

文章编号 1004-924X(2012)11-2345-08

## 线结构光传感器模型的简易标定

陈新禹\*, 马 孜, 陈天飞

(大连海事大学 自动化研究中心, 辽宁 大连 116026)

**摘要:**为了现场完成线结构光视觉传感器中摄像机和光平面的同时标定,提出了一种基于单一圆形标靶标定线结构光视觉传感器的方法,该平面标靶包含一个同心圆以及过圆心的两条正交直线。通过共轭点原理线性计算摄像机内参数的初值,并根据正交性约束进行迭代优化。然后,多次移动传感器,保持结构光与同心圆相交,使其构成三点透视模型(P3P),依此计算光平面上标定点的三维坐标。最后,利用最小二乘法拟合出光平面方程,从而完成光平面方程的标定。实验结果表明:该方法具有较高的精度,平均测量精度为 0.036 82 mm,相对测量误差为 0.277 13%。该标定方法仅需同一标靶即可完成摄像机内参数和光平面方程的标定,降低了标定成本,且计算简单、操作灵活,适宜现场环境标定。

**关键词:**线结构光传感器;摄像机标定;光平面标定;共轭点;三点透视模型

**中图分类号:**TP242.62; TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122011.2345

## Calibration model for line structured light vision sensor

CHEN Xin-yu\*, MA Zi, CHEN Tian-fei

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

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

**Abstract:** To realize the calibration of a camera and a light plane in the line structured light sensor simultaneously, a calibration method was proposed based on a single plane calibration target which contains a concentric circle and two orthogonal lines passing through its center. Firstly, several images of model plane were captured from different orientations, and the camera parameters were determined via computing conjugated points linearly and were optimized according to the orthogonal constraints. Then, by moving the sensor for several times freely and keeping the light plane intersecting with the concentric circle, the perspective-three-points (P3P) model was implemented, and the 3D coordinates of calibration points on the light plane were computed. Finally, the light plane equation was derived eventually using the least square algorithm. Experimental results indicate that this calibration method has high accuracy, its average measuring accuracy is 0.036 82 mm, and relative error is about 0.277 13%. This calibration method requires only one target to complete the calibration of camera parameters and light plane equation, therefore, the calibration cost is reduced. It is characterized by simple calculation, easy operation and suitable for calibration in fields.

收稿日期:2012-05-21;修订日期:2012-07-03.

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; camera calibration; light plane calibration; conjugated point; perspective-three-point model

## 1 引言

线结构光视觉测量技术以其结构简单、精度适中、速度快且信息量大等优点,在反向工程、在线检测、三维形貌扫描等领域中有着广泛应用。线结构光视觉传感器主要由摄像机和激光投射器构成,根据摄像机与激光器之间的相对位置关系,由激光三角法获得被测物体的三维型面信息。

线结构光视觉传感器的标定包括两部分,一是摄像机参数标定,二是光平面方程标定。摄像机参数标定主要通过标定参照物上的已知特征点及其对应的图像坐标,利用线性或非线性方法求解摄像机参数。摄像机标定的研究开展较早,方法繁多且较为成熟<sup>[1]</sup>。Tsai 提出了两步法求解摄像机的外参数和内参数,但该方法只考虑径向畸变,没有考虑切向畸变<sup>[2]</sup>。1999 年,张正友提出一种基于平面点阵标靶的标定技术,该方法具有精度较高、高灵活性、成本低等优点,解决了摄像机参数的现场标定<sup>[3]</sup>。孟小乔等<sup>[4-5]</sup>提出利用绝对二次曲线和圆环点对摄像机进行标定,此方法不需知道标靶的欧氏坐标信息。针对光平面方程的标定,最早有学者提出拉丝标定法和齿形标定法,但这两种方法不仅需要精密的辅助设备,过程繁琐,还不适合现场标定。Huynh 等提出基于三维标靶的交比不变标定方法<sup>[6-7]</sup>,该方法能够获得比较高的标定精度,但需要相互垂直的平面构成高精度标靶,这不仅提高了标定成本,而且由于平面之间对光照的相互遮挡,难以获得高质量的标定图像。文献<sup>[8-12]</sup>提出基于自由移动二维标靶的结构光标定技术,由于它具有操作简单、精度较高、无需辅助设备等优点,成为了目前最常用的标定方法。为降低标定成本,周富强,魏振忠<sup>[13-14]</sup>等提出基于一维标靶的结构光视觉传感器标定方法,解决了大尺寸结构光视觉测量传感器的标定难题。

