

DOI: 10.7652/xjtuxb201710006

# 区域分割的亚像素相位立体匹配算法

蒙雁琦, 胡改玲, 温琳鹏, 王军平  
(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

**摘要:** 针对双目光栅投影测量中深度不连续及边界阴影处的误匹配导致测量误差大的问题, 提出区域分割的亚像素相位立体匹配算法。该算法采用由粗到精的匹配策略, 在标准极线几何、相位等约束下获得粗匹配点。根据变形栅线图、展开相位图的特点将粗匹配结果分为不包含边界阴影的深度连续区域、边界阴影及深度不连续区域, 分别使用加窗匹配测度最小二乘法和外插法获得亚像素匹配点。实验结果表明: 该算法能有效消除传统匹配算法在深度不连续处的视差平滑过渡; 与传统点基元匹配算法相比, 该算法在边界阴影及深度不连续处的平均高度相对误差减小了 62%~69%, 与传统模板匹配算法相比, 该算法在边界阴影及深度不连续处的平均高度相对误差减小了 57%~61%, 在深度连续处的匹配精度提高了 3~4 倍。该算法有效提高了相位立体匹配的精度, 对提高目前三维测量技术精度具有重要意义。

**关键词:** 光栅投影测量; 区域分割; 相位立体匹配; 深度不连续; 最小二乘法

**中图分类号:** TH39 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)10-0033-06

## A Stereo Matching Algorithm of Sub-Pixel Phases Based on Region Segmentation

MENG Yanqi, HU Gailing, WEN Linpeng, WANG Junping  
(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** A stereo matching algorithm of sub-pixel phases based on region segmentation is proposed to solve the problem of mismatching in boundary shadow region and depth-discontinuous region appeared in binocular projected grating measurement. The proposed algorithm uses a matching strategy for coarse-to-fine and obtains the coarse matching points under a standard epipolar line constraint, a phase constraint and other constraints. The algorithm divides the coarse matching results into a depth-continuous region without boundary shadow and a depth-discontinuous region with boundary shadow in accordance with the characteristics of the deformed fringe map and the phase unwrapping map. Sub-pixel matching points are then obtained by using the least square curve fitting method with windowed matching measure and the extrapolation method, respectively. Experimental results show that the proposed algorithm effectively eliminates the disparity smoothing transition in depth-discontinuous region. A comparison with the traditional point matching algorithm and traditional template matching algorithm shows that the proposed algorithm reduces mean relative error of heights from 62% to 69% and from 57% to 61%, respectively in depth-discontinuous region and increases the

收稿日期: 2017-02-15。 作者简介: 蒙雁琦(1992—), 女, 硕士生; 王军平(通信作者), 男, 教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11072183)。

网络出版时间: 2017-08-19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170819.1125.008.html>

matching accuracy 3 to 4 times in depth-continuous region. The proposed algorithm effectively improves the accuracy of phase stereo matching, and is of great significance to improve the accuracy of 3D present measurement technique.

**Keywords:** projected grating method; region segmentation; phase stereo matching; depth-discontinuous; least square method

基于光栅投影的双目三维测量方法以精度高、速度快的特点在工业测量领域得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。立体匹配是影响双目测量系统测量精度的关键环节之一<sup>[3-4]</sup>。在双目光栅投影系统中,通常选择对畸变不敏感的相位信息作为匹配基元,而相位立体匹配的难点在于等相位点的寻找。

传统的基于极线约束的相位立体匹配算法将匹配点的搜索由二维转化为一维,提高了立体匹配的精度和速度<sup>[5-6]</sup>,但是每个待匹配点极线求取过程计算量大,影响测量速度。姜宏志等利用极线校正实现了快速立体匹配<sup>[7-9]</sup>;熊维等先结合极线校正以单个点相位差最小处作为初始匹配点,然后通过线性插值得到亚像素匹配点坐标<sup>[10-11]</sup>,但是基于点基元的匹配方法容易受相位展开错误引起的相位跳变点的影响,因此黄亚楠和娄小平在点基元匹配算法的基础上,根据展开相位的连续性对相位跳变点进行了校正<sup>[12]</sup>;肖志涛等提出模板匹配方法,通过寻找左右图像模板内相位差最小处并将其作为匹配点,一定程度上降低了相位跳变点对匹配精度的影响<sup>[13]</sup>。

