

## 基于双目立体视觉的结构光测量技术

周 麒<sup>1,2</sup> 杨永明<sup>1,2</sup> 王振洲<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 目前的三维测量系统多数利用投影矩阵法求解出三维点坐标, 但该方法未充分利用标定的参数, 且矩阵之间计算复杂。为此, 提出一种基于解析解的双目成像系统。该系统通过左右相机光线相交计算物体的三维坐标解析解, 光线由相机的光心和成像平面上点的物理坐标计算得到。运用 Steger 算法提取条纹中心图像, 并给出一种新的匹配点方法来匹配提取的条纹。实验结果表明, 该系统通过 48 个标定计算的误差为 0.149 0 mm, 从而验证了其有效性。

**关键词:** 三维重建; 双目立体视觉; 解析解; 匹配算法; 成像系统

中文引用格式: 周 麒, 杨永明, 王振洲. 基于双目立体视觉的结构光测量技术[J]. 计算机工程, 2018, 44(7): 244-249, 258.

英文引用格式: ZHOU Qi, YANG Yongming, WANG Zhenzhou. Structured light measurement technique based on binocular stereo vision[J]. Computer Engineering, 2018, 44(7): 244-249, 258.

## Structured Light Measurement Technique Based on Binocular Stereo Vision

ZHOU Qi<sup>1,2</sup>, YANG Yongming<sup>1,2</sup>, WANG Zhenzhou<sup>1,2</sup>

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**【Abstract】** Most of the current three-dimensional measurement systems uses projection matrix method to solve the three-dimensional point coordinates, but this method does not make full use of the calibration parameters, and the calculation between the matrix is complex. Therefore, a binocular imaging system based on analytic solution is proposed. The system calculates the analytic solutions of the object's three-dimensional coordinates by intersecting the left and right camera lights. The light is calculated from the camera's optical center and the physical coordinates of the points on the imaging plane. The Steger algorithm is used to extract the center of the stripe, and a new matching point method is proposed to match the extracted stripe. Experimental results show that the error of the system calculated by 48 calibration points is 0.149 0 mm, which verifies the effectiveness of the proposed system.

**【Key words】** three-dimensional reconstruction; binocular stereo vision; analytic solutions; matching algorithm; imaging system

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0047226

### 0 概述

双目视觉即用两台摄像机来模拟人的眼睛, 摄像机经过移动或旋转拍摄同一幅场景, 通过计算空间点在两幅图像中的视差<sup>[1]</sup>, 获得该点的三维坐标, 在得到场景的一系列空间点坐标后, 利用这些坐标信息来实现对场景的三维重建。三维重构技术的运用非常广泛, 已经渗透到工业检测<sup>[2]</sup>、医学诊断、航空航天<sup>[3]</sup>等领域中。

目前, 大多数三维测量系统都是建立在获得二维图像坐标基础上, 进行图像匹配后利用投影矩阵法<sup>[2]</sup>求解出三维点坐标, 但该方法没有充分利用标

定的参数, 而且矩阵之间计算复杂。因此, 建立一种新的简单求解三维点方法的双目系统非常重要。

本文在获得二维图像坐标的基础上, 提出一种基于解析解的双目成像系统。该系统充分利用标定焦距, 获得成像平面上的三维坐标, 并在此基础上运用线线相交原理求解三维坐标的解析解。同时, 在图像匹配过程中利用结构光技术采用一种新的方法找到匹配点对。

### 1 双目成像系统模型的建立

#### 1.1 相机成像模型

相机标定的精度直接影响了重建效果的好坏,

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目(Y5A1270101)。

作者简介: 周 麒(1993—), 男, 硕士研究生, 主研方向为图像处理、计算机视觉; 杨永明, 硕士; 王振洲(通信作者), 研究员、博士生导师。

收稿日期: 2017-05-16 修回日期: 2017-07-20 E-mail: 717347900@qq.com

物体和成像平面上像素的几何位置取决于相机成像模型<sup>[3]</sup>。

图 1 是相机成像模型,  $O$  点为投影中心点, 相机光轴与成像平面垂直,  $O$  点距离成像平面为焦距  $f$ , 空间一点  $P(X, Y, Z)$  通过中心投影到成像平面上的点为  $p_c(x, y)$ 。

