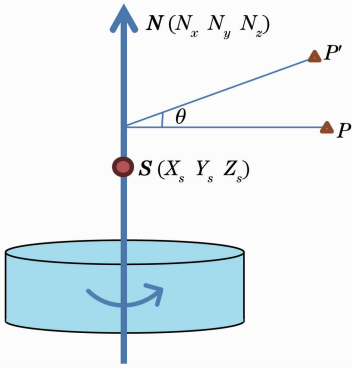


图 2 单轴旋转的几何模型

Fig. 2 Geometric model of single-axis rotation

式中

$$\begin{aligned}
 r_1 &= N_x N_y (1 - \cos \theta) + \cos \theta, \\
 r_2 &= N_x N_y (1 - \cos \theta) + N_z \sin \theta, \\
 r_3 &= N_z N_x (1 - \cos \theta) - N_y \sin \theta, \\
 r_4 &= N_x N_y (1 - \cos \theta) - N_z \sin \theta, \\
 r_5 &= N_y N_y (1 - \cos \theta) + \cos \theta, \\
 r_6 &= N_y N_z (1 - \cos \theta) + N_x \sin \theta, \\
 r_7 &= N_z N_x (1 - \cos \theta) + N_y \sin \theta, \\
 r_8 &= N_y N_z (1 - \cos \theta) - N_x \sin \theta, \\
 r_9 &= N_z N_z (1 - \cos \theta) + \cos \theta.
 \end{aligned} \quad (3)$$

两轴转台的几何模型如图 3 所示。其中， S_1 和向量 $N_H(n_{hx}, n_{hy}, n_{hz})$ 构成水平旋转轴， $S_1 H_0$ 为初始激光水平状态，由初始时刻激光测距仪出光点和激光发射方向确定， H_1 为 H_0 点绕水平轴旋转 α 角度后的激光测距仪出光点。 S_2 和向量 $N_V(n_{vx}, n_{vy}, n_{vz})$ 构成竖直旋转轴， $S_2 V_0$ 为初始激光竖直状态， V_1 为 V_0 点绕竖直轴旋转 β 角度后的激光测距仪出光点。转台绕水平旋转轴、竖直旋转轴旋转时，激光出光点分别位于两个平面圆 π_H, π_V 上。在理想的情

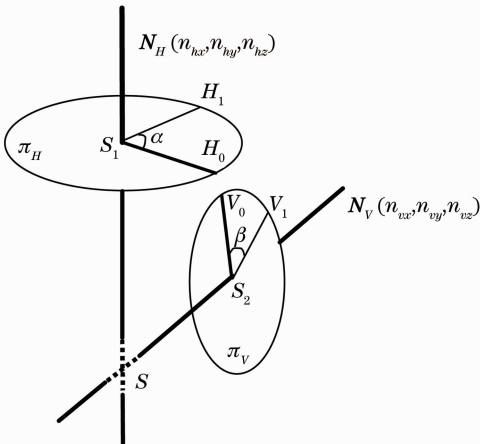


图 3 两轴转台的几何模型

Fig. 3 Geometric model of two-axis turntable

况下，转台的两个旋转轴垂直相交于 S ，但是由于安装误差，导致两轴是异面垂直^[15]。因此。为实现高精度动态测量，需要精确标定转台的旋转轴。

3.2 两轴转台标定方法的设计

两轴转台的标定目的是确定转台的两个旋转轴在世界坐标系下的位姿，即标定出旋转轴方向向量和轴上定点坐标，主要方法是利用激光测距仪左侧固联的摄像机测量激光光束上两点的空间坐标，并结合激光测距仪反馈的测距信息，通过差速器锁定系统(DLS)差分解算激光测距仪的出光点位置。然后再根据水平旋转和竖直旋转的激光出光点必定位于两个平面圆上的几何性质，拟合计算两个圆的圆心及圆面法向量，从而确定两轴转台的旋转轴。