对于深度有突变的物体,在深度不连续处的视差也是不连续的,但是目前基于点基元的匹配方法和基于模板的相位匹配方法在深度不连续处的匹配会产生视差平滑过渡的情况,在边界阴影处受阴影干扰匹配精度低。本文提出了一种区域分割的亚像素相位立体匹配算法,将测量对象表面分割成不包含边界阴影的深度连续区域、边界阴影及深度不连续区域,对于不同区域采用不同的匹配策略,以提高深度不连续及边界阴影处的匹配精度。

## 1 区域分割匹配算法原理

为降低匹配复杂度,本文算法首先对左右图像进行极线校正,在同一行中进行匹配点的搜索,然后对校正后的图像进行区域分割。

### 1.1 区域分割原理

由于深度不连续及边界阴影使展开相位杂乱无序,物体的边缘处匹配结果出现平滑过渡现象。为了实现边缘处的正确匹配,需要进行区域分割。区域分割原理如图1所示,具体分割方法如下:

**步骤1** 对左相机采集的变形栅线图进行边缘检测,得到边缘二值模板图像;

**步骤2** 根据展开相位图在同一行上的单调变化区域的斜率设定阈值,对左相机的展开相位图进行阈值分割,得到含有边缘阴影的二值图像;

**步骤3** 对边缘二值模板图像、含有边缘阴影的二值图像作并运算后进行形态学膨胀操作,得到区域分割二值图像,区域分割二值图像中的黑色区域表示该像素点位于不包含边界阴影的深度连续区域,白色区域表示该像素点位于边界阴影及深度不连续区域。

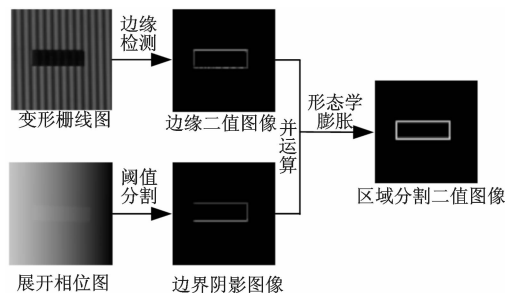


图1 区域分割原理

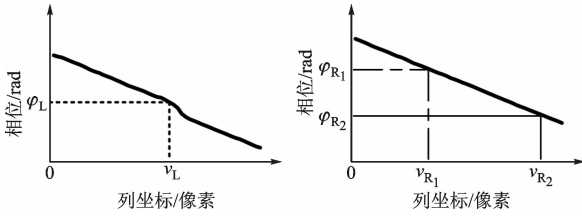
### 1.2 亚像素级视差获取

为了提高匹配的精度,本文算法分像素级粗匹配和亚像素级精匹配2个阶段进行。

标准极线几何约束下的相位立体匹配是在左右图像的同一行中寻找展开相位相等的点,但是一般情况下不可能直接找到这样的点。根据分析可知,展开相位值在同一行上呈递增或递减趋势,如图2a、图2b分别为左右相位展开图在同一行方向上的相位分布。利用相位递减或递增约束、标准极线几何约束、匹配点的顺序约束可实现像素级粗匹配。以左图像为基准视图,假设极线上待匹配点的相位为 $\varphi_L$ , $\varphi_{R_1}$ 、 $\varphi_{R_2}$ 为右视图对应极线上两像素点的相位,则当相位满足

$$\varphi_L - \varphi_{R_1} < 0 \text{ 且 } \varphi_L - \varphi_{R_2} > 0 \quad (1)$$

时,可确定待匹配点在右图的匹配点列坐标在区间 $[v_{R_1}, v_{R_2}]$ 上。若 $\|\varphi_L - \varphi_{R_1}\| < \|\varphi_L - \varphi_{R_2}\|$ ,则待匹配点在右图的粗匹配点为 $P_{R_1}(u_{R_1}, v_{R_1})$ ;若 $\|\varphi_L - \varphi_{R_1}\| > \|\varphi_L - \varphi_{R_2}\|$ ,则左图待匹配点在右图的粗匹配点为 $P_{R_2}(u_{R_2}, v_{R_2})$ 。