本文提出了一种基于自由移动平面标靶的线结构光视觉传感器标定方法,该方法基于单个同心圆参照物同时完成摄像机和光平面的标定。平面标靶包含一个同心圆以及过圆心的两条垂直直

线,在不同位置获取多幅标靶图像便可以完成摄像机参数和光平面方程的同时标定。该方法所需的标靶容易制造,成本低廉,计算简单,操作上灵活方便,适合现场标定。

## 2 线结构光传感器的数学模型

图 1 为线结构光视觉传感器的数学模型, $O_c - X_c Y_c Z_c$  为摄像机坐标系; $\sigma - uv$  为 CCD 像平面坐标系; $O_n - X_n Y_n$  为归一化平面坐标系,与摄像机坐标系原点的距离为 1,且与摄像机光轴  $O_c Z_c$  垂直。设点  $P$  为结构光与被测物体表面相交曲线上的一点, $p'$  和  $p''$  分别为其在 CCD 像平面和归

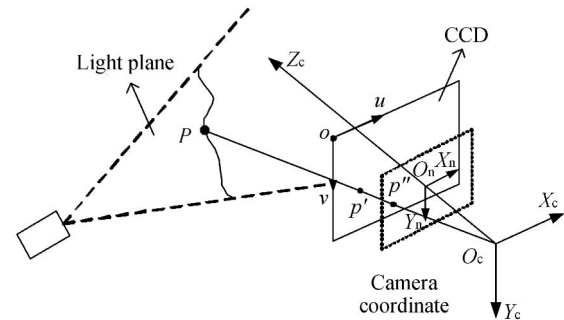


图 1 线结构光传感器的数学模型

Fig. 1 Model of line structured light sensor

一化平面上的成像点。点  $P$  在世界坐标下的齐次坐标为  $\mathbf{P}_w = (x_w, y_w, z_w, 1)^T$ , 在摄像机坐标系下的齐次坐标为  $\mathbf{P}_c = (x_c, y_c, z_c, 1)^T$ , 像点  $p'$  和  $p''$  的齐次坐标分别为  $\mathbf{p}' = (u, v, 1)^T$  和  $\mathbf{p}'' = (x_n, y_n, 1)^T$ 。根据透视投影变换有:

$$\mathbf{p}_c = [\mathbf{R} \quad \mathbf{t}] \cdot \mathbf{P}_w \quad (1)$$

$$z_c \cdot \mathbf{p}'' = [\mathbf{E} \quad 0] \cdot \mathbf{P}_c \quad (2)$$

$$\mathbf{p}' = \mathbf{K} \cdot \mathbf{P}'' \quad (3)$$

其中: $\mathbf{p}''$  可以认为像点  $p''$  在摄像机坐标系下的三维坐标, $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{t}$  分别表示世界坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵和平移向量, $\mathbf{E}$  为  $3 \times 3$  的单位矩阵, $\mathbf{K}$  为摄像机内参数矩阵,其形式如下:

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

式中:  $f_u, f_v$  分别为 CCD 像平面上  $u$  和  $v$  的尺度因子,  $\gamma$  是  $u$  和  $v$  不垂直因子,  $u_0$  和  $v_0$  是像平面的中心点坐标。

设线结构光在摄像机坐标系下的平面方程为:

$$a_1 \cdot x_c + a_2 \cdot y_c + a_3 \cdot z_c + a_4 = 0. \quad (4)$$

如果摄像机内参数矩阵  $\mathbf{K}$ , 光平面方程已知, 根据方程(2)~(4), 就可以确定光平面上一点  $P$  在摄像机坐标系下唯一的三维坐标。当  $\mathbf{R}$  和  $t$  已知或者世界坐标系与摄像机坐标系重合时, 便可确定该点在世界坐标系下的三维坐标。

