

# 基于共面靶标的线结构光传感器标定新方法

陈天飞<sup>1,2</sup> 赵吉宾<sup>2</sup> 吴翔<sup>1</sup>

<sup>1</sup>河南工业大学电气工程学院, 河南 郑州 450001

<sup>2</sup>中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016

**摘要** 现有的线结构光传感器标定方法中, 结构光平面上标定点的计算精度将会直接影响到传感器最终的标定精度。提出了一种基于共面靶标的线结构光传感器标定新方法, 该方法无需计算光平面上的标定点, 也无需反复计算摄像机的外参数。多次移动共面靶标计算不同方向激光条纹直线的消隐点, 并对其拟合直线得到光平面的消隐线, 完成光平面法向的标定。根据交比不变原理计算共面靶标上标定点间的距离, 并以其为约束来标定剩余参数。考虑到误差传递的影响, 定义了优化目标函数, 以已求得参数为初值进行非线性优化。对比实验表明了该方法具有较高的标定精度, 测量误差均方根为0.0306mm, 且标定过程简单, 计算复杂度低, 适合现场标定。

**关键词** 测量; 线结构光; 共面靶标; 标定; 消隐点; 消隐线; 交比不变

中图分类号 TP391; TP212

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0112004

## New Calibration Method for Line Structured Light Sensor Based on Planar Target

Chen Tianfei<sup>1,2</sup> Zhao Jibin<sup>2</sup> Wu Xiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China

<sup>2</sup>Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China

**Abstract** Among the existing calibration methods for line structured light sensor, the accuracy of calibration points in laser plane has direct influence on the calibration result of line structured light sensor. A new calibration method for line structured light sensor based on planar target is proposed. The proposed approach does not need to calculate the calibration points in laser plane and the extrinsic camera parameters repeatedly. Planar target is moved to capture laser stripe with different directions and compute the vanish points, and then the normal vector of laser plane is calibrated by the way of fitting straight using the vanish lines. After that, distances between each calibration points are computed based on the principle of cross ratio invariance, and the remaining parameters are calculated according to the distances. Considering the influence of error propagation, an optimized objective function is defined with the obtained parameters as initial value. The results of comparative experiment show that the proposed method has higher calibration accuracy, and the root mean square measurement error is 0.0306 mm. Besides that, the calibration process is simple with low computational complexity, and suitable for calibration on spot.

**Key words** measurement; line structured light; planar target; calibration; vanish point; vanish line; cross ratio invariance

**OCIS codes** 120.6650; 150.6910; 150.1488

## 1 引言

近年来, 由于逆向工程、三维(3D)打印等技术的迫切需求, 基于视觉的三维测量技术得到了迅速发展<sup>[1-3]</sup>。该技术可分为主动式和被动式两种, 而线结构光三维测量则属于典型的主动式视觉测量技术。线结构光传

收稿日期: 2014-07-24; 收到修改稿日期: 2014-08-22

基金项目: 国家自然科学基金(51375476)、辽宁省科技创新重大专项(201301002)、河南省教育厅科学技术研究重点项目(14B413001)、河南工业大学高层次人才基金(2014BS008)

作者简介: 陈天飞(1986—), 男, 博士后, 讲师, 主要从事计算机视觉、视觉测量等方面的研究。

E-mail: chen\_tianfei@163.com

感器自身具有结构简单、容易建模、精度高等优点,得到了广泛的应用<sup>[4-5]</sup>。基于激光三角测量原理,传感器由线式激光器和摄像机构成。线式激光器主动投射结构光,并由物体表面调制形成变形条纹。通过摄像机记录变形的激光条纹图像,提取图像特征,通过传感器的测量模型获取物体表面的三维信息。

