

文章编号 1004-924X(2016)增-0682-08

## 复杂环境下线结构光曲面检测方法

黄雪梅<sup>1\*</sup>, 刘志伟<sup>2</sup>, 赵吉宾<sup>3</sup>

- (1. 山东理工大学 机械工程学院, 山东 淄博 255091;
2. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111;
3. 中国科学院 沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110179)

**摘要:**针对复杂环境下高精度三维检测的需求,从提高视觉传感器系统标定精度出发,提出了一种线结构光曲面检测方法。首先利用精度较高的圆形靶标并采用柔性立体靶标的模式对相机进行标定,在获取光平面和靶标相交的所有点坐标后,通过非线性优化计算出光平面到像平面之间的映射矩阵,完成线结构光传感器系统的标定;然后借助于真彩图像中红色分量所占比重和灰度重心法提取光条纹;最后按照局部最小化准则,对检测到的光条进行光顺连接。在每次迭代中改变当前点并将其作为空间点集使用,得到光条纹中心点的最终位置。实验结果表明本文方法具有较高的标定精度,相机重投影误差均值为0.102 pixel,测量结果的平均距离误差为0.0132 mm,并且可得到精确的光条纹,为复杂环境下曲面的检测提供了一种有效的手段。

**关键词:**线结构光;标定;光顺;曲面检测

**中图分类号:**TP394.1;TH691.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162413.0682

## Surface detection method with line structured light in complex environment

HUANG Xue-mei<sup>1\*</sup>, LIU Zhi-wei<sup>2</sup>, ZHAO Ji-bin<sup>3</sup>

- (1. College of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255091;
  2. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111;
  3. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110179)
- \* Corresponding author, E-mail: huangxuemei@sdut.edu.cn

**Abstract:** Specific to the requirements of high precision 3D measurement in complex environment, starting from improving the calibration accuracy of vision sensor system, a kind of surface detection method with line structured light was put forward. Firstly, round target with high accuracy and flexible 3D target mode were used for calibrating the camera; after obtaining all intersection points coordinates of optical plane and target, mapping matrix from the light plane to the image plane was calculated through nonlinear optimization; then the calibration of line structured light sensor system was completed; light stripe was taken with the aid of proportion of red component in true color image and gray centroid method; lastly, according to local minimization criterion, fairing connection for detected light stripe was carried out. In each iteration, change the current point as spatial point set and the final po-

收稿日期:2016-05-09;修订日期:2016-06-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51375476);山东省自然科学基金(No. ZR2012EEL11)资助项目

sition for center point of light stripe was obtained. Experimental results show that this method has relatively high calibration accuracy; mean error of camera reprojection is 0.102 pixel; mean longitudinal error of measurement result is 0.0132 mm; precise light stripe can be obtained so as to provide an effective method for surface detection in complex environment.

**Key words:** line structured light; calibration; fairing; surface detection

## 1 引言

近年来,非接触测量被越来越多应用在图像处理、计算机视觉以及机器人视觉等领域,其中线结构光检测的应用范围最广<sup>[1-2]</sup>。线结构光条纹的检测精度会直接影响曲面检测的精度,而结构光检测精度本身又受到视觉传感器的标定精度以及环境因素的影响。

针对视觉传感器的标定,关键问题是如何精确地标定线结构光平面参数<sup>[3]</sup>。Huynh<sup>[4]</sup>提出了基于交比不变原理的标定点坐标计算方法,该方法可以得到精度较高的标定点,但在对视觉系统进行标定时需要立体靶标,而立体靶标造价昂贵,且在标定时,平面之间易相互遮挡,从而造成光照亮度不统一,难以获得高质量的标定图像,最终影响了精度的进一步提升。在 Zhou<sup>[5]</sup>的方法中,利用线结构光和靶标网格的交点作为控制点,来计算线结构光参数方程。但由于网格精度受限及控制点数较小,因此标定精度较低。Sun<sup>[6]</sup>等人利用一个方形模式的平面靶标来计算线结构光视觉系统,当进行靶标像点与靶标的世界坐标系之间的转换时,检测的 4 个角点的精度会受到平面靶标精度和外界环境的影响,造成标定精度较低。

