

文章编号 1004-924X(2012)02-0256-08

基于主动视觉标定线结构光传感器中的光平面

陈天飞*, 马 孜, 吴 翔

(大连海事大学 自动化研究中心, 辽宁 大连 116026)

摘要:提出了一种基于主动视觉的光平面标定方法实现对线结构光传感器的自动标定。与以往求取光平面上标定点后拟合平面的方法不同,该方法通过控制传感器做若干平移运动分两步完成标定。首先,经多次平移运动得到光平面中相互平行直线在摄像机中的投影,经计算消影点完成光平面法向的标定。然后,控制传感器沿设定的与光平面法向垂直的方向做2次平移运动,使其满足三点透视模型(P3P),完成摄像机坐标系原点到光平面距离信息的标定。实验结果表明:该标定方法具有较高的准确性,平均绝对测量偏差为0.015 4 mm,相对误差为0.183 0%。该方法本质上属于自标定方法,标定过程无需使用标靶,降低了标定成本,且操作灵活方便,适合现场标定。

关键词:线结构光传感器;光平面标定;消影点;三点透视模型;主动视觉

中图分类号:TP212.6;TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122002.0256

Calibration of light plane in line structured light sensor based on active vision

CHEN Tian-fei*, MA Zi, WU Xiang

(Automation Research Center, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

* Corresponding author, E-mail: chen_tianfei@163.com

Abstract: A calibration approach based on active vision for a light plane is proposed to achieve the self-calibration of a line structured light sensor. The proposed method is different from the previous plane fitting methods using the target points on the light plane, and the entire calibration process can be accomplished in two steps by several translational motions of a sensor. Firstly, the projections of parallel lines in the light plane are captured through some translational motions, and the normal vector of light plane is obtained via computing vanishing points. Then, in order to satisfy the model of perspective-three-points, the sensor is controlled to move along the set direction twice which is perpendicular to the normal vector, and the distance from the origin of camera coordinate system to the light plane is derived eventually. Experimental result shows that this calibration method has high accuracy, its average measuring accuracy is 0.015 4 mm, and relative error is about 0.183 0%. This calibration approach belongs to the self-calibration method without calibration targets, therefore, the calibration cost is reduced. It concludes that the whole process is easy, flexible and suitable for calibration on sites.

收稿日期:2011-09-13;修订日期:2011-10-28.

基金项目:国家科技重大专项资助项目(No. 2009ZX04001-021)

Key words: line structured light sensor; light plane calibration; vanishing point; Perspective-three-point(P3P); active vision

1 引言

线结构光传感器作为非接触视觉测量技术的典型代表,以其结构简单、精度适中、速度快且信息量大等优点在逆向工程、产品实时检测等工业领域有着广泛的应用前景^[1-3]。它主要由激光投射器和摄像机组成,利用摄像机获取变形的结构光条纹,然后根据摄像机与激光器之间的相对位置关系,由光学三角法来得到被测物体的表面三维信息。目前,线结构光传感器多采用主动扫描的方式,即通过某种精密机械结构(如机械臂),变换结构光源位置得到某一视角下被测物体的三维空间坐标,最大程度地减少扫描盲区。

线结构光传感器的标定包括两部分,一是摄像机参数标定,二是结构光参数标定即光平面方程标定。摄像机标定的研究开展较早,方法繁多且较为成熟^[4]。而针对光平面方程的标定,最早有学者提出拉丝标定法^[5]和齿形标定法^[6],但这两种方法不仅需要精密的辅助设备、而且过程繁琐,精度受限。Huynh^[7]和魏振忠^[8]等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标靶,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。为此,基于自由移动平面标靶的结构光标定技术^[9-11]应运而生,并成为目前常用的标定方法。此外,为进一步降低标定成本,周富强^[12]和韩建栋^[13]先后提出了基于一维标靶的传感器标定方法,拓宽了线结构光测量的应用领域。

