

## 基于特征匹配的非连续镜面物体三维测量

王月敏<sup>1,2</sup>, 张宗华<sup>1,2\*</sup>, 高峰<sup>2</sup>, 徐永佳<sup>2</sup>, 高楠<sup>1</sup>, 孟召宗<sup>1</sup>, 蒋向前<sup>2</sup><sup>1</sup>河北工业大学机械工程学院, 天津 300130;<sup>2</sup>哈德斯菲尔德大学精密技术中心, 西约克郡, 哈德斯菲尔德 HD1 3DH

**摘要** 提出了一种基于特征匹配的非连续镜面物体三维(3D)测量方法,在保证测量精度的同时避免了不连续物面之间的积分错误问题。首先,采用图像分割方法和立体偏折术,将非连续镜面物体分割为若干个连续物面,并通过梯度积分独立计算各连续物面的 3D 形貌。然后,利用双目视觉技术计算连续区域内特征点的绝对空间坐标,精确定位不连续物面之间的相对位置关系。同时,提出了一种极线约束与特征描述子相结合的特征匹配方法,克服了无纹理镜面物体误匹配率高的问题。最后,结合各连续物面的形貌和空间位置重建非连续镜面物体的 3D 形貌。实验结果表明,本方法可以获得较好的无纹理匹配结果,且能有效实现非连续镜面物体的高精度测量。

**关键词** 测量与计量; 非连续镜面物体; 高精度; 特征匹配; 无纹理

中图分类号 TH741

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1612004

## Three-Dimensional Measurement of Discontinuous Specular Object Based on Feature Matching

Wang Yuemin<sup>1,2</sup>, Zhang Zonghua<sup>1,2\*</sup>, Gao Feng<sup>2</sup>, Xu Yongjia<sup>2</sup>, Gao Nan<sup>1</sup>,  
Meng Zhaozong<sup>1</sup>, Jiang Xiangqian<sup>2</sup><sup>1</sup> School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;<sup>2</sup> Centre for Precision Technologies, University of Huddersfield, Queensgate,  
Huddersfield, West Yorkshire HD1 3DH, UK

**Abstract** This paper presents a three-dimensional (3D) measurement method for discontinuous specular objects based on feature matching, which can not only avoid the integration errors between discontinuous surfaces, but ensure the high accuracy. First, the image segmentation method and stereo deflectometry technique are applied to separate the discontinuous specular object into several continuous surfaces and calculate the 3D shape of each area independently by slope integration. Then, the binocular vision technology is utilized to obtain the absolute spatial coordinates of the feature points to accurately evaluate the relative positions between continuous surfaces. Meanwhile, a feature matching method combining epipolar constraint and feature descriptor is proposed to overcome the problem of poor matching rate of non-texture specular objects. Finally, the 3D shape of the measured object is reconstructed by combing the topography and absolute spatial position of each surface. Experimental results show that the method can obtain better results without texture matching and can achieve high precision measurement of discontinuous specular object.

**Key words** measurement and metrology; discontinuous specular object; high-precision; feature matching; non-texture

**OCIS codes** 240.6700; 150.6910; 330.1400

收稿日期: 2021-01-20; 修回日期: 2021-02-09; 录用日期: 2021-03-18

基金项目: 英国 EPSRC 项目(EP/P006930/1、EP/T024844/1)、国家自然科学基金(52075147)、河北省研究生创新资助项目(220056)

通信作者: \*zhzhang@hebut.edu.cn

## 1 引言

镜面物体在精密制造、航空航天、汽车工业等领域的广泛应用使其成为光学测量领域中的重要研究对象<sup>[1-2]</sup>。相位测量偏折术(PMD)具有非接触、高精度、大动态范围、数据自动处理等优势,是一种极具发展前景的镜面物体形貌测量方法<sup>[3-4]</sup>。