目前现有的结构光条纹的精确检测方法主要有灰度重心法<sup>[7]</sup>、模板法<sup>[8]</sup>等,但主要都是针对背景环境较为简单的情况,而在复杂背景环境的工业应用中,其检测精度容易受到光照变化以及检测表面材质的影响,导致条纹检测错误。因此,本文首先利用特制的圆形靶标和柔性立体靶标模式得到相机参数,完成相机标定;在获取光平面和靶标相交的所有点坐标后,通过非线性优化计算出光平面到像平面之间的映射矩阵,完成视觉传感器系统的标定;然后利用线结构光中红色分量在真彩图像中所占的比重以及光带中心两边灰度的分布特性,去除环境光以及杂乱环境的影响。针

对检测中出现的杂点以及镜面反射引起的光条纹有时不连续现象,按照最小化局部准则,在每次迭代中改变当前点,最后进行光顺连接,获得较为准确的光条中心点。

## 2 视觉传感器系统标定

### 2.1 相机标定

本文对视觉传感器系统进行标定时采用圆形靶标样式<sup>[9]</sup>,如图 1 所示,圆心即为平面靶标的标志点。为了方便求解图像内靶标投影图案和靶标规格样式图案的单应性矩阵,需要对靶标进行排序。利用靶标的该特殊性,按照距离准则对 5 个大圆标志点进行标记,其中,2、3 号标志点距离最小,4、5 号标志点距离最大,由此可以识别出 1 号标志点;1 号标志点到 3 号标志点距离大于其到 2 号标志点的距离,可识别出 2 号、3 号标志点;3 号标志点到 4 号标志点距离小于其到 5 号标志点距离,据此可识别出 4 号、5 号标志点。在确定了 5 个大圆标志点后,整个圆形靶标标定板的顺序也就确定了,通过所有的圆形靶标标志点,可以精确计算靶标投影图案和靶标规格样式图案的单应性

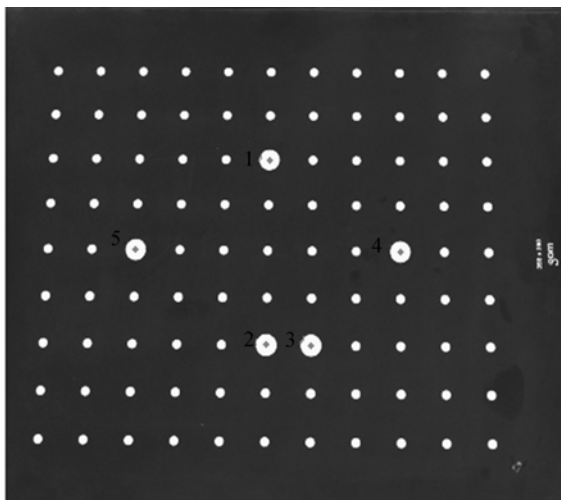


图 1 圆形靶标以及标志点顺序

Fig. 1 Round target and sorting of signed points

矩阵。

立体靶标造价昂贵,平面之间存在相互遮挡,光照亮度不统一,从而造成检测精度降低,针对这些问题,本文采用柔性立体靶标的方式进行标定。柔性立体靶标是由平面靶标多次移动而成的<sup>[10]</sup>。图 2 描述了柔性立体靶标建立过程。如图 2 所示,在平面靶标第  $i$  个位置处,局部坐标系  $O_i Z_i$  垂直于靶标平面,轴  $O_i X_i$ 、 $O_i Y_i$  在靶标平面内。图中,点  $P_i$  表示第  $i$  个位置处靶标平面上共线点与光平面调制形成的标定点。同理,可获取激光条纹上形成的其他的标定点。利用交比不变原理计算点  $P_i$  在靶标局部坐标系上的位置坐标。