(a)左相位展开图相位变化 (b)右相位展开图相位变化

图 2 同一行上的展开相位变化

为了获得精确的视差值,当满足上述粗匹配条件时,则进入亚像素级精匹配阶段。将 1.1 节中区域分割的结果映射到初始匹配结果中,即将初始匹配结果分为不包含边界阴影的深度连续区域、边界阴影及深度不连续区域,精匹配过程分两种情况进行。①边界阴影及深度不连续区域的亚像素点求取:当图 2a 中待匹配点处于区域分割二值图像所标记的边界阴影及深度不连续区域,则亚像素级匹配点坐标根据待匹配点单侧相邻两个已经获得亚像素匹配坐标点的匹配点坐标线性插值得到。②不包含边界阴影的深度连续区域的亚像素点求取:当图 2a 中待匹配点处于区域分割二值图像所标记的不包含边界阴影的深度连续区域,考虑到立体校正误差及噪声的影响,以待匹配点为中心建立  $n$  邻域的展开相位窗口  $W_i$ ,图 2b 分别以粗匹配点及其两侧相邻 4 点为中心构造同样大小的展开相位窗口  $W_{r-2}$ 、 $W_{r-1}$ 、 $W_r$ 、 $W_{r+1}$ 、 $W_{r+2}$ 。选择匹配测度函数 SAD 计算窗口内的绝对相位偏差

$$D_i = \sum \|W_i - W_r\| \quad (2)$$

式中: $i$  的取值为  $r-2$ 、 $r-1$ 、 $R$ 、 $r+1$ 、 $r+2$  中的任意值。

不包含边界阴影的深度连续区域的展开相位值在同一行上是单调分布的,通过二次函数模型分析可知,绝对相位差和  $(D) D_{r-2}$ 、 $D_{r-1}$ 、 $D_r$ 、 $D_{r+1}$ 、 $D_{r+2}$  与粗匹配点坐标  $v_{r-2}$ 、 $v_{r-1}$ 、 $v_r$ 、 $v_{r+1}$ 、 $v_{r+2}$  之间满足二次曲线关系。采用最小二乘法的二次曲线拟合方法将粗匹配点坐标及其两侧相邻 4 点绝对相位差和拟合为一个二次曲线,曲线的顶点即为亚像素匹配点  $P(u'_r, v'_r)$ ,其中  $u'_r$ 、 $v'_r$  分别为  $P$  点的行、列坐标,  $D'_r$  为对应的绝对相位偏差,如图 3 所示。

根据上述分析,本文选择如下拟合函数

$$D = Av^2 + Bv + C \quad (3)$$

将粗匹配点的列坐标及由式(2)计算得到的绝对相位差和代入式(3)中,写成如下矩阵形式

$$\begin{bmatrix} v_{r-2}^2 & v_{r-2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{r+2}^2 & v_{r+2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{r-2} \\ \vdots \\ D_{r+2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

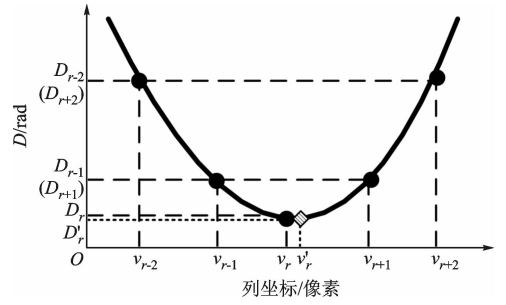


图 3 匹配点列坐标与绝对相位差和的二次曲线

通过对式(4)进行最小二乘求解即可求得  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的值,则图 2a 中待匹配点对应图 2b 的亚像素匹配点  $P(u'_r, v'_r)$  的坐标可由下式计算得到

$$\left. \begin{aligned} u'_r &= -B/2A \\ v'_r &= (4AC - B^2)/4A \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