### 3 摄像机参数的标定

#### 3.1 绝对二次曲线及其共轭点

绝对二次曲线  $\mathbf{I}$  的像  $\omega$  表示如下:

$$\omega = \mathbf{H}_{\infty}^{-T} \mathbf{I} \mathbf{H}_{\infty}^{-1} = \mathbf{K}^{-T} \mathbf{K}^{-1}, \quad (5)$$

其中:  $\mathbf{H}_{\infty} = \mathbf{K} \mathbf{R}$  称为无穷远单应矩阵, 表示无穷远点到像点的射影变换。从式(5)可知,  $\omega$  仅与摄像机参数有关, 与世界坐标系的选择无关。于是当求得  $\omega$  以后, 通过 Cholesky 分解可以确定  $\mathbf{K}^{-1}$ , 求逆得  $\mathbf{K}$ 。  $\mathbf{K}$  仅与摄像机内参数相差一个常数因子, 则摄像机内参数为  $\mathbf{K}_{33}^{-1} \mathbf{K}$ 。

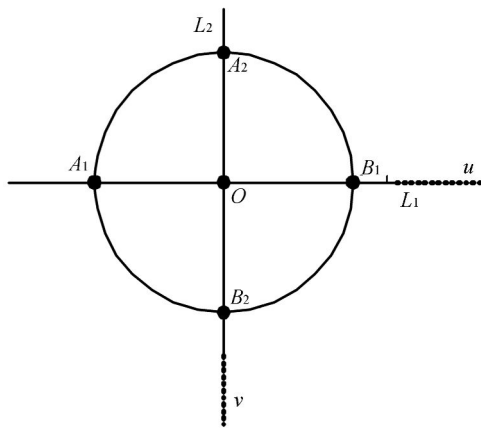


图 2 摄像机标定模板

Fig. 2 Model plane for camera calibration

直线上无穷远点的图像称为该直线的消隐点, 该点为空间中平行直线与无穷远平面的交点在像平面上的投影, 而直线与无穷远平面的交点可表示该直线的方向<sup>[15-16]</sup>。如图 2 所示, 设直线  $L_1$  的无穷远点为  $u$ , 直线  $L_2$  的无穷远点为  $v$ , 则  $A_1, B_1, O, u$  4 点调和共轭<sup>[17]</sup>, 即:

$$(A_1 B_1, O, u) = \frac{A_1 O}{B_1 O} / \frac{A_1 u}{B_1 u} = -1. \quad (6)$$

设定  $A_1, B_1, O, u$  的像点分别为  $m_{A1}, m_{B1}, m_O$  和  $m_u$ , 由于透视变换保持共线性和交比不变, 因此  $(m_{A1} m_{B1}, m_O m_u) = -1$ 。由此可以求得消隐点  $m_u$ , 同理也可求得  $L_2$  的消隐点  $m_v$ 。根据正交性有  $\mathbf{u}^T \mathbf{I} \mathbf{v} = 0$ , 则  $(\mathbf{H}_{\infty}^{-1} m_u)^T \mathbf{I} (\mathbf{H}_{\infty}^{-1} m_v) = 0$ , 由式(5)进一步整理得:

$$m_u^T \omega m_v = 0. \quad (7)$$

$m_u$  和  $m_v$  为关于  $\omega$  的一对共轭点。当已知多组共轭点时便可求解出  $\omega$ , 进而求出摄像机内参数矩阵。

#### 3.2 摄像机参数的线性求解

摄像机在不同位置拍摄几幅图像, 每幅图像中可以计算一对共轭点。设  $m_u = (m_{u1}, m_{u2}, m_{u3})^T$ ,  $m_v = (m_{v1}, m_{v2}, m_{v3})^T$ ,  $\omega =$

