

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.06.011

基于单应性矩阵的线结构光测量 快速标定方法研究^{*}

彭谦之, 杨雪荣^{*}, 成思源, 吕文阁
(广东工业大学 机电工程学院, 广东 广州 510006)

摘要:针对线结构光三维测量中的测量系统标定问题,对相机成像与畸变模型、单应性矩阵模型、线结构光移动扫描等方面进行了研究,对现有的线结构光测量系统标定方法的特点进行了归纳,提出了一种基于单应性矩阵的线结构光测量快速标定方法。利用机械辅助装置,使标定板和结构光平面平行并且共面,避免了多次调整位置,实现了线结构光三维测量系统的快速标定;利用标定板对扫描过程中单帧时间间隔内线结构光测量模块的位移量进行了计算,完成了对被测物整体扫描后全局点云的拼接;利用移动平台对单应性矩阵和测量点云数据的准确性进行了测试。研究表明:该方法能够快速建立线结构光测量系统的测量模型,标定过程简单、高效,能够满足有一定精度要求的三维扫描。

关键词:线结构光;单应性;三维扫描;点云

中图分类号:TP391;TH74

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)06-0613-05

Fast calibration method for line structure light measurement based on homography matrix

PENG Qian-zhi, YANG Xue-rong, CHENG Si-yuan, LV Wen-ge

(School of Mechatronics Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Aiming at the calibration problem of measuring system in three-dimensional measurement of line structured light, the camera imaging model, distortion model, homography matrix model and line structured light moving scanning were researched, the characteristics of the existing line structure light measurement system calibration methods were summarized, and the fast calibration method for linear structured light measurement based on homography matrix was proposed. The mechanical auxiliary device was used to make the calibration plate and the structural light plane parallel and coplanar, avoiding multiple position adjustment, and realizing rapid calibration of the line structure light three-dimensional measurement system. In addition, the calibration plate was used to calculate the displacement of the line structure light measurement module in the single frame time interval during the scanning process, and the splicing of the global point cloud after the overall scanning of the object was completed. In the test, the mobile platform was used for testing the accuracy of the homography matrix and the measurement point cloud data. The research results indicate that the method can quickly establish the measurement model of the line structure light measurement system. The calibration process is simple and efficient, and meets a certain precision of the 3D scanning.

Key words: line structured light; homography; 3D scanning; point cloud

收稿日期:2018-12-18

基金项目:广东省科技计划项目(2013B061000007);广东省研究生教育创新计划项目(2015SFKC23);广州市高校创新创业教育项目(20170422)

作者简介:彭谦之(1994-),男,湖南岳阳人,硕士研究生,主要从事机器视觉测量方面的研究。E-mail:1250612412@qq.com

通信联系人:杨雪荣,女,副教授,硕士生导师。E-mail:8395762@qq.com

0 引 言

线结构光视觉测量具有柔性好、测量精度高、速度快、抗干扰能力强等特点,在高速在线检测^[1]、视觉引导^[2]、逆向工程^[3]等领域有着广泛的应用。

线结构光测量系统标定主要分为相机内部参数标定和结构光投射器参数标定,目前建立合理的视觉测量模型主要包括基于简单三角法和应用透视投影变换理论建立的测量模型^[4]。基于简单三角法,利用相机和激光投射器的空间几何位置关系建立了光平面的几何方程,结合相机成像模型,建立了二维像素点与三维物理点的映射关系。这种方法需要准确的相机和激光投射器的位置关系,操作难度大,在实际应用中可行性不高。透视投影理论模型是以相机内参、结构光平面方程为基础的检测模型,其建立的是结构光平面和相机成像平面的透视投影映射关系,在实际应用中的适用性更广。

在透视投影理论模型中,如何获取光平面上的标定点是建立模型的重点,众多学者对其进行了广泛的研究,其中经典的有拉丝标定法^[5]、基于交比不变性的标定法^[6]、锯齿靶标定法^[7]。这 3 种方法需要多次调整辅助装置的位置,标定过程较为复杂。吴福理等人^[8]提出了基于单应性矩阵的标定方法,利用 2 块相互平行且与线结构光投射方向垂直的平板,在空间中获取所需的 4 个控制点,直接计算了光平面在图像像素坐标系与世界物理坐标系之间的映射关系,该方法需要多次调整平板位置并且得到的控制点较少,控制点的坐标偏差对单应性矩阵的准确性产生较大影响;贾华宇、崔海华等人^[9]提出了通过双目视差原理获取激光条纹的三维空间坐标,计算三维坐标到像素坐标的单应性矩阵的标定方法,该方法需要两个相机配合使用,成本较高,且两个相机成像中光条纹中心像素点的匹配对三维坐标的精度影响较大。