线结构光传感器的测量模型分为面面模型和线面模型<sup>[6]</sup>。面面模型主要求解结构光平面和电荷耦合器件(CCD)像平面之间的映射关系。对于面面模型,常用标定方法有锯齿靶标法<sup>[7]</sup>和拉丝法<sup>[8]</sup>。这类方法利用特定标定物在结构光平面上产生数目不多的标定物,并利用其他坐标测量仪获取标定物的实际坐标,直接求取光平面与像平面的映射关系。该方法缺陷在于获取的标定物数目较少,需借助其他辅助设备,且操作繁琐。线面模型是对图像中像点进行逆投影,计算其与结构光平面的交点,故需计算结构光平面在摄像机坐标系下的平面方程。对于线面模型,现有方法多计算结构光平面上的标定物在摄像机坐标系下的三维坐标,对标定物拟合平面计算光平面方程来完成标定。Huynh等<sup>[9-10]</sup>采用立体靶标,通过交比不变原理计算标定物在摄像机坐标系下的三维坐标,而立体靶标造价较高且不同平面之间光照程度不一样,难以获得高质量的标定图像。相关学者<sup>[11-12]</sup>提出了基于平面靶标的结构光传感器标定方法,而文献[13]在标定过程中做了稳健性改进,该方法是目前最为典型、实用的方法。标定过程需反复移动平面靶标来获取光平面的标定物,并转化到摄像机坐标系下,会增大标定物的定位误差,而且摄像机外参数的反复计算增加了标定复杂度。基于一维靶标的标定方法<sup>[14-15]</sup>无需计算外参数,然而获得的标定物的精度有限,难以得到高精度的标定结果。文献[16]采用主动视觉方法,无需使用靶标,但严重依赖于机械本体的运动信息。

本文在现有标定方法的基础上,提出了一种新的基于共面靶标的线结构光传感器标定方法。该方法采用线面测量模型,标定过程无需计算光平面上标定物在摄像机坐标系下的三维坐标,也无需反复计算摄像机外参数,标定过程简单,适合现场标定。并且,对比实验也验证了该方法具有较高的标定精度。

## 2 线结构光传感器数学模型

图1为线结构光传感器的数学模型。 $O_c-X_cY_cZ_c$ 表示摄像机坐标系,点 $O_c$ 为坐标系原点, $O_cZ_c$ 为摄像机光轴。 $O_n-X_nY_n$ 为归一化平面坐标系,原点 $O_n$ 在光轴 $O_cZ_c$ 上,且距离点 $O_c$ 为1。 $O-uv$ 则表示 CCD 像面坐标系,该坐标系原点 $O$ 定义在 CCD 像面的左上角。三坐标系之间满足平行关系: $O_cX_c // O_nX_n // Ou$ 、 $O_cY_c // O_nY_n // Ov$ 。

点 $P$ 为激光平面上一点,对应像点 $p'$ 、 $p''$ 分别为 CCD 像面和归一化平面上的成像点。设激光平面在摄像机坐标下数学方程为 $a_1 \cdot X + a_2 \cdot Y + a_3 \cdot Z + d = 0$ ,点 $P$ 在摄像机坐标系下的齐次坐标为 $\tilde{P} = (x_c, y_c, z_c, 1)^T$ ,像点 $p'$ 、 $p''$ 的齐次坐标表示为 $\tilde{p}' = (u_c, v_c, 1)^T$ 、 $\tilde{p}'' = (x_n, y_n, 1)^T$ 。根据摄像机的透视投影变换关系,则有:

$$z_c \cdot \tilde{p}'' = [I \quad 0] \cdot \tilde{P}, \tag{1}$$

$$\tilde{p}' = K_c \cdot \tilde{p}'', \tag{2}$$

式中矩阵 $I$ 为 $3 \times 3$ 的单位矩阵,矩阵 $K_c$ 为摄像机的内参数矩阵。矩阵 $K_c$ 的具体形式为

$$K_c = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{3}$$

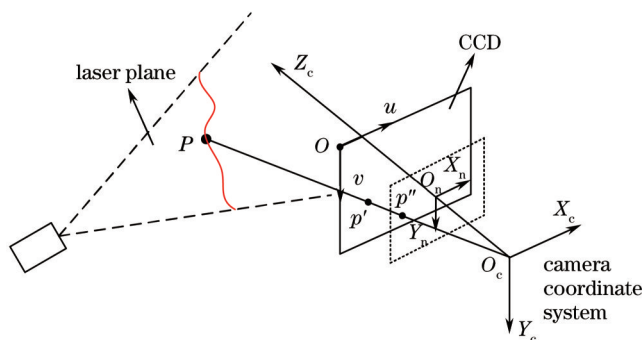


图1 线结构光传感器数学模型  
Fig.1 Mathematic model of line structured light sensor

式中  $[u_0, v_0]$  为摄像机的主点坐标,  $f_u, f_v$  分别为 CCD 像面上  $u, v$  轴的尺度因子。

点  $P$  同时为激光平面上一点, 其三维坐标还应满足激光平面数学方程约束:

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

由于实际中镜头不可避免地会产生畸变, 在归一化平面上, 像点  $p''(x_n, y_n)$  到实际畸变像点  $p_d(x_{nd}, y_{nd})$  的变换关系为

$$\begin{cases} x_{nd} = x_n + x_n \cdot (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4) + [p_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot x_n^2) + 2 \cdot p_2 \cdot x_n \cdot y_n] \\ y_{nd} = y_n + y_n \cdot (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4) + [p_2 \cdot (r^2 + 2 \cdot y_n^2) + 2 \cdot p_1 \cdot x_n \cdot y_n] \end{cases} \quad (5)$$

式中  $r^2 = x_n^2 + y_n^2$ , 畸变模型系数  $\mathbf{k}_c = [k_1, k_2, p_1, p_2]$ 。

至此, 传感器的模型参数包括摄像机内参数矩阵  $\mathbf{K}_c$ , 畸变系数  $\mathbf{k}_c$  以及结构光参数  $[a_1, a_2, a_3, d]$ 。若以上参数已知, 便可根据 (1)~(5) 式唯一确定出点  $P$  在摄像机坐标系下的三维坐标。

### 3 传感器的标定

传感器的标定包括摄像机的标定和结构光参数标定。摄像机的标定方法正趋于完善, 采用 Zhang<sup>[17]</sup> 方法, 拍摄不同姿态的平面靶标图像, 可同时求得内参数矩阵  $\mathbf{K}_c$  和畸变系数  $\mathbf{k}_c$ , 且具有较高的标定精度。因此, 重点介绍结构光参数的标定。

自由运动平面靶标的结构参数标定方法是目前实用且广泛使用的标定方法。在其基础上, 文献[13]对标定过程做了稳健性改进。标定过程主要是求得光平面上的标定点点, 且反复计算摄像机外参数, 将标定点点坐标转换到摄像机坐标系, 最后通过平面的拟合完成结构光参数的标定。因此, 标定点点的精度会直接影响到拟合结构光平面参数的精度。

图 2 为平面拟合的精度分析图。图 2 中实点为用于拟合平面的数据点, 实线表示理想平面。若拟合数据点集中包含异常点或者噪声较大的点, 则最终拟合的平面(虚线表示)与理想平面将会出现差异, 从而影响结构光参数标定的准确性。

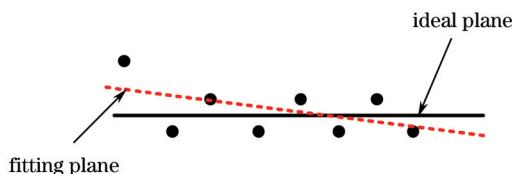


图 2 平面拟合精度分析

Fig.2 Accuracy analysis of plane fitting

为此, 采用平面靶标对结构光参数分步进行标定求得参数的初值, 无需计算标定点点。另外, 考虑到误差传递的影响, 定义优化目标函数, 以已求得参数为初值进行非线性优化, 优化结果即为最终的结构光参数。

#### 3.1 参数 $(a_1, a_2, a_3)$ 的标定

根据空间几何知识, 参数  $(a_1, a_2, a_3)$  表示平面的法向量。经过透视投影变换后, 平面的法向量与该平面在摄像机的像平面中形成的消隐线是一一对应的<sup>[18]</sup>。因此, 参数  $(a_1, a_2, a_3)$  的标定转化为计算结构光平面在像平面对应的消隐线。

图 3 为平面靶标投影的几何特性示意图。利用平面靶标调制结构光平面, 在靶标平面上形成激光条纹直线, 如图 3(a) 所示。图 3(b) 为平面靶标的成像。经透视投影后, 空间中相互平行的直线在像平面中不再平行, 并在理想情况下, 空间中平行的直线在像平面中相交于一点, 该点即为平行直线的消隐点点。正如图 3(b) 所示, 点  $v_1$  和  $v_2$  分别表示靶标中垂直和水平方向平行直线的消隐点点。该两点的连线  $l$  即构成了该姿态下靶标平面的消隐线。需要说明的是, 靶标的摆放应避免出现靶标平面和 CCD 像平面相互平行的情况。否则, 两者间的映射关系则变为仿射变换。而仿射变换保持平行, 平行直线的像仍会平行, 将不会相交于一点。但在实际的标定过程中, 该情况不容易出现。