$$\begin{bmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \omega_{13} \\ \omega_{12} & \omega_{22} & \omega_{23} \\ \omega_{13} & \omega_{23} & \omega_{33} \end{bmatrix}, \text{ 并将其代入(7)中得:}$$

$$[m_{u1}, m_{u2}, m_{u3}] \omega [m_{v1}, m_{v2}, m_{v3}]^T = 0.$$

因为矩阵  $\omega$  是对称矩阵, 因此可以定义向量  $\mathbf{c} = [\omega_{11}, \omega_{12}, \omega_{13}, \omega_{22}, \omega_{23}, \omega_{33}]^T$ , 从而将上式改写为:

$$\mathbf{M} \mathbf{c} = 0, \quad (8)$$

其中:  $\mathbf{M} = [m_{v1} m_{u1}, m_{v1} m_{u2} + m_{v2} m_{u1}, m_{v1} m_{u3} + m_{v3} m_{u1}, m_{v2} m_{u2}, m_{v2} m_{u3} + m_{v3} m_{u2}, m_{v3} m_{u3}]$ 。方程(8)的解是  $\mathbf{M}^T \mathbf{M}$  对应最小特征值的特征向量<sup>[18]</sup>。

#### 3.3 考虑畸变的非线性优化方法

由于镜头存在光学畸变, 针孔模型不能准确地描述实际映射关系, 因此需要考虑畸变模型。畸变可分为径向畸变、切向畸变和薄透镜畸变。通常只考虑一阶径向畸变即可满足系统测量精度的要求<sup>[19]</sup>。只考虑一阶径向畸变的畸变模型如下:

$$\begin{cases} \tilde{x} = x + \Delta x \cdot k_1 \cdot r^2 \\ \tilde{y} = y + \Delta y \cdot k_1 \cdot r^2 \end{cases}, \quad (9)$$

其中:  $(\tilde{x}, \tilde{y})$  为畸变矫正后特征点的像点坐标,  $(x, y)$  为存在畸变的特征点的像点坐标,  $k_1$  为一阶径向畸变系数,  $(u_0, v_0)$  为光学中心(也称畸变中心)坐标。  $\Delta u, \Delta v$  和  $r$  分别为像点到畸变中心的水平距离、垂直距离和直线距离, 有:  $\Delta x = x - u_0, \Delta y = y - v_0, r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ 。

本文提出一种利用正交性原理对  $\mathbf{K}$  和畸变系数  $k_1$  进行非线性优化的方法。首先用式(9)对每幅图像中的特征点进行修正,然后依据式(3)和(6)求得修正后的消隐点在归一化平面上像点的齐次坐标  $\tilde{\mathbf{u}}_n, \tilde{\mathbf{v}}_n$ 。由于  $\tilde{\mathbf{u}}_n, \tilde{\mathbf{v}}_n$  可表示直线  $L_1$  和  $L_2$  的方向,当  $\mathbf{K}$  越接近真值,  $\tilde{\mathbf{u}}_n$  和  $\tilde{\mathbf{v}}_n$  越满足正交性,可由此来优化  $\mathbf{K}$  以及确定畸变系数。建立如下优化目标函数:

$$F(\mathbf{K}) = \min(\text{abs}(\cos\left[\frac{\pi}{2}\right] - \cos\langle\tilde{\mathbf{u}}_n, \tilde{\mathbf{v}}_n\rangle)), \quad (10)$$

其中:  $\cos\langle\tilde{\mathbf{u}}_n, \tilde{\mathbf{v}}_n\rangle = \text{dot}(\tilde{\mathbf{u}}_n, \tilde{\mathbf{v}}_n) / (|\tilde{\mathbf{u}}_n| \cdot |\tilde{\mathbf{v}}_n|)$ 。将第 3.2 节所求的  $\mathbf{K}$  和  $k_1=0$  作为初始值,利用 Nelder-Mead 直接搜索法对式(10)进行寻优,求得最优的摄像机内参数  $\mathbf{K}$  和一阶径向畸变系数  $k_1$ 。