本文将提出一种改进的基于单应性矩阵的线结构光测量标定方法。

1 线结构光测量模型的建立

基于单应性矩阵的结构光测量模型是设定结构光平面上 $Z = 0$,直接建立了二维像素坐标 (u,v) 与光平面上二维物理坐标 (X,Y) 唯一的对应关系。

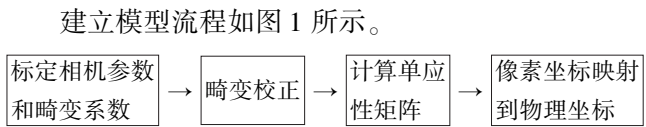


图 1 建立模型流程

1.1 相机参数标定

相机成像是将三维空间物理点映射到二维空间像素点的过程,如图 2 所示。

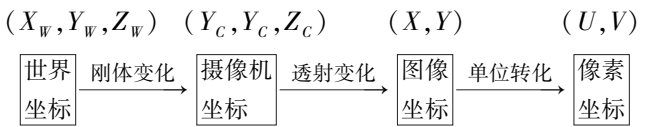


图 2 相机成像流程

成像流程涉及 4 个坐标系:世界坐标系、相机坐标系、图像平面坐标系、像素坐标系以及 4 个坐标系之间的转换。坐标系之间的转换关系实质就是需要标定得出的相机的内外参数。

理想的相机成像模型可用小孔成像模型来描述,但成像过程中,由于透镜的外形制造工艺和透镜安装与成像平面不平行,会导致相机成像出现径向畸变和切向畸变。

对于径向畸变和切向畸变可以用多项式函数来近似描述畸变前后的坐标变化,即:

$$x_{cor} = x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + 2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2)$$
$$y_{cor} = y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy$$

(1)

式中: k_1, k_2, k_3, p_1, p_2 —畸变系数; r —透镜半径; x, y —校正前的坐标; x_{cor}, y_{cor} —校正后的坐标。

目前,相机内外参和畸变系数的标定方法主要有直接线性法(DLT)、两步标定法^[10]、张氏标定法^[11]。本文采用张氏标定法对相机内外参数和畸变系数进行标定。

1.2 单应性矩阵模型的建立

单应性变换可以理解为一个平面到另一个平面的映射关系,线结构光测量系统单应性矩阵的计算需要已知结构光平面上的物理坐标点和对应的像素坐标点。

为了实现快速标定,本文自制了辅助标定义,利用辅助标定义使结构光平面和棋盘格平面平行且共面,如图 3 所示。

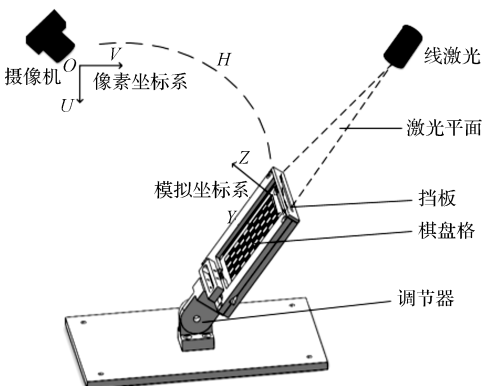


图 3 辅助标定义

辅助标定仪的使用方法是:

开始粗调调节辅助标定仪上的调节器,使得线结构光发射器投射出来的光平面能从辅助标定仪的挡板上面的透光缝隙中穿过;之后再细调辅助标定仪上的调节器,使得线结构光发射器投射出来的激光平面和辅助标定仪上的棋盘格平行且共面(平行且共面判断标志是棋盘格上被激光均匀覆盖,并且在棋盘格下方挡板上,有一条水平均匀的细激光条纹);棋盘格平面上的内角点可以近似为结构光平面上的点,从而结构光平面到像素平面的单应性矩阵计算可近似为棋盘格平面到像素平面的单应性矩阵计算。

定义棋盘格平面位于结构光测量系统中模块坐标系 $Z_L = 0$ 的平面,单应性矩阵即描述了棋盘格平面到像素平面之间的映射关系,其数学模型为:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} f_x & \gamma & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$s \mathbf{K} \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1 & \mathbf{r}_2 & \mathbf{t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: u, v —像素坐标,Pixel; s —尺度因子; $f_x, f_y, c_x, c_y, \gamma$ —相机内参; r_1, r_2, t —相机外参向量; X_L, Y_L, Z_L —模块坐标系中的坐标(棋盘格平面位于模块坐标系中 $Z_L = 0$ 的平面), $m; \mathbf{K}$ —相机内参矩阵; $\mathbf{H}$ —单应性矩阵。