转台标定示意图如图 4 所示。图中 $O_w-X_w Y_w Z_w$ 为人工合作标志墙 M 所在的世界坐标系， $O_c-X_c Y_c Z_c$ 为以摄像机光心 O_c 为原点的摄像机坐标系。 M 为人工合作标志墙($Z=0$)，用于标定摄像机外参数和拦截激光光束，拦截面 N 为与标志墙 M 平行的平面($Z=h$)，仅用于拦截激光光束，形成激光光斑。 D 为激光测距仪的出光点， P_1 为激光测距仪激光光束打在标志墙 M 表面上的光斑点， $d_1 = |DP_1|$ 为激光测距实际测量路径； P_2 为激光测距仪激光光束打在拦截墙 N 表面上的光斑点， $d_2 = |DP_2|$ 同为激光测距实际测量路径。

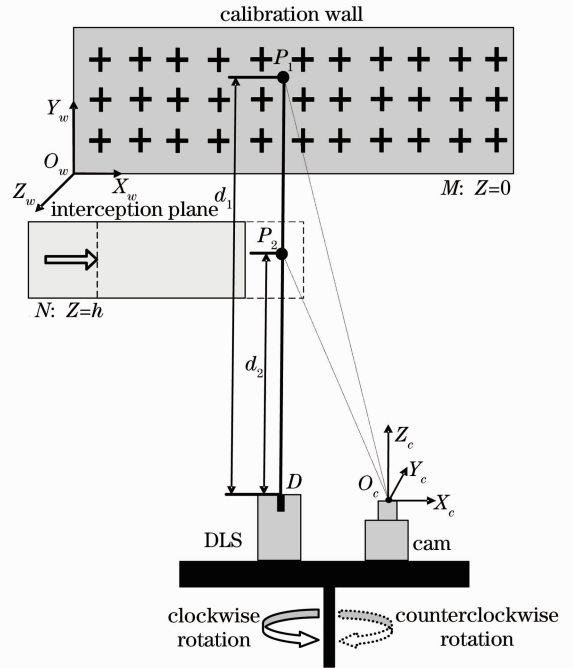


图 4 转台标定示意图

Fig. 4 Schematic diagram of two-axis turntable calibration

图 4 中 $|DP_1|$ 、 $|DP_2|$ 为同一激光光束的实际测量路径,要同时得到光斑点 P_1 、 P_2 ,需要用标定墙 M 和拦截面 N 交替拦截某一激光光束。为提高标定效率,可以利用两轴转台高精度的可重复性,通过编程控制转台往返旋转,即先控制转台沿顺时针方向以一定角度间隔旋转,并用标定墙拦截激光光束;再控制转台沿逆时针方向以相同的角度间隔往回转,此时换用拦截面拦截激光光束。从而间接保证激光光束的可重现性,对于同一转台角度,激光测距仪的激光出光点 D 、标志墙上的激光光斑 P_1 与拦截面上

的激光光斑 P_2 必定位于同一条直线上。

3.2.1 激光光斑空间坐标的求取

要确定某一转台角度下激光测距仪出光点的空间坐标,需要先获得光斑点 P 在世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 中的空间坐标。激光光束照射在标定墙(或拦截面)的表面一般形成一个亮圆斑,可以利用重心法精确求得光斑点的图像坐标。摄像机获取实际场景图像,其成像关系可用中心透视投影模型来描述,如图 5 所示。