以上标定方法都需使用标靶获取光平面上的标定点,最后通过平面拟合完成标定。本文提出了一种基于主动视觉的光平面标定方法,只需控制线结构光传感器做若干平移运动,两步就可完成光平面的标定。该方法本质上属于自标定方法,标定过程无需使用标靶,最大程度降低了标定成本,且算法本身无搜索过程,快速便捷,操作上灵活方便,适合现场标定。

2 线结构光传感器的测量原理

图 1 为线结构光传感器的数学模型, $O_c-X_c Y_c Z_c$ 表示摄像机坐标系, $O-uv$ 表示 CCD 像面坐标系, $O_n-X_n Y_n$ 为归一化平面坐标系。其中, $O_n X_n // O_c X_c, O_n Y_n // O_c Y_c$ 。 $O_c Z_c$ 为摄像机光轴,其与 CCD 和归一化像面相垂直。点 P 为结构光条纹上一点。 p', p'' 分别是空间点 P 在 CCD 和归一化像面上对应的成像点。

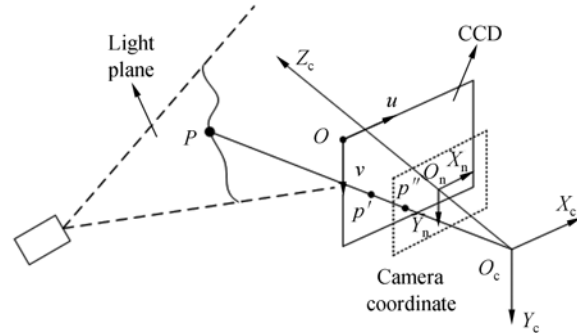


图 1 线结构光传感器的数学模型

Fig. 1 Model of line structured light sensor

在摄像机坐标系下,设点 P 的齐次坐标为 $\tilde{P} = (x_c, y_c, z_c, 1)^T$,像点 p', p'' 在各自坐标系下的齐次坐标分别是 $\tilde{p}' = (u_c, v_c, 1)^T, \tilde{p}'' = (x_n, y_n, 1)^T$,激光平面在摄像机坐标系下的数学方程为 $a_1 X + a_2 Y + a_3 Z + a_4 = 0$ 。根据透视投影变换,则有:

$$z_c \cdot \tilde{p}'' = [\mathbf{E} \ 0] \cdot \tilde{P}, \quad (1)$$

$$\tilde{p}' = \mathbf{K} \cdot \tilde{p}'', \quad (2)$$

其中, \mathbf{E} 为 3×3 的单位阵,齐次坐标 \tilde{p}'' 可认为像点 p'' 在摄像机坐标系下的坐标, \mathbf{K} 为摄像机内参数矩阵,其形式如下:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_u & s & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

其中, f_u, f_v 分别为 CCD 像面上 u, v 轴上的尺度因子, $[u_0, v_0]$ 是摄像机主点坐标, s 为畸变因子。

此外,点 P 是光平面上一点,其坐标同时还

满足光平面方程约束:

$$a_1 \cdot x_c + a_2 \cdot y_c + a_3 \cdot z_c + a_4 = 0. \quad (3)$$

如果摄像机内参数矩阵 \mathbf{K} 、光平面方程已知, 根据方程(1)~(3), 就可以确定光平面上点 P 在摄像机坐标系下的三维坐标。

要获取被测物体的整体三维形貌特征, 多采用传感器配合精密机械运动结构(如机械臂)等主动扫描方式。图 2 为测量系统的结构简图。

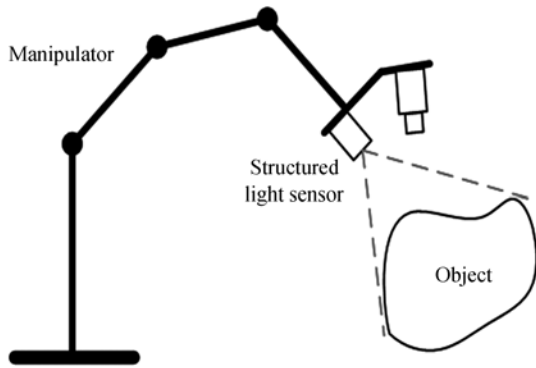


图 2 测量系统简图

Fig. 2 Schematic diagram of measuring system

3 光平面方程的标定

针对传感器中摄像机的标定方法繁多且较为成熟, 本节重点介绍光平面的标定方法。

由式(3)可知, 光平面的标定可归结为求解平面方程系数 $a_1 \sim a_4$ 。区别以往利用标靶得到若干标定点后拟合平面的方法, 本文将通过机械结构控制传感器做平移运动, 分两步完成标定任务: 第一步为光平面法向标定, 即向量 (a_1, a_2, a_3) 的标定; 第二步为距离信息的标定, 即参数 a_4 的标定。

3.1 光平面法向标定

在摄像机的视角范围内, 利用辅助平板对光平面进行调制, 以使得摄像机能够获取结构光条纹图像。通过下面定理便可获取光平面中相互平行的直线在摄像机中投影所得的结构光条纹图像信息。

定理 1: 空间中两平面相交形成直线 a , 且该直线属于这两平面。若其中一个平面保持不动, 控制另一平面做平移运动形成直线 b , 直线 a 与直线 b 相互平行。

利用空间几何知识容易证明上一定理, 因而

本文不再加以证明。依据定理 1, 保持辅助平板位置不变, 通过机械结构控制传感器做平移运动, 进而光平面同样也做平移运动, 可得到光平面中一系列相互平行的直线。

因为摄像机的成像过程是透视投影变换, 进而空间中相互平行直线在 CCD 上的投影相交于消影点, 该点为空间中平行直线与无穷远平面的交点在像面上的投影, 而直线与无穷远平面的交点可表示为直线的方向^[14]。

光平面中平行直线在 CCD 投影形成激光条纹, 由于噪声或算法等硬件条件限制, 对激光条纹提取的直线实际并不会交于一点, 而是略有偏差。为减少噪声等因素的影响, 需对消影点进行重新定位。如图 3 所示, 新的消影点应满足其到所有直线的距离之和最小。

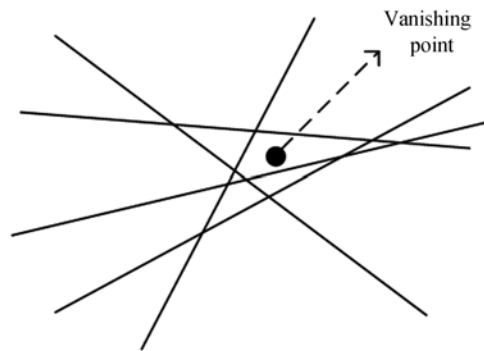


图 3 消影点重新定位

Fig. 3 Relocation for vanishing point

设图像中直线方程为 $a_i x + b_i y + c_i = 0$ ($i=1, \dots, n$), 消影点 (x_0, y_0) 为下目标函数的最优解。

$$f(x_0, y_0) = \min \sum_{i=1}^n \left| \frac{a_i x_0 + b_i y_0 + c_i}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}} \right|^2, \quad (4)$$

式(4)可转化为最小二乘问题进行求解。若已知摄像机内参数 \mathbf{K} , 依据式(2)可得消影点在归一化平面上像点的齐次坐标, 其齐次坐标值也代表光平面中平行直线在摄像机坐标系下的方向。