经典的 PMD 系统由一个液晶显示屏(LCD)和一个相机构成。编码的正弦条纹图案先被显示在 LCD 上作为面光源投向镜面物体,然后用相机采集镜面物体反射的变形条纹图,解算出变形条纹图的相位信息后根据系统参数获取被测物面的梯度场,并通过梯度积分恢复物体的三维(3D)形貌<sup>[5]</sup>。唐燕等<sup>[6]</sup>沿待测镜面轴向移动 LCD 和相机,并根据物点虚拟抛物面的焦距计算物点的梯度数据和位置坐标,然后通过梯度积分恢复物面的 3D 形貌。Wu 等<sup>[7]</sup>使用彩色复合正交条纹图结合傅里叶变换,在避免频谱混叠的同时实现了对镜面物体的动态测量。Niu 等<sup>[8]</sup>使用带有标记的平面镜结合一幅条纹图最小化光线偏差,实现了 PMD 系统的标定。但这类 PMD 技术基于梯度积分算法重建被测物面的 3D 形貌,无法测量具有非连续表面的镜面物体。因此,人们提出了一些基于特殊数学模型的 PMD 技术,通过变形条纹图的相位信息直接获得被测物面的高度场。Guo 等<sup>[9]</sup>将 LCD 垂直移动到多个位置,然后用最小二乘法拟合入射光线,消除了 PMD 固有的梯度-高度模糊问题。Liu 等<sup>[10-11]</sup>提出了一种基于双显示屏单相机的直接 PMD 技术,用半透半反镜构建无遮挡的平行面光源,并根据系统几何结构建立了相位和物面深度的关系,实现了不连续表面镜面物体的 3D 形貌测量。Chang 等<sup>[12]</sup>在此基础上用红外光源代替可见光,消除了环境光对测量结果的影响,进一步提高了测量精度。这些基于相位-高度的 PMD 技术省略了梯度积分过程,独立计算每个物点的深度信息,可实现非连续镜面物体的测量。但相比物面的高度变化,PMD 对物面的梯度变化更敏感,因此,这类测量方法的精度往往低于基于梯度积分重建被测物体 3D 形貌的 PMD 技术<sup>[13]</sup>。

为了解决现有 PMD 技术测量非连续表面镜面物体时精度较低的问题,本文提出了一种基于特征匹配的非连续镜面物体测量方法。首先,采集被测物体的纹理图及其反射的变形条纹图。然后,将非连续物面分割成若干连续物面后结合梯度积分算法高精度获取各连续物面的点云信息。最后,基于无

纹理特征匹配技术计算各区域特征点的深度信息,以获得不同物面间的相对位置关系。实验结果表明,本方法在保留梯度积分算法高测量精度优势的同时可实现对非连续镜面物体的测量。

## 2 测量原理

梯度积分是实现非连续镜面物体高精度测量的关键步骤,但直接对非连续镜面物体的梯度场积分会使几个不连续物面被视为一个连续的整体,从而产生错误的结果。因此,将非连续被测物体分割成几个连续的子区域,得到被测物面的梯度场后分别对子区域的梯度场进行积分,可在精确获取各连续子区域形貌的同时避免不连续物面之间的错误积分。

梯度积分的实质是一个超定方程的求解过程,若仅对子区域的梯度场积分无法得到各连续物面的绝对位置,导致不同物面之间的相对位置关系发生混淆<sup>[14]</sup>。因此,提取被测物体的 Harris 角点作为子区域的位置参考点,然后通过极线约束与特征描述子相结合的无纹理特征匹配算法确定参考点的深度信息,从而对连续区域的空间位置进行定位,重建出非连续镜面物体的 3D 形貌。实验提出的非连续镜面物体测量方法基于一个单屏双相机系统实现,具体结构如图 1 所示。

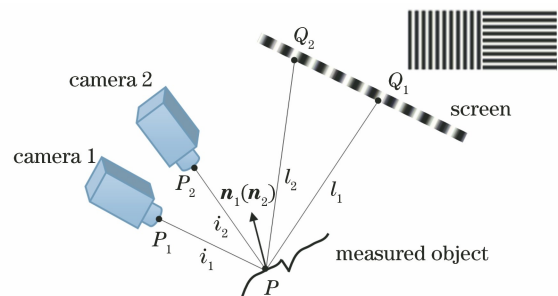


图 1 测量系统的结构

Fig. 1 Structure of the measurement system

### 2.1 连续子区域的形貌测量

为了避免不同物面之间的错误积分,将非连续镜面物体分割成多个连续子区域。用 LCD 显示亮度均匀的白色图片,此时,相机采集的被测物体纹理图的灰度值依赖于物点反射的光源亮度,纹理图中同一个连续区域内物点的灰度值十分相近,仅在区域边缘处发生跳变。因此,将区域生长算法用于检测镜面物体中的连续区域,在每个连续物面上任取一点作为种子点,通过相邻像素和种子点之间的灰度差将具有相同性质的像素点合并起来向外生长,