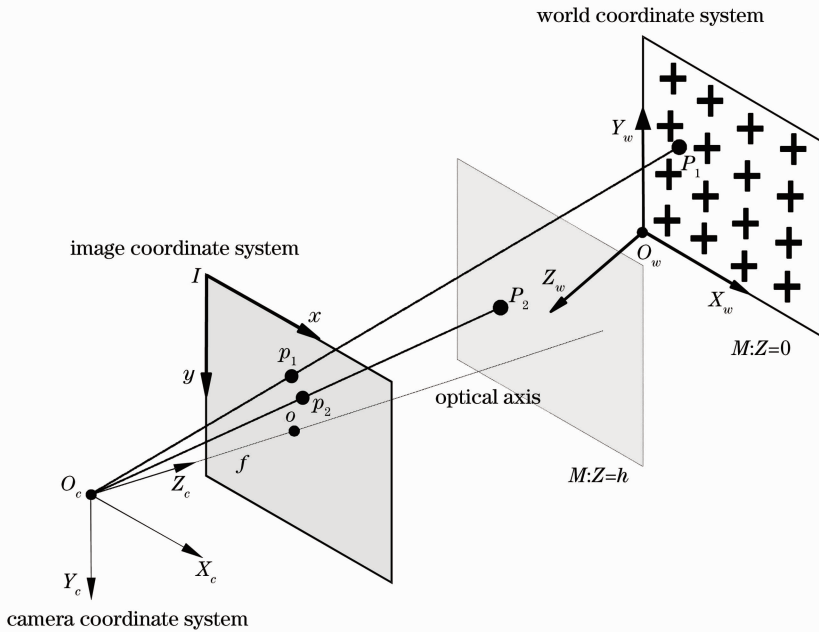


图 5 摄像测量常用坐标系及中心透视投影成像关系

Fig. 5 Mostly used coordinate systems in videometrics and the imaging model of ideal camera

激光光斑 P 在世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 中的空间坐标为 (X,Y,Z) , P 经中心透视投影得到的像点 p 的图像坐标为 (x,y) 。利用投影矩阵各元素描述的共线方程如(4)式所示^[16]:

$$\begin{cases} x = \frac{m_0 X + m_1 Y + m_2 Z + m_3}{m_8 X + m_9 Y + m_{10} Z + m_{11}} \\ y = \frac{m_4 X + m_5 Y + m_6 Z + m_7}{m_8 X + m_9 Y + m_{10} Z + m_{11}} \end{cases}, \quad (4)$$

式中 $m_0 \sim m_{11}$ 为投影矩阵元素。事先标定出摄像机的内参数^[17],然后在转台带动摄像机沿顺时针方向旋转时,利用标定墙对摄像机外参数进行标定^[18],从而确定某一转台角度下投影矩阵各元素。然后通过重心法求取激光光斑点 P_1 和 P_2 的图像坐标 (x_{P_1}, y_{P_1}) 、 (x_{P_2}, y_{P_2}) ,分别代入(4)式计算得到激光光斑点在世界坐标系中的空间坐标 $(X_{P_1}, Y_{P_1}, Z_{P_1})$ 、 $(X_{P_2}, Y_{P_2}, Z_{P_2})$ 。

3.2.2 激光出光点空间坐标的求取

图 6 中, S 为某一旋转轴上的定点, D 为激光测距仪的实际出光点, D' 为激光测距仪的虚拟出光点, P_1 为激光光束照射在标定墙表面形成的光斑点,其空间坐标表示为 \mathbf{X}_{P_1} , d_1 为激光出光点 D 到光斑点 P_1 的距离, P_2 为激光光束照射在拦截面表面形成的光斑点,其空间坐标表示为 \mathbf{X}_{P_2} , d_2 为激光出光点 D 到光斑点 P_2 的距离。在转台某一固定旋转角度下,空间点 D 、 P_1 、 P_2 必定共线,可求得激光测距仪实际出光点的空间坐标:

$$\mathbf{X}_D = \frac{d_1 \mathbf{X}_{P_2} - d_2 \mathbf{X}_{P_1}}{d_1 - d_2}. \quad (5)$$

根据激光光束上 P_1 和 P_2 的空间坐标,同样可确定激光光束的方向:

$$e = \frac{\mathbf{X}_{P_1} - \mathbf{X}_{P_2}}{d_1 - d_2}. \quad (6)$$

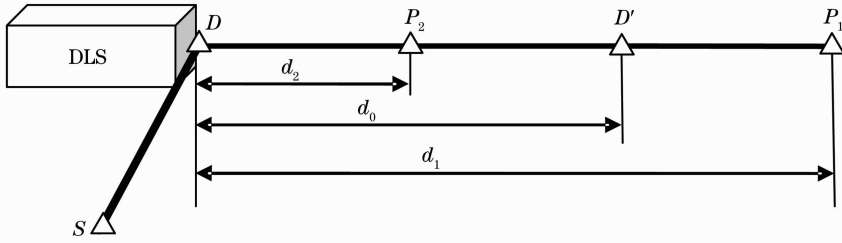


图6 求取激光出光点空间坐标的示意图

Fig. 6 Sketch of the getting of laser output light spot's coordinates

然而,通过单目视觉定位求取 P_1 、 P_2 点的空间坐标不可避免地存在误差,用这二个空间点确定的激光方向,会与实际的射线方向存在偏差,并且激光测距仪出光点 D 往往距离光斑点 P_1 、 P_2 较远,若按激光方向延长至激光出光点,坐标偏差会被明显放大,必然影响平面和圆拟合的精度,难以实现转台的精确标定。因此选取 P_1 、 P_2 之间的中间点 D' 作为激光测距仪的虚拟出光点,其中 D' 到实际出光点的距离为 d_0 ($d_2 \leq d_0 \leq d_1$)。利用虚拟出光点进行旋转轴的标定,相对误差小,可以有效减弱 P_1 和 P_2 空间坐标误差带来的影响。虚拟出光点 D' 的空间坐标为

$$\mathbf{X}_{D'} = \frac{(d_0 - d_1)\mathbf{X}_{P_1} - (d_0 - d_2)\mathbf{X}_{P_2}}{d_1 - d_2}. \quad (7)$$

根据多个旋转角度下激光测距仪虚拟出光点的空间坐标,可以标定出两轴转台的旋转轴。以标定水平旋转轴为例,控制转台在水平平面以固定的角度间隔旋转一个来回,求取每一个旋转角度下虚拟出光点的空间坐标。理想情况下绕水平旋转轴旋转的虚拟激光出光点必定位于一个平面圆上,但由于测量误差的存在,虚拟激光出光点不可能恰好位于平面圆上,因此拟合计算平面圆的圆心及圆面法向量^[15],从而标定出转台的水平旋转轴。同理,可标定出转台的竖直旋转轴。

3.3 点结构光系统测量原理

点结构光系统实际测量时,为更好地满足近、远场高精度的测量需求,通常选取预定测量区域内的两个空间点来确定初始时刻激光光束的方向。例如以转台水平和竖直转角均为 0 时作为初始时刻的激光光束,通过(4)式求取预定测量区域内该激光光束上两个空间点的坐标。

在两自由度转台角度已知的情况下,激光光束在空间中的旋转运动可分解为绕水平旋转轴和竖直旋转轴分别进行旋转。激光测距仪获得目标点 A 的距离信息 ρ 后,将初始时刻激光光束伸长至距离激

光实际出光点为 ρ 的虚拟目标点 A_0 处,通过(7)式求得虚拟目标点 \mathbf{X}_{A_0} 。根据两轴转台的转动模型,在已知转台的水平旋转角度 α 、竖直旋转角度 β 及激光测距信息 ρ 的情况下,可以推算出目标点的空间坐标:

$$\mathbf{X}_A = R(NH, \alpha)^{-1} R(NV, \beta)^{-1} \mathbf{X}_{A_0}. \quad (8)$$

4 标定实验与结果分析

4.1 两轴转台标定实验

利用上述的标定场对点结构光测量系统的两轴转台进行精确标定。采样角度范围小于 30° 时圆心偏差尤为明显^[15],因此利用标定墙和拦截面标定两轴转台时应尽量增大采样角度,提高拟合的精度。标定实验中,控制转台在水平面内先从 -50° 以 2° 为分隔沿顺时针方向旋转到 50° ,再沿逆时针方向以相同的角度间隔往回转,测量 100 次;然后,在竖直面内从 -30° 以 1° 为分隔沿顺时针方向旋转到 30° ,再沿逆时针方向转回,测量 120 次。摄像机在转台的带动下以相同的角度隔间采图,并通过(7)式计算出所有激光测距仪虚拟出光点的空间坐标,如图 7 所示。为对比出虚拟出光点的优势,通过(5)式计算