改变传感器姿态, 控制机械结构做另一组平移运动, 由摄像机获取光平面中另一组平行直线的光条投影。同理, 可计算得该组平行直线的方向。

设 $\mathbf{v}_{p1}, \mathbf{v}_{p2}$ 为光平面中两组平行直线的方向, \mathbf{V} 为光平面的法向, 则有:

$$\mathbf{V} = \mathbf{v}_{p1} \times \mathbf{v}_{p2}. \quad (5)$$

至此,控制传感器做 2 组平移运动便可完成光平面法向 (a_1, a_2, a_3) 的标定。

当传感器的光平面与 CCD 像面平行时,光平面与像面之间退化成仿射变换,而仿射变换保持平行,无法计算消影点。此时,光平面法向与摄像机光轴同向。但实际一般不存在该情况。

3.2 距离信息的标定

若光平面法向已知,将光平面上点的坐标值代入方程(3)便可求解距离信息 a_4 。

光平面法向标定完成后,控制传感器沿与法向相互垂直的方向做 2 次平移运动,传感器的移动距离等同于光平面中一点在光平面中的移动距离。

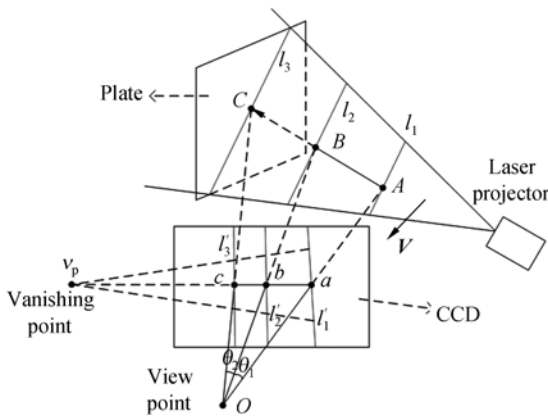


图 4 距离信息标定示意图

Fig. 4 Schematic layout of distance information

图 4 为距离信息的标定示意图。 l_1, l_2, l_3 为沿与法向 V 垂直方向 \overline{AC} 做平移运动后所形成的平行直线, l_1', l_2', l_3' 为对应平行直线在 CCD 投影产生的结构光条纹。点 A, B, C 是运动方向与平行直线的交点,其对应投影点为 a, b, c 。 v_p 为平移运动方向投影形成的消影点,因为此时运动方向是人为设定的,依据公式(2)可求出消影点,并且光平面中方向为 \overline{AC} 的直线在 CCD 上的投影都将交于 v_p 。

此时,光平面上点 A, B, C 与视点 O 满足三点透视原理。若已知 AB, BC 的距离, $\angle AOB$ 和 $\angle BOC$,便能确定出点 A, B, C 的空间坐标^[15]。 AB, BC 的大小等同于传感器的移动距离,可从机械结构控制器中直接读出。投影点 a, b, c 的坐标值为过 v_p 的直线与激光条纹直线的交点。摄像机内参数已知,由投影点的坐标值便可求出夹角 $\angle AOB, \angle BOC$,进而得到光平面上点 A, B, C 的

坐标。

将求得的坐标值代入方程(3),便完成了光平面距离信息的标定。为减少噪声等因素的影响,取多组光平面上的点进行优化处理,有:

$$f(a_4) = \min \sum_{i=1}^n (a_1 \cdot x_i + a_2 \cdot y_i + a_3 \cdot z_i + a_4)^2 \quad (6)$$

对公式(6)求导数,可得参数 a_4 的最优解为:

$$a_4 = - \frac{\sum_{i=1}^n (a_1 \cdot x_i + a_2 \cdot y_i + a_3 \cdot z_i)}{n} \quad (7)$$

至此,光平面方程标定完毕。

4 实验与精度分析

线结构光传感器由型号 WAT-5352EX2 摄像机(768×576)、定焦距 Computar 精工镜头以及波长为 650 nm 的线式激光器构成。将传感器安装在机械臂末端组成了图 5 所示的线结构光测量系统。