实现连续子区域的自动分割<sup>[15]</sup>。

将立体偏折术用于计算物面的梯度场, LCD 依次显示带有相移的水平、竖直正弦条纹图案, 如图 1 中右上角的插图所示, 相机在另一侧采集包含被测物面梯度和高度信息的变形条纹图。随后, 采用多步相移法和最佳条纹选择法计算变形条纹图的相位信息并建立 LCD 投射点与两相机成像点之间的对应关系, 如  $(P_1, Q_1)$  和  $(P_2, Q_2)$ <sup>[16-17]</sup>。假设两组投射点与成像点对应的被测物点位置在点  $P$  处, 则可得两组入射光线与反射光线  $(i_1, r_1)$ 、 $(i_2, r_2)$  及其对应的法向量  $\mathbf{n}_1$ 、 $\mathbf{n}_2$ 。由于每个物点的法向量是唯一的, 若两组光线构成的法向量相等, 则物点  $P$  为真实的物点, 法向量  $\mathbf{n}_1$  为物点的梯度信息; 否则, 重

新假设物点  $P$  的位置, 直至得到真实的物点<sup>[18-19]</sup>。最后, 分别对子区域的梯度场进行积分, 获得各连续物面的 3D 点云。

## 2.2 不连续物面相对深度的计算

获取的连续物面 3D 形貌中各子区域内物点之间的相对位置关系是确定的, 已知面内任意一点的 3D 坐标, 就能确定该物面在空间中的绝对位置。基于上述测量系统及被测物体的无纹理特性, 采用双目视觉技术计算区域特征点的深度信息, 从而实现区域定位<sup>[20-22]</sup>。双目视觉技术根据物点在两个相机中的视差计算物点的空间坐标, 若物面上一点在两个相机下的像素坐标已知, 即可得到该点的绝对空间位置, 可表示为

$$\begin{cases} (u_1 m_{31}^1 - m_{11}^1)X + (u_1 m_{32}^1 - m_{12}^1)Y + (u_1 m_{33}^1 - m_{13}^1)Z = m_{14}^1 - u_1 m_{34}^1 \\ (v_1 m_{31}^1 - m_{21}^1)X + (v_1 m_{32}^1 - m_{22}^1)Y + (v_1 m_{33}^1 - m_{23}^1)Z = m_{24}^1 - v_1 m_{34}^1 \\ (u_r m_{31}^r - m_{11}^r)X + (u_r m_{32}^r - m_{12}^r)Y + (u_r m_{33}^r - m_{13}^r)Z = m_{14}^r - u_r m_{34}^r \\ (v_r m_{31}^r - m_{21}^r)X + (v_r m_{32}^r - m_{22}^r)Y + (v_r m_{33}^r - m_{23}^r)Z = m_{24}^r - v_r m_{34}^r \end{cases}, \quad (1)$$

式中,  $(u_1, v_1)$  和  $(u_r, v_r)$  分别为物点在左、右相机中的像素坐标,  $m_{ij}^k$  为相机投影矩阵中索引为  $(i, j)$  的元素,  $k$  为 l, r, 分别表示左相机和右相机,  $(X, Y, Z)$  为待解算的物点 3D 坐标。

镜面物体具有无纹理特性, 利用两台相机从不同角度对物体进行拍摄时, 无明显特征的物点很难在两幅纹理图中进行识别匹配。而角点在不同视角下可以保留图像的重要特征, 不仅易被识别且具有局部不变性, 可作为子区域定位的参考点。Harris 算法是一种经典的角点检测算法, 通过计算像素点在各个方向上的灰度强度变化区分边缘点和角点<sup>[23-24]</sup>。当某个像素点对应的灰度相关矩阵  $\mathbf{C}$  的 2 个特征值  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  较大且近似相等时, 该像素点可被视为角点, 可表示为

$$\mathbf{C} = G(\sigma) \otimes \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中,  $I_x$ 、 $I_y$  分别为图像  $I(x, y)$  在水平、竖直方向的偏导数,  $G(\sigma)$  为高斯加权函数,  $\sigma$  为尺度因子,  $\otimes$  为卷积符号。可以发现, Harris 算法涉及到了一阶微分运算, 且角点检测利用的是二阶矩的特征值, 因此, Harris 角点具有旋转、平移不变性, 且不受光照和对比度的影响。但其仅能作用在单一尺度的图像上, 当图像尺度发生变化时角点可能会转变为边缘点。为了使检测结果的鲁棒性更强, 采用一种具有