## 4 光平面方程的标定

### 4.1 确定摄像机坐标下光平面上标定点的三维坐标

在摄像机的视角范围内,利用标靶对光平面进行调制,使得摄像机能够获取线结构光条纹图像。

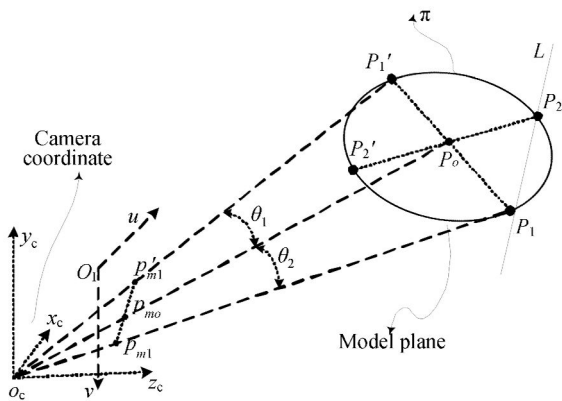


图 3 线结构光标定示意图

Fig. 3 Schematic diagram of line structured light calibration

图 3 为线结构光在摄像机坐标系下光平面标定的示意图。 $\pi$  为平面标靶上半径  $r$  已知的圆,  $L$  为线结构光与标靶的交线,  $L$  与  $\pi$  相交于  $P_1$  和  $P_2$  两点,  $P_1'$  和  $P_2'$  分别为直线  $P_o P_1$  和  $P_o P_2$  与

圆的另一个交点,则  $|P_o P_1|, |P_o P_1'|, |P_o P_2|, |P_o P_2'|$  均等于  $r$ 。 $P_o$  为标靶圆心,使用同心圆代替圆可以提高圆心  $P_o$  的提取精度<sup>[20]</sup>。此时,点  $P_1, P_o, P_1'$  与视点  $o_c$  满足 3 点透视模型(P3P)原理。若已知  $P_o P_1, P_o P_1'$  的距离,以及  $o_c P_o$  和  $o_c P_1', o_c P_o$  和  $o_c P_1$  之间的角度  $\theta_1$  和  $\theta_2$ ,便能确定  $P_1, P_1', P_o$  3 点在摄像机坐标系下的坐标<sup>[21,23]</sup>。

若已知摄像机参数矩阵  $\mathbf{K}$ ,依据式(3)可求得  $P_1, P_1'$  和  $P_o$  在归一化平面上像点的齐次坐标,设其分别为  $p_{m1}, p_{m1'}, p_{mo}$ 。如图 3 所示,由向量点积的定义可得:

$$\begin{cases} \theta_1 = \cos^{-1}\left[\frac{o_c p'_{m1} \cdot o_c p_{mo}}{|o_c p'_{m1}| \times |o_c p_{mo}|}\right] \\ \theta_2 = \cos^{-1}\left[\frac{o_c p_{m1} \cdot o_c p_{mo}}{|o_c p_{m1}| \times |o_c p_{mo}|}\right] \end{cases} \quad (11)$$

当  $\theta_1$  和  $\theta_2$  确定后,根据正弦和余弦定理得:

$$\begin{cases} |o_c P_1'| = \frac{|P_o P_1'| \cdot |P_1 P_1'| \cdot \sin \theta_2}{\sqrt{\text{den}}} \\ |o_c P_o| = \frac{|P_o P_1'| \cdot |P_o P_1| \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2)}{\sqrt{\text{den}}} \\ |o_c P_1| = \frac{|P_o P_1| \cdot |P_1 P_1'| \cdot \sin \theta_1}{\sqrt{\text{den}}} \end{cases} \quad (12)$$

其中:  $\text{den} = |P_1 P_1'|^2 \cdot \sin^2 \theta_2 + |P_1 P_o|^2 \cdot \sin^2(\theta_1 + \theta_2) - 2|P_1 P_o| \cdot |P_1 P_1'| \cdot \sin \theta_2 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot \cos \theta_1$ 。根据图 3 所示的几何关系可得:

$$\begin{cases} P_1 = p_{m1} \cdot o_c P_1 / |o_p p_{m1}| \\ P_o = p_{mo} \cdot o_c P_o / |o_p p_{mo}| \\ P_1' = p'_{m1} \cdot o_c P_1' / |o_p p'_{m1}| \end{cases} \quad (13)$$