## 2 匹配算法实现过程

基于以上匹配原理,考虑算法的执行效率,具体的匹配算法步骤如下。

**步骤 1 匹配参数设定。**为了提高算法的效率,以左右展开相位图中某一特征点的列坐标差值作为基础视差  $d_0$ 。将原始的右相位图向左平移基础视差个距离得到新的右相位图。将左相位图作为待匹配视图,在新生成的右相位图中搜索匹配点。根据相位值分布特点设定右图中的搜索起止点坐标、匹配测度的窗口大小。

**步骤 2 区域分割生成二值图像。**采用对噪声不敏感的 Canny 边缘检测算子<sup>[15]</sup>,根据 1.1 节的区域分割原理进行区域分割生成区域分割二值图像。

**步骤 3 像素级粗匹配。**根据 1.1 节的像素级粗匹配原理进行匹配,当不满足粗匹配条件时考虑以下 3 种特殊情况:①若待匹配点的相位  $\varphi_L$  超出右相位图的相位变化范围,则无对应匹配点;②若待匹配点的前一像素点已经求得匹配坐标,则认为该像素点为相位跳变点,此待匹配的匹配点坐标由其前像素点的匹配点坐标外插得到;③若  $\varphi_L = \varphi_{R_1}$  或  $\varphi_L = \varphi_{R_2}$ ,则匹配点的坐标为对应像素点坐标。

**步骤 4 根据 1.2 节的精匹配原理实现亚像素级匹配点坐标的获取。**

**步骤 5 更新图 2b 的起始搜索点。**为了提高匹配的效率,在同一行中,当某一待匹配点已获得匹配点  $P(u'_r, v'_r)$  时,进入下一待匹配点的匹配环节。对求得的匹配点列坐标  $v'_r$  进行四舍五入得到  $v$ ,将下一个待匹配点的起始搜索点列坐标定义为  $v+1$ 。根据每次获得的匹配点坐标,自适应地更新搜索起始

点,不必每次都从步骤 1 中定义的搜索起始点开始搜索。

**步骤 6** 遍历整幅图像获得所有像素点的匹配点坐标,并计算视差

$$d = d_0 + (v'_r - v'_l) \tag{6}$$

式中: $v'_r$  为匹配点的列坐标; $v'_l$  为待匹配点的列坐标。

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 实验系统

实验投影系统采用型号为 DLP4500 的数字显微镜空间光开关调制器,分辨率为  $912 \times 1\,140$ ;摄像机系统采用维视图像的工业 CCD 相机,型号为 MV-EM1200M,帧率为 30 Hz,分辨率为  $1\,280 \times 960$ ,像素尺寸为  $3.75\,\mu\text{m} \times 3.75\,\mu\text{m}$ ,镜头采用定焦镜头,焦距为 8 mm。

#### 3.2 相位立体匹配实验

由于台阶面之间存在明显的深度不连续现象,选择 2 块标准平板叠放构成的标准台阶块作为测量对象进行实验,可有效对比本文算法与传统算法对于深度不连续物体的匹配效果。标准台阶块的高度标准值为上层标准平板的厚度,即  $h = 4\,\text{mm}$ 。采用四步相移法进行相位求解。分别采用本文提出的算法与基于点基元的匹配算法<sup>[11]</sup>及基于模板的匹配算法<sup>[14]</sup>进行比较,通过分析待匹配点与匹配点的相位差、匹配点的坐标变化、同一行中的视差变化来验证文中算法的优势。本文算法中的基础视差设为 48 像素,精匹配中的窗口大小设为  $3 \times 3$  像素。

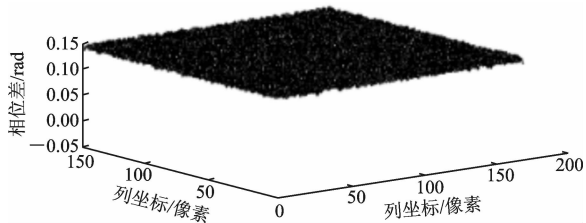
由于在不包含边界阴影的深度连续区域展开相位满足单调性,待匹配点的展开相位与对应匹配点的展开相位差越小则匹配精度越好。图 4a~图 4c 所示分别为上述 3 种算法在不包含边界阴影的深度连续区域中的展开相位差分布图。表 1 给出了上述 3 种算法在此区域中的最大相位差、最小相位差、平均相位差。