尺度不变性的 Harris 算法检测镜面物体的角点。通过增加一个微分尺度因子, 在多尺度空间中度量角点响应函数。改进的灰度相关矩阵可表示为

$$\mathbf{C} = \sigma_D^2 G(\sigma) \otimes \begin{bmatrix} I_x^2(\sigma_D) & I_x I_y(\sigma_D) \\ I_x I_y(\sigma_D) & I_y^2(\sigma_D) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中,  $\sigma_D$  为微分尺度因子。

将特征匹配技术用于确定角点在两个相机成像平面中对应的像素坐标。实验采用基于描述子的特征匹配算法, 在向量空间中构建能表征特征点位置、方向等信息的特征描述子, 并根据欧氏距离判断描述子的相似性, 实现特征点对之间的匹配。鉴于镜面物体的无纹理特性, 实验基于平行双目视觉模型提出了一种类尺度不变特征变换 (SIFT) 描述子的构建方法, 并结合极线约束实现点匹配。

平行双目视觉模型即两台相机的主光轴完全平行, 如图 2 所示。在该成像模型中, 物点  $P$  在左、右相机坐标系  $O_1-X_1Y_1Z_1$  和  $O_2-X_2Y_2Z_2$  中的成像共轭点  $P_1$ 、 $P_r$  仅在水平方向存在视差, 因此可以通过极线约束匹配区域特征点, 即在两成像平面的同一行上搜索匹配点对。这种方法简化了特征匹配的复杂度, 但非连续镜面物体测量系统不能满足平行双目视觉模型。因此, 采用 Bouguet 算法将测量系统校正成主光轴平行的双目视觉模型<sup>[19]</sup>。首先, 根据表征两相机相对位置关系的旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移矩



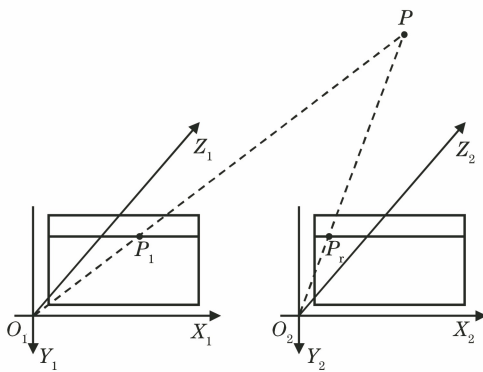


图 2 平行双目视觉模型的原理

Fig. 2 Principle of the parallel binocular vision model

阵  $T$  将两相机各自旋转一半使其光轴平行; 然后, 再次旋转两相机使其成像平面与两相机光心构成的基线平行, 从而实现相机校正。

理论上, 相机校正后物点的成像共轭点等高, 但当同一行上存在多个特征点时可能会引起误匹配。因此, 构建了一种类 SIFT 特征描述子, 用直方图统计特征点  $16 \times 16$  邻域内的像素梯度和方向, 在单尺度图像上构建 128 维的特征描述子, 以提高特征点在匹配过程中的可区分性<sup>[25-26]</sup>。特征描述子之间的欧氏距离越近, 表明特征点之间的匹配度越高, 根据最近邻距离和极线约束可实现特征点对之间的匹配。此外, 由于各连续表面的 3D 形貌是在主光轴不平行的会聚式双目系统中获取的, 因此需要将获得的成像共轭点坐标转换到校正前的相机像素坐标系中, 并根据(1)式计算各区域角点在非连续镜面物体测量系统中的绝对 3D 坐标。

### 2.3 实现流程

基于区域角点的 3D 坐标可确定子区域在空间中的绝对位置, 结合各连续面型的 3D 形貌可实现非连续镜面物体的高精度测量, 具体工作流程如图 3 所示。分别用左右相机采集被测物体的纹理图及经其

