

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.09.006

基于自由靶标的线结构光视觉测量系统标定研究^{*}

杨 凯, 余厚云^{*}, 杨 超

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要:针对现有的线结构光视觉测量系统现场标定方法存在效率低、操作复杂等不足,提出了一种基于自由移动平面靶标的标定方法。该方法以平面靶标作为标定对象,首先采用张正友的方法标定出了摄像机内部参数,然后引入了线结构光和自由移动平面靶标,以各种位姿下靶标内的激光条纹与棋盘格角点边线交点作为特征点,求取了特征点在摄像机坐标系下的坐标,并拟合出了结构光面平面方程,从而完成了整个测量系统的标定。试验结果表明,采用上述方法标定后的线结构光视觉测量系统测量误差小于1%,达到了较高的标定精度,能够满足使用要求。

关键词:线结构光;视觉测量;标定;光平面;平面靶标

中图分类号:TH741;TP391

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)09-1066-05

Calibration of line structured-light vision measurement system based on free-target

YANG Kai, YU Hou-yun, YANG Chao

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming at the problem of existing line structured light vision measurement system calibration method such as low efficiency, complex operation, a approach of calibration based on free plane targets was proposed. This method took planar target as a calibration object. First, according to the two-dimensional plane calibration theory of Zhang, the internal and external parameters of the camera was calculated. Then the line structured-light and free planar target were introduced, with taking intersection-points of laser stripe and checkerboard border in a variety of target positions as feature points, the coordinates of the feature points in the camera coordinate system were calculated, and structure-light equation of plane to complete the whole measurement system calibration was fitted. The results indicate that the line structured light vision measurement system measurement error is less than 1% by the above methods of calibration, and reaches the high calibration precision.

Key words: structured-light; vision-measurement; calibration light-plane; planar-target

0 引 言

线结构光视觉测量技术具有测量精度高、速度快以及信息量丰富等优点,被广泛应用于数字化测量领域。测量过程中,系统将结构光投射到被测工件表面,利用结构光面与摄像机之间的位置关系来提取工件表面信息。与一般视觉测量系统不同,线结构光测量系

统需要同时标定出摄像机参数和线结构光面方程。

目前,针对摄像机的标定方法已经非常成熟,例如基于径向约束的方法^[1]、基于主动视觉的方法^[2]、基于二维平面靶标的方法等^[3],而关于结构光面的现场标定方法仍在不断研究之中。其中,R. Dewar 和K. W. James^[4]分别提出了细丝散射法。该方法将结构光投射到金属细丝上,利用仪器测出光在细丝上形成亮点的空间位置

收稿日期:2016-04-12

基金项目:国防技术基础研究项目(101130192)

作者简介:杨 凯(1993-),男,安徽巢湖人,硕士研究生,主要从事计算机辅助测控方面的研究. E-mail:nuaayk9330@sina.com

通信联系人:余厚云,男,博士,讲师,硕士生导师. E-mail:nuaahyyu@nuaa.edu.cn

来标定结构光面。但由于该方法使用的细丝数量有限,导致测量点数少,标定精度较低。段发阶^[5]提出了一种齿形靶标法,他以特殊设计的锯齿形立体结构作为靶标来进行线结构光面的标定。但该方法要求靶标与光平面呈一个特殊位置,且获得标定点点较少,调整复杂,并不适合现场标定。Huynh 和魏振忠等^[6-7]提出了基于立体标靶的交比不变和双重交比不变法,所得标定点的精度大幅提升但仍需相互垂直的平面构成高精度靶标,这不但提高了标定成本,且标靶平面之间对光照相互遮挡,难以获得高质量标定图像。吴庆华^[8]提出了3圆点靶标法,该方法尽管在精度和制作难易程度上都优于齿形靶标,适合操作简单的现场标定,但其坐标映射策略较为复杂,程序实现难度大。王金桥等^[9]提出引入两束激光条纹相交求解特征点,该方法能够有效简化标定过程,但由于两束激光的光纹在相交处会产生干涉,将降低激光条纹中心的提取精度。