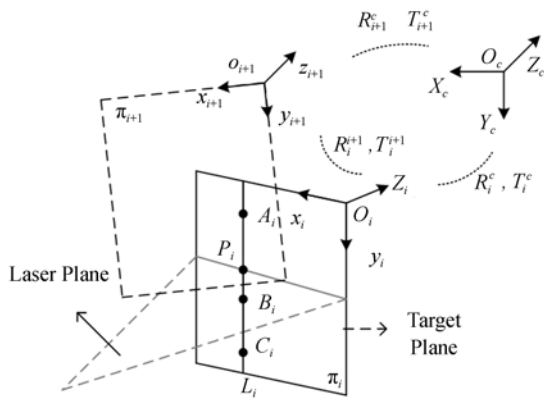


图 2 柔性立体靶标的建立

Fig. 2 Establishing of flexible three-dimensional target

将靶标移动多个位置,得到图 2 所示的  $\pi_{i+1}$  位置以及其他不同位置,设置平面靶标所处的第一个位置为柔性立体靶标的参考坐标系,在每个位置的靶标平面上建立局部坐标系,从而可以获取标定点在该坐标系下的坐标值,再对标定点进行坐标系的统一。利用不同位置的平面靶标上的标志点,计算出摄像机坐标系和靶标局部坐标系之间的位置关系,获得摄像机的外参数,即可进一步获得摄像机的内参数。

## 2.2 线结构光传感器系统标定

建立线结构光视觉系统数学标定模型,如图 3 所示。其中  $\pi_l$  为结构光光平面,  $O_s X_s Y_s Z_s$  为测量坐标系,  $\pi_i$  为标定板移动第  $i$  个位置的平面。设  $i = 1$  时的坐标系为参考坐标系,即  $O_i X_i Y_i Z_i$ ,  $\pi_c$  为像平面,  $l_c$  为光条在像平面

的成像。 $O_i Z_i$  光平面的法向矢量  $\mathbf{n} = [n_1, n_2, n_3]^T$ , 将线结构光投射器投射的光投射到圆形标定板上,检测标定板上的红色光条,用结构光映射矩阵  $\mathbf{H}$  表示从测量坐标系到像平面间的映射矩阵。

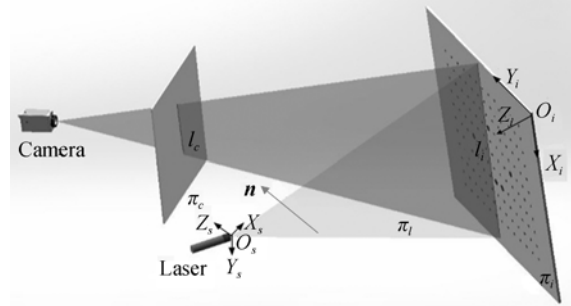


图 3 线结构光视觉系统的数学标定模型

Fig. 3 Mathematic calibration system model of line structure light vision system

首先将光平面上所有检测到的标定点转换到光平面的测量坐标系上。光平面上的标定点平面拟合的法向矢量  $\mathbf{n} = [n_1, n_2, n_3]^T$ , 测量坐标系  $Z$  轴的方向矢量  $\mathbf{z}_w = [0, 0, 1]^T$ , 矢量  $\mathbf{n}$  和  $\mathbf{z}_w$  的旋转轴  $\mathbf{a}$  (垂直于向量  $\mathbf{n}$  和向量  $\mathbf{z}_w$  决定的平面) 和旋转角度  $\varphi$  (向量  $\mathbf{n}$  和向量  $\mathbf{z}_w$  之间的角度) 分别为:

$$\mathbf{a} = (\mathbf{n} \times \mathbf{z}_w) / \|\mathbf{n} \times \mathbf{z}_w\|, \quad (1)$$

$$\varphi = \arccos(\mathbf{n} \cdot \mathbf{z}_w). \quad (2)$$

因此,旋转矩阵  $\mathbf{R}_w^s$  可根据如下关系计算:

$$\mathbf{R}_w^s = \mathbf{a} \times \mathbf{a}^T + \cos\varphi(\mathbf{I} - \mathbf{a} \times \mathbf{a}^T) + \sin\varphi(\mathbf{I} \times \mathbf{a}) \quad (3)$$

