

文章编号 1004-924X(2009)05-0958-06

线结构光传感系统的快速标定方法

韩建栋^{1,2}, 吕乃光^{2,1}, 董明利², 娄小平²

(1. 北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876;

2. 北京信息科技大学 光电信息与通信工程学院, 北京 100192)

摘要:针对现有线结构光传感系统标定过程中对设备要求高、标定过程繁琐等问题,提出一种基于三点透视模型的快速标定方法。引入一个可自由移动的平面靶标,靶标上只需要共线且相互位置确定的3个特征点,利用共线三点建立三点透视数学模型,根据3个特征点以及光条纹在摄像机像面的成像信息,获取了光平面上标定点在摄像机坐标系下的坐标。平面靶标在视觉范围内任意移动几个位置,得到光平面上多个标定点坐标,从而确定光平面方程。实验证明,该方法平均相对测量误差约为0.72%,标定时不需要昂贵的辅助调整设备,也不需要求解坐标系之间的转换矩阵,简单、快速,适合现场标定。

关键词:线结构光;标定;光平面;三点透视

中图分类号:TP212.14;TP391;TH703 **文献标识码:**A

Fast method to calibrate structure parameters of line structured light vision sensor

HAN Jian-dong^{1,2}, LÜ Nai-guang^{2,1}, DONG Ming-li², LOU Xiao-ping²

(1. *School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China*; 2. *School of Optoelectronic Information and Telecommunication Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China*)

Abstract: In order to solve the calibration problems in line structured light sensor systems such as requirements for high accuracy calibration models, complicate calibration procedures and so on, a calibration method based on perspective-three-points was proposed. A calibration model was established by introducing a planar target that could move freely with three collinear and known mutual location points. The calibration point coordinates in a camera coordinate system could be calculated by using the imaging information of three points and the light stripes on image plane of the camera. The spatial pose between the camera and the light plane could be calibrated by moving the reference plane at several arbitrary places in the sensor range. Experiments show that relative accuracy of the sensor is about 0.72%. The method is suitable for the field calibration, for it has advantages in its simple and flexible calibration, the cost of calibration equipment, and not to calculate the transformation matrix

收稿日期:2008-09-24; **修订日期:**2008-10-14.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50675015; No. 50475176);北京市重点实验室(机电系统测控)开放课题资助项目(No. 82073011);北京市属市管高等学校人才强教计划资助项目(No. PXM2007_014224_044674; No. PXM2007_014224_044655)

among different coordinate systems.

Key words: line structured light; calibration; light plane; perspective-three-points

1 引言

线结构光主动传感技术具有成本低、体积小、非接触、测速快、方便灵活以及光条图像信息易于提取等优点,在视觉测量、工业检测等领域有着重要的意义和广阔的应用前景^[1]。基本原理是结构光条纹受被测物体高度的调制而发生形变,摄像机通过获取形变后的条纹图像信息,根据摄像机与激光器之间的相对位置关系来解算被测物体表面的三维信息^[2]。因此,线结构光传感系统的标定是整个检测任务中关键环节之一。

目前,根据线结构光传感系统的测量模型,提出了许多标定方法。主要方法有拉丝标定法^[3]、基于三维立体靶标和交比不变性的标定方法^[4-5]以及齿形靶标定法^[6-7],这3种标定方法都需要精密的标定辅助设备,标定过程繁琐,且不适合现场标定。针对这一问题,有人提出了基于平面参照物的标定方法^[8-11],其优点是标定设备制作简单,适合现场标定,但这种方法是在平面参照物上建立三维局部世界坐标系,平面参照物每移动到一个位置,都要计算这个位置下局部世界坐标系到世界(摄像机)坐标系的转换矩阵,因此增加了标定的复杂度。

为了方便、快速地得到线结构光传感器模型,本文提出一种基于三点透视模型的标定方法。平面靶标上只需要共线且位置确定的3个特征点,平面靶标自由移动几个位置,通过3个特征点以及光条纹在摄像机像面的成像信息,就可以获得光平面在摄像机坐标系中的平面方程。该方法不需要昂贵的辅助设备,也不要求解任何坐标系之间的转换矩阵,方法简单、快速,非常适合现场标定。

2 线结构光测量原理

线结构光检测系统一般由激光器、摄像机以及角度扫描设备组成,激光器投射一光平面到被测物体表面,受被测物体表面的深度变化调制,形成一变形的结构光光条,由摄像机获取条纹的二维图像。其条纹的变形程度包含了激光器、摄像