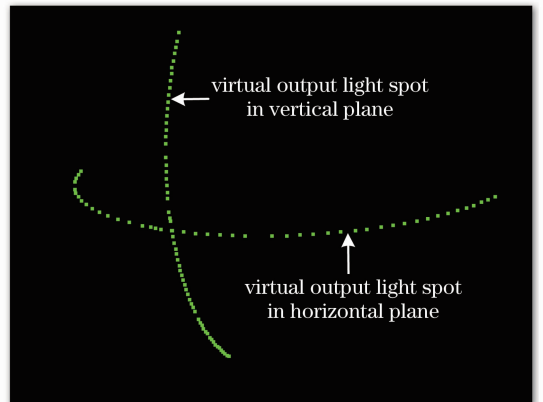


图7 虚拟出光点的空间分布图

Fig. 7 Spatial distribution map of virtual laser output light spots

激光测距仪实际出光点的空间坐标,如图 8 所示。不难发现,激光测距仪实际出光点受误差影响大,拟合为平面和圆的误差较大,标定旋转轴精度低。

利用虚拟出光点标定水平旋转轴,水平面内虚拟出光点的空间分布如图 9 所示。绕水平旋转轴的所有虚拟出光点可拟合出一个平面,将虚拟出光点投影至该平面,并进一步将投影点拟合为圆,如图 10 所示。

水平面内虚拟出光点拟合平面的齐次坐标 $\pi_1 = (-0.012, -0.060, -0.998, 1318.243)^T$,其中点偏离平面的中误差为 0.164 mm;水平旋转轴定点为: $(-2234.575 \text{ mm}, -16535.335 \text{ mm}, 1624.076 \text{ mm})$,水平旋转轴方向矢量为: $(-0.012, -0.060, -0.998)$ 。

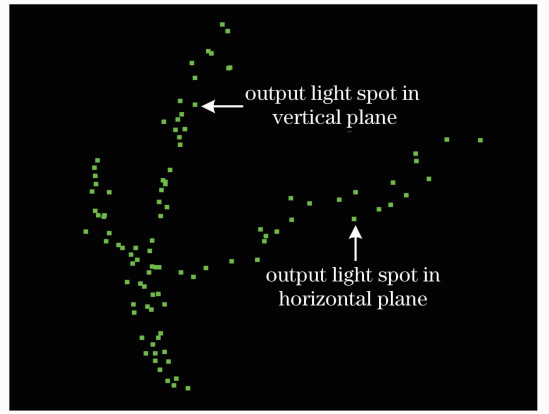


图 8 实际出光点的空间分布图
Fig. 8 Spatial distribution map of laser output light spots

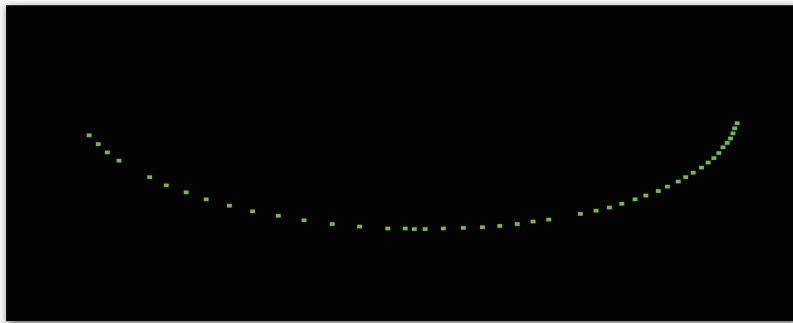


图 9 水平面内虚拟出光点的空间分布图
Fig. 9 Spatial distribution map of virtual laser output light spots in horizontal plane

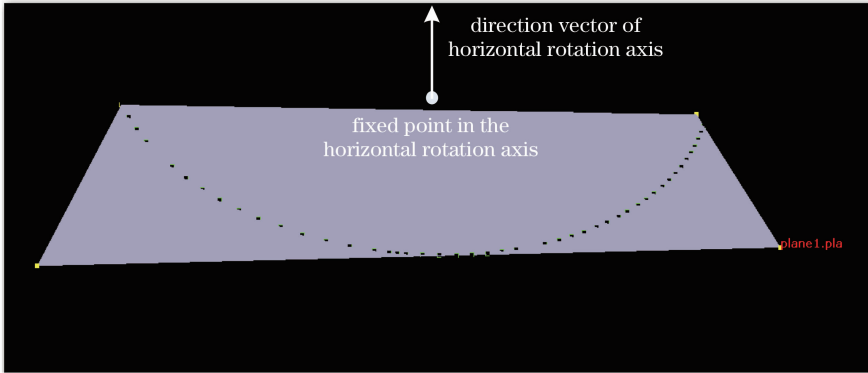


图 10 拟合为水平面内平面圆的效果图
Fig. 10 Effect diagram of fitting as round plane in horizontal plane