式中,  $\mathbf{I}$  表示  $3 \times 3$  的单位矩阵,  $\mathbf{I} \times \mathbf{a}$  表示向量  $\mathbf{a}$  的反对称矩阵。

$4 \times 4$  转换矩阵  $\mathbf{T}_w^c$  可表示为:

$$\mathbf{T}_w^c = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_w^s & -\mathbf{R}_w^s \cdot \tilde{\mathbf{P}}_0 \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

则参考坐标系到测量坐标的转换关系表示为:

$$\tilde{\mathbf{P}}_s = \mathbf{T}_w^s \cdot \tilde{\mathbf{P}}_w, \quad (5)$$

式中,点  $P_0$  为测量坐标系的原点,点  $\tilde{\mathbf{P}}_s, \tilde{\mathbf{P}}_w$  分别为测量坐标系和参考坐标系的齐次坐标表示。

当完成了标定点坐标从参考坐标系到测量坐标系的转换后,根据光平面上的标定点和其对应的像点,便可计算出结构光映射矩阵  $\mathbf{H}$ 。

定义优化目标函数,对映射矩阵进行非线性优化求解<sup>[11]</sup>,具体形式如下:

$$f(\mathbf{H}) = \sum_i^{\text{num}} (m_i - \overline{m}_i)^T (m_i - \overline{m}_i), \quad (6)$$

式中, num 表示标定点的个数;  $m_i$  表示标定点在像平面的像点,点  $\overline{m}_i$  表示由映射矩阵  $\mathbf{H}$  求出的像点,其表达式如下:

$$\overline{m} = \frac{1}{\mathbf{h}_3^T} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1^T M_i \\ \mathbf{h}_2^T M_i \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中,  $M_i$  表示标定点在测量坐标系下的坐标,  $\mathbf{h}_1$ 、 $\mathbf{h}_2$ 、 $\mathbf{h}_3$  分别表示矩阵  $\mathbf{H}$  的第 1、2、3 列。

利用 Levenberg-Marquardt 算法对公式(7)进行非线性优化,最终结果即为传感器的结构光参数,从而完成了传感器的标定。

### 3 复杂环境的激光检测

#### 3.1 滤除环境因素

本文利用上述标定的视觉传感器系统对复杂环境中的激光进行检测,图 4 所示为线结构光曲面检测图。 $p$  点为曲面和线结构光平面交线  $L$  上的一点,  $l$  为  $L$  在相机图像平面的投影,点  $p$  为  $P$  在像平面上的投影且点  $p$  在  $l$  上。将线结构光投射到曲面上时,通常情况下结构光条纹在图像中表现为具有一定宽度的线条,其灰度沿光条法线方向从光条中心向两侧过渡区域缓慢减小。由于被测曲面本身的材质均匀性、透光性、颜色和形状以及粗糙程度等不同,被测物体各处的光强反

射率也不相同,图像上的光带截面灰度分布呈不对称的近似高斯分布,即非正态分布。

本文采用如下处理方式精确检测光条纹,对图像进行高斯平滑,去除边缘噪声,将 RGB 图像分成 3 个通道,由于在 RGB 图像中,红色分量所占的比重较大,利用公式(8)去除物体表面反射以及杂乱环境光的影响,进而借助于光线灰度分布的重心位置来提取光带中心。

$$\text{Image}(i, j) = R(i, j) - G(i, j) - B(i, j), \quad (8)$$

其中,  $\text{Image}$  是得到的红色边缘图像,  $i, j$  表示像素位置,  $R$  表示原图像的红色分量灰度值,  $G$  表示原图像的绿色分量灰度值,  $B$  表示原图像的蓝色分量灰度值。

当背景中存在红色物体或其它线结构光反射的光条纹时,会严重干扰光条的检测,为避免光条误检,对于遍历检测出的光带中心点,如果求取的光条中心灰度值小于阈值(本文取 200),则去掉该检测点;反之,则保留,作为最终的光条特征点。