综上所述,现有的线结构光面标定方法靶标制作难度大、现场标定过程复杂,为此本研究利用简单的二维平面靶标,通过求取结构光条纹与靶标平面内直线的交点来拟合得到结构光面平面方程,简化求解过程,提高标定效率。

1 线结构光扫描测量原理

摄像机和激光器固定安装在运动滑座上,并可随滑座一起沿工作台作直线移动。测量时首先由电机驱动滑座移动到各测量位置,激光器发出的激光投射到被测工件上,在工件表面形成一条光亮的激光条纹。然后,摄像机拍摄工件表面图像,再结合摄像机和线结构光平面的预先标定结果,便可以计算出各测量位置处激光条纹在摄像机坐标系下的物理坐标。最后,笔者将这些坐标统一到世界坐标系下得到工件表面点云数据,从而完成整个工件的线结构光扫描测量。

线结构光视觉测量系统如图1所示。

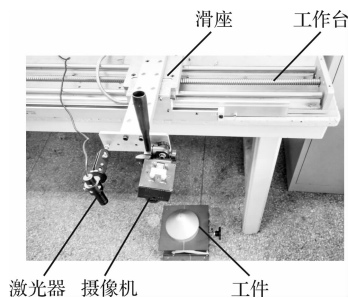


图1 线结构光视觉测量系统

线结构光视觉测量系统用到的坐标系包括摄像机坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$, 世界坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$, 图像物理

坐标系 $O'XY$ 和图像像素坐标系 OUV 。系统以首次采集图像时的摄像机坐标系作为世界坐标系,后续摄像机移动到各位置处测得的工件表面光条纹坐标均统一到该世界坐标系下,以实现整个工件表面轮廓的测量。

线结构光视觉测量系统如图2所示。

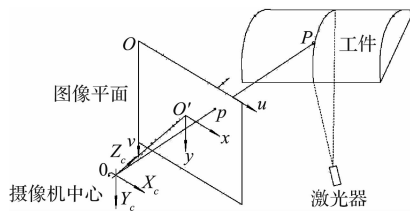


图2 线结构光测量系统模型

假设工件表面任意一点 $P(x_c, y_c, z_c)$, 其在图像坐标系下的像素坐标为 $p(u, v)$, 物理坐标为 (x, y) , 两者满足如下关系:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dx & 0 & -u_0 dx \\ 0 & dy & -v_0 dy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: (u_0, v_0) — 摄像机像平面光心坐标; dx, dy — 单一像素在 x, y 方向的物理尺寸。

同时,根据摄像机针孔成像模型,图像物理坐标系和摄像机坐标系又有如下关系:

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

联立式(1)和式(2)可得到图像像素坐标系和摄像机坐标系之间的关系^[3]:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{f}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: s — 比例因子。

设结构光平面在摄像机坐标系下的方程为:

$$Z_c = AX_c + BY_c + C \quad (4)$$

因此,只需求出摄像机内部参数和结构光平面方程,联立公式(3,4)就能够求出工件表面任一点 P 在当前摄像机坐标系下的坐标。再根据线位移工作台上运动滑座的位移矢量,就可以将各测量位置处的 P 点坐标转换到世界坐标系下,进而拟合出工件表面轮廓点云数据。其中,各测量位置处摄像机坐标系与世界坐标系满足如下关系:

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = d \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: d —滑座移动距离; $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ —滑座位移方向向量。

2 测量系统标定

如上所述,线结构光视觉测量系统标定包括对摄像机参数的标定和结构光平面标定两个部分。考虑到张正友提出的基于二维平面靶标的标定方法简单易行且精度较高,该系统采用该方法对摄像机参数进行标定。针对结构光面与摄像机之间位置关系的标定,本研究提出了一种新的基于自由平面靶标的标定方法。