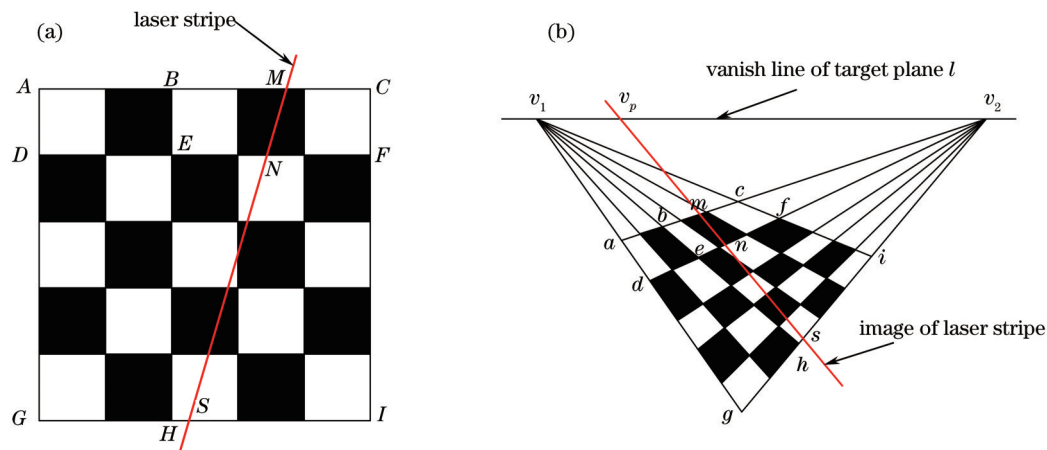


图3 平面靶标投影的几何特性。(a)平面靶标;(b)平面靶标成像  
Fig.3 Geometric property of plane target projection. (a) Planar target; (b) planar target imaging

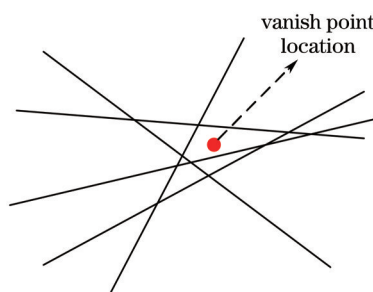


图4 消隐点定位  
Fig.4 Vanish point location

受到图像处理噪声、镜头畸变等因素的影响,靶标垂直和水平方向直线的像不会严格交于一点。因此,需要对靶标中相同方向直线的消隐点进行精确定位。定位的消隐点应满足到所有直线的距离之和最小。如图4所示。设图像内形成直线方程为  $a_i x + b_i y + c_i = 0, i = 1, \dots, n$ 。定位的消隐点  $(x_v, y_v)$  为目标函数的最优解,并可利用最小二乘求解:

$$f(x_v, y_v) = \min \sum_{i=1}^n \left| \frac{a_i x + b_i y + c_i}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}} \right|^2 \quad (6)$$

采用 Steger<sup>[19]</sup> 算法提取图像中激光条纹点并拟合直线,计算该直线与靶标平面消隐线的交点  $v_p$ , 点  $v_p$  则代表了靶标平面上激光条纹直线的消隐点。多次改变平面靶标姿态,调制结构光平面形成不同方向的激光条纹直线,依据上述过程可计算每个激光条纹直线的消隐点  $v_{p1}, \dots, v_{pn}$ 。对点  $v_{p1}$  至  $v_{pn}$  拟合直线便可得到激光平面的消隐线方程。

