

# 基于拉丝法的线结构光视觉测量系统 标定

崔希民, 李聪, 袁德宝, 洪雪倩, 赵毅

中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

**摘要** 利用线结构光视觉非接触测量技术的大量程、大视场、高精度、光纹信息提取简单等优点进行非接触测量大型机器及轨道等。分析了线结构光视觉测量传感器数学模型, 利用构建的位于光平面上的标定特征点, 提出了一种基于拉丝法的线结构光视觉测量标定方法, 即先标定传感器相机的内外参数, 再利用激光线与铁丝相交形成的点作为特征点标定光平面在相机坐标系下的方程。该方法降低了标定设备的成本, 过程简单。标定结果表明: 该方法标定满足测量要求。

**关键词** 线结构光视觉测量; 特征点; 标定; 拉丝法

**中图分类号** TH761

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.24.010

## Calibration of a Line Structured Light Vision Measuring System Based on the Drawing Method

CUI Ximin, LI Cong, YUAN Debao, HONG Xueqian, ZHAO Yi

College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China

**Abstract** The line structured light vision measurement technology is widely used as a non-contact measurement technology. This paper proposes a method for structured light vision measurement calibration based on the drawing method by analyzing the mathematical model of the visual measurement sensor and using the feature point constructed on the light plane. This method has simple process and reduces the cost of calibration equipment, laying the foundation for line structured light engineering application. The calibration results show that the method meets the measurement requirements.

**Keywords** line structured light vision measurement; feature point; calibration; drawing method

结构光三维视觉测量方法研究兴起于20世纪70年代。在诸多的视觉测量方法中, 结构光三维视觉测量以其大量程、大视场、较高精度、光条图像信息易于提取、实时性强及主动受控等特点, 近年来在逆向工程、在线测量等主动、现场实时测量过程中得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。针对现有的轨道检测小车使用CPHII点作为检测基准, 检测人员推动小车进行轨道检测的作业方式, 检测过程中还需要使用全站仪进行指导作业, 存在依赖设计值低、作业效率低、精度不高等缺点。在新型的轨道几何参数检测中研制的结构光视觉测量系统能进行快速、高效的检测。

线结构光视觉系统标定主要是确定相机的内外部参数

和视觉系统的结构参数<sup>[2-3]</sup>, 目前, 有学者对结构光平面参数的标定方法进行了研究, 例如, 刘凤梅等<sup>[4]</sup>提出了基于齿形靶标和一维工作台的标定方法, 但是这两类方法均需要使用特殊的设备, 操作步骤较复杂, 不适合现场标定的使用; 周富强等<sup>[5]</sup>及徐丽等<sup>[6]</sup>分别提出了基于交比不变性的标定方法, 该方法使用二维平面靶标在观测范围内自由地移动数个位置, 实现了对结构光平面的标定。但这类方法均通过标定靶标上至少3个共线特征点, 并利用交比不变性原理得到结构光平面与已知三点所在直线的交点坐标, 获取特征点的效率仍然较低。

本文在拉丝法的基础上提出了一种新的标定方法, 即首

收稿日期: 2013-10-23; 修回日期: 2014-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071328)

作者简介: 崔希民, 博士, 研究方向为GPS卫星导航和定位、形变灾害监测与数据处理、三维工业测量、3S集成与应用, 电子信箱: cxm@cumt.edu.cn

引用格式: 崔希民, 李聪, 袁德宝, 等. 基于拉丝法的线结构光视觉测量系统标定[J]. 科技导报, 2014, 32(24): 64-67.

先标定传感器相机的内外参数,然后利用激光线与铁丝相交形成的点作为特征点标定光平面在相机坐标系下的方程(即光平面的法向量)。

### 1 线结构光视觉测量系统数学模型

线结构光视觉测量系统由线性激光器和一个 CCD 相机构成。激光器发射出的光束形成的光平面与空间被测物体相交,产生一个反映物体轮廓的截面曲线,曲线上的点就是被测点,其成像于相机的像平面上。而光平面与相机的像平面可以建立透视对应关系,利用此关系就可以由像点计算出其对应的被测点空间坐标。

图 1 为线结构光视觉测量传感器的数学模型,  $O-XYZ$  表示相机坐标系,  $O-uv$  表示 CCD 像面坐标系,忽略透镜的倾斜因子,光学透镜中心  $O$  到像平面的距离为相机透镜焦距  $f$ ,光轴与像平面相交于主点  $(u_0, v_0)$ ,像素在水平和垂直方向的物理尺寸分别为  $dx$ 、 $dy$ 。