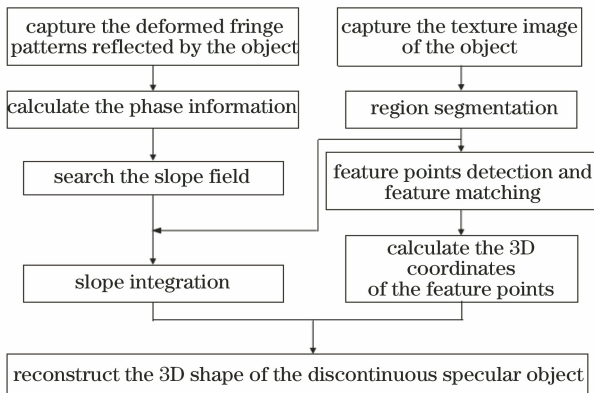


图 3 本方法的流程图

Fig. 3 Flow chart of our method

反射的变形正弦条纹图, 其中, 纹理图被用于分割物体中存在的连续物面, 为后续连续子区域的积分提供可行性。检测被测物面的特征点, 完成特征匹配后计算特征点在相机坐标系中的绝对位置。而变形条纹图中的相位信息用来计算被测物面的梯度场。结合区域分割结果分别对各连续物面的梯度场进行积分, 并根据特征点的绝对坐标定位不同物面之间的相对位置关系, 从而实现非连续镜面物体 3D 形貌的重建。

### 3 实验结果及分析

为验证本方法对无纹理特征匹配和非连续镜面物体 3D 测量的有效性, 进行了镜面物体测量实验。硬件测量系统由一个 iPad Pro、两个分辨率为  $1216 \text{ pixel} \times 1616 \text{ pixel}$  的 LW235M-IO 相机以及两个焦距为 35 mm 的镜头组成, 如图 4 所示。

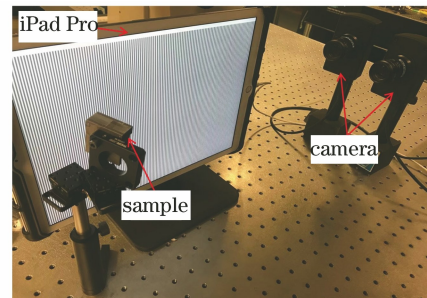


图 4 实验系统的实物图

Fig. 4 Physical image of the experimental system

首先, 用 1 个带有圆环标志的平面镜评估无纹理特征匹配算法的效果。用 LCD 显示亮度均匀的白色图片, 用左右相机分别采集平面镜在白色背景光源下的纹理图。然后, 对纹理图进行极线校正。为度量本方法在特征点匹配中的有效性, 提取纹理图中具有无纹理性和自相似性邻域信息的圆心及角点作为特征点, 构建 128 维的特征描述子。最后, 结合极线约束计算描述子之间的欧氏距离。根据最近邻距离筛选误匹配点, 结果如图 5 所示, 匹配率为 64.86%。

用 1 个具有 4 个不连续表面的镜面台阶验证本方法测量非连续镜面物体的精度。首先, 用左右相机分别拍摄台阶的纹理图, 为后续检测连续物面区域、提取区域特征点和实现特征匹配提供基础, 得到的区域分割结果如图 6 所示。然后, 将编码的水平、竖直正弦条纹图显示在 LCD 上, 并用左右相机分别采集变形条纹图, 结果如图 7 所示。同一行中的两个图像分别为 LCD 显示竖直、水平条纹图时, 相机采集的物体反射图像。