联立式(11)~(13)可求解  $P_1$  点在摄像机坐标系下的三维坐标,同理可求解  $P_2$  点的三维坐标。

### 4.2 求解摄像机坐标系下的光平面方程

采集  $N$  幅图像,采用第 4.1 节的方法可获得  $2N$  个光平面上的标定点,将求得的坐标代入方程(4),拟合平面,目标函数为点到平面的欧氏距离平方和,即:

$$f(a_1, a_2, a_3, a_4) = \sum_{i=1}^{2N} d_i^2, \quad (14)$$

其中:  $d_i = \left| \frac{a_1 \cdot x + a_2 \cdot y + a_3 \cdot z + a_4}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}} \right|$  为点到平面的距离,  $a_1, a_2, a_3$  和  $a_4$  为平面方程的系数。

### 5 实验与精度评定

如图 4 所示,线结构光传感器由型号 WAT-535EX 摄像机(768×576)、12 mm 定焦 Computar 镜头以及波长为 650 nm 的线式激光器组成。

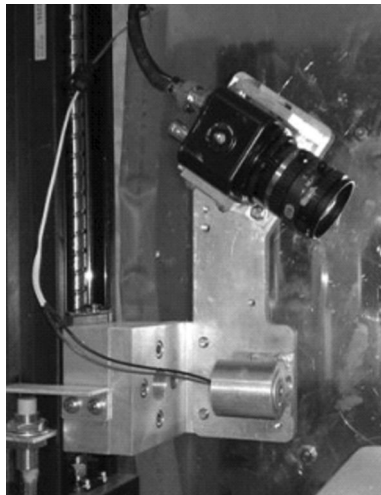


图 4 线结构光视觉传感器

Fig. 4 Line structured light sensor

#### 5.1 标定实验

现场条件下,随机直线提取过程中通常会引入错误的直线,影响视觉传感器标定的稳定性。因此,本文设计了图 5 所示的标定模板,外圆半径为 20 mm,内圆半径为 10 mm,四周相邻角点与圆心构成 90°夹角。由于角点检测具有识别成功率高,对噪声抑制性强等优点,因此本文提出的方法具有较高的稳定性,可适宜现场环境。利用 Harris

角点检测算法提取周围亚像素级角点  $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i (i=1, 2)$ , 对其进行直线拟合可获得两条直线  $L_1$  和  $L_2$ , 之后按照第 3 节所述算法完成摄像机参数标定。图 6 显示从不同位置拍摄的 9 幅模板图像。本文方法和张正友方法的对比结果如表 1 所示。

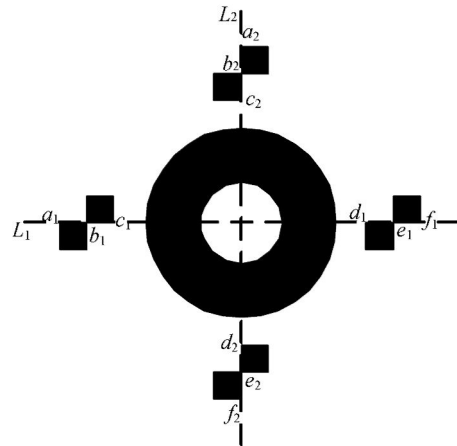


图 5 本文所用标定模板

Fig. 5 Proposed model plane for calibration

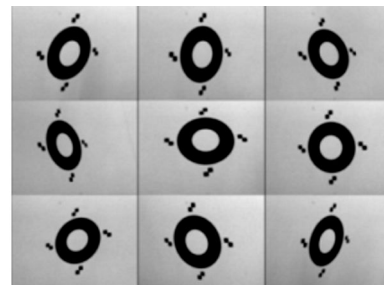


图 6 摄像机标定图像

Fig. 6 Figures of camera calibration

表 1 摄像机标定结果

Tab. 1 Results of camera calibration

	$f_u$	$f_v$	$\gamma$	$u_0$	$v_0$
本文方法	1 962.755 12	1 964.489 24	-4.477 50	364.986 31	256.637 46
张的方法	1 960.728 31	1 962.854 73	$3.188 28 \times 10^{-4}$	356.442 94	300.621 37