标定竖直旋转轴,竖直面内虚拟出光点的空间分布如图 11 所示。同样,图 12 是将绕竖直旋转轴的虚拟出光点拟合为平面圆的效果图。

竖直面内虚拟出光点拟合平面的齐次坐标 $\pi_2 = (0.997, -0.085, -0.008, -298.565)^T$,其中点偏离平面的中误差为 0.181 mm;竖直旋转轴定点为: $(-2245.841 \text{ mm}, -16548.411 \text{ mm}, 1520.920 \text{ mm})$,竖直旋转轴方向矢量为: $(0.997, -0.085, -0.008)$ 。

4.2 点结构光系统测量实验

在预定测量区域,确定初始时刻激光光束的方向和初始时刻的虚拟出光点坐标。实验中,在距离系统约 20 m 和 25 m 分别进行测量,得到同一激光光束上的两个空间点坐标,从而确定初始时刻激光光束的方向为: $(-0.043, 0.999, 0.013)$,初始时刻虚拟出光点位置为: $(-2327.031 \text{ mm}, -14778.861 \text{ mm}, 1638.171 \text{ mm})$ 。

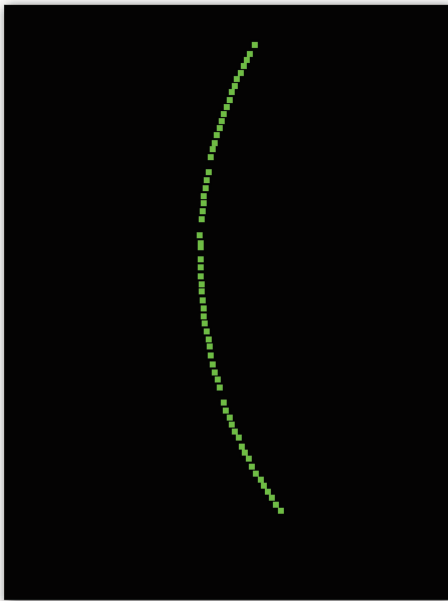


图 11 竖直面内虚拟出光点的空间分布图

Fig. 11 Spatial distribution map of virtual laser output light spots in vertical plane

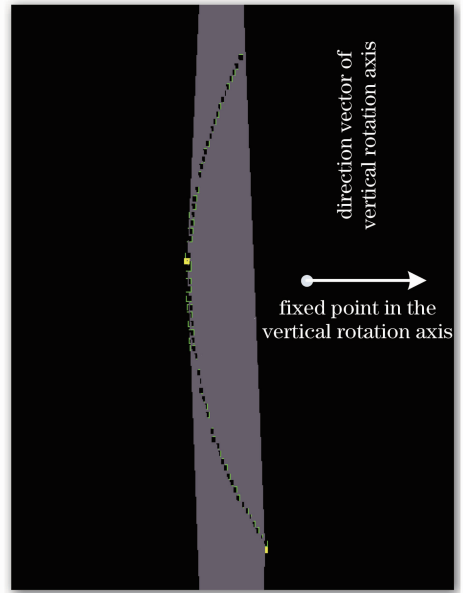


图 12 拟合为竖直面内平面圆的效果图

Fig. 12 Effect diagram of fitting as round plane in vertical plane

利用检查点验证点结构光测量系统的测量精度。检查点坐标真实值通过测量机器人采用棱镜模式自动测量确定,精度在 0.01~0.05 mm 范围内。系统对测量区域内同一固定点进行 10 次测量,求得坐标测量值与其真实值的误差如 13 所示。

由图 13 可知,点结构光测量系统测量单点的重复性精度在 0.1mm 以内,基本满足大尺寸、高精度测量现场的要求。

点结构光测量系统对测量区域内的 13 个检查点依次进行测量并求解其三维坐标值,与被测点真实值进行对比,并分别计算各点处 X、Y、Z 坐标的偏差值,结果如表 1 所示。