该系统以摄像机参数标定时使用的平面靶标作为标定对象,将激光投射到靶标上,提取激光条纹中心线并拟合出直线方程。然后,以该直线与靶标内各棋盘格交点作为特征点,并求出这些特征点在摄像机坐标系下的坐标。

平面靶标特征点如图 3 所示。

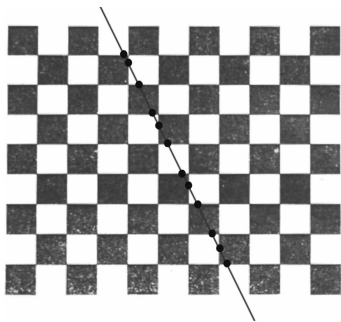


图 3 平面靶标特征点

为了得到摄像机坐标系下的结构光平面方程,必须求出上述特征点在摄像机坐标系下的坐标,而仅根据各特征点的图像坐标 (u, v) 是无法通过公式(3)求解出该特征点在摄像机坐标系下的坐标 (x_c, y_c, z_c) 的。因此,本研究先利用交比不变性求出特征点在平面靶标坐标系下的坐标^[10],再将其转换到摄像机坐标系。

交比不变性原理示意图如图 4 所示。

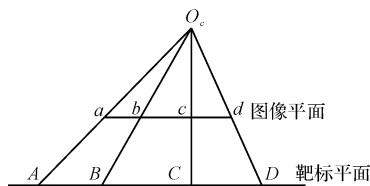


图 4 交比不变性原理示意图

根据交比不变性原理,有:

$$\frac{AC}{BC} : \frac{AD}{BD} = \frac{ac}{bc} : \frac{ad}{bd} \quad (6)$$

利用公式(6),已知某点在图像坐标系下的坐标 (u, v) ,可以求出其在靶标坐标系下坐标 $(x_t, y_t, 0)$ 。再由摄像机针孔成像模型可知,平面靶标坐标系下任意一点 $P(x_t, y_t, 0)$ 在摄像机坐标系下的坐标 (x_c, y_c, z_c) 可通过下式计算得到:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_t & t_t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: R_t, t_t —靶标坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵和平移向量。

本研究通过保持激光器和摄像机位置不变,任意调整靶标位姿,可以得到若干组这样的特征点坐标。

本研究通过将得到的若干组特征点利用最小二乘法进行平面拟合,即可求出结构光面在摄像机坐标系下的平面方程。

3 试验结果

系统是在 Win7 平台利用 VC++ 结合 OpenCV 开发的,使用的摄像机为大恒 DH-HV2003UC 型 USB 接口工业相机,像素分辨率为 $1\,600 \times 1\,200$ 。激光器采用波长 635 nm 的 5 mW 一字线结构光激光器,平面靶标是打印的 10×8 的棋盘格,格子尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 。

3.1 标定实验

本研究采用张正友的方法,利用 OpenCV 函数库中的标定函数计算出摄像机内部参数如表 1 所示。

表 1 摄像机内部参数标定结果

参数	f_x	f_y	U_0	V_0	K_1	K_2	P_1	P_2
数值	3 987.25	3 992.28	798.10	557.93	-0.719	5.977	-0.013	-0.026

拍摄靶标平面内激光条纹图像及其条纹提取、细化处理后图像。本研究对激光条纹图像先进行大津阈值分割,再利用改进的 Hilditch 细化算法进行细化条纹,最后采用最小二乘法拟合出条纹所在直线方程,以