#### 3.2 平面点集光顺

对于反光面较强的物体,线结构光周围会出现较多的散乱光点,检测到的线结构光条纹中途可能会出现丢失、断续的现象<sup>[12]</sup>。本文提出了一种自动点集光顺连接,按照最小化局部准则,在每次迭代中改变当前点作为空间点集使用。在每次迭代中,需要遵守两个原则:(1)光顺的点必须在原始点给定的容忍范围内;(2)降低全局光顺标准,确保最后的点集比初始点集更光顺。

##### 3.2.1 计算离散曲率

多边形  $P_N^d = (P_0, P_1, \dots, P_N) = (P_i)_{i=0}^N$  是几何中最简单的模型,由  $N+1$  个顶点连接而成,利用具有  $N+1$  个顶点的常规参数曲线关联多边形  $P_N^d$ ,计算多边形  $P_N^d$  的长度  $s^N$ :

$$s^N = \sum_{i=1}^N L_i, \quad (9)$$

其中  $L_i$  表示多边形第  $i$  条边的边缘长度,  $L_i = \|L_i\|$ ,  $L_i = P_i - P_{i-1}$ ,  $\|\cdot\|$  表示范数符号。

在多边形的内部顶点中定义离散曲率  $K_i$ :

$$K_i = \frac{2\Delta_i}{L_i L_{i+1} Q_i} = \text{sgn}(\Delta_i) \frac{2\sin(a_i)}{Q_i}, \quad (10)$$

其中:

$$Q_i = \|Q_i\|, Q_i = P_{i+1} - P_{i-1}$$

$$\Delta_i = \det(L_i, L_{i+1})$$

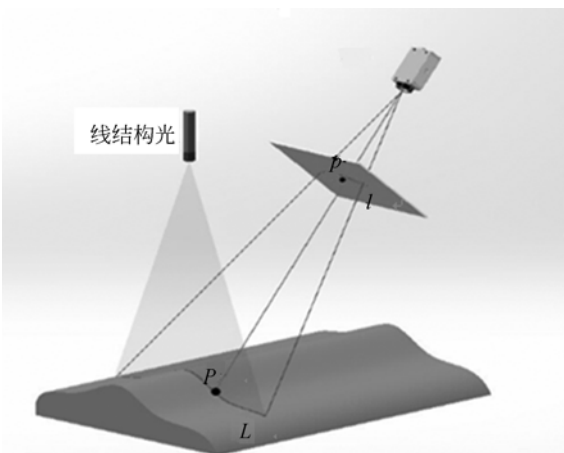


图 4 线结构光视觉系统的曲面检测

Fig. 4 Curved surface detection of vision sensor system

$$\cos(a_i) = \frac{L_i \cdot L_{i+1}}{L_i L_{i+1}}, 0 \leq a_i \leq \pi$$

式中  $\text{sgn}()$  作为符号函数使用。通过弦长参数化法, 借助  $K_{i-1}$ 、 $K_i$  和  $K_{i+1}$  的二次插值多项式  $K(t)$  计算离散曲率  $K_i$  的一阶导数和二阶导数:

$$K'_i = K^i(t_i) = \frac{1}{L_i + L_{i+1}} \left[ L_i \frac{K_{i+1} - K_i}{L_{i+1}} + L_{i+1} \frac{K_i - K_{i-1}}{L_i} \right], \quad (11)$$

$$K''_i = K''(t_i) = \frac{2}{L_i + L_{i+1}} \left[ \frac{K_{i+1} - K_i}{L_{i+1}} - \frac{K_i - K_{i-1}}{L_i} \right]. \quad (12)$$