1.3 单应性矩阵的计算

由式(2)可知单应矩阵 $\mathbf{H}$ 为 3×3 的矩阵,即:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & h_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $h_1 \sim h_9$ —单应性矩阵 $\mathbf{H}$ 的 9 个未知变量。

由于式(3)使用的是齐次坐标,则进行任意尺度的缩放,也就是 $\mathbf{H}$ 矩阵乘以任意非零常数 s 并不会改变结果,如下式所示:

$$\begin{cases} u = \frac{h_1 X_L + h_2 Y_L + h_3}{h_7 X_L + h_8 Y_L + h_9} \\ v = \frac{h_4 X_L + h_5 Y_L + h_6}{h_7 X_L + h_8 Y_L + h_9} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} u = \frac{sh_1 X_L + sh_2 Y_L + sh_3}{sh_7 X_L + sh_8 Y_L + sh_9} \\ v = \frac{sh_4 X_L + sh_5 Y_L + sh_6}{sh_7 X_L + sh_8 Y_L + sh_9} \end{cases} \quad (4)$$

由式(3,4)可知:

单应性矩阵有 9 个自由变量和一个尺度不确定性约束,所以实际上 1 个单应矩阵只有 8 个自由度^[12]。一对匹配点的像素坐标和物理坐标可以提供关于单应矩

阵元素的 2 个约束方程,为了计算单应矩阵的唯一解,至少需要共面的 4 对匹配点提供 8 个约束方程。对于 4 对匹配点可以采用直接线性变换(DLT)方法计算单应矩阵,计算多对二维点之间的单应性矩阵,可以采用最小均方误差或者随机抽样一致性算法(RANSAC)优化计算。

实际应用中,匹配点难免会出现像素偏差,如果仅用 4 个点来计算单应性矩阵,会对结果造成较大偏差,采用更多的匹配点来对单应性矩阵进行优化计算,有利于降低某个匹配点像素误差对计算结果造成的影响,从而使单应性矩阵的计算结果更加准确。

本文建立模块坐标系 $Z_L = 0$ 平面为棋盘格平面,按照棋盘格单元大小得到内角点的物理坐标($X_L, Y_L, 0$),对棋盘格图像的内角点像素坐标进行提取得到亚像素坐标(u, v)。本文所使用的棋盘格标定板存在多对匹配点,因此,可以用 RANSAC 算法对单应性矩阵进行优化计算。

由式(2)可知:单应性矩阵仅涉及相机的内外参数,并没有涉及相机成像过程中的非线性畸变,因此,先利用相机标定得到的相机畸变系数对内角点像素坐标(u, v)进行畸变校正,之后再进行单应性矩阵的计算。

2 整体扫描和全局点云的拼接

2.1 扫描过程单帧间隔位移量的计算

如需得到被测物整体表面数据,还要外部驱动装置作为载体来对被测物进行扫描。扫描方式主要分为相机和线激光传感器相对位置固定,相对被测物做移动或者旋转运动两种,本文主要针对移动扫描方式。

移动扫描如图 4 所示。

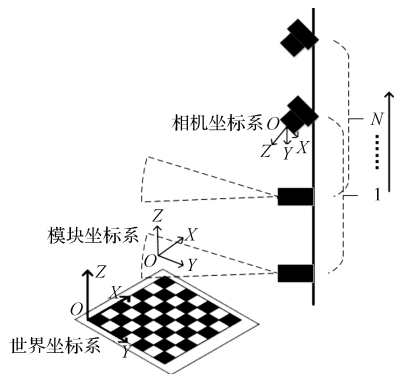


图4 移动扫描

在结构光平面平行的某一平面放置棋盘格,定义世界坐标系原点为棋盘格原点,世界坐标系 $Z_w = 0$ 平面为棋盘格平面。相机和线结构光投射器组成线结构光测量模块,定义模块坐标系 $Z_L = 0$ 平面为结构光平面。线结构光测量模块匀速向上移动,移动过程中,世界坐标系位置固定,模块坐标系位置不断发生改变。