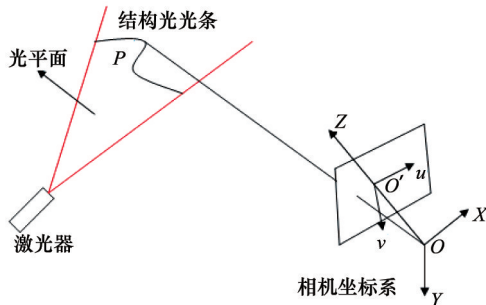


图 1 线结构光视觉测量的数学模型

Fig. 1 Mathematical model of line structured light vision measurement

图 2 为测量系统简图。设光平面与被测物体交线上一点  $P$  在相机坐标系中的坐标为  $(X, Y, Z)$ ,在像平面成像于点  $(\tilde{u}, \tilde{v})$ 。考虑透镜径向畸变,理想像点坐标  $(u, v)$  为

$$u = (\tilde{u} - u_0)(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + u_0 \quad (1)$$

$$v = (\tilde{v} - v_0)(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + v_0 \quad (2)$$

式中,  $r = \sqrt{(\tilde{u} - u_0)^2 + (\tilde{v} - v_0)^2}$ ,  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  为径向畸变系数。由透视模型得到:

$$(u - u_0)dx = \frac{f}{Z}X, \quad (v - v_0)dy = \frac{f}{Z}Y \quad (3)$$

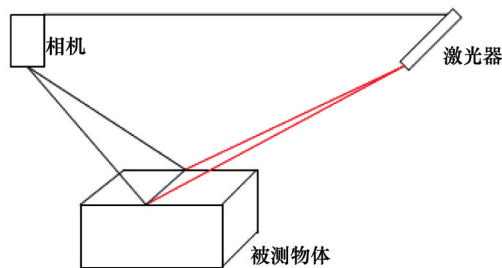


图 2 测量系统示意

Fig. 2 Measurement system sketch

设光平面在相机坐标系下的方程为

$$a_1 X + a_2 Y + a_3 Z + a_4 = 0 \quad (4)$$

在相机内参数和光平面方程已知的情况下,则根据式(1)~(4)可唯一确定物点  $P$  的坐标<sup>[7,8]</sup>。

### 2 相机内外参数标定

对基于数字相机的摄影来说,干扰成像的因素主要有相机镜头的径向畸变(畸变系数为  $K_1, K_2, K_3$ )和偏心畸变(畸变系数为  $a_1, a_2$ )、像平面不平畸变和像平面内比例及正交畸变(畸变系数为  $A_1, A_2$ )。相机的内方位元素( $C, X_p, Y_p$ )和镜头光学畸变系数成为相机的内部参数,外方位元素成为外部参数<sup>[9,10]</sup>。求取相机内外参数过程即是相机的标定。

本文相机内外参数的标定采用的是实验场法。即由一些坐标已知的物方控制点构成实验场,用待标定的相机对实验场摄影,然后根据单片空间后方交会或多片后方交会求解内参数的过程,标定实验时先用  $D_3$  相机拍摄标定场编码标志,用 V-STARS 处理由  $D_3$  相机得到照片的标定场数据,然后用待标定的视觉测量系统在不同位置对做好的标定场拍照(图 3),用两台电子经纬仪构成的工业测量系统测量标定场公共点的坐标。相机标定的方法较为成熟在此不多介绍。实验场如图 4 所示,标定得到的相机内外参数分别为  $C=4.135895$ ,  $X_p=-0.042171$ ,  $Y_p=0.005797$ ,  $K_1=6.833595 \times 10^{-3}$ ,  $K_2=-3.581795 \times 10^{-4}$ ,  $K_3=-1.431923 \times 10^{-6}$ ,  $a_1=-5.739269 \times 10^{-4}$ ,  $a_2=-4.037920 \times 10^{-4}$ ,  $A_1=2.372057 \times 10^{-4}$ ,  $A_2=-5.686892 \times 10^{-5}$ ;  $\Delta X=752.9129$ ,  $\Delta Y=-882.9198$ ,  $\Delta Z=-401.0542$ ,  $\phi=-1.554$ ,  $\omega=-0.052$ ,  $\kappa=3.141$ 。