设  $l_p$  为激光平面消隐线的方程参数,  $n$  表示激光平面的法向量。则两者关系为<sup>[18]</sup>

$$l_p = K_c^{-T} \cdot n, \quad (7)$$

式中  $l_p$  和  $K_c$  已知,可求得  $n = [a_1, a_2, a_3]$ 。

### 3.2 参数 $d$ 的标定

摄像机的透视投影变换还满足共线四点的交比不变原理,如图5所示。空间中共线四点  $A, \dots, M$  及其像平面对应像点  $a, \dots, m$  满足关系:

$$C_r(A, B; C, M) = \frac{AC}{BC} \bigg/ \frac{AM}{BM} = \frac{ac}{bc} \bigg/ \frac{am}{bm} = C_r(a, b; c, m). \quad (8)$$

图3(a)中激光条纹直线交直线  $AC$  于点  $M$ , 点  $A, B, C$  和  $M$  共线。而在图3(b)中,它们的对应像点坐标可通过图像处理算法求出,并由此计算交比,通过(8)式获取点  $M$  在靶标上的局部坐标值。为了克服特征点偶然

噪声的影响,取多个共线点组合来计算标定点的局部坐标值,然后取均值。同理,可获得激光条纹上标定  
 N、S局部坐标值,进而可求得标定点的距离。

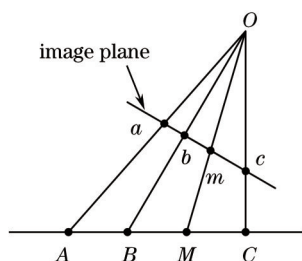


图5 交比不变原理

Fig.5 Principle of cross ratio invariance

通过标定点的距离标定结构光参数  $d$ 。设图 3(b)中标定点  $M, N$  在归一化平面的坐标值分别为  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ , 两点间距离为  $d_{ist}$ 。由(1)、(4)式可求得标定点的坐标值。定义  $f(x, y)$  为

$$f(x, y) = \frac{1}{a_1x + a_2y + a_3} [x, y, 1] \tag{9}$$

则点  $M, N$  的摄像机坐标值为  $M = f(x_1, y_1) \cdot d$ ,  $N = f(x_2, y_2) \cdot d$ 。

已知参数  $a_1, a_2, a_3$  的初值和两点间距离  $d_{ist}$ , 则参数  $d$  为

$$d = \frac{d_{ist}}{\|f(x_1, y_1) - f(x_2, y_2)\|} \tag{10}$$

同样,为了减少偶然误差的影响,利用多组激光条纹标定点的距离:

$$d = \sqrt{\frac{\sum_{i,j} d_{isti,j}^2}{\sum_{i,j} \|f(x_i, y_i) - f(x_j, y_j)\|^2}} \tag{11}$$

### 3.3 非线性优化

上述求解过程会出现误差传递,即参数  $a_1, a_2, a_3$  的误差会影响到参数  $d$  的精确求解。因此,以求得的结构光参数结果为初值进行非线性优化。

根据求得的激光条纹直线上多组标定点的距离为约束,定义优化目标函数为

$$g(a_1^*, a_2^*, a_3^*, d^*) = \sum_{i,j} (\|f(x_i, y_i) - f(x_j, y_j)\|^2 \cdot d^2 - d_{isti,j}^2)^2 \tag{12}$$

采用 Levenberg-Marquardt 算法进行非线性优化,便可得到最优的结构光参数  $a_1^*, a_2^*, a_3^*, d^*$ 。

## 4 实 验

### 4.1 传感器的标定

图 6 为线结构光传感器的实验装置图。图中摄像机采用德国 AVT 公司的 Manta 系列工业相机,分辨率为 1292 pixel×964 pixel,并装配日本 Computar 公司的 8 mm 精工镜头。激光器为美国 Coherent 公司生产的波长为 660 nm 的线式激光器,功率为 35 mW。摄像机与激光器的水平距离约为 600 mm,夹角约为 30°。

通过 Zhang<sup>[17]</sup> 方法完成对相机的标定,得到内参数矩阵  $K_c$  和畸变系数  $k_c$  分别为

$$K_c = \begin{bmatrix} 2231.0757 & 0 & 661.6050 \\ 0 & 2232.7274 & 494.5940 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$k_c = [-0.0847 \quad 0.0483 \quad -0.0004 \quad 0.0008] \tag{14}$$