表 2 光平面标定结果

Tab. 2 Results of light plane calibration

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	均方根误差(RMS)/mm
本文方法	-1.723 69	-0.024 39	1.000 00	-197.538 36	0.062 99
文献[7]方法	-1.683 49	-0.027 16	1.000 00	-196.938 06	0.053 32

结构光条纹中心线提取采用 Steger 曲线提取方法,具体参见文献[22]。需要注意的是,同心圆边缘处条纹中心的提取会受到黑色环带的影响向同心圆外侧偏移。为了消除该误差,本文将距离椭圆边缘小于 10 个像素的光条中心点忽略,利用剩余的中心点来拟合光条直线方程。如图 7 所示,多次移动传感器,使得激光条纹图像位置的变化范围尽量布满整个 CCD 图像。依据 P3P 模型每幅图像可获得结构光条纹上两点的三维坐标。将多点三维坐标代入公式(4),拟合光平面方程。表 2 显示了本文方法和文献[7]提出的交比不变法的对比结果,其中 RMS 指三维点到平面距离的均方根误差。

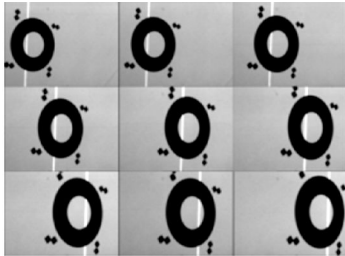


图 7 结构光条纹图像

Fig. 7 Figures of laser stripes

## 5.2 精度评定

为了评定标定误差,采用一种基于交比不变性的方法来验证传感器的标定精度<sup>[13]</sup>。如图 8 所示,

将  $3 \times 6$  的同心圆平面标靶作为检测对象。首先,利用交比不变性计算激光点在平面标靶上的局部坐标,并以相邻两点间的距离作为参考值。然后,利用线结构光传感器的测量模型计算相同激光点在摄像机坐标系下的三维坐标及其相邻两点间的距离,并与参考值进行比较。该评定方法无需手动调节<sup>[8-10]</sup>,提高了验证的可靠性和可重复性,具有方便灵活等优点。另外,该方法特征点的提取误差同时存在于传感器测量过程中,因此可以更好地评定传感器测量模型的标定精度,对比结果如表 3 所示。分析数据表明:传感器的平均误差为 0.036 82 mm,相对误差为 0.277 13%,说明本文的标定方法具有较高的标定精度,可满足大多数检测精度的要求。

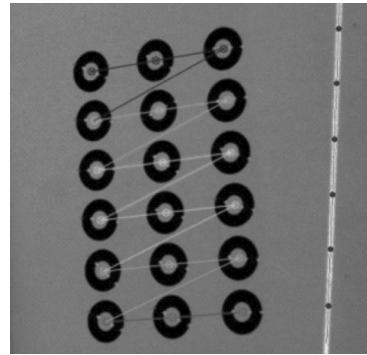


图 8 误差评定图像

Fig. 8 Figures of error evaluation

表 3 测量结果

Tab. 3 Results of measurement

测量次数	交比不变法/mm	本文方法/mm	绝对偏差/mm	相对偏差/%
1	10.005 82	10.061 90	0.056 08	0.560 47
2	10.013 48	10.029 47	0.015 99	0.159 68
3	10.012 96	9.929 88	0.083 09	0.829 82
4	10.011 44	10.015 61	0.004 17	0.041 65
5	10.013 30	9.977 52	0.035 77	0.003 57
6	10.010 70	10.092 66	0.081 95	0.818 62
7	10.007 81	9.991 52	0.016 29	0.162 77
8	10.010 71	9.993 02	0.017 69	0.176 71
9	10.014 33	10.013 08	0.001 24	0.012 38
10	10.010 81	10.066 76	0.055 95	0.005 59
均值	—	—	0.036 82	0.277 13