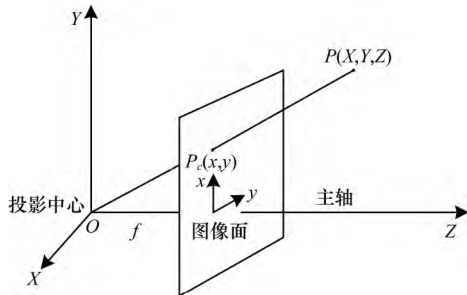


图 1 相机成像模型

由图 1 并通过相似三角形关系<sup>[4]</sup>可以得到:

$$\frac{f}{Z} = \frac{x}{X} = \frac{y}{Y} \quad (1)$$

即:

$$x = \frac{fX}{Z} \quad (2)$$

$$y = \frac{fY}{Z} \quad (3)$$

齐次坐标可以表示为:

$$z \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (4)$$

因为二维成像平面上的实际物理坐标系原点与像素坐标系的原点不一致<sup>[5]</sup>, 所以需要将实际物理坐标系的原点移动到像素坐标系的原点<sup>[5]</sup>, 平移向量为  $(t_x, t_y)$ , 因此  $x, y$  为:

$$x = \frac{fX}{Z} + t_x \quad (5)$$

$$y = \frac{fY}{Z} + t_y \quad (6)$$

同样, 用齐次坐标可以表示为:

$$z \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & t_x \\ 0 & f & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (7)$$

在式(7)中  $p_c$  表示实际物理单位, 因为要将成像平面上的点表示成像素坐标, 所以需要知道相机的分辨率 pixels/mm, 即每 1 mm 占几个像素值<sup>[6]</sup>。若相机像素尺寸为正方形, 则在成像平面上  $x$  和  $y$  方向上的分辨率相同, 但在实际情况下, 相机像素尺寸为矩形<sup>[6]</sup>, 假设在  $x$  方向上的分辨率为  $m_x$  pixels/mm, 在  $y$  方向上的分辨率为  $m_y$  pixels/mm。因此, 为了得到  $p_c$  的像素坐标, 将  $x$  和  $y$  分别

乘以  $m_x$  和  $m_y$ , 可以得到:

$$u = m_x \frac{fX}{Z} + m_x t_x \quad (8)$$

$$v = m_y \frac{fY}{Z} + m_y t_y \quad (9)$$

用矩阵表示为:

$$z \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_x f & 0 & m_x t_x \\ 0 & m_y f & m_y t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x & 0 & u_0 \\ 0 & a_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} P = KP \quad (10)$$

其中  $K$  为相机内参矩阵, 仅取决于相机的内部参数<sup>[6]</sup>。实验中通过对棋盘格标定得到两相机的内参矩阵分别为:

$$K_{\text{left}} = \begin{pmatrix} 1\ 320.263\ 4 & 0 & 699.423\ 6 \\ 0 & 1\ 317.699\ 2 & 506.607\ 3 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$K_{\text{right}} = \begin{pmatrix} 1\ 324.771\ 6 & 0 & 714.686\ 1 \\ 0 & 1\ 321.941\ 4 & 535.640\ 9 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

通过计算得到左相机焦距为 8.411 mm, 右相机焦距为 8.439 mm。

### 1.2 双图成像系统的建立

如图 2 所示, 对两相机单独进行标定后<sup>[6]</sup>, 得到  $x_{c1}, x_{c2}$ :

$$x_{c1} = R_1 x_w + t_1 \quad (11)$$

$$x_{c2} = R_2 x_w + t_2 \quad (12)$$

联立式(11)、式(12)可以得出左右两相机之间的位置关系:

$$x_{c1} = R_1 R_2^{-1} x_{c2} + t_1 - R_2^{-1} t_2 \quad (13)$$

令  $R = R_1 R_2^{-1}$ ,  $T = t_1 - R_2^{-1} t_2$ , 可以得出:

$$x_{c1} = R x_{c2} + T \quad (14)$$

即右相机相对于左相机存在一个旋转和平移的关系<sup>[6]</sup>。

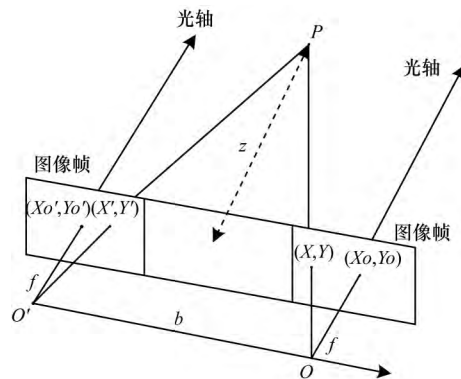


图 2 双目成像系统模型

通过实验可以得到:

$$R = \begin{pmatrix} 0.9996 & -0.0241 & -0.0136 \\ 0.0241 & 0.9997 & 7.7990e-04 \\ 0.0135 & -0.0011 & 0.9999 \end{pmatrix}$$

$$T = (-73.0671, -0.3443, -1.9482)$$

从图 2 可以看出,由于两相机摆放位置几乎平行,因此  $R$  近似于单位矩阵。

假设左相机光心  $O$  的坐标为  $(0 \ \rho \ \rho)$  根据两相机之间的旋转和平移矩阵<sup>[6]</sup>可以得到右相机光心  $O$  的坐标。由于中心投影、相机成像平面与光轴互相垂直,且光心与成像平面的距离为焦距,焦距由 1.1 节计算已知。所以,对于空间一点  $P$ ,投影到成像平面上点的  $z$  值已知。由于获得图像上的点为像素坐标,因此通过式(8)、式(9)将像素坐标转换为实际物理坐标得到  $x、y$  的值。

基于此,便获得了左相机成像面上点的三维坐标。同理,根据右相机相对左相机的旋转和平移矩阵,也能获得右相机成像面上点的三维坐标。以标定板上 48 个点为例,可以画出光心与角点在成像平面上三维点的坐标,如图 3、图 4 所示。

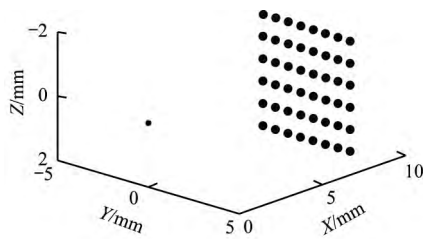


图 3 左相机成像面上三维点图

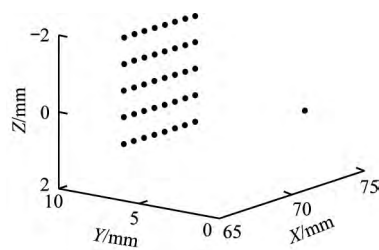
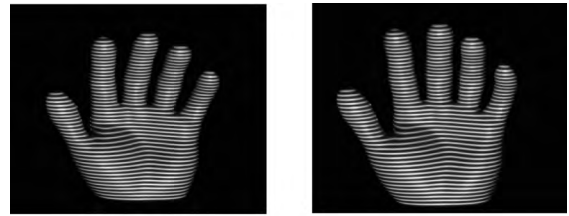


图 4 右相机成像面上三维点图

## 2 图像处理与特征点匹配

### 2.1 图像处理

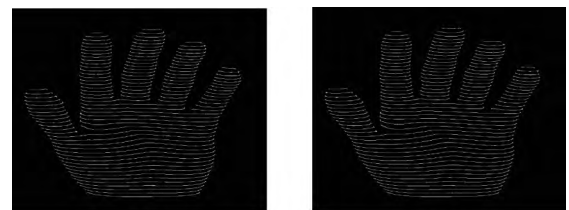
利用投影仪将线结构光投影在物体表面上,便可以获得畸变的光条信息,畸变程度代表了物体的深度信息<sup>[7]</sup>。实验中对纸盒和手指进行了处理,下面以手指为例,获得的畸变条纹图像如图 5 所示。



(a)畸变条纹左 (b)畸变条纹右

图 5 畸变条纹图像

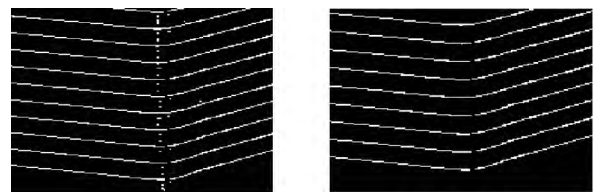
本文运用 Steger 算法对条纹中心进行提取。Steger 算法的原理在文献[7]中有详细描述。求出结构光条中心的亚像素位置后,可以提取出光条中心图像,如图 6 所示。