表 1 待匹配点与匹配点的相位差

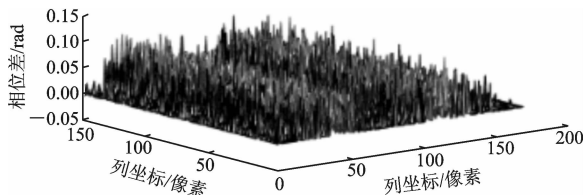
| 算法    | 最大相位<br>差/rad | 最小相位<br>差/rad | 平均相位<br>差/rad |
|-------|---------------|---------------|---------------|
| 传统点基元 | 0.151 0       | 0.127 3       | 0.143 5       |
| 传统模板  | 0.135 7       | 0             | 0.015 3       |
| 本文算法  | 0.131 8       | 0             | 0.004 3       |

由表 1、图 4 可以看出,传统基于点基元的匹配算法由于受噪声的影响,整体相位差偏大。与基于

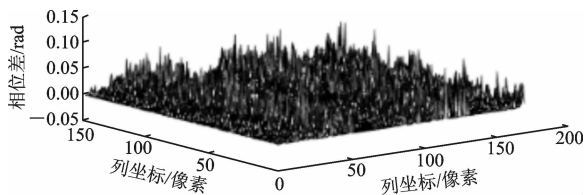
传统模板的匹配算法相比,传统基于点基元的匹配算法受噪声影响小。本文算法比传统匹配算法平均相位差更小。由于相机分辨率、投影光强非线性会



(a)传统基于点基元匹配算法



(b)传统模板匹配算法



(c)本文算法

图 4 待匹配点与对应匹配点的相位差分布

使相移不准确,造成相移误差。相移误差会导致匹配误差,使测量的理论深度分辨率降低。在测量系统中采集频率分布不同的条纹图像进行 8 次重复实验,实验结果表明,与传统模板匹配算法相比,本文算法匹配精度提高了 3~4 倍。

展开相位在边界阴影及深度不连续处是混乱无序的,因此无法根据待匹配点与匹配点之间的相位差来评价匹配效果的好坏。然而,在深度不连续处的视差也应该是不连续的,可根据此处的视差变化情况来比较匹配的效果。在边界阴影处的匹配效果可以通过同一行方向上的匹配点坐标是否满足立体匹配的顺序一致性约束来评价。图 5 给出了上述 3 种匹配算法同一行方向的视差变化图。图 6 给出了上述 3 种算法在边界阴影区域的匹配点坐标变化。

由图 5 中可以看出,在深度突变处,传统基于点基元的匹配及传统模板匹配算法出现了平滑过渡,不满足深度不连续处视差不连续的准则。如图 6 所示,受边界阴影的影响,传统基于点基元及模板的匹配算法出现了不同的待匹配像素点在同一像素点匹配的匹配点顺序错乱现象。

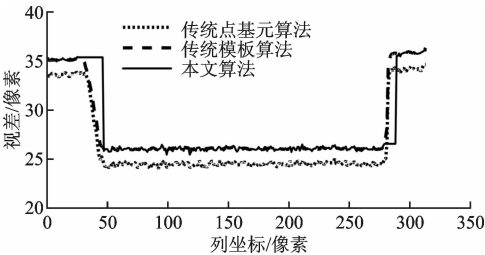


图 5 同一行方向的视差变化

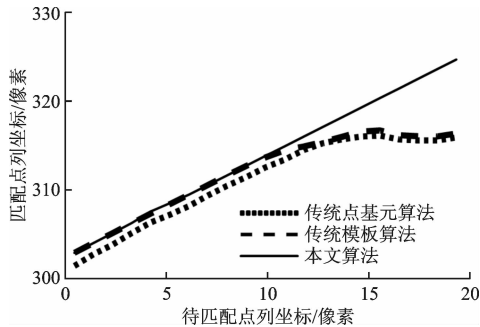
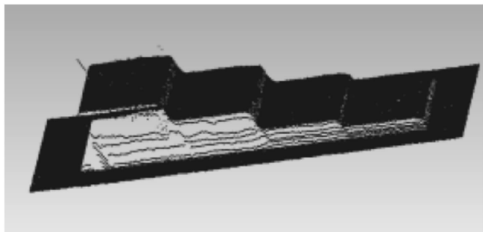