机之间的相对位置信息以及被测物体表面的深度信息^[12]。线结构光测量任务就是根据激光器与摄像机之间的三角位置关系,从变形的结构光条纹图像中获取被测物体表面的三维信息。

如图1所示, $O-XYZ$ 为摄像机坐标系, $o-uv$ 为像面坐标系,忽略透镜的倾斜因子,光学透视中心 O 到像平面的距离为摄像机透镜焦距 f ,光轴与像面相交于主点 (u_0, v_0) ,像素在水平和垂直方向的物理尺寸分别为 dx, dy 。设光条纹上一点 P 在摄像机坐标系中坐标为 (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:

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

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

其中 $r = \sqrt{(\tilde{u} - u_0)^2 + (\tilde{v} - v_0)^2}$, k_1, k_2 为径向畸变系数。根据针孔透视模型,有:

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

设光平面在摄像机坐标系中的方程为:

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

如果摄像机内部参数、光平面方程已知,则根据式(1)~(4),就可以唯一确定物点 P 的坐标。

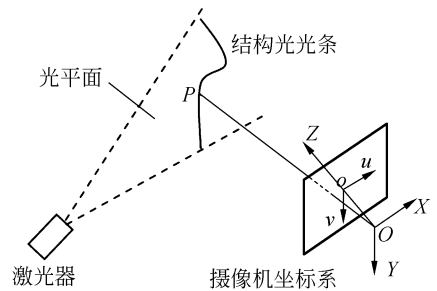


图1 线结构光传感系统

Fig. 1 Line structured light sensor system

3 线结构光传感器快速标定方法

线结构光传感系统的标定包括两部分:摄像机内部参数的标定和光平面的标定。本节重点介绍光平面的标定方法。

光平面的标定采用一块可自由移动的平面靶标,靶标上绘有 3 个彼此距离已知的共线点: A、B、C,三点确定的直线设为 l 。为不失一般性,设定 $AB=BC=d$ 。移动平面靶标在位置 1,确保光条纹与直线 l 相交,交点记为 P ,如图 2 所示。下面通过共线三点的透视模型^[13]计算点 P 在摄像机坐标系中的坐标。

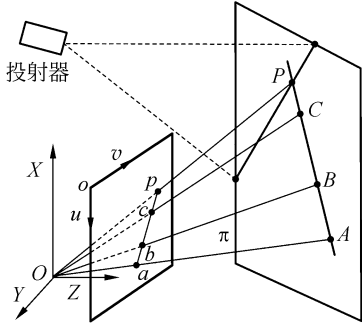


图 2 光平面标定示意图

Fig. 2 Schematic layout of light plane calibration

共线四点 $A、B、C、P$ 在像平面上分别成像于 $a、b、c、p$,利用图像处理算法以及图像畸变校正模型,可以得到理想像点坐标 (u_i, v_i) , ($i=a, b, c, p$),以及像点在摄像机坐标系下的坐标 (X_i, Y_i, f) , ($i=a, b, c, p$),其中 $X_i = (u_i - u_0)dx, Y_i = (v_i - v_0)dy$ 。设向量 $Ob、Oa、Op$ 与 Oc 之间的夹角分别为 θ_1, θ_2 和 θ_3 ,由向量的点积定义可得:

$$\begin{cases} \theta_1 = \arccos\left(\frac{Oc \cdot Ob}{\|Oc\| \cdot \|Ob\|}\right) \\ \theta_2 = \arccos\left(\frac{Oc \cdot Oa}{\|Oc\| \cdot \|Oa\|}\right), \\ \theta_3 = \arccos\left(\frac{Oc \cdot Op}{\|Oc\| \cdot \|Op\|}\right) \end{cases} \quad (5)$$

其中, $\| \cdot \|$ 表示求向量的 2-范数。

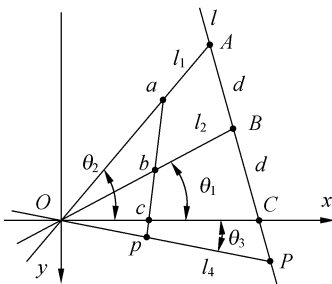


图 3 求解标定点的平面几何模型

Fig. 3 Plane geometric model of collinear P3P

设向量 $Oa、Ob、Oc、Op$ 所在直线分别记为 $l_1、l_2、l_3、l_4$,由射影几何知识可知,4 条直线必定位于同一平面内,记为 π 。在平面 π ,建立平面坐标系 Oxy ,坐标原点与摄像机坐标系中心重合, x 轴与 l_3 重合, y 轴与 l_3 垂直,如图 3 所示。由于 P 点必定位于直线 l_4 上,因此,只要知道 P 点到摄像机中心 O 的空间距离,那么 P 点在摄像机坐标系下的坐标就能唯一确定。下面分两种情况讨论:

(1) 若 $2\tan \theta_1 = \tan \theta_2$,则直线 l 与 y 轴平行,利用约束条件 $AB=d$,求得:

$$\|OP\| = \frac{d}{|\tan \theta_1 \cdot \cos \theta_3|}, \quad (6)$$

(2) 若 $2\tan \theta_1 \neq \tan \theta_2$,设直线 l 方程为: $y = kx + b$,利用约束条件 $AB=BC=d$,得到:

$$k = \frac{\tan \theta_1 \cdot \tan \theta_2}{2\tan \theta_1 - \tan \theta_2}, b = \frac{d \cdot k(\tan \theta_1 - k)}{\tan \theta_1 \cdot \sqrt{1+k^2}}, \quad (7)$$

点 P 为直线 l 与直线 l_4 的交点,计算得到:

$$\|OP\| = \frac{b}{|(\tan \theta_3 - k) \cdot \cos \theta_3|}, \quad (8)$$

得到距离 $\|OP\|$ 后,空间点 P 在摄像机坐标系的三维坐标为:

$$X_P = \|OP\| \cdot \frac{Op_x}{\|Op\|}. \quad (9)$$

同理,移动靶标于位置 2,3, ..., 可以获得光平面上的多个空间点 (X_i, Y_i, Z_i) ($i=1, \dots, n$),将多次得到的三维点坐标拟合成一个平面,目标函数为点到平面的欧氏距离平方和,即

$$f(a_1, a_2, a_3, a_4) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{|a_1 X_i + a_2 Y_i + a_3 Z_i + a_4|}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2}} \right)^2, \quad (10)$$

式中, a_1, a_2, a_3, a_4 为平面方程的系数。

4 实验与精度分析

4.1 标定实验

实验采用一个半导体激光发射器和一个大恒 DH-HV3102-UC 数字摄像机组成线结构光传感系统。摄像机内部参数采用 Photomodeler 近景摄影测量标定软件获取,内参包括:主距 f ,面阵宽度 F_w 、高度 F_h ,图像主点位置 (X, Y) (单位: mm),以及径向畸变系数 k_1, k_2 。假设相机分辨率为 $W \times H$,则通过计算,可得到像元的物理尺寸大小: $dx = F_w/W, dy = F_h/H$,以及以像素为单

位的主点坐标: $u_0 = X/dx, v_0 = Y/dy$ 。

实验中,摄像机分辨率为 $1\ 024\ \text{pixel} \times 768\ \text{pixel}$,标定出的内部参数为:

$$f=12.027\ \text{mm}, F_w=5.999\ 8\ \text{mm}, F_h=4.5\ \text{mm},$$

$$X=2.931\ 4\ \text{mm}, Y=2.184\ 5\ \text{mm},$$

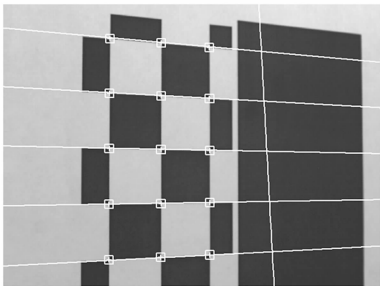
$$k_1=8.46 \times 10^{-4}, k_2=-2.094 \times 10^{-5}.$$

计算得到像元大小与主点位置为:

$$dx=5.858\ 5\ \mu\text{m}, dy=5.859\ 4\ \mu\text{m},$$

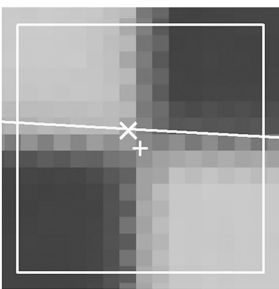
$$u_0=500.377, v_0=372.820.$$

为了在一次摆放位置下,得到光平面上多个标定,可以在平面靶标上设置多组点列,每一行的 3 个角点为一组点列。打开激光投射器,保证投射光条与每一组点列所在的直线相交。将光条纹投射在黑色区域,能有效减少背景光对结构光条纹的影响。采用 Harris 算子检测角点,利用文献[14]方法提取光条纹中心线,如图 4(a)。对提取的角点以及光条纹中心线的图像坐标进行畸变校正,如图 4(b)所示。自由移动靶标两个位置,采用上述方法标定光平面方程。图(5)为光平面