(a)条纹中心左 (b)条纹中心右

图 6 条纹中心图像

由于物体表面结构的不同,Steger 算法提取出的条纹中心在光照不均匀的地方存在间断点<sup>[7]</sup>,如图 7(a) 中线与线之间的点。本文利用形态学<sup>[8]</sup>的开操作对图像进行处理,充分运用了开操作可以平滑物体轮廓、断开狭窄的间断和消除细小的突出物的特点,去掉存在的间断点,实验结果如图 7(b) 所示。



(a)原始图像 (b)处理后的图像

图 7 开操作前后图像对比

### 2.2 特征点匹配

图像立体匹配首先是利用双目相机在不同位置同时对目标物体进行拍摄而得到两幅二维图像<sup>[8]</sup>,然后再在这两幅图像中寻找空间对应的像点,将对应像点进行匹配,得到匹配点对<sup>[9]</sup>。

本文在匹配过程中提出了一种新的匹配方法。将结构光投影在物体上获得条纹数量一致的左右两幅图像,经过提取中心点操作后,按顺序提取条纹<sup>[10]</sup>,确保左右两幅提取的条纹按顺序进行一一对应,例如选取了大拇指的第 24 根条纹线段,左右对应如图 8 所示。

实现了线与线的对应关系后,将线段上的点通

过拟合使它们满足有规律的曲线分布, 本文选取了2种拟合方法<sup>[11]</sup> 并做对比分析, 第1种为多项式拟合, 第2种为样条纹 Spline 拟合, 如图9所示。

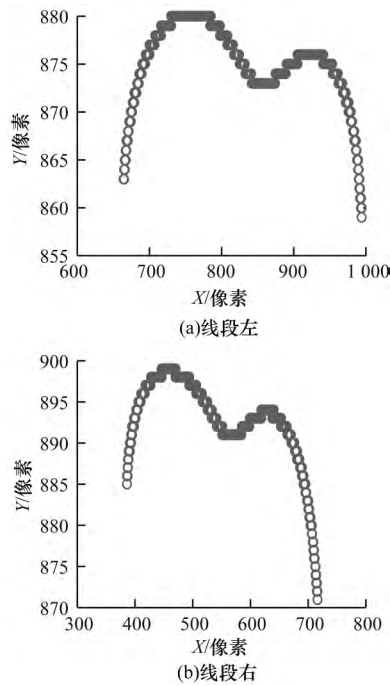


图8 左右对应的条纹线段

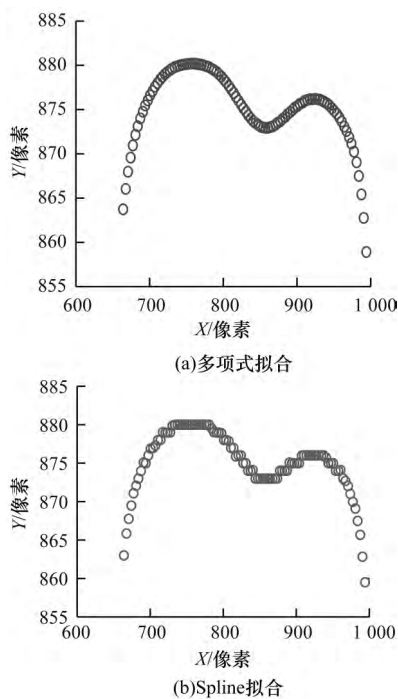


图9 曲线拟合方法对比

本文比较2种拟合方法发现, 多项式拟合使曲线更加平滑但不能满足所有的点都在曲线上, 样条纹拟合则尽可能保证多的点在曲线上但不能满足曲线平滑, 这里要尽可能保证曲线平滑, 故选择多项式拟合, 并在拟合好的左右曲线上等间隔地采样相同多的点。如图10所示, 对两边同时采样了100个点。