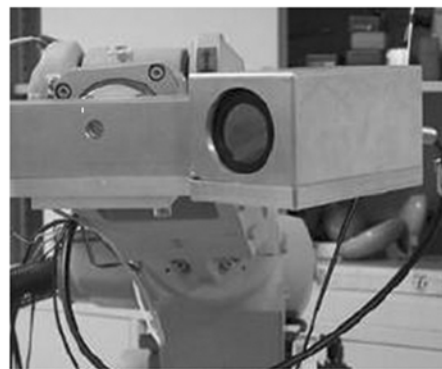


图 5 线结构光测量系统

Fig. 5 Line structured light measurement system

传感器中摄像机同样可利用主动视觉技术进行自标定。利用文献[16]的方法标定,可得摄像机内参数 K 为:

$$K = \begin{bmatrix} 1920.6 & -0.0612 & 375.7973 \\ 0 & 1922.8 & 265.2171 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4.1 标定实验

将张 A4 白纸粘附于玻璃上当辅助平板,控制传感器做平移运动获取光平面中两组平行直线的激光条纹图像,计算其消影点。此阶段,为准确定位消影点,多次平移传感器,使得激光条纹图像

位置的变化范围尽量布满整个 CCD 图像,如图 (6)所示。

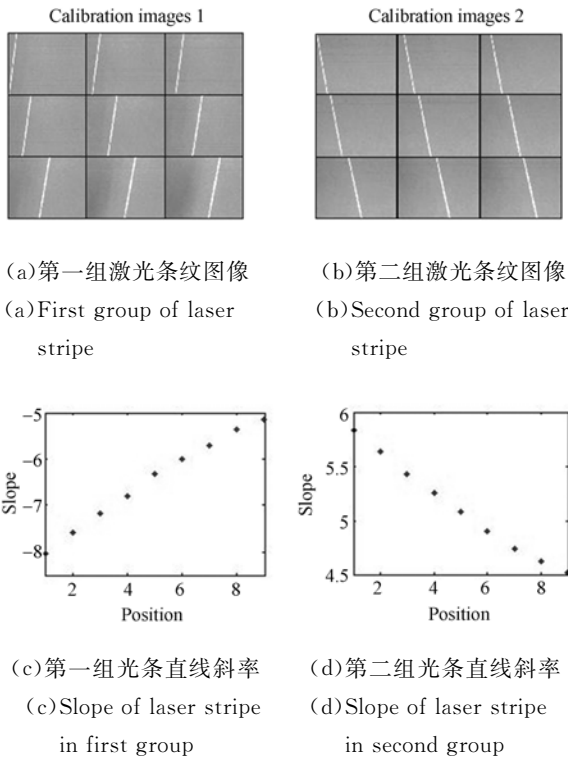


图 6 两组标定图像

Fig. 6 Two group of calibration images

图 6(a)、(b)是不同姿态下获取的两组激光条纹图像,图 6(c)、(d)为在不同位置下激光条纹直线的斜率。可以看出,空间中平行的直线在摄像机的投影不再平行,并且激光条纹直线的斜率从图像左侧至图像右侧呈现出单调变化的规律。

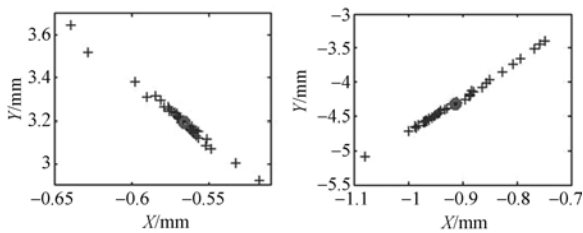


图 7 定位消影点

Fig. 7 Vanishing point location

图 7 为两组平行直线消影点的定位结果。十字为任意两条激光条纹直线的交点。圆圈代表消影点的定位结果。从图中可看出,圆圈定位在十字交点密集的地方,从而证明了 3.1 小节中消影