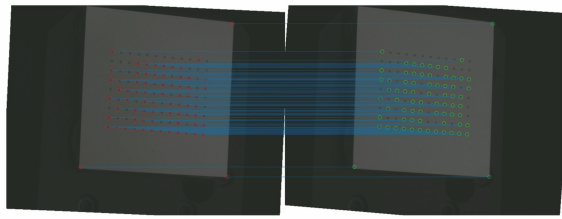


图 5 平面镜的特征匹配结果  
Fig. 5 Feature matching result of the plane mirror

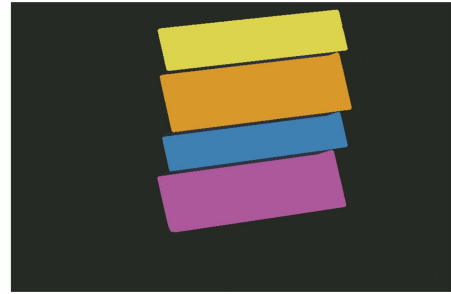


图 6 区域分割的结果  
Fig. 6 Results of the region segmentation

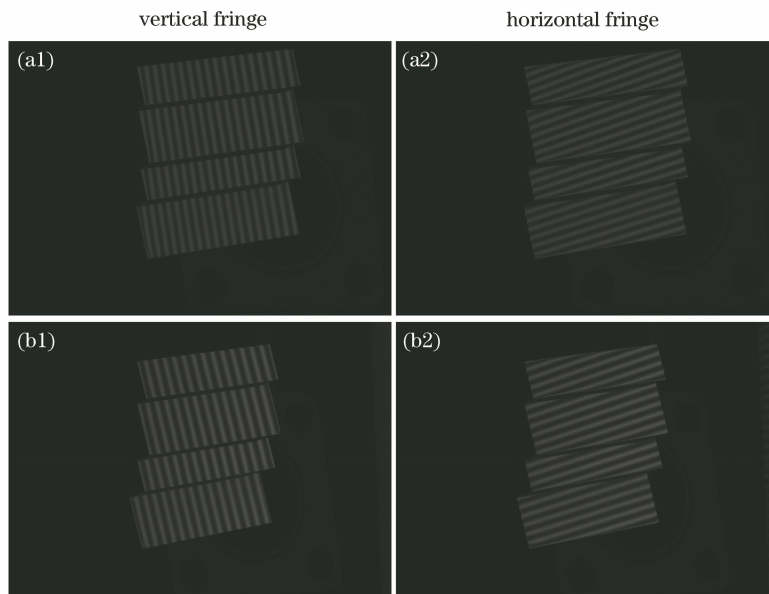


图 7 不同相机视角下的条纹图。(a)左相机;(b)右相机  
Fig. 7 Fringe diagrams under different camera angles. (a) Left camera; (b) right camera

用多步相移和相位展开技术解算条纹图中的相位信息并计算被测物面的梯度场,结果如图 8 所示。其中,  $k$  轴表示梯度值。

检测被测物体的 Harris 角点,经极线校正后的匹配结果如图 9 所示。根据(1)式计算角点的深度

信息,并以深度信息为基准分别对子区域的梯度场进行积分,得到重建被测物体的 3D 形貌如图 10 所示,其中,  $S_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 为被测物体的 4 个台阶面。

为度量本方法在非连续镜面物体测量中的精

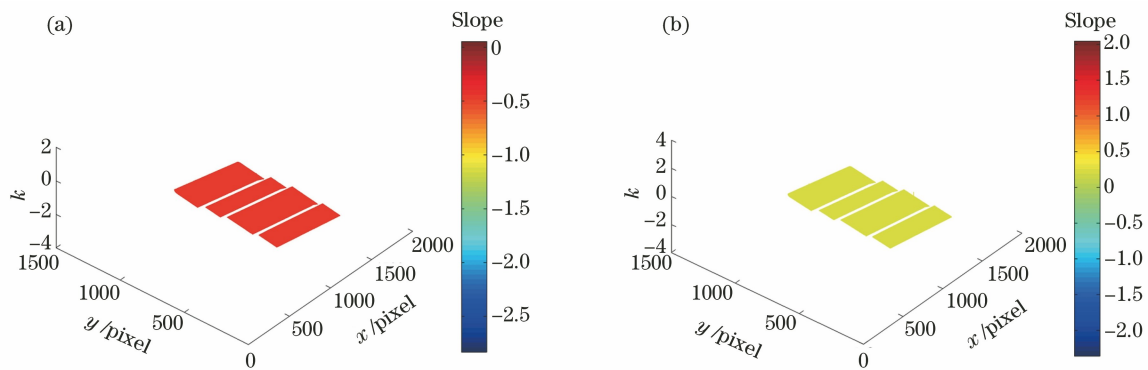


图 8 条纹图中的梯度信息。(a)  $x$  方向;(b)  $y$  方向  
Fig. 8 Slope information in a fringe plot. (a)  $x$ -direction; (b)  $y$ -direction