提高交点特征点坐标提取精度,并求出图像内特征点在摄像机坐标系下的坐标。

实验中,调整靶标位姿求出 10 组这样的特征点坐标数据,再用最小二乘算法拟合出结构光面在摄像机

坐标系下的平面方程:

$$Z=0.005X-0.052Y+867.576$$

第一组靶标图和激光条纹图如图5所示。

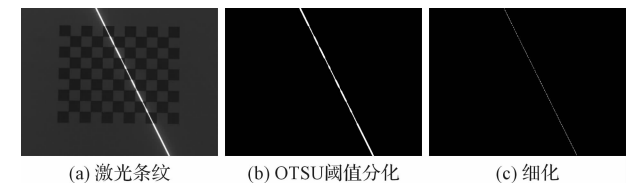


图5 第一组靶标图和激光条纹图

特征点在不同坐标系下的坐标如表2所示。

表2 特征点在不同坐标系下的坐标

图像坐标		靶标坐标		摄像机坐标下的三维坐标		
u	v	X_o	Y_o	X_c	Y_c	Z_c
380.20	160.33	31.22	0	-124.07	-57.76	895.39
401.33	202.84	35.68	10.00	-113.90	-53.71	895.52
421.96	244.35	40.00	19.72	-104.02	-49.78	895.65
422.56	245.54	40.11	20.00	-93.56	-45.63	895.66
443.82	288.33	44.57	30.00	-83.39	-41.62	895.92
465.11	331.16	48.99	40.00	-73.22	-37.53	896.05
469.96	340.91	50.00	42.26	-81.09	-40.74	895.95
486.69	374.58	53.49	50.00	-63.04	-33.46	896.17
508.20	417.84	57.97	60.00	-52.87	-29.39	896.30
517.98	437.51	60.00	64.53	-58.44	-31.62	896.23

3.2 精度分析

影响系统标定精度的误差因素主要来源于以下几个方面:

(1)激光条纹中心线提取误差。激光条纹中心线的提取是工件表面测量和后续数据处理的前提,直接影响系统的标定精度。结构光投射在工件表面时,激光条纹会受到金属工件表面的反射和背景条纹的干扰,提取中心线时需要作图像去噪和细化处理。

(2)坐标系转换误差。摄像机坐标系与世界坐标系之间的转换需要用到线位移工作台上运动滑座的位移矢量,该位移量是通过在位移工作台上安装的光栅传感器测得的,因此光栅传感器的测量误差也会影响系统测量精度。

为了验证系统的测量精度,本研究利用标定好的结构光测量系统进行了平面靶标棋盘格尺寸测量试验。笔者将激光条纹以一定角度投射到平面靶标上,提取激光条纹并拟合出直线方程,并计算出激光条纹与靶标平面内水平直线的夹角 β 以及各交点坐标。最后,计算由各交点坐标确定的棋盘格尺寸并与公称值10 mm进行比对。笔者通过四组这样的试验,计算出结构光测量系统的测量误差绝对值小于0.1 mm,相对

误差低于1%。

系统精度验证图如图6所示。

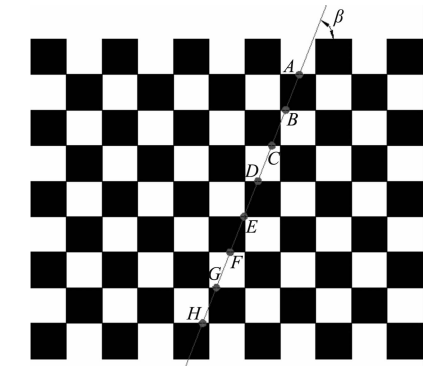


图6 系统精度验证图

平面靶标棋盘格尺寸测量结果如表3所示。

表3 平面靶标棋盘格尺寸测量结果(单位:mm)

棋盘格	尺寸测量数据				平均值	误差
	第一组	第二组	第三组	第四组		
AB	9.87	10.09	9.84	9.83	9.91	-0.09
BC	9.86	10.09	9.85	9.89	9.92	-0.08
CD	9.84	10.18	9.94	9.93	9.97	-0.03
DE	9.83	10.07	9.87	9.97	9.94	-0.06
EF	9.89	10.04	9.84	9.99	9.94	-0.06
FG	9.88	10.07	9.86	9.89	9.93	-0.07
GH	9.81	9.99	9.89	9.94	9.91	-0.09