点定位方法的可靠性。

根据消影点可确定光平面中两组平行直线的方向。然后由式(5)得光平面法向的单位向量 V 为:

$$V = [a_1, a_2, a_3]^T = [0.8234 \quad -0.0316 \quad 0.5665]^T.$$

光平面法向标定完成后,控制传感器沿与法

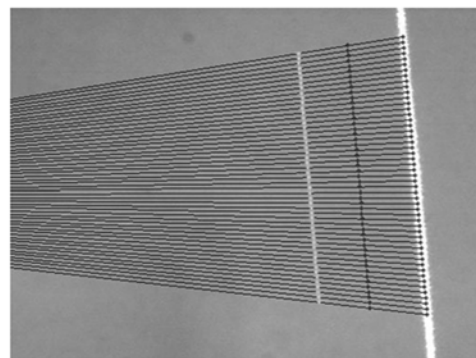
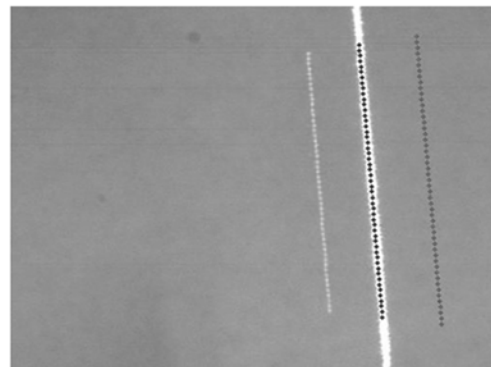
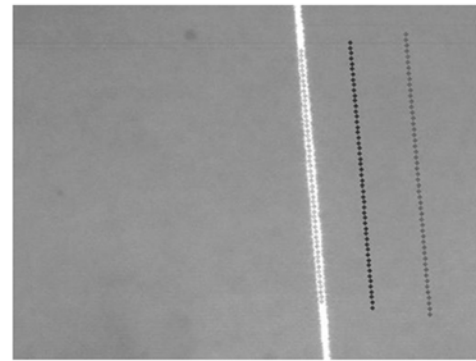


图 8 三点透视模型的激光条纹图像

Fig. 8 Laser stripe images of P3P

向垂直的同一方向做平移运动,此阶段对平移次数的多少没有较高要求,只需 2 次平移能够满足建立三点透视模型条件^[15]即可。图 8 为满足 P3P 模型的激光条纹图像,(a)~(c)分别是运动前后各个位置上获取的激光条纹图像。

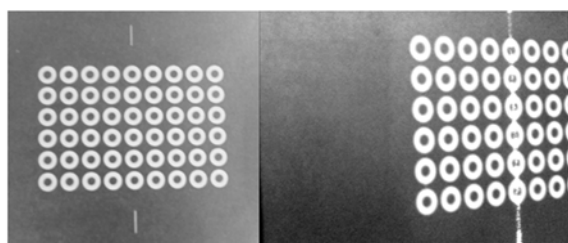
理论上只需一组 P3P 模型便可完成光平面距离信息 α_4 的标定,但为了减少噪声等因素的影响,需建立多组 P3P 模型。在其中一条激光条纹直线上均匀取点,然后将其与平移方向的消影点连线,求和另外两条激光条纹直线的交点,如图 8 (c)所示。

依据 P3P 模型得到多组点的三维坐标后代入公式(7),求得距离信息 $\alpha_4 = -94.032 4$ 。最后标定所得光平面方程为:

$$1.453 5 X - 0.055 7 Y + Z - 165.978 9 = 0$$

4.2 精度分析

为了验证上述标定方法的测量精度,本文采用特制高精度的同心圆标靶,标靶圆心间距为 5 mm,其上刻线与某列圆心所在直线重合,如图 9(a)所示。打开激光器,调整标靶位置,以刻线为准,尽量使激光条纹与其重合,如图 9(b)所示,则此时该列圆心位于光平面上。关闭激光器,提取该列圆心坐标,根据已标定的结构光测量模型,计算圆心间距离。通过将其与标靶圆心距的标准值比对,来评价传感器的测量精度。