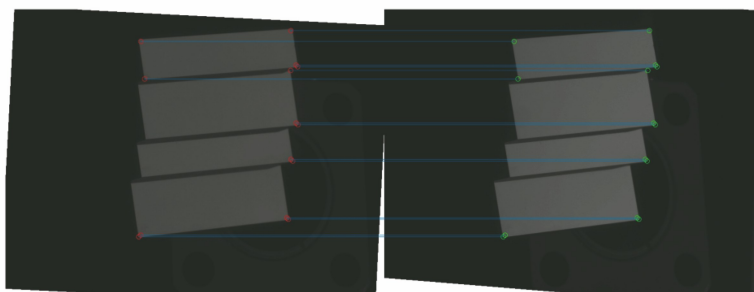


图 9 特征匹配的结果

Fig. 9 Results of the feature matching

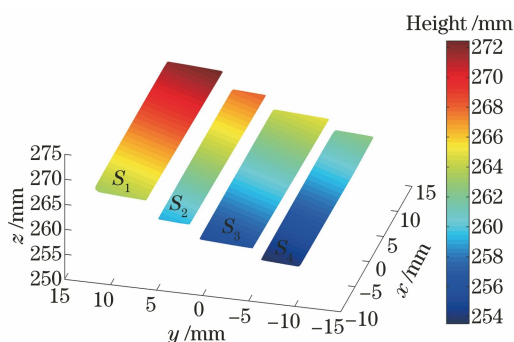


图 10 台阶的 3D 形貌

Fig. 10 3D shape of the step

度,同时使用精度为  $2\ \mu\text{m}$  的三坐标测量机(CMM)测量相邻台阶面之间的高度,结果如表 1 所示。其中,  $S_i - S_j$  为台阶面  $S_i$  与  $S_j$  之间的相对高度。可以发现,本方法在测量非连续镜面物体时,最大误差为  $34.8\ \mu\text{m}$ ,最小误差为  $7.2\ \mu\text{m}$ 。已有研究表明,立体偏折术在连续物面重建中具有高分辨率特性,其平面测量误差小于  $100\ \text{nm}$ <sup>[19]</sup>。这表明本方法可以有效实现非连续镜面物体的高精度测量。

表 1 镜面台阶测量结果与误差

Table 1 Results and errors of the measured specular step units: mm

Step plane	CMM	Ours	Absolute error
$S_1 - S_2$	2.9927	2.9855	0.0072
$S_2 - S_3$	3.9282	3.8934	0.0348
$S_3 - S_4$	4.9392	4.9494	0.0102

## 4 结 论

提出了一种基于特征匹配的非连续镜面物体高精度 3D 形貌测量技术。首先,将不连续镜面分割成连续子区域以保留梯度积分在 PMD 技术中高精度测量的优势。然后,用特征点的绝对空间位置确定不连续物面之间的相对位置关系。同时,基于平行双目视觉模型构建具有可区分性、可重复性的特征描述子,完成特征点对之间的匹配,为双目视觉深

度计算提供支撑。实验结果表明,本方法在非连续镜面物体 3D 形貌测量中的最大误差为  $34.8\ \mu\text{m}$ ,对连续物面的测量精度可达  $\text{nm}$  量级,能有效实现非连续镜面物体的高精度测量,且本方法适用于其他无纹理物体间的特征匹配。

## 参 考 文 献

- [1] Li M Y, Yuan X D, Cao T F, et al. Effect of alignment errors on surface measurements of flat mirror deflectometry[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(8): 0812001.  
李萌阳, 袁晓东, 曹庭分, 等. 校直误差对平面镜偏折术面形测量的影响[J]. 光学学报, 2019, 39(8): 0812001.
- [2] Zhao J G, Li D H, Li L, et al. Method for coordinate acquisition of camera and measured surface in deflectometry [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0304001.  
赵建岗, 李大海, 李磊, 等. 偏折术中相机和被测面坐标的获取[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0304001.
- [3] Xu Y J, Gao F, Jiang X Q. A brief review of the technological advancements of phase measuring deflectometry[J]. Photonix, 2020, 1(1): 1-10.
- [4] Zhang Z H, Wang Y M, Huang S J, et al. Three-dimensional shape measurements of specular objects using phase-measuring deflectometry [J]. Sensors, 2017, 17(12): 2835-2861.
- [5] Huang L, Xue J P, Gao B, et al. Zonal wavefront reconstruction in quadrilateral geometry for phase measuring deflectometry[J]. Applied Optics, 2017, 56(18): 5139-5144.
- [6] Tang Y, Su X Y, Liu Y K, et al. Three-dimensional shape measurement of aspheric mirror based on fringe reflection[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(4): 965-969.  
唐燕, 苏显渝, 刘元坤, 等. 基于条纹反射的非球面镜三维面形测量[J]. 光学学报, 2009, 29(4): 965-969.
- [7] Wu Y X, Yue H M, Yi J Y, et al. Dynamic specular