(a)检测结果

(a) Detection results

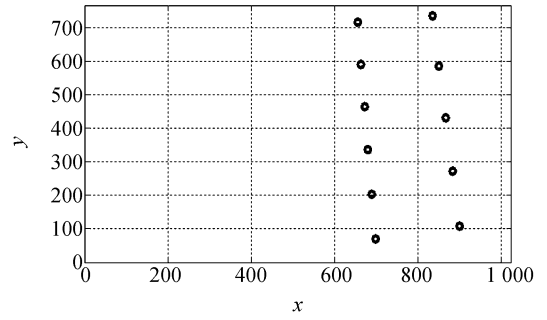


(b)“+”: 校正前角点坐标,“×”:畸变校正后的角点坐标

(b) “+”: Uncorrected coordinate; “×”: Corrected coordinate

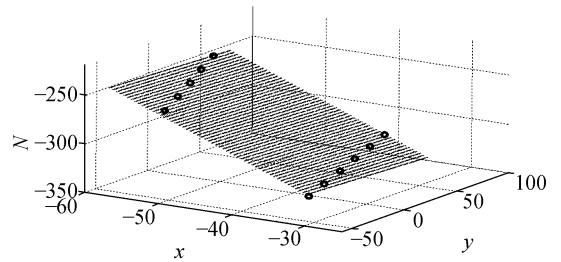
图 4 共面靶标及特征检测

Fig. 4 Coplanar targets and feature detection



(a)标定点的图像坐标

(a) Image coordinates of calibration points



(b) 标定点的空间坐标及拟合的光平面

(b) Three dimensional coordinates of calibration points and light plane

图 5 标定点坐标

Fig. 5 Coordinate of calibration points

上标定点的图像坐标以及标定拟合的光平面。平面拟合得到平面方程为:

$$3.257X+0.046\ 7Y+Z+466.180\ 4=0$$

4.2 精度分析

采用深圳科创时代电子有限公司加工的高精度标准模板,模板上方格边长为 $20\ \text{mm}$,模板精度指标为 $\pm 0.001\ 5\ \text{mm}$ 。调整模板的位置,打开激光器,尽量使结构光条纹与模板上共线的 4 点(顺序为 A, B, C, D)所在的直线重合,然后关闭激光器,测量任意两点之间的距离,将测量值与标准值进行对比,来评价线结构光系统测量精度。并通过多次移动标定模板的位置,重复上面实验。表 1 列出其中一次实验的测量数据。实验数据表明:传感系统的平均绝对误差 $< 0.24\ \text{mm}$,平均相对误差为 0.72% 。

表 1 线结构光系统测量精度分析数据(单位:mm)

Tab.1 Measurement data by structured light sensor system

距离	标准值	测量值	测量绝对偏差	相对误差
AB	20	20.182	0.182	0.91 %
AC	40	40.311	0.311	0.78 %
AD	60	60.392	0.392	0.65 %
BC	20	20.154	0.154	0.77 %
BD	40	40.247	0.247	0.62 %
CD	20	20.118	0.118	0.59 %
平均			0.234	0.72 %

影响其测量精度的因素有以下几点:(1)激光器发射出的光平面本身质量问题;(2)光条纹的中心提取与特征点的像点定位误差;(3)平面靶标的制作精度不高引起的误差;(4)摄像机的内参标定误差。另外,精度分析时,光条纹与四点所在直线

参考文献:

- [1] 田庆国,葛宝臻,杜朴,等. 基于激光三维扫描的人体特征尺寸测量[J]. 光学精密工程,2007,15(1):84-88.
TIAN Q G, GE B ZH, DU P, *et al.*. Measurement of human figure size based on laser 3D scanning[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(1):84-88. (in Chinese)
- [2] 贺忠海,王宝光. 线结构光传感器的模型及成像公式[J]. 光学精密工程,2001,9(3):269-272.
HE ZH H, WANG B G. Model and imaging formula of the line structured light sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001,9(3):269-272. (in Chinese)
- [3] DEWAR R. Self-generated targets for spatial calibration of structured light optical section sensors with respect to an external coordinate system[C]. *Robots and Vision'88 Conf.*, Detroit, 1988:5-13.
- [4] 徐光祐,刘立峰,曾建超,等. 一种新的基于结构光的三维视觉系统标定方法[J]. 计算机学报,1995,18(6):450-456.
XU G Y, LIU L F, ZENG J CH, *et al.*. A new method of calibration in 3D vision system based on structure-light[J]. *Chinese Journal of Computers*, 1995,18(6):450-456. (in Chinese)
- [5] HUYNH D Q. Calibration a structured light stripe system: a novel approach [J]. *International Journal of Computer Vision*. 1999,33(1):73-86.
- [6] 刘凤梅,段发阶,叶声华. 一种新的高精度的线结构