(a) 标靶图像

(b) 光条与刻线对齐

(a) Image of calibration target

(b) Alignment between laser stripe and straight line target

图 9 同心圆标靶

Fig. 9 Concentric circle target

表 1 传感器精度分析数据

序号	标准值 /mm	测量值 /mm	绝对偏差 /mm	相对偏差 /%
1	5	4.990 4	0.009 6	0.191 1
2	5	5.026 9	0.026 9	0.538 0
3	5	4.979 2	0.020 8	0.415 9
4	5	5.008 5	0.008 5	0.170 4
5	5	5.018 4	0.018 4	0.367 9
6	10	10.017 1	0.017 1	0.171 5
7	10	10.006 1	0.006 1	0.060 9
8	10	9.987 7	0.012 3	0.122 8
9	10	10.026 7	0.026 7	0.267 1
10	15	14.996 3	0.003 7	0.024 5
11	15	15.014 6	0.014 6	0.097 3
12	15	15.005 8	0.005 8	0.038 7
13	20	20.004 8	0.004 8	0.024 2
14	20	20.032 6	0.032 6	0.162 9
15	25	25.022 9	0.022 9	0.091 8
平均偏差			0.015 4	0.183 0

多次改变平面标靶位置,重复以上实验步骤。表 1 为某一姿态下得到的传感器精度分析数据。分析数据表明:传感器的平均偏差为 0.015 4 mm,相对误差为 0.183 0%。可满足多数工件的检测精度要求。

影响测量精度的因素包括:(1)机械运动载体的定位精度;(2)激光条纹直线的提取误差;(3)镜头中微小畸变的影响;(4)摄像机内参数的标定精度;(5)线式激光器本身的质量问题。此外,精度分析时激光条纹直线与刻线不重合也会影响评价结果。针对畸变需说明的是可利用文献^[17]根据光条直线的变形程度对其进行自校正。而本文采用精工镜头,其畸变非常小,因此对光条特征提取算法的要求较高;且 SHIH^[18]指出在畸变较小的情况下,若特征提取误差相对较大,考虑畸变后的结果反而会比线性模型下差,所以本文直接采用线性模型。因本文标定方法基于主动视觉技术,所以机械运动载体的定位精度是主要的误差来源,并直接影响到光平面方程和摄像机的标定结果。利用误差补偿技术^[19]来修正机械结构的定位精度,系统的测量精度可进一步提高。

5 结 论

针对线结构光传感器中光平面方程的自动标定问题,本文提出了一种基于主动视觉的光平面标定方法。控制传感器做平移运动,将整个标定过程分两步完成。该方法本质上隶属于自标定方

法,标定过程无需使用标靶,降低了标定成本,并且配合摄像机的自标定方法,可实现线结构光传感器的自标定。方法本身无搜索过程,标定快速且操作上灵活方便,适宜现场标定。实验结果表明:该方法具有较高的准确性,平均测量精度达 0.015 4 mm,相对偏差为 0.183 0%,可满足多数工件的检测精度要求。

参考文献:

- [1] JASON G. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, 3(2):128-160.
- [2] 郝继贵,郭磊,刘常杰,等. 基于机器人的柔性电子检具测量系统[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(8): 1787-1793.
- ZHU J G, GUO L, LIU CH J, *et al.*. Measurement system of flexible electronic checking fixture on robot[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8): 1787-1793. (in Chinese)
- [3] 许丽,张之江. 结构光测量系统的误差传递分析[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(2):306-313.
- XU L, ZHANG ZH J. Error propagation analysis of structured light system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2):306-313. (in Chinese)
- [4] 邱茂林,马颂德,李毅. 计算机视觉中摄像机定标综述[J]. *自动化学报*, 2000, 26(1):43-55.
- QIU M L, MA S D, LI Y. Overview of camera calibration for computer vision [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000, 26(1):43-55. (in Chinese)
- [5] DEWAR R. Self-generated targets for spatial calibration of structured light optical sectioning sensors with respect to an external coordinate system [C]. *Robots and Vision'88 Conf. Proceedings*, 1985:5-13.
- [6] 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, YIE 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)
- [7] HUYNH D Q. Calibration a structured light stripe system: a novel approach [J]. *Internal Journal of Computer Vision*, 1999, 33(1):73-86.
- [8] 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(2):210-214.
- WEI ZH ZH, ZHANG G J, XU Y. Calibration approach for structured lighted stripe vision sensor [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(2):210-214. (in Chinese)
- [9] 许丽,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 L, ZHANG ZH J. Calibration in structured light system using coplanar target [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2009, 20(8):1063-1069. (in Chinese)
- [10] 孙军华,张广军. 结构光视觉传感器通用现场标定方法[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(3):174-177.
- SUN J H, ZHANG G J. Universal method for calibration structured-light vision sensor on the spot [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(3):174-177. (in Chinese)
- [11] 刘震,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):3124-3128.
- LIU ZH, ZHANG G J, WEI ZH ZH, *et al.*. An accurate calibration method for line structured light vision sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(11):3124-3128. (in Chinese)
- [12] 周富强,蔡斐华. 基于一维靶标的结构光视觉传感

- 器标定[J]. 机械工程学报, 2010, 46(18):7-12.
ZHOU F Q, CAI F H. Calibrating structured-light vision sensor with one-dimensional target[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(18):7-12. (in Chinese)
- [13] 韩建栋,吕乃光,董明利. 线结构光传感系统的快速标定方法[J]. 光学精密工程, 2009, 17(5):949-963.
HAN J D, LÜ N G, DONG M L. Fast method to calibrate structure parameters of line structured light vision sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5):949-963. (in Chinese)
- [14] HARTLEY R, ZISSERMAN A. *Multiple View Geometry in Computer Vision*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [15] 黄凤山. 光笔式单摄像机三维坐标视觉测量系统关键技术的研究[D]. 天津:天津大学,2005.
HUANG F SH. *Study on the key technique of single camera 3D coordinate vision measurement system using a light pen*[D]. Tianjin:Tianjin University,2005. (in Chinese)
- [16] 许海霞,王耀南. 一种机器人手眼关系自标定方法[J]. 机器人, 2008, 30(4):373-378.
XU H X, WANG Y N. A self-calibration approach to hand-eye relation of robot[J]. *Robot*, 2008, 30(4):373-378. (in Chinese)
- [17] WANG A Q, QIU T SH, SHAO L T. A simple method of radial distortion correction with center of distortion estimation[J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2009, 35:165-172.
- [18] SHIH SH W, HUNG Y P, LIN W S. When should we consider lens distortion in camera calibration[J]. *Pattern Recognition*, 1995, 28(3):447-461.
- [19] 王一,刘常杰,任永杰,等. 工业坐标测量机器人定位误差补偿技术[J]. 机械工程学报, 2011, 47(15):31-36.
WANG Y, LIU CH J, REN Y J, *et al.*. Compensation for positioning error of industrial coordinate measurement robot [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011,47(15):31-36. (in Chinese)

作者简介:



陈天飞(1986—),男,河南濮阳人,博士研究生,2008年、2010年于大连海事大学分别获得学士、硕士学位,主要从事计算机视觉、视觉检测等方面的研究。E-mail: chen_tianfei@163.com



吴翔(1983—),男,河南郑州人,博士研究生,2006年、2008年于大连海事大学分别获得学士和硕士学位,主要从事图像处理与机器人运动控制等方面的研究。E-mail: wu_xiang@foxmail.com



马孜(1955—),女,辽宁沈阳人,教授,博士生导师,1982年、1989年、1992年于东北大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事精密检测、机器人控制等方面的研究。E-mail: zima@dlmu.edu.cn