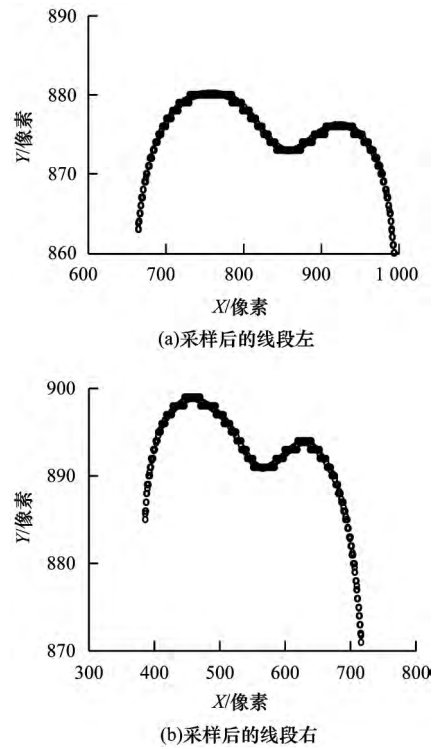


图10 拟合采样后的单根条纹线段

对拟合好的曲线上的采样点按顺序进行一一对应就可以得到这条线段上的匹配点对。按照上述方法对所有条纹线段进行拟合, 等间隔采样同样多的点, 将这些点一一对应便能得到整幅图像的匹配点对, 如图11、图12所示。

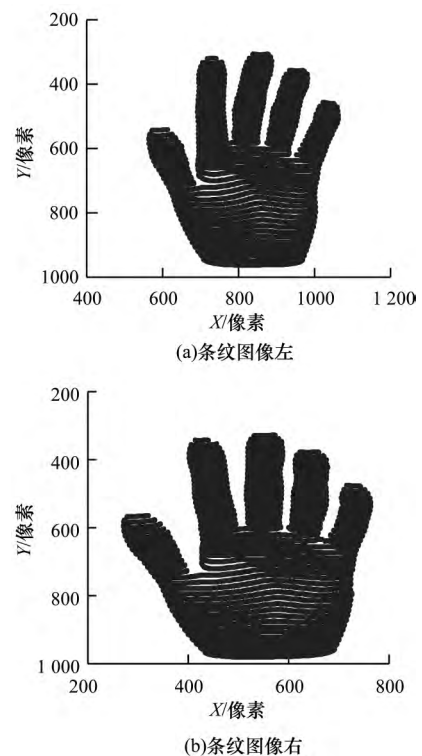


图11 条纹中心图像

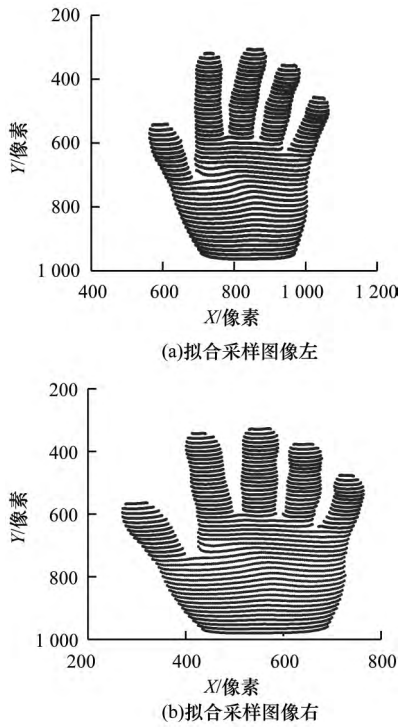


图 12 拟合采样后的条纹线段

根据上文建立的双目成像系统模型,类似于标定板上的点,将像素坐标通过式(8)、式(9)转换成实际物理坐标<sup>[12]</sup>,同样可以画出物体在成像平面上的三维点和光心的坐标,如图13所示。

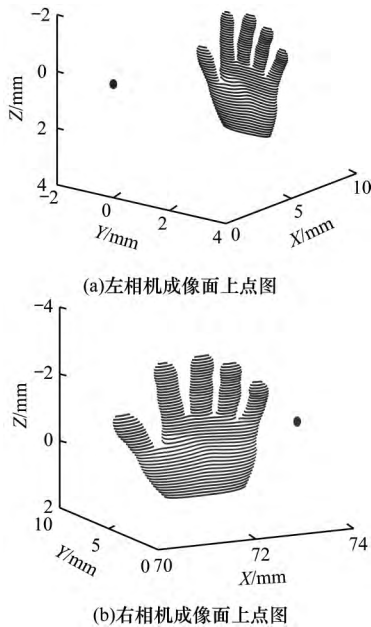


图 13 成像面上三维点图(手指)