$K_i$  是由 3 点  $P_{i-1}$ 、 $P_i$  和  $P_{i+1}$  所确定圆半径的倒数, 如图 5 所示。

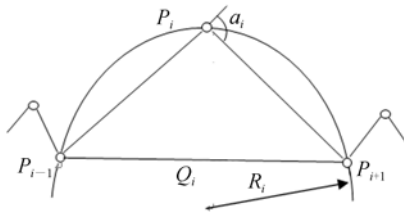


图 5 多项式的离散曲率  $K_i$

Fig. 5 Discrete curvature  $K_i$  of a polynomial

### 3.2.2 平面光顺算法

定义以下光顺准则对点进行光顺化处理:

$$\xi = \sum_i z_i, \quad (13)$$

其中  $z_i$  表示局部光顺值,  $z_i = (K''_i)^2$ ,  $\xi$  表示全局光顺值。

在给定的多边形中, 迭代光顺每个点  $p_j$  得到新的位置  $p'_j$ , 定义点  $p'_j$  在直线  $G$  上。直线  $G$  定义如下:

$$p'_j = G(\mu) = p_j + \mu X_j, \quad (14)$$

其中:  $X_j = \frac{aP_{j+1} + \beta P_{j-1}}{a + \beta} - P_j$ ,  $a = 1, \beta = 1, \mu$  是一个非线性优化系数。将点  $p'_j$  作为多边形新的位置。通过点的限制性约束, 可以将断续的光条纹进行准确的光顺连接, 该技术具有一定的保形性。

## 4 实验结果

### 4.1 视觉传感器系统标定精度分析

采用本文提出的标定方法对相机进行标定, 得到内参数矩阵  $K_c$  和畸变系数矩阵  $k_c$  结果如

下:

$$K_c = \begin{bmatrix} 1683.0029 & 0 & 971.735 \\ 0 & 1683.0029 & 700.8743 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$k_c =$$

$$[-0.33258 \quad 0.13259 \quad -0.00058 \quad 0.00089]$$

根据上述参数计算得重投影误差均值为 0.102 pixel, 因此获得的内参具有较高的精度。

利用本文提出的方法, 将精准的圆形靶标以不同姿态摆放, 通过计算测量坐标系下标定点的三维坐标以及像平面上标定点的像坐标后, 根据公式(6)再计算出光平面与像平面之间的映射矩阵  $H$ , 其结果如下:

$$H = \begin{bmatrix} 1522.3201 & 236.7114 & 98.7415 \\ -694.1522 & 1001.8922 & -13.7889 \\ -1.2011 & 0.00031 & 1 \end{bmatrix}$$

获得映射矩阵后, 对测量结果的精度进行分析。

将本文的测量结果与 Zhou 方法进行比较, 结果见表 1。在 Zhou 方法中, 通过交比不变性利用少量的控制点求取光平面参数方程。由于在标定过程中, 不同环境因素以及相机内部抖动或人为因素的影响, 会导致提取的亚像素精度的光条点的坐标位置不精确, 从而会造成较大的标定误差。从表 1 可以看出, 本文方法的标定精度相对较高。图 6 为精度评估图像集合中所有距离比较数据, 平均距离误差为 0.013 2 mm, 表明本文方法可以实现精确现场标定。

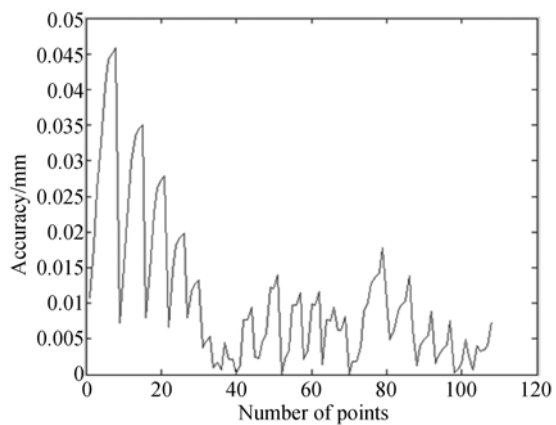


图 6 线结构光视觉系统标定精度

Fig. 6 Calibration accuracy of vision sensor

表 1 几种方法测量结果的精度分析

Tab. 1 Accuracy analysis of measurement results by different methods

(mm)

中心点到平面的距离	最大值	最小值	均值
本文方法测量结果	1.391 372e-02	1.980 237e-04	4.449 948e-03
精度验证数据	4.579 779e-02	1.195 913e-05	1.061 772e-02
Zhou 方法测量结果	1.521 372e-02	1.562 542e-03	3.582 148e-02
精度验证数据	4.579 779e-02	1.655 23e-04	9.325 974e-02