不重合也会影响测量结果。通过减小上述误差,测量精度可以进一步提高。

5 结 论

本文提出一种基于三点透视模型的线结构光传感器标定方法。对平面靶标上共线的三点建立透视模型,通过三点以及光条纹在摄像机像面上的成像信息,即可获得光平面在摄像机坐标系中的平面方程。实验数据表明:传感系统可实现约 0.72% 的相对测量精度。该方法不需要昂贵的辅助设备,也不要求解坐标系之间的转换矩阵,本质上属于基于一维标定物的标定方法,且标定过程简单、快速,适用于现场标定。通过改进实验条件,标定精度可以进一步提高。

光传感器标定方法[J]. 天津大学学报,1999,32(5):547-550.

LIU F M, DUAN F J, YE SH H. New accurate calibrating technique for the light-strip sensors[J]. *Journal of Tianjin University*, 1999,32(5):547-550. (in Chinese)

- [7] 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.

DUAN F J, LIU F M, YE SH H. A new accurate method for the calibration of line structured light sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2000,21(1):108-110. (in Chinese)

- [8] 周富强,张广军,江洁. 线结构光视觉传感器的现场标定方法[J]. 机械工程学报,2004,40(6):169-173.
ZHOU F Q, ZHANG G J, JIANG J. Field calibration method for line structured light vision sensor [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004,40(6):169-173. (in Chinese)

- [9] 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 F Q, ZHANG G J. Facilitated method to calibrate model parameters of vision sensor for surface measurement[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005,41(3):175-179. (in Chinese)

- [10] 郝继贵,李艳军,叶声华. 基于共面标定参照物的线结构光传感器快速标定方法[J]. 中国机械工程,2006,17(2):183-186.

- ZHU J G, LI Y J, YE SH H. A speedy method for the calibration of line structured light sensor based on coplanar reference target[J]. *China Mechanical Engineering*, 2006, 17(2): 183-186. (in Chinese)
- [11] 吴庆阳, 苏显渝, 向立群, 等. 线结构光双传感器测量系统的标定方法[J]. *中国激光*, 2007, 34(2): 259-264.
- WU Q Y, SU X Y, XIANG L Q, *et al.*. A new calibration method for two-sensor measurement system based on line-structure light[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(2): 259-264. (in Chinese)
- [12] 魏振忠, 张广军. 结构光直光条中心线的鲁棒性自动提取方法[J]. *仪器仪表学报*, 2004, 25(2): 244-247.
- WEI ZH ZH, ZHANG G J. A robust automatic method for extracting the centric line of straight structured-light stripe[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(2): 244-247. (in Chinese)
- [13] 黄凤山, 钱惠芬. 光笔式单摄像机三维坐标视觉测量系统[J]. *光电工程*, 2007, 34(4): 69-72.
- HUANG F SH, QIAN H F. Single camera 3D coordinate vision measuring system using a light pen [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(4): 69-72. (in Chinese)
- [14] 李和平, 李德华, 朱洲, 等. 基于遗传算法的结构光条纹中心检测方法[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(1): 82-87.
- LI H P, LI D H, ZHU ZH, *et al.*. Detection of structured light strip center line based on genetic algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1): 82-87. (in Chinese)

作者简介:



韩建栋(1980—),男,山西文水人,博士研究生,主要从事计算机视觉及图像处理等方面的研究。E-mail: zhchmin2002@yahoo.com.cn

吕乃光(1944—),男,安徽临泉人,教授,博士生导师,主要从事光信息处理、视觉测量等方面的研究。E-mail: nglv2002@yahoo.com.cn

董明利(1965—),女,辽宁鞍山人,教授,硕士生导师,主要从事精密测量技术等方面的研究。E-mail: dongml@sina.com

娄小平(1970—),女,河南临颖人,副教授,硕士生导师,主要从事计算机测控技术的研究。E-mail: louxiaoping@bistu.edu.cn