### 3 重建方法与误差分析

#### 3.1 重建方法

从前面的部分已经得到了两相机的光心与物体在成像平面上的三维坐标,连接光心与成像面上的三维点,对2个相机会有的直线方程<sup>[13]</sup>:

$$\frac{x_i - x_0}{a_i} = \frac{y_i - y_0}{b_i} = \frac{z_i - z_0}{c_i} = t_i \tag{15}$$

$$\frac{X_j - X_0}{A_j} = \frac{Y_j - Y_0}{B_j} = \frac{Z_j - Z_0}{C_j} = T_j \tag{16}$$

在理想情况下,空间两条直线会相交于一点,但由于实际相机并非理想的中心投影并且伴随着图像噪声<sup>[14]</sup>,相机畸变的存在,两条直线可能不会有交点,是异面的关系。为了求出这个点,采用最小二乘法求异面直线公垂线的中心点来代替这个点<sup>[13-14]</sup>。

假设点 $(x_i, y_i, z_i)$ 在左相机对应的直线上,点 $(X_j, Y_j, Z_j)$ 在右相机对应的直线上,两点之间的距离公式为:

$$d_i = \sqrt{(X_j - x_i)^2 + (Y_j - y_i)^2 + (Z_j - z_i)^2} \tag{17}$$

$$\begin{aligned} \text{将式(15)、式(16)代入到式(17)中,可以得到:} \\ (d_i)^2 = (A_j T_j + X_0 - a_i t_i - x_0)^2 + \\ (B_j T_j + Y_0 - b_i t_i - y_0)^2 + \\ (C_j T_j + Z_0 - c_i t_i - z_0)^2 \end{aligned} \tag{18}$$

要使距离最小,将式(18)看成关于 $T_j$ 的方程,对 $T_j$ 求导并令导数为0,可以得到 $T_j$ 与 $t_i$ 的关系:

$$T_j = p_1 t_i + p_2 \tag{19}$$

可以求出:

$$p_1 = \frac{a_i A_j + b_i B_j + c_i C_j}{A_j A_j + B_j B_j + C_j C_j} \tag{20}$$

$$p_2 = \frac{A_j x_0 + B_j y_0 + C_j z_0 - A_j X_0 - B_j Y_0 - C_j Z_0}{A_j A_j + B_j B_j + C_j C_j} \tag{21}$$

将式(19)代入式(18)中,对 $t_i$ 求导并令导数为0,得到:

$$t_i = \frac{u_1 + u_2 + u_3}{r} \tag{22}$$

可以求出:

$$r = (A_j p_1 - a_i)^2 + (B_j p_1 - b_i)^2 + (C_j p_1 - c_i)^2 \tag{23}$$

$$u_1 = -(A_j p_1 - a_i)(A_j p_2 + X_0 - x_0) \tag{24}$$

$$u_2 = -(B_j p_1 - b_i)(B_j p_2 + Y_0 - y_0) \tag{25}$$

$$u_3 = -(C_j p_1 - c_i)(C_j p_2 + Z_0 - z_0) \tag{26}$$

把 $t_i$ 代入式(19)中可以得到 $T_j$ 的值:

$$T_j = p_1 \frac{u_1 + u_2 + u_3}{r} + p_2 \tag{27}$$

将 $t_i$ 和 $T_j$ 代入式(15)、式(16)中,得到2个相距最近的点:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \frac{u_1 + u_2 + u_3}{r} \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \tag{28}$$

$$\begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{bmatrix} = \left( p_1 \frac{u_1 + u_2 + u_3}{r} + p_2 \right) \begin{bmatrix} A_j \\ B_j \\ C_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

当这两点不相等时取它们的中心点<sup>[13-14]</sup>作为物体的三维点:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (30)$$

通过上述方法能够求出距离 2 条直线最近的点的三维坐标,对成像平面上的所有点进行求解便能得到物体表面的三维点坐标。

### 3.2 误差分析

根据 1.2 节建立的双目成像系统模型可知,光心和成像平面上的三维点坐标,结合 3.1 节阐述的重建方法,可以计算出标定板上 48 个点的坐标,同样用传统投影矩阵的方法计算出点的坐标,将两者与实际测量点坐标进行对比分析,如表 1 所示。