### 4.2 复杂环境下光条检测

对本文算法进行实验验证。图 7(彩图见期刊电子版)所示为对环境光干扰情况下的线结构光的检测结果,图 7 左图是一块弯曲的木板,图 7 右图为采用本文方法得到的检测结果,由图 7 中的绿线可以看出,采用本文方法可以克服环境光以及红色投影光条的影响,精确地检测出实际的光条纹。

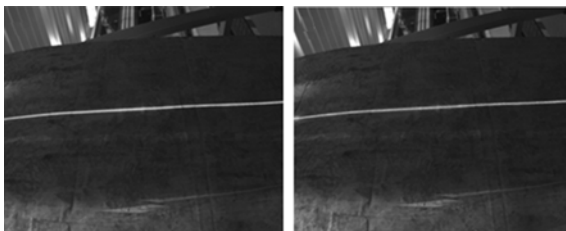


图 7 投影结构光干扰下的线结构光检测

Fig. 7 Structure light detection disturbed by the projected structure light

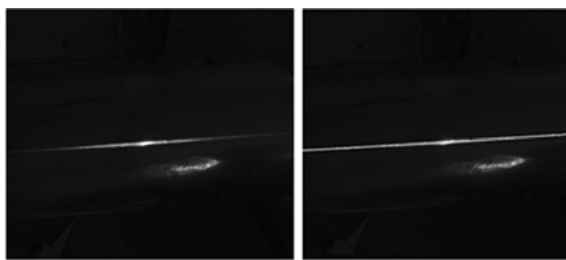


图 8 光滑曲面上的线结构光检测

Fig. 8 Structure light detection of smooth surface

为进一步验证本文方法的鲁棒性,调整相机的曝光,使得图像变暗,图 8(彩图见期刊电子版)为光滑曲面的线结构光检测试验,图 8 左图为反射度较高的铝制圆筒,图 8 右图为检测结果图,绿线表示检测出的光条纹点,从图 8 右图中的绿线可以看出,采用本文方法可以有效克服反射光照的影响。

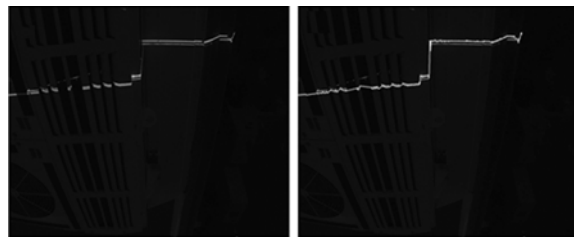


图 9 动车顶部表面线结构光检测

Fig. 9 Structure light detection of bullet train roof with air conditioning

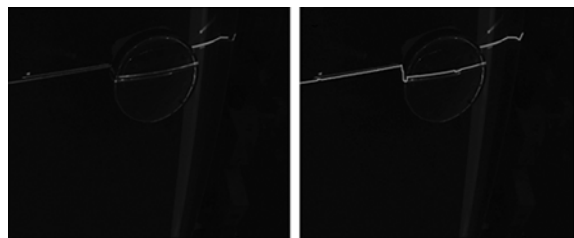


图 10 带有镜面圆盘的动车顶部表面结构光检测

Fig. 10 Structure light detection of bullet train roof with mirror disk

图 9 左图为带有空调的动车顶部表面,图 10 左图为带有镜面反射圆盘的动车顶部表面,从图 9 右图和图 10 右图可以看出采用本文方法可以有效克服其他光条纹、反射的杂乱光点以及镜面反射的干扰,实现光条纹点的精确定位。

## 5 结 论

本文巧妙地使用了特制的圆形靶标作为标定板,首先利用距离准则对整个标定板进行排序,将圆形靶标摆放成不同姿态建立柔性靶标,对相机进行标定;然后将线结构光投射到标定板上,在获取光平面和靶标相交的所有点坐标后,通过非线性优化计算出光平面到像平面之间的映射矩阵,完成线结构光传感器系统的标