单应性矩阵的计算建立了线结构光测量模块中结

构光平面和像素平面的映射关系,可以将单帧图像光条纹中心像素坐标 (u,v) 转换为模块坐标系上的物理坐标 $(X_L,Y_L,0)$ 。

但扫描过程中,每帧线结构光测量模块的位置都在发生改变,因此,需要计算单帧时间间隔内线结构光测量模块相对于世界坐标系的位移量,最终将模块坐标系上的计算坐标转换到世界坐标系上。又因为相机坐标系和模块坐标系相对位置固定,在世界坐标系中相机坐标系位移量模块坐标系位移量相同。相机边匀速移动边采集在世界坐标系上的棋盘格图像,共采集 N 帧图像,利用张氏标定法对第1帧和第 N 帧棋盘格图像分别标定外参,记为 $\boldsymbol{H}_{\text{cal2camer}_1}$ 和 $\boldsymbol{H}_{\text{cal2camer}_N}$ 。

对相机坐标系的的原点坐标进行计算,得到在第1帧和第 N 帧位置时相机坐标系原点在世界坐标系中的位置,即:

$$\begin{bmatrix} X_{w_i} \\ Y_{w_i} \\ Z_{w_i} \end{bmatrix} = \boldsymbol{H}_{\text{camer2word}_i} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \boldsymbol{H}_{\text{cal2camer}_i}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $\boldsymbol{H}_{\text{camer2word}_i}$ —第 i 帧位置时相机坐标系到世界坐标系的转换矩阵; $\boldsymbol{H}_{\text{cal2camer}_i}$ —第 i 帧位置时相机外参矩阵,即从世界坐标系上的棋盘格坐标系到相机坐标系的转换矩阵; X_{w_i},Y_{w_i},Z_{w_i} —第 i 帧时相机坐标系原点在世界坐标系的坐标。

计算扫描时单帧时间间隔内线结构光测量模块的位移量,即:

$$\begin{bmatrix} X_{\text{offset}} \\ Y_{\text{offset}} \\ Z_{\text{offset}} \end{bmatrix} = \frac{[X_{w_n} \ Y_{w_n} \ Z_{w_n}]^T - [X_{w_1} \ Y_{w_1} \ Z_{w_1}]^T}{N - 1} \quad (6)$$

表 1 反透视投影误差

理论 X 坐标/ m	计算 X 坐标/ m	X 坐标误差/ m	理论 Y 坐标/ m	计算 Y 坐标/ m	Y 坐标误差/ m
-0.024	-0.024 050 5	-5.054×10^{-5}	-0.024	-0.024 044 3	-4.426×10^{-5}
-0.016	-0.016 005 1	-5.102×10^{-6}	-0.024	-0.024 016 1	-1.609×10^{-5}
-0.008	-0.007 994 6	5.326×10^{-6}	-0.024	-0.023 999 8	1.599×10^{-7}
0.0	2.011×10^{-5}	2.011×10^{-5}	-0.024	-0.023 98	1.997×10^{-5}
0.008	0.007 992 37	-7.626×10^{-6}	-0.024	-0.023 958 2	4.183×10^{-5}
...	...	...	...	...	...
X 坐标平均误差/ m		$3.489\ 47 \times 10^{-5}$	Y 坐标平均误差/ m		$2.825\ 26 \times 10^{-5}$

从表1可以看出:
49个像素点反透射投影成物理坐标点的 X 坐标平均误差在0.035 mm左右, Y 坐标平均误差0.028 mm左右。

为了检验本文基于单应性矩阵对三维点云数据获

式中: $X_{\text{offset}},Y_{\text{offset}},Z_{\text{offset}}$ —单帧时间间隔内模块坐标系上的位移量。

2.2 点云的拼接

计算出单帧时间间隔内线结构光测量模块的位移量后,对被测物体进行整体扫描,提取每帧图像中的光条纹中心像素。对光条纹中心像素坐标进行计算,最终得到每帧扫描图像在世界坐标系下的测量坐标,即:

$$\begin{bmatrix} X_{L_i} \\ Y_{L_i} \\ 0 \end{bmatrix} = \boldsymbol{H}^{-1} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} X_{w_i} \\ Y_{w_i} \\ Z_{w_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{L_i} \\ Y_{L_i} \\ 0 \end{bmatrix} + (i - 1) * \begin{bmatrix} X_{\text{offset}} \\ Y_{\text{offset}} \\ Z_{\text{offset}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: u_i,v_i —第 i 帧光条纹中心像素坐标,Pixel; X_{L_i},Y_{L_i} —模块坐标系上的物理坐标, m ; $\boldsymbol{H}^{-1}$ —单应性矩阵的逆矩阵; X_{w_i},Y_{w_i},Z_{w_i} —世界坐标系下的物理坐标, m 。