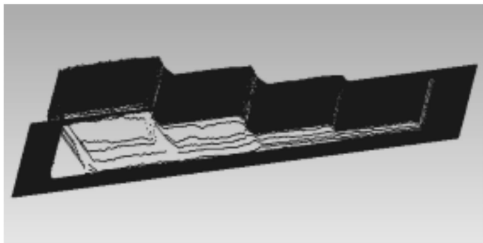
图 6 边界阴影区域匹配点坐标变化

3.3 三维重建实验

为了进一步验证本文算法对深度不连续物体的测量效果,选择台阶高度为 3、5、10、15 mm 的 4 阶标准连续阶梯试块进行测量。图 7a~图 7c 分别为上述 3 种算法匹配后重建的 4 阶连续台阶三维点云。



(a)传统点基元匹配算法



(b)传统模板匹配算法



(c)本文算法

图 7 3 种不同算法的连续台阶三维重建点云

由图 7 可以看出,传统点基元匹配与传统模板匹配算法在台阶高度突变处的重建结果出现了大噪声点,深度突变处出现了平滑过渡。通过计算重建台阶面到参考平面的距离,得到台阶的高度测量值。表 2、表 3 给出了本次实验中连续台阶在边界阴影及深度不连续区域、不包含边界阴影的深度连续区域的高度相对误差。

表 2 边界阴影及深度不连续区域的高度相对误差

| 算法    | 最大误差/% | 最小误差/% | 平均误差/% |
|-------|--------|--------|--------|
| 传统点基元 | 96.75  | 4.30   | 70.03  |
| 传统模板  | 93.62  | 3.14   | 63.86  |
| 本文算法  | 3.52   | 3.04   | 3.28   |

表 3 不包含边界阴影的深度连续区域的高度相对误差

| 算法    | 最大误差/% | 最小误差/% | 平均误差/% |
|-------|--------|--------|--------|
| 传统点基元 | 3.87   | 3.25   | 3.41   |
| 传统模板  | 3.69   | 3.15   | 3.37   |
| 本文算法  | 3.42   | 2.78   | 3.10   |

由表 2、图 5 可以看出,由于传统匹配算法在深度不连续及边界阴影处三维重建点云的噪声,本文算法在连续台阶的深度不连续及边界阴影处的平均高度相对误差远小于传统算法。由于相机分辨率和相移误差会导致匹配误差。为了减小相移误差对匹配结果的影响,对连续台阶进行 8 次重复实验,得到 3 种算法在深度不连续及边界阴影处的平均高度相对误差,如图 8 所示。

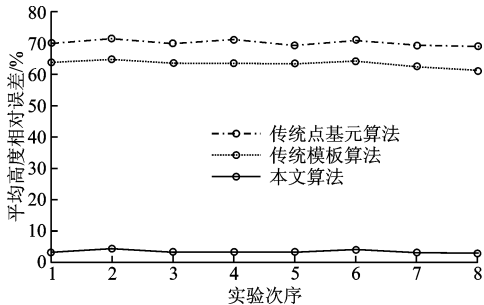


图 8 边界阴影及深度不连续处的平均高度相对误差对比

由图 8 可以看出,与传统点基元匹配算法重建结果相比,本文算法重建的连续台阶在边界阴影及深度不连续处的平均高度相对误差减小了 62%~69%,与传统模板匹配算法相比,本文算法重建的平均高度相对误差减小了 57%~61%。