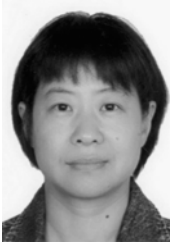
定;其次,根据线结构光中红色分量在真彩图像中所占的比重以及光带中心两边灰度的分布特性,去除环境光以及杂乱背景的干扰,利用标定好的视觉系统检测复杂环境中的光条纹。最后,对于出现的不精确点,提出一种平面点集光顺方法,按照最小化局部准则,在每次迭代中改

变当前点作为空间点集,完成曲面检测。实验结果显示本文提出的标定方法具有较高的精度,相机重投影误差均值为 0.102 pixel,测量结果的平均距离误差为 0.013 2 mm,并且可以实现精确的光条纹检测,可以满足复杂环境下的高精度三维检测需求。

#### 参考文献:

- [1] 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.  
GAO Y, SHAO SH Y, FENG Q B. A novel method for automatically measuring wheel geometric parameters by laser scanning[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(7): 0708005. (in Chinese)
- [2] 汪霖, 曹建福, 韩崇昭. 基于超二次曲面模型的 3 维目标定位算法[J]. 机器人, 2013, 35(4): 439-448.  
WANG L, CAO J F, HAN CH ZH. Super quadrics Model-based 3D object localization algorithm [J]. *Robot*, 2013, 35(4): 439-448. (in Chinese)
- [3] 邹媛媛, 赵明扬, 张雷. 基于量块的线结构光视觉传感器直接标定方法[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1108002. (in Chinese)  
ZOU Y Y, ZHAO M Y, ZHANG L. Vision inspection technology of IC die bonder Direct calibration method of laser stripe vision sensor based on gauge block [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(11): 1108002.
- [4] HUYNH D Q. Calibration a structured light stripe system: a novel approach [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1999, 33(1): 73-86.
- [5] ZHOU F, ZHANG G. 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.
- [6] SUNQ, HOU Y, TAN Q, *et al.*. A flexible calibration method using the planar target with a square pattern for line structured light vision system[J]. *PLoS ONE*, 2014, 9(9): 106911.
- [7] 谢则晓, 高翔, 崔健. 移动式三维测量用圆形标记点提取算法[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1208002.  
XIE Z X, GAO X, CUI J. Extraction algorithm of circular targets used for mobile three-dimensional measurement [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(12): 1208002. (in Chinese)
- [8] KOKKU R, BKSBYROO G. Improving 3D surface measurement accuracy on metallic surfaces [C]. *International Society for Optics and Photonics*, 2005: 618-624.
- [9] 薛婷, 吴斌, 张涛, 等. 基于线结构光视觉传感器的圆孔定位误差分析[J]. 光学精密工程, 2008, 16(4): 624-629.  
XUE T, WU B, ZHANG T *et al.*. Analysis on round-hole orientation error based on structured light stripe vision sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4): 624-629. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] 岳武陵, 吴勇. 基于多目标优化的空间直线度误差评定[J]. 光学精密工程, 2008, 16(8): 1423-1428.  
YUE W L, WU Y. Evaluation of spatial straightness errors based on multi target optimization[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(8): 624-629. (in Chinese)
- [12] LEVI Z, ZORIN D. Strict minimizers for geometric optimization [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2014, 33(6): 185-196.

## 作者简介:



黄雪梅(1974—),女,山东东营人,副教授,2001年于山东大学获得工学硕士学位,2004年于上海交通大学获得工学博士学位,主要从事数字化设计与制造以及自动控制方面的研究。E-mail: huangxuemei@sdut.edu.cn



赵吉宾(1970—),男,山东济南人,研究员,博士生导师,1996年于合肥工业大学获得学士学位,2001年于山东大学获得硕士学位,2004年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事激光加工技术、视觉测量、智能制造等方面的研究。E-mail: jbzha@sia.cn



刘志伟(1980—),男,辽宁葫芦岛人,工程师,2002年、2005年于黑龙江科技大学分别获得学士、硕士学位。E-mail: zhiweisifang@163.com