## 6 结 论

为了快速完成线结构光传感器的现场整体标定,本文提出了一种利用单一圆形标靶进行标定的新方法。首先,研究了基于绝对二次曲线共轭点的摄像机标定算法,并提出了利用正交约束进行非线性优化的方法,该方法所需模板简单,且不需计算

图像特征点和模板特征点的对应关系。然后,介绍了一种根据 P3P 模型求取光平面上标定点后拟合光平面的方法。最后,利用设计的同心圆标靶完成了传感器的标定,并采用交比不变性的方法验证了标定精度。实验结果证明:该方法的平均测量精度为 0.036 82 mm,相对测量误差为 0.277 13%,具有较高的准确性,满足大多数检测精度的要求,并且计算简单,操作灵活方便,适宜现场标定。

### 参考文献:

- [1] 邱茂林,马松德,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)
- [2] TSAI R Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision [C]. *Proc of CVPR*, 1986: 364-374.
- [3] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [4] MENG X Q, HU Z Y. A new easy camera calibration technique based on circular points [J]. *Pattern Recognition*, 2003, 36(5): 1155-1164.
- [5] 吴福朝,王光辉,胡占义. 由矩形确定摄像机内参数与位置的线性方法[J]. 软件学报, 2003, 14(3): 703-712.  
WU F CH, WANG G H, HU ZH Y. A linear approach for determining intrinsic parameters and pose of cameras from rectangles [J]. *Journal of Software*, 2003, 14(3):703-712. (in Chinese)
- [6] 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)
- [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] 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 Z Y, 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] 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)
- [10] 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, LV 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)
- [11] 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]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(3):174-177. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] 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]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(18):7-12. (in Chinese)

- [14] WEI ZH ZH, CAO L J, ZHANG G J. A novel 1D target-based calibration method with unknown orientation for structured light vision sensor [J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42(4): 570-574.
- [15] CPRILE B, TORRE V. Using vanishing points for camera calibration [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1990, 4(2): 127-140.
- [16] 吴福朝. 计算机视觉中的数学方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.  
WU F CH. *Mathematical Methods in Computer Vision* [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
- [17] SEMPLE J G, KNEEBONE G T. *Algebraic Projective Geometry* [M]. London: Oxford University Press, 1952.
- [18] GOLUB G, van LOAN C. *Matrix Computations* [M]. Third Edition. Maryland: The John Hopkins University Press, 1996.
- [19] FITZGIBBON A W. Simultaneous linear estimation of multiple view geometry and lens distortion [C]. *Proc of CVPR, Hawaii: IEEE Press*, 2001: 125-132.
- [20] 邢德奎, 达飞鹏, 张虎. 圆形目标精密定位方法的研究与应用[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(12): 2593-2598.  
XING D K, DA F P, ZHANG H. Research and application of locating of circular target with high accuracy [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(12): 2593-2598. (in Chinese)
- [21] 黄凤山, 钱慧芬. 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)
- [22] STEGER C. An unbiased detector of curvilinear structures [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(2): 113-125.
- [23] 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): 256-263.  
CHEN T F, MA Z, WU X. Calibration of light plane in line structured light sensor based on active vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 256-263. (in Chinese)
- [24] 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, ZHANF ZH J. Error propagation analysis of structured light system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 306-313. (in Chinese)
- [25] ZHOU F Q, ZHANG G J. Complete calibration of a structured light stripe vision sensor through planar target of unknown orientations [J]. *Image and Vision Computing*, 2005, 23(1): 59-67.

#### 作者简介:



陈新禹(1986—),男,辽宁海城人,博士研究生,2009年、2011年于大连海事大学分别获得学士、硕士学位,主要从事机器视觉、视觉测量等方面的研究。E-mail: chensavy@163.com



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



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