- surface measurement based on color-encoded fringe reflection technique[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(2): 024104.
- [8] Niu Z Q, Zhang X C, Ye J Q, et al. Flexible one-shot geometric calibration for off-axis deflectometry [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(13): 3819-3824.
- [9] Guo H W, Feng P, Tao T. Specular surface measurement by using least squares light tracking technique [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 166-171.
- [10] Liu Y, Huang S J, Zhang Z H, et al. Full-field 3D shape measurement of discontinuous specular objects by direct phase measuring deflectometry [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 10293.
- [11] Guo Z N, Liu X H, Zhang Z H. Simulation and verification of three-dimensional shape measurement method for composite surface[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(19): 191202.  
郭志南, 刘小红, 张宗华. 复合表面三维形貌测量方法的仿真与验证[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(19): 191202.
- [12] Chang C X, Zhang Z H, Gao N, et al. Improved infrared phase measuring deflectometry method for the measurement of discontinuous specular objects [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134: 106194.
- [13] Liang L B, Su X Y, Liu Y K. Phase-measuring deflectometry based on binocular vision[J]. *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)*, 2009, 46(2): 387-391.  
梁礼斌, 苏显渝, 刘元坤. 基于双目视觉的相位测量偏折术[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2009, 46(2): 387-391.
- [14] Ren H Y, Gao F, Jiang X Q. Least-squares method for data reconstruction from gradient data in deflectometry[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(22): 6052-6059.
- [15] Mohammed M A, Ghani M K A, Hamed R I, et al. Automatic segmentation and automatic seed point selection of nasopharyngeal carcinoma from microscopy images using region growing based approach [J]. *Journal of Computational Science*, 2017, 20: 61-69.
- [16] Niu Z Q, Xu X Y, Zhang X C, et al. Efficient phase retrieval of two-directional phase-shifting fringe patterns using geometric constraints of deflectometry [J]. *Optics Express*, 2019, 27(6): 8195-8207.
- [17] Zhang Z H, Towers C E, Towers D P. Time efficient color fringe projection system for 3D shape and color using optimum 3-frequency selection [J]. *Optics Express*, 2006, 14(14): 6444-6455.
- [18] Knauer M C, Kaminski J, Hausler G. Phase measuring deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5457: 366-376.
- [19] Xu Y J, Gao F, Zhang Z H, et al. A holistic calibration method with iterative distortion compensation for stereo deflectometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 106: 111-118.
- [20] Zhou K J. Research and application of binocular vision 3D measurement technology [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.  
周科杰. 双目视觉三维测量技术研究与应用[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [21] Liu H X. Research on phase-assisted binocular vision measurement based on orthogonal color fringe projection [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2017.  
刘慧娴. 基于正交彩色条纹投影的相位辅助双目视觉测量研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2017.
- [22] Ji K. Research on textureless target recognition technology based on edge sector distribution features [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.  
计魁. 基于边缘扇区分布特征的无纹理目标识别技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [23] Zhang L T, Huang X L, Lu L L, et al. Fast Harris corner detection based on gray difference and template [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(2): 218-224.  
张立亭, 黄晓浪, 鹿琳琳, 等. 基于灰度差分与模板的Harris角点检测快速算法[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(2): 218-224.
- [24] Gueguen L, Pesaresi M. Multi scale Harris corner detector based on differential morphological decomposition [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2011, 32(14): 1714-1719.
- [25] Bastanlar Y, Temizel A, Yardımcı Y. Improved SIFT matching for image pairs with scale difference [J]. *Electronics Letters*, 2010, 46(5): 346-348.
- [26] Zhang G X, Zeng Z, Zhang S W, et al. SIFT matching with CNN evidences for particular object retrieval[J]. *Neurocomputing*, 2017, 238: 399-409.