(a) 位置 1



(b) 位置 2

图 3 待标定相机拍摄图像

Fig. 3 Images of the to-be calibrated camera

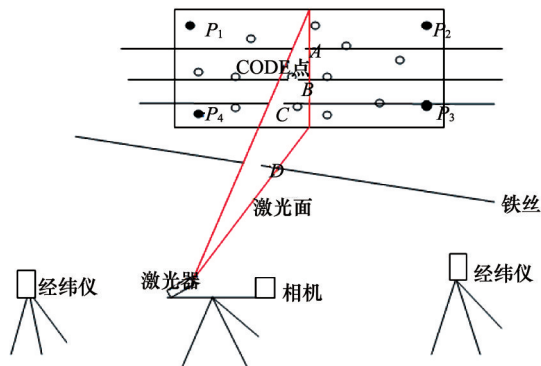


图4 实验场示意

Fig. 4 Experiment field sketch

实验采用尼康D<sub>3</sub>数码相机,其分辨率为4256 pixel × 2832 pixel,镜头为尼康镜头。实验场采用的是尺寸为2.0 m × 1.5 m的平面,在其上共布设90个编码标志,编码标志点坐标由数码相机拍摄经V-STARS处理得到,其坐标测量精度在10 μm以内。

### 3 光平面的标定

针对线结构光视觉测量系统的特点,实验中采用一种基于拉丝法的标定方法,该方法主要是让光平面投射到空间分布不共面的3条细线和1根细铁丝上,从而在这些线和铁丝上形成一些亮点作为线结构光光平面上的特征点。采用经纬仪前方角度交会获得特征点在经纬仪坐标系下的坐标,然后通过公共点转换获得特征点在相机坐标系下的坐标。通过这5个特征点利用最小二乘法拟合出一个光平面,从而得到光平面在相机坐标系下的法向量。

#### 3.1 标定过程

1) 进行经纬仪的初始化(即联机)、定向,并解算定向误差(不超过0.1 mm)。如果误差超限则要重新定向直到误差满足要求为止。

2) 经纬仪测点。先测出公共点 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ 的坐标,再测出线结构光与3根细线和1根细铁丝的交点坐标( $P_5$ 、 $P_6$ 、 $P_7$ 、 $P_8$ 、 $P_9$ ),然后进行工业相机拍照,拍出的照片至少应可以扫描出3个CODE点,此为第1组数据。接着继续测线结构光与各线的交点,并进行工业相机拍照,重复6次。

3) D<sub>3</sub>相机拍照,得到的照片作为相机标定时的标定场数据。

4) 数据处理。

① 在V-STARS中处理D<sub>3</sub>相机拍到的照片得出相机标定所需的标定场数据。

② 利用相机标定程序进行相机标定,得到相机的内参数和外参数。

③ 利用智能精密测量系统进行坐标转换,即把线结构光与铁丝和线的交点在全站仪坐标系下的坐标转到工业相机坐标系下,转换参数为相机标定得到的外参数。接着进行平面拟合,即对测点进行拟合得到线结构光光平面的法向量。

#### 3.2 标定数据获取

在本实验中实验数据主要包括公共点和特征点三维坐标,由经纬仪测得的公共点和特征点数据分别如表1、表2所示。

表1 公共点坐标

Table 1 Coordinates of common points

公共点	x/mm	y/mm	z/mm
$P_1$	1537.979	-2613.832	247.826
$P_2$	1066.712	-2581.651	169.593
$P_3$	698.653	-2554.775	164.948
$P_4$	390.207	-2533.685	-655.627

表2 特征点数据

Table 2 Feature point data

组别	特征点	x/mm	y/mm	z/mm
1	$P_5$	1167.901	-2587.758	387.409
	$P_6$	1164.648	-2588.441	-44.807
	$P_7$	1161.712	-2589.143	-440.131
	$P_8$	1108.097	-1771.634	29.547
	$P_9$	1084.480	-1510.087	-597.414
2	$P_5$	1167.675	-2587.540	387.603
	$P_6$	1164.333	-2587.615	-45.005
	$P_7$	1161.354	-2588.583	-440.046
	$P_8$	1107.975	-1771.525	29.525
	$P_9$	1084.708	-1509.476	-597.265
3	$P_5$	1167.400	-2586.989	387.403
	$P_6$	1164.612	-2588.139	-44.962
	$P_7$	1161.123	-2588.072	-439.857
	$P_8$	1108.124	-1771.342	29.559
	$P_9$	1084.566	-1509.813	-597.770
4	$P_5$	1348.990	-2598.683	387.166
	$P_6$	1357.266	-2600.752	-40.944
	$P_7$	1364.915	-2602.921	-427.610
	$P_8$	1127.171	-1773.549	30.371
	$P_9$	1062.948	-1502.698	-608.576
5	$P_5$	1348.991	-2599.301	-2599.302
	$P_6$	1357.364	-2601.099	-40.815
	$P_7$	1364.817	-2603.003	-427.583
	$P_8$	1127.274	-1773.667	30.467
	$P_9$	1062.803	-1502.801	-608.579
6	$P_5$	1497.943	-2609.576	387.574
	$P_6$	1503.171	-2611.978	-37.536
	$P_7$	1506.736	-2612.650	-420.239
	$P_8$	1381.780	-1808.569	42.923
	$P_9$	1353.805	-1589.474	-475.946
7	$P_5$	1239.260	-2591.455	387.349
	$P_6$	1209.650	-2590.031	-43.549
	$P_7$	1182.739	-2588.767	-437.615
	$P_8$	1270.027	-1794.120	37.414
	$P_9$	1248.546	-1557.880	-524.522