4 结束语

本研究提出了一种基于自由靶标的线结构光面参数标定方法,建立了线结构光测量系统的数学模型,根据张正友摄像机标定思想完成摄像机内外参数标定,并在以上平面靶标基础上引入线结构光。通过提取不同位姿靶标上特征点坐标,然后利用最小二乘法进行平面拟合,完成线结构光面的标定。

该方法只需要2幅以上不同位姿的靶标图像就可以进行光面标定,提高了现场标定的快捷性,方便性,而且不需要高精度硬件测量组件,降低了标定成本。

实验结果表明,该方法具有较高准确性,在本研究的实验条件下相对误差为0.9%,能满足使用要求。

参考文献(References):

[1] TSAI R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. **IEEE Journal of Robotics and Automation**,1987,3(4):323-344.

[2] HARTLEY R. Self-calibration of stationary cameras[J]. **International Journal of Computer Vision**,1997,22(2):5-23.

- [3] ZHANG Zheng you. A Flexible New Technique for Camera Calibration[J]. **IEEE Transon Pattena Analysis and Machine Intelligence**, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [4] DEWAR R. Self-generated targets for calibration of structured light optical sectioning sensors with respect to an external coordinate system[R]. Dearborn Mich: Sochety of Man-hfatnring Engineers, 1988.
- [5] 段发阶, 刘凤梅, 叶声华. 一种新型线结构光传感器结构参数标定方法[J]. **仪器仪表学报**, 2000, 21(1): 108-110.
- [6] HUYNH D Q. Calibration a structured light stripe system: a novel approach[J]. **Internal Journal of Computer Vi-**

sion, 1999, 33(3): 73-86.

- [7] 魏振忠, 张广军, 徐 园. 一种线结构光视觉传感器标定方法[J]. **机械工程学报**, 2005, 41(5): 210-214.
- [8] 吴庆华. 基于线结构光扫描的三维表面缺陷在线检测的理论与应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学机械科学与工程学院, 2013.
- [9] 王金桥, 段发阶, 伯 恩, 等. 线结构光扫描传感器结构参数一体化标定[J]. **传感技术学报**, 2014, 9(5): 1196-1201.
- [10] 张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社. 2008.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

杨 凯, 余厚云, 杨 超. 基于自由靶标的线结构光视觉测量系统标定研究[J]. **机电工程**, 2016, 33(9): 1066 - 1070.

YANG Kai, YU Hou-yun, YANG Chao. Calibration of line structured-light vision measurement system based on free-target[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2016, 33(9): 1066 - 1070.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>



机械制造[®]

MACHINERY 月刊

主要栏目

慧眼聚焦、专题报导、研究·开发、制造·材料、现状·趋势·战略、试验·检测、工艺·装备、维修·改装、经验交流、机电信息、质量·成本·管理、企业·产品·市场、技术讲座等。

读者对象

面向全国机电行业及相关配套行业的生产企业、设计研究院所、各院校从事机电产品研究、开发、设计、制造、设备应用等工程技术人员, 以及企业规划、管理、营销等专业人士。

中国标准连续出版物号: ISSN1000-4998
CN31-1378/TH

发行: 公开发行, 全国各地邮局征订

邮发代号: 4-18 国外发行代号: M5562

刊期: 月刊(每月20日出版) 幅面: 大16开

定价: 15元/期, 全年总价180元

地址: 上海市中兴路960号2号楼407室 邮编: 200070

电话: 021-63292023 63217621 56902460

传真: 56902460

E-mail: jixiezhizao@126.com

网址: www.jxzzzz.com

创刊于
1950年

- 国家百种重点科技期刊
- 华东地区优秀期刊
- 中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)
- 中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊

★ 欢迎订阅 ★ 欢迎赐稿 ★ 欢迎刊登广告