4 结 论

本文针对双目光栅投影三维测量法中相位立体

匹配在边界阴影及深度不连续处的错误匹配导致三维重建误差较大的问题,提出了一种区域分割的亚像素相位立体匹配算法。该算法将测量对象表面分割成不包含边界阴影的深度连续区域、边界阴影区域及深度不连续区域,分区域进行匹配。通过对高度为4 mm的标准台阶块及台阶高度为3、5、10、15 mm的标准4阶阶梯试块进行8次重复测量实验,结果表明,本文算法能有效消除深度不连续处的视差平滑过渡现象。与传统点基元算法相比,在边界阴影及深度不连续区域的平均高度相对误差减小了62%~69%;与传统模板匹配算法相比,在边界阴影及深度不连续处的平均高度相对误差减小了57%~61%,在深度连续处的算法匹配精度提高了3~4倍,有效地提高了深度不连续物体的三维重建精度。

### 参考文献:

- [1] DAI Meiling, YANG Fujun, LIU Cong, et al. A dual-frequency fringe projection three-dimensional shape measurement system using a DLP 3D projector [J]. *Optics Communications*, 2017, 382: 294-301.
- [2] PRIBANIC T, OBRADOVIC N, SALVI J. Stereo computation combining structured light and passive stereo matching [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(6): 1017-1022.
- [3] 李进军, 赵宏. 一种基于多模式单演特征检测与匹配的三维视觉测量方法 [J]. *光学学报*, 2011, 31(7): 140-148.  
LI Jinjun, ZHAO Hong. Three-dimensional vision measuring technique based on multi-modal monogenic features detecting and matching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 140-148.
- [4] GU Feifei, ZHAO Hong, ZHOU Xiang, et al. Photometric invariant stereo matching method [J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 31779-31792.
- [5] 董诗浩, 赵晓波, 李阿蒙, 等. 透镜畸变模型下的亚像素对应点匹配方法 [J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(S1): 55-58.  
DONG Shihao, ZHAO Xiaobo, LI Ameng, et al. Subpixel matching method based on model of lens distortion [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S1): 55-58.
- [6] 魏振忠, 樊妍睿, 张广军. 光栅式双目立体视觉传感器的立体匹配方法 [J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(2): 330-334.  
WEI Zhenzhong, FAN Yanrui, ZHANG Guangjun. Stereo matching method for raster binocular stereo vi-

sion sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 330-334.

- [7] 姜宏志, 赵慧洁, 梁宵月, 等. 基于极线校正的快速相位立体匹配 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(10): 2520-2525.  
JIANG Hongzhi, ZHAO Huijie, LIANG Xiaoyue, et al. Phase based stereo matching using epipolar line rectification [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(10): 2520-2525.
- [8] HUANG Haiqing, FANG Xiangzhong, LI Qingchun, et al. Rapid and accurate phase matching for 3D measurement [C]// *Proceedings of the 2013 10th IEEE International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 1096-1100.
- [9] LI Dong, ZHAO Huijie, JIANG Hongzhi. Fast phase-based stereo matching method for 3D shape measurement [C]// *Proceedings of the 2010 International Symposium on Optomechatronic Technologies*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 1-5.
- [10] 熊维, 李文龙, 尹周平. 双目PMP视觉测量中立体匹配方法的设计与实现 [J]. *中国机械工程*, 2013, 24(19): 2635-2640.  
XIONG Wei, LI Wenlong, YIN Zhouping. Design and implementation of a stereo matching method in binocular PMP vision measurement [J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(19): 2635-2640.
- [11] SONG Kechen, HU Shaopeng, WEN Xin, et al. Fast 3D shape measurement using Fourier transform profilometry without phase unwrapping [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 84: 74-81.
- [12] 黄亚楠, 娄小平. 基于多频外差原理的相位校正及匹配方法研究 [J]. *应用光学*, 2014(2): 237-241.  
HUANG Yanan, LOU Xiaoping. Phase correction and matching based on multi-frequency heterodyne method [J]. *Journal of Applied Optics*, 2014(2): 237-241.
- [13] 肖志涛, 卢晓方, 耿磊, 等. 基于极线校正的亚像素相位立体匹配方法 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(S1): 225-230.  
XIAO Zhitao, LU Xiaofang, GENG Lei, et al. Subpixel matching method based on epipolar line rectification [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(S1): 225-230.
- [14] 张铮, 徐超, 任淑霞, 等. 数字图像处理与机器视觉: Visual C++与Matlab实现 [M]. 2版. 北京: 人民邮电出版社, 2014: 383-384.

(编辑 武红江)