表 1 坐标误差比较 mm

方法	$X_{mse}$	$Y_{mse}$	$Z_{mse}$	$d_{error}$
本文方法	4.035 3	0.215 3	0.101 1	0.149 0
传统方法	5.636 9	0.415 7	0.211 9	0.251 7

在表 1 中  $X_{mse}$  表示实际测量点与重构点坐标在 X 方向上的均方误差,  $Y_{mse}$  表示实际测量点与重构点坐标在 Y 方向上的均方误差,  $Z_{mse}$  表示实际测量点与重构点坐标在 Z 方向上的均方误差,  $d_{error}$  表示实际测量点间距与重构点间距的误差。

均方误差公式如下:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_r^i - X_o^i)^2 \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_r^i - Y_o^i)^2 \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_r^i - Z_o^i)^2 \end{bmatrix} \quad (31)$$

从表 1 可以看出,本文采用求三维点的方法比传统方法误差更小。图 14 为实际测量点与重构点的位置关系,可以看出,越靠近成像中心相机畸变越小,点能很好地重合,而在边缘处相机畸变大<sup>[15]</sup>,故存在一定的误差。

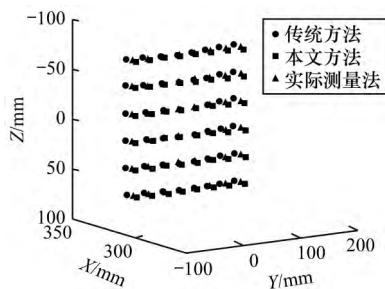
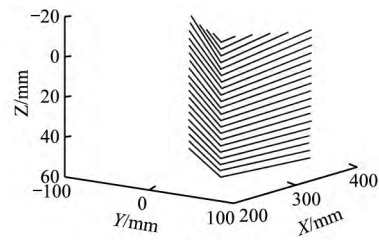
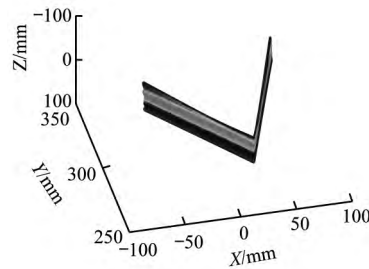


图 14 实际测量点与重构点位置关系

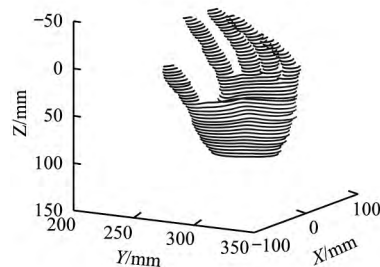
在上述误差允许的范围对 2 个物体进行了重构,即一个简单的纸盒和一个复杂的手指模型,重构效果如图 15 所示。



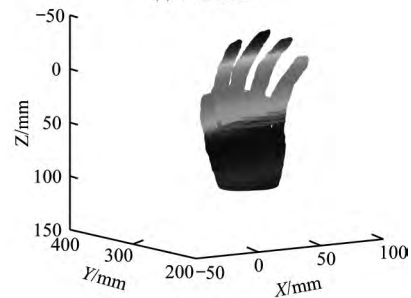
(a)纸盒重建



(b)纸盒重建(HSV)



(c)手指重建



(d)手指重建(HSV)

图 15 物体重构效果

## 4 结束语

本文建立一种简单的结构光双目测量系统,利用 Steger 算法对条纹中心进行提取,得到结构光条中心的亚像素位置后,提取出光条中心图像,并提出了一种新的匹配点方法来匹配提取的条纹。实验结果表明,与传统投影矩阵法相比,该系统具有较低的标定点计算误差。

(下转第 258 页)