该结果重投影误差均值为 0.1522 pixel,具有较高的精度,为后续的传感器标定奠定了基础。

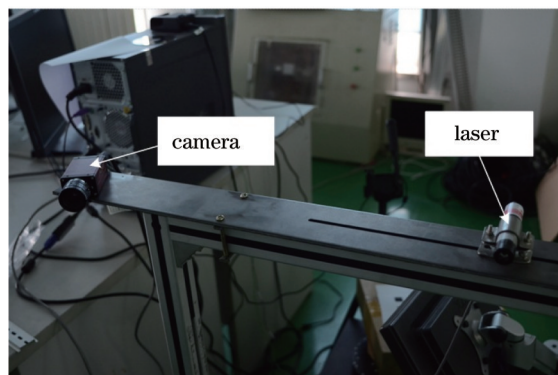


图6 线结构光传感器实验装置

Fig.6 Experimental platform of line structured light sensor

通过平面靶标采集激光条纹图像实现对传感器的标定。图7为不同姿态下激光条纹图像集合。图中靶标规格为 $11 \times 9$ ,间距为 $35\text{ mm}$ 。对每幅激光条纹图像,提取靶标中圆形图案的亚像素边缘,然后按类椭圆拟合得到中心坐标,中心坐标的定位精度为亚像素级别。根据3.1小节内容,计算靶标中水平方向和垂直方向直线的消隐点,两点连线即为靶标平面的消隐线。随后,提取激光条纹点并拟合直线,计算所拟合激光条纹直线与靶标平面消隐线的交点,此点即为该方向激光条纹直线的消隐点。同理,可计算所有图像激光条纹直线的消隐点。图8为激光条纹的消隐点分布图。对所有的激光条纹消隐点拟合直线,并由(7)式便可得到光平面的法向为 $\mathbf{n} = [a_1, a_2, a_3] = [-1.7497, -0.0468, 1]$ 。

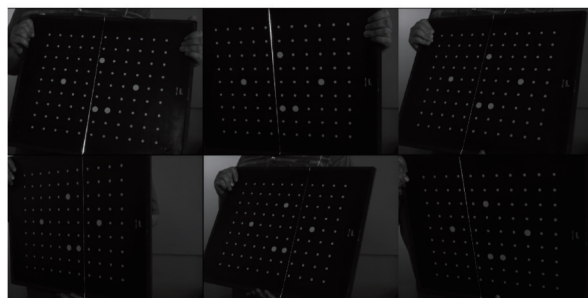


图7 激光条纹图像集合

Fig.7 Set of laser stripe image

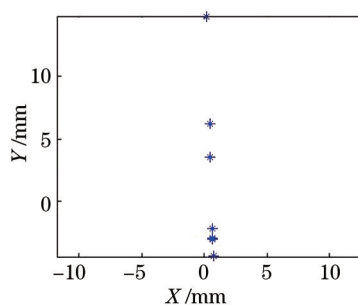


图8 激光条纹的消隐点分布图

Fig.8 Vanish point distribution of laser stripes

在已知光平面的法向初值后,便可由(11)式线性求得光平面参数 $d = 1006.9682$ 。

考虑到分步计算光平面参数误差传递的影响,在求得光平面参数的初值后,以交比不变原理求得的靶标平面上空间距离为约束,对光平面参数重新优化,使得目标函数(12)式最小。优化结果为

$$-1.7438 \cdot x_c - 0.0477 \cdot y_c + z_c + 1007.0257 = 0. \quad (15)$$

至此,线结构光传感器标定完成。

4.2 精度验证与对比

为了评价本文标定方法的效果,采用文献[13]方法对传感器重新标定。该方法对周富强等<sup>[14]</sup>提出的基于自由移动平面靶标的标定方法做了稳健性分析,进一步提高了标定精度。