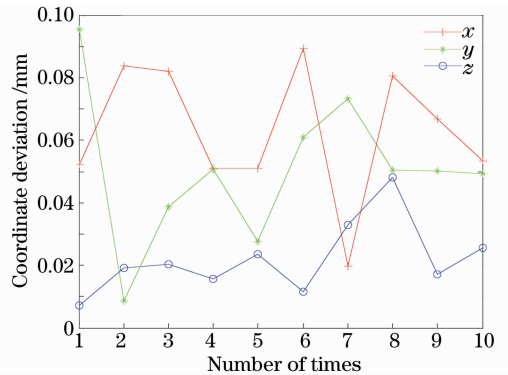


图 13 系统测量值与真实值误差曲线图

Fig. 13 Diagram of the measurement errors

表 1 系统测量结果及误差

Table 1 Result s and errors of the dot structured light measurement system

No.	True value /mm			Measurement results /mm			Deviation /mm		
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	Δx	Δy	Δz
1	526.375	1542.457	1221.239	526.0	1543.2	1221.5	-0.375	0.743	0.261
2	611.230	1528.720	1221.087	611.3	1528.7	1221.0	0.070	-0.020	-0.087
3	685.713	1484.787	1222.700	685.7	1484.7	1222.9	-0.013	-0.087	0.200
4	872.879	1464.164	1222.151	872.4	1464.1	1222.2	-0.479	-0.064	0.049
5	934.056	1396.157	1225.346	933.5	1396.6	1225.2	-0.556	0.443	-0.146
6	1076.633	1404.617	1223.812	1076.9	1404.6	1223.5	0.267	-0.017	-0.312
7	1513.936	1705.179	1204.153	1514.8	1707.4	1203.8	0.864	0.821	-0.353
8	1278.676	1293.472	1228.585	1278.8	1294.1	1229.1	0.124	0.628	0.515
9	1444.869	1253.420	1229.789	1445.8	1254.1	1229.8	0.931	0.680	0.011
10	1209.592	1110.174	1239.331	1209.5	1110.4	1239.4	-0.092	0.226	0.069
11	1285.038	1000.157	1245.162	1285.6	999.9	1245.7	0.562	-0.257	0.538
12	1453.038	966.164	1246.163	1453.4	966.3	1246.4	0.362	0.136	0.237
13	1572.674	904.972	1249.047	1572.4	904.8	1248.7	-0.274	-0.172	-0.347

根据表 1 中数据计算可得, 系统测量结果在 x 、 y 、 z 轴方向上的中误差分别为

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta_{x_i}^2 / n} = 0.474 \text{ mm}, \\ \sigma_y &= \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta_{y_i}^2 / n} = 0.435 \text{ mm}, \\ \sigma_z &= \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta_{z_i}^2 / n} = 0.291 \text{ mm}.\end{aligned}\quad (9)$$

实验结果表明: 该方法对目标点在 x 、 y 、 z 轴方向上的测量中误差维持在 0.5 mm 以内, 基本满足高精度空间坐标测量的要求。影响系统测量精度的因素主要有激光测距仪的测距精度、转台的转角精度、激光光斑中心提取精度、虚拟出光点拟合为平面和圆的误差以及被测目标的平面度和粗糙度等因素。

5 结 论

针对目前点结构光测量系统在远距离条件下测量精度明显降低这一实际问题, 设计了基于两轴转台的点结构光测量系统, 并提出了一种基于单目视觉的两轴转台高精度标定方法。该标定方法利用激光测距仪虚拟出光点标定两轴转台, 有效提升了系统的测量精度; 同时标定过程简单、高效, 解决了传统标定方法中测量设备安装、调试复杂的问题。

实验结果表明, 标定后的点结构光测量系统具有较高的精度, 各坐标值的测量中误差维持在 0.5 mm 以内, 基本实现近、远场的高精度测量, 满足某些大范围的测量需求。但标定方法仍有待改进, 应进一步优化激光光斑中心提取精度、简化标定条件, 拓宽标定方法的适用范围。