### 3.3 标定结果

由以上标定过程算出各组光平面的法向量及平均法向量如表3所示。

由表3计算可知,标定得到的光平面之间最大夹角是2',

在结构光视觉测量系统工作距离为1 m,被测物体长度为2 m的情况下最大点位误差在2 mm,能够满足铁路几何参数检测的任务要求。

表3 光平面的法向量

Table 3 Normal vectors of the light plane

组别	$i$	$j$	$k$	总RMS	最小点位 偏差	最大点位 偏差
1	-0.9998863	-0.0110737	0.0102382	0.124	-0.138	0.182
2	-0.9998909	-0.0109902	0.0098715	0.030	-0.033	0.044
3	-0.9998901	-0.0111309	0.0097963	0.208	-0.271	0.288
4	-0.9998877	-0.0115720	0.0095173	0.182	-0.199	0.266
5	-0.9998859	-0.0114039	0.0099078	0.207	-0.292	0.274
6	-0.9998890	-0.0110967	0.0099411	0.216	-0.267	0.208
7	-0.9998992	-0.0110152	0.0089586	0.210	-0.212	0.241
平均	-0.99988971	-0.011183229	0.009747257			

## 4 结论

建立了基于线结构光视觉测量的数学模型,提出一种基于拉线法的线结构光视觉测量系统标定方法,该方法只需在实验室布置一个简易标定场,即可方便得到成像模型中需要的参数,成本低,操作简单;标定所需的特征点由激光发射器产生,简单方便。经实验证明该方法原理简单、计算方便,标定误差在0.1%,完全可以满足结构光视觉测量的要求。

### 参考文献(References)

- [1] 余乾, 张旭苹, 张益昕, 等. 新型三维视觉测量结构光平面标定方法[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 277-281.  
Yu Qian, Zhang Xuping, Zhang Yiqing, et al. New three-dimensional vision measurement method calibrating structured light plane[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(1): 277-281.
- [2] 刘振, 张广军, 魏振忠, 等. 一种高精度线结构光视觉传感器现场标定方法[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3125-3128.  
Liu Zhen, Zhang Guangjun, Wei Zhenzhong, et al. An accurate calibration method for line structured light vision sensor[J]. Journal of the Optical, 2009, 29(11): 3125-3128.
- [3] 陈天飞, 马孜, 吴翔. 基于主动视觉标定线结构光传感器中的光平面[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 257-263.  
Chen Tianfei, Ma Zi, Wu Xiang. Calibration of light plane in line structured light sensor based on active vision[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(2): 257-263.
- [4] 刘凤梅, 段发阶, 叶声华. 一种新的高精度的线结构光传感器标定方法[J]. 天津大学学报, 1999, 2(5): 547-550.  
Liu Fengmei, Duan Fajie, Ye Shenghua. New accurate calibration technique for the light-strip sensors[J]. Journal of Tianjin University, 1999, 2(5): 547-550.
- [5] 周富强, 张广军. 表面视觉传感器模型参数的简易标定方法[J]. 机械工程学报, 2005, 41(3): 175-179.  
Zhou Fuqiang, Zhang Guangjun. Facilitated method to calibrate model

- parameters of vision sensor for surface measurement[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(3): 175-179.
- [6] 徐丽, 张之江. 基于共面靶标的结构光标定方法[J]. 光电子激光, 2009, 20(8): 1063-1069.  
Xu Li, Zhang Zhijiang. Calibration in structured light system using coplanar target[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2009, 20(8): 1063-1069.
- [7] 孙长库, 何明霞, 王鹏. 激光测量技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 2008.  
Sun Changku, He Mingxia, Wang Peng. Laser measurement technology [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2008.
- [8] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[C]//Proceedings of Seventh International Conference on Computer Vision. Corfu, Greece, ICCV, 1999: 666-673.
- [9] Stetger C. An unbiased detector of curvilinear structures[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 1998, 20(2): 113-125.
- [10] 张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.  
Zhang Guangjun. Vision measurement[M]. Beijing: Science Press, 2008.

(责任编辑 赵业玲)

### 《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映中国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域中国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。