计算激光条纹直线上标定点在摄像机坐标系下的三维坐标,拟合平面完成光平面的标定。标定点的计算过程需反复计算摄像机外参数,且全部为线性过程。图9为激光条纹标定点的分布图。图中实点表示标定点,十字表示摄像机坐标系原点。拟合光平面参数为

$$-1.7478 \cdot x_c - 0.0488 \cdot y_c + z_c + 1007.0651 = 0. \quad (16)$$

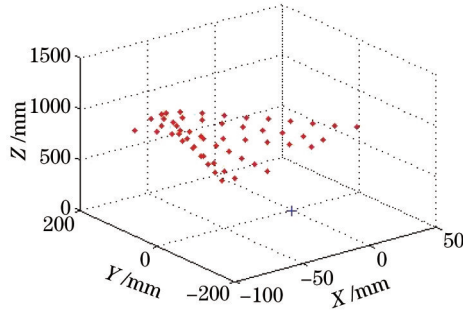


图9 激光条纹的标定点分布图

Fig.9 Calibration point distribution of laser stripes

采用空间测距的方式评定两种方法标定结果的精度。同样利用平面靶标采集激光条纹直线,通过交比不变计算激光条纹上标定点在平面靶标上的局部世界坐标,计算标定点间距离作为参考值距离。然后,根据两种方法的标定结果,计算标定点在摄像机坐标系下的世界坐标,计算点间距离,并与参考值比较。图10为重新采集的精度评定图像集。

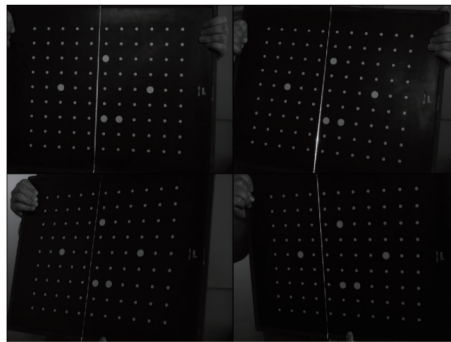


图10 精度评定图像集

Fig.10 Set of images for accuracy evaluation

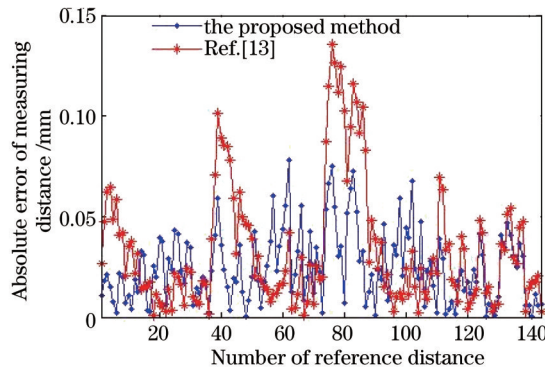


图11 精度对比图

Fig.11 Comparison of accuracy

表 1 两种结果计算的标定点坐标(单位:mm)

Table 1 Coordinates of calibration points calculated by two results (units: mm)

No.	Coordinate of image points (normalized image plane)		Camera coordinate system (the proposed method)			Camera coordinate system (Ref.[13])		
	$x_a$	$y_a$	$x_c$	$y_c$	$z_c$	$x_c$	$y_c$	$z_c$
1	-0.0589	-0.1621	-53.4259	-147.0085	906.8504	-53.4081	-146.9595	906.5481
2	-0.0605	-0.1237	-54.7839	-112.0508	906.1496	-54.7671	-112.0172	905.8777
3	-0.0620	-0.0851	-56.1413	-77.0898	905.4487	-56.1263	-77.0693	905.2072
4	-0.0636	-0.0466	-57.4992	-42.1250	904.7477	-57.4858	-42.1151	904.5366
5	-0.0651	-0.0079	-58.8575	-7.1501	904.0465	-58.8457	-7.1487	903.8658
6	-0.0667	0.0308	-60.2164	27.8409	903.3450	-60.2064	27.8363	903.1946
7	-0.0682	0.0696	-61.5743	62.8042	902.6440	-61.5661	62.7958	902.5239
8	-0.0698	0.1084	-62.9331	97.7933	901.9425	-62.9268	97.7835	901.8527
9	-0.0713	0.1473	-64.2911	132.7599	901.2415	-64.2868	132.7511	901.1818

表 2 标定点间距离的比较(单位:mm)

Table 2 Comparison of distances between calibration points (unit: mm)