参 考 文 献

- 1 R J Valkenburg, A M Mcivor. Accurate 3D measurement using a structured light system [J]. *Image and Vision Computing*, 1998, 16(2): 99-110.
- 2 R Kowarschik, P Ku, W Schreiber, *et al.*. Adaptive optical three-dimensional measurement with structured light [J]. *Opt Eng*, 2000, 39(1): 150-158.
- 3 R Yang, S Cheng, W Yang, *et al.*. Robust and accurate surface measurement using structured light [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, 57(6): 1275-1280.
- 4 Tang Yan, Chen Wenjing. Neural network applied to three-dimensional measurement of complex objects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(8): 1435-1439.
唐 燕, 陈文静. 应用神经网络的复杂物体三维测量[J]. *光学学报*, 2007, 27(8): 1435-1439.
- 5 Zhang Qican, Su Xianyu, Cao Yiping, *et al.*. Three-dimensional shape measurement for rotating blade using stroboscopic structured illumination [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(2): 207-211.
张启灿, 苏显渝, 曹益平, 等. 利用频闪结构光测量旋转叶片的三维面形[J]. *光学学报*, 2005, 25(2): 207-211.
- 6 Yang Yu, Yu Jia, Wang Tian, *et al.*. Underwater laser line scan and three-dimensional reconstruction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(s1): s111002.
杨 宇, 于 佳, 王 添, 等. 水下环境的线结构光扫描和三维重建[J]. *光学学报*, 2012, 32(s1): s111002.
- 7 R Horaud, F Dornaika. Hand-eye calibration [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 1995, 14(3): 195-210.
- 8 R Y Tsai, R K Lenz. A new technique for fully autonomous and efficient 3D robotics hand/eye calibration [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1989, 5(3): 345-358.
- 9 N Andreff, R Horaud, B Espiau. Robot hand-eye calibration using structure-from-motion [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2001, 20(3): 228-248.
- 10 Hu Minzheng, Xi Juntong. Two-axis turntable calibration in three-dimensional structured light measurement system [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2010, (4): 506-511.
胡民政, 习俊通. 面向结构光三维测量的两轴转台标定[J]. *上海交通大学学报*, 2010, (4): 506-511.
- 11 Hu Minzheng, Chen Xiaobo, Xi Juntong. Two-axis turntable three-dimensional measuring system based on structured light and automatic registration of multi-view [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2010, 24(2): 161-169.
胡民政, 陈晓波, 习俊通. 两轴转台结构光三维扫描仪及多视自动拼合[J]. *测试技术学报*, 2010, 24(2): 161-169.
- 12 Feng Hang, Zhang Liyan, Wang Xing, *et al.*. Registering multi-view measurement data using two-axis NC turntable [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2012, 31(2): 244-249.
冯 杭, 张丽艳, 王 兴, 等. 基于两轴数控转台的多视测量数据拼合[J]. *机械科学与技术*, 2012, 31(2): 244-249.
- 13 Wu Di, Lü Nanguang, Ouyang Jing. A structured light three-dimensional measurement method based on unconstrained system configuration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(3): 482-486.
吴 迪, 吕乃光, 欧阳京. 基于无约束系统的结构光三维测量方法[J]. *光学学报*, 2008, 28(3): 482-486.
- 14 Zhou Langming, Zheng Shunyi, Huang Rongyong. A registration algorithm for point clouds obtained by scanning objects on turntable [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(1): 73-79.
周朗明, 郑顺义, 黄荣永. 旋转平台点云数据的配准方法[J]. *测绘学报*, 2013, 42(1): 73-79.
- 15 Peng Si, Yang Xiangdong, Wu Liao, *et al.*. Calibration method research for high precision turntable [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2012, (4): 1-3.
彭 思, 杨向东, 吴 聊, 等. 高精密转台标定方法研究[J]. *机械设计与制造*, 2012, (4): 1-3.
- 16 Yu Qifeng, Shang Yang. *Videometrics: Principles and Researches* [M]. Beijing: Science Press, 2009. 29-31.
于起峰, 尚 洋. *摄像测量学原理与应用研究* [M]. 北京: 科学出版社, 2009. 29-31.
- 17 Z Zhang. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- 18 Ru Haifeng, Wang Yaoming, Yin Ye. Calibrating camera's intrinsic parameter based on plane calibration object in the computer vision [J]. *Journal of Shanghai Dianji University*, 2005, 8(6): 49-51.
茹海峰, 王耀明, 殷 业. 计算机视觉中基于平面标定物体的摄像机标定[J]. *上海电机学院学报*, 2005, 8(6): 49-51.