## 参考文献

- [1] SEBASTIAN T, PUTHIYIDAM J. A survey on video summarization techniques [J]. International Journal of Computer Applications 2015, 132(13): 30-32.
- [2] KANG Hongwen, MATSUSHITA Y, TANG Xiaou, et al. Space-time video montage [C]//Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2006: 1331-1338.
- [3] PRITCH Y, RAV-ACHA A, PELEG S. Nonchronological video synopsis and indexing [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 2008, 30(11): 1971-1984.
- [4] PRITCH Y, RATOVITCH S, HENDEL A, et al. Clustered synopsis of surveillance video [C]//Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance. Washington D. C., USA: IEEE Press 2009: 195-200.
- [5] FU Yanwei, GUO Yanwen, ZHU Yanshu, et al. Multi-view video summarization [J]. IEEE Transactions on Multimedia 2010, 12(7): 717-729.
- [6] LEO C, MANJUNATH B S. Multicamera video summarization and anomaly detection from activity motifs [J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2014, 10(2): 27.
- [7] NIE Yongwei, XIAO Chunxia, SUN Hanqiu, et al. Compact video synopsis via global spatiotemporal optimization [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 2013, 19(10): 1664-1676.
- [8] ZHU Jianqing, FENG Shikun, YI Dong, et al. High-performance video condensation system [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology 2015, 25(7): 1113-1124.
- [9] KOLMOGOROV V, ZABIN R. What energy functions can be minimized via graph cuts [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(2): 147-159.
- [10] 汤进, 单晓凤, 阮瑞, 等. 基于运动目标轨迹优化的监控视频浓缩方法 [J]. 数据采集与处理 2016(1): 108-116.
- [11] 欧阳建权, 李锦涛, 张勇东. 视频摘要技术综述 [J]. 计算机工程 2005, 31(10): 7-9.
- [12] GOYETTE N, JODIN P M, PORIKLI F, et al. Changedetection.net: a new change detection benchmark dataset [C]//Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. Washington D. C., USA: IEEE Press 2012: 1-8.
- [13] FENG Shikun, LEI Zhen, YI Dong, et al. Online content-aware video condensation [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2012: 2082-2087.
- [14] 唐铭谦. 基于对象的监控视频摘要算法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学 2014.
- [15] BRUTZER S, HOFERLIN B, HEIDEMANN G. Evaluation of background subtraction techniques for video surveillance [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2011: 1937-1944.

编辑 刘冰

(上接第 249 页)

## 参考文献

- [1] 韩峻峰, 王帅. 基于双目立体视觉技术的汽车测距系统实现 [J]. 计算机应用与软件, 2016, 33(9): 227-230.
- [2] 黄椰, 黄靖, 肖长诗. 基于双目立体视觉的船舶轨迹跟踪算法的研究 [J]. 计算机科学, 2017, 44(1): 308-313.
- [3] 沈文波, 周武. 基于双目视觉的飞行头盔动载特性测试技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(6): 52-55.
- [4] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence 2000, 22(11): 1330-1334.
- [5] TSAI R Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision [C]//Proceeding of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington D. C., USA: IEEE Press, 1986: 364-374.
- [6] 刘样豪, 谢林柏. 基于共面点的改进摄像机标定方法研究 [J]. 计算机工程 2016, 32(8): 289-293.
- [7] STEGER C. An unbiased detector of curvilinear structures [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(2): 113-125.
- [8] 朱真, 杜轶诚, 秦绪佳, 等. 结构光条纹图像分割方法 [J]. 计算机应用与软件 2017, 33(8): 206-210.
- [9] CHEN F, BROEN G M, SONG M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods [J]. Optical Engineering 2000, 39(1): 10-22.
- [10] 宋祺鹏, 唐晶磊, 辛菁. 基于生长模型的苗期大豆植株三维重建 [J]. 计算机工程 2017, 43(5): 275-280.
- [11] 韩成春. 面向踝关节功能评价的三维测量与重建系统设计 [J]. 计算机工程 2016, 42(11): 300-304.
- [12] WANG J, WANG X J, LIU F. Modeling of binocular stereo vision for remote coordinate measurement and fast calibration [J]. Optical Engineering, 2014, 54(1): 269-274.
- [13] WANG Z Z. An imaging and measurement system for robust reconstruction of weld pool during arc welding [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2015, 62(8): 5109-5118.
- [14] WANG Z Z. A one-shot-projection method for robust measurement of specular surfaces [J]. Optical Engineering 2015, 23(3): 1912-1929.
- [15] 焦亮, 胡国清, 吕成志, 等. 基于机器视觉的高精度测量与装配系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(7): 72-76.

编辑 索书志