	Reference distance	The proposed method		Ref.[13]	
		Calculated distance	Error	Calculated distance	Error
(1,2)	35.0019	34.9911	0.0108	34.9752	0.0267
(1,3)	70.0032	69.9854	0.0178	69.9559	0.0473
(1,4)	105.0049	104.9837	0.0213	104.9429	0.0620
(1,5)	140.0068	139.9919	0.0149	139.9422	0.0646
(1,6)	175.0086	175.0164	0.0078	174.9601	0.0485
(1,7)	210.0109	210.0130	0.0020	209.9525	0.0585
(1,8)	245.0135	245.0355	0.0220	244.9431	0.0404
(1,9)	280.0154	280.0354	0.0200	279.9735	0.0420

## 5 结 论

提出了一种基于共面靶标的线结构光传感器标定新方法。区别于现有的传感器标定方法,该方法无需计算光平面上标定点坐标,也无需反复计算摄像机的外参数。多次移动平面靶标,对不同方向激光条纹直线的消隐点拟合直线来标定光平面的法向。以交比不变计算标定点的距离为约束标定其余结构参数。此外,考虑到误差传递的影响,定义了优化目标函数进行非线性优化。对比实验表明了本文方法具有较高的精度,且操作简单适合现场标定。

## 参 考 文 献

- 1 H Kieu, T Y Pan, Z Y Wang, *et al.*. Accurate 3D shape measurement of multiple separate objects with stereo vision [J]. Measurement Science and Technology, 2014, 25(3): 035401.
- 2 An Dong, Gai Shaoyan, Da Feipeng. A new model of three-dimensional shape measurement system based on fringe projection [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0512004.  
安冬, 盖绍彦, 达飞鹏. 一种新的基于条纹投影的三维轮廓测量系统模型[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0512004.
- 3 Ren Maodong, Liang Jin, Tang Zhengzong, *et al.*. Microscopic three-dimensional deformation measurement system based on digital image correlation [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0512002.  
任茂栋, 梁晋, 唐正宗, 等. 微尺度三维变形测量的显微数字图像相关系统[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0512002.
- 4 Zhang Dejin, Li Qingquan, He Li. A new method for laser rut depth measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0112005.  
张德津, 李清泉, 何莉. 一种新的激光车辙深度测量方法研究[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0112005.
- 5 Gao Yan, Shao Shuangyun, Feng Qibo. A novel method for automatically measuring wheel geometric parameters by laser scanning



- [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0708005.  
高 岩, 邵双运, 冯其波. 一种激光扫描自动测量轮对几何参数的方法[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0708005.
- 6 Zhang Guangjun. Vision Measurement [M]. Beijing: Science Press, 2008. 139–150.  
张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 139–150.
- 7 Duan Fajie, Liu Fengmei, Ye Shenghua. A new accurate method for the calibration of line structured light sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2000, 21(1): 108–110.  
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 R Dewar. Self-generated targets for spatial calibration of structured light optical sectioning sensors with respect to an external coordinate system [J]. Society of Manufacturing Engineers, 1988. 5–13.
- 9 D Q Huynh, R A Qwens, P E Hartmann. Calibration a structured light stripe system: A novel approach [J]. Internal Journal of Computer Vision, 1999, 33(1):73–86.
- 10 Wei Zhenzhong, Zhang Guangjun, Xu Yuan. Calibration approach for structured lighted stripe vision sensor [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(2): 210–214.  
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.
- 11 F Q Zhou, G J Zhang. 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.
- 12 Liu Zhen, Zhang Guangjun, Wei Zhenzhong, *et al.*. An accurate calibration method for line structured light vision sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(11): 3124–3128.  
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.
- 13 Xu Li, Zhang Zhijiang. Error propagation analysis of structured light system [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(2): 306–313.  
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.
- 14 Zhou Fuqiang, Cai Feihua. Calibrating structured-light vision sensor with one-dimensional target [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(18): 7–12.  
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.
- 15 Han Jiandong, Lü Naiguang, Dong Mingli. Fast method to calibrate structure parameters of line structured light vision sensor [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(5): 949–963.  
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.
- 16 Chen Tianfei, Ma Zi, Wu Xiang. Calibration of light plane in line structured light sensor based on active vision [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(2): 256–263.  
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.
- 17 Z Zhang. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330–1334.
- 18 R Hartley, A Zisserman. Multiple View Geometry in Computer Vision [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 216–218.
- 19 C Steger. An unbiased detector of curvilinear structures [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(2): 113–125.

栏目编辑: 苏 岑