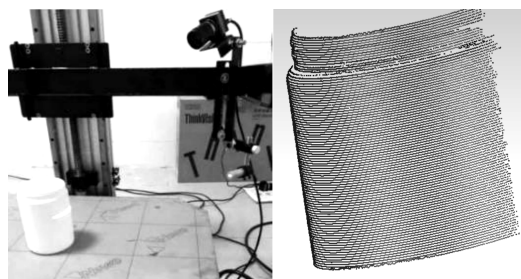
若定义的世界坐标系 $Z_L = 0$ 面和结构光平面不平行,还需利用棋盘格计算两个坐标系的转换矩阵,将模块坐标系上的测量坐标转换到世界坐标系上之后再 进行计算。

3 实验及结果分析

该实验采用西安思拓ST-01线激光器、映美精工业相机、焦距6 mm的镜头和移动平台,用计算得出的单应性矩阵 $\boldsymbol{H}$ 对49个像素坐标点进行反透视投影,反透视投影误差如表1所示。

取的可行性,笔者选取瓶子为待测量模型,将线激光投射到瓶子表面,对瓶子进行整体扫描,利用计算好的单应性矩阵和单帧时间间隔内线结构光测量模块的移动量对瓶子全局点云数据拼接。

扫描过程和结果点云如图5所示。



(a) 扫描过程 (b) 结果点云

图5 扫描过程和结果点云

观察图5可以看出:

扫描瓶子得到的点云数据效果良好,数据完整且无明显失真,可较为准确地反映瓶子的部分表面模型。

4 结束语

本文提出了一种改进的基于单应性矩阵的线结构光测量标定方法,利用自制的辅助标定装置使得结构光平面和棋盘格标定板平面平行共面,使结构光平面到像素平面的单应性矩阵的计算近似成棋盘格标定板到像素平面的单应性矩阵的计算,简化了线结构光测量系统的标定流程,并且在棋盘格平面上可以得到较多的对应匹配点,降低了单个匹配点的像素偏差对计算结果的影响,有利于提高单应性矩阵的准确性。

笔者对被测物体进行整体扫描时,建立了世界坐标系和测量模块坐标系,利用棋盘格对单帧时间间隔内模块坐标系的移动量进行了计算,最后完成了全局点云的拼接。

经过实验验证,单应性矩阵和点云数据准确性良好,满足一定精度要求的线结构光三维扫描。

参考文献(References):

[1] 李友浩,张海鸥,张弓,等. 基于线结构光的电弧增材制

造熔积层三维测量[J]. 工具技术,2018,52(4):123-127.

[2] 金振扬,孟正大. 基于线结构光视觉传感的焊缝跟踪系统研究[J]. 工业控制计算机,2008(4):63-65.

[3] 赵从容. 以线结构光视觉测量为基础的逆向工程技术探索[J]. 现代制造技术与装备,2017(11):69-70,73.

[4] 张广军,魏振忠,孙志武,等. 基于BP神经网络的结构光三维视觉检测方法研究[J]. 仪器仪表学报,2002,23(1):31-35.

[5] DEWAR R. Self-generated targets for spatial calibration of structured light optical sectioning sensors with respect to an external coordinate system[C]. Proc. Robots and Vision 788 Conf, Detroit: IEEE, 1988.

[6] HUYNH D Q. Calibration a structured light stripe system: a novel approach [J]. **International Journal of Computer Vision**, 1999, 33(1): 73-86.

[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.

[8] 吴福理,吴嘉盛,丁维龙. 基于线结构光和单应性的点云获取方法[J]. 浙江工业大学学报,2018,46(5):522-527.

[9] 贾华宇,崔海华,程筱胜,等. 基于单应性矩阵的线结构光传感器标定方法[J]. 传感器与微系统,2018,37(9):148-150,154.

[10] 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 on Robotics & Automation**, 2003, 3(4): 323-344.

[11] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, 2000, 22(1): 1330-1334.

[12] KRIEGMAN D. Homography estimation [J]. **Computer Vision I**, 2007(CSE 252A): 1-3.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

彭谦之,杨雪荣,成思源,等. 基于单应性矩阵的线结构光测量快速标定方法研究[J]. 机电工程,2019,36(6):613-617.

PENG Qian-zhi, YANG Xue-rong, CHENG Si-yuan, et al. Fast calibration method for line structure light measurement based on homography matrix[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2019, 36(6): 613-617.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>