

## 基于 regionprops 函数的并行彩色共聚焦测量系统三维重构

张雅丽, 余 卿\*, 程 方, 王 翀, 王 寅  
(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 针对并行彩色共聚焦测量系统在进行三维重构时质心识别效果差, 处理效率低等相关问题, 本文提出一种高效率高精度的三维重构方法。该方法首先对三维重构实验得到的所有图像进行目标提取和图像拼接, 得到待处理的拼接图像; 其次, 通过 MATLAB 的 regionprops 函数和形态学处理提取拼接后各个被测点的质心及质心连通区域, 并利用颜色转换算法进行相应的“H值-高度”转换; 最后, 比较并结合插值拟合算法实现物体表面三维形貌的重构。为了验证该算法的可行性, 文中针对一元硬币的“N”字和“E”字进行处理。实验结果表明, 该系统的轴向测量范围为 80  $\mu\text{m}$ , 测量精度可达到微米级别。经验证: 该算法可以快速有效地实现物体表面三维形貌的还原, 且相较于传统方法, 处理效率提高 5~6 倍。

**关键词:** 彩色共聚焦; 并行测量; 图像处理; 三维重构  
**中图分类号:** TH742 **文献标识码:** A

### Research on 3D reduction algorithm for parallel chromatic confocal measurement system based on regionprops function

ZHANG Ya-li, YU Qing\*, CHENG Fang, WANG Chong, WANG Yin

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

\* Corresponding author, E-mail: yuqing@hqu.edu.cn

**Abstract:** In order to solve the problems of poor centroid recognition and low processing efficiency in 3D reconstruction of parallel chromatic confocal measurement system, a high efficiency and high precision 3D reconstruction method is proposed in this paper. In this algorithm, target extraction and image splicing were performed on all of the experimental images to obtain the spliced images. And using the 'regionprops' function in MATLAB, the centroid and its connected area of each measured point were extracted, and then the relationship for H value and height was constructed with the method of color conversion algorithm. Finally, the interpolation fitting algorithm is used to reconstruct the 3D surface topography of the object. In order to verify the feasibility of the algorithm, the letter 'N' and 'E' on the coin of one-yuan was measured in author's self-built parallel chromatic confocal system. The experimental results showed that the axial measuring range of the system was 80  $\mu\text{m}$ . Therefore, the measurement accuracy can reach micron level, and this algorithm can quickly and effectively reconstruct the 3D surface topography of sam-

收稿日期: 2021-04-26; 修订日期: XXXX-XX-XX.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 52075190, 51505162); 福建省科技计划项目 (No. 2019I0013); 华侨大学中青年教师科研提升资助计划项目 (No. ZQN-PY604)

ple. Compared with the conventional method, the processing efficiency is 5~6 times higher.

**Key words:** Chromatic confocal measurement; parallel measurement; image processing; 3D reconstruction

## 1 引言

彩色共聚焦技术作为物体表面三维形貌测量技术之一,常用于厚度测量<sup>[1-2]</sup>,粗糙度和瑕疵检测<sup>[3-4]</sup>,三维重构<sup>[5-6]</sup>和生物医疗<sup>[7]</sup>等等。与传统激光共聚焦技术<sup>[8]</sup>相比,彩色共聚焦技术避免了轴向扫描,提高了测量效率和测量精度。同时,为了提高传统单点彩色共聚焦系统的测量效率,并行彩色共聚焦测量技术<sup>[9-10]</sup>应运而生,并行彩色共聚焦技术主要利用光分束器件<sup>[11]</sup>将一束光分成多束光以实现并行测量。在利用并行彩色共聚焦测量装置中的彩色相机采集图像时,常常遇到杂散光和离焦光的影响<sup>[12]</sup>,所采集的每一幅图像由于图像质量不同,很难一次性识别所有光点的质心进行目标被测点的定位、提取和处理。尤其是在并行测量的过程中,采集到的图像质量较差、质心识别效果差、图像数量比较多、处理耗时长、处理效率低。针对这些问题,在本文中,首先利用图像拼接技术<sup>[13-14]</sup>将彩色相机采集到的结果用掩膜<sup>[15]</sup>进行抠图处理,截取圆形光点目标区域,圆形的形状方便了后续的质心识别。之后再将这些目标区域拼接在一起,进一步利用MATLAB的regionprops函数<sup>[16-17]</sup>进行质心及质心连通区域提取,并结合实验室自主研发的颜色转换算法<sup>[18]</sup>实现“H值-高度”转换,进行物体表面三维形貌的还原和插值拟合<sup>[19-20]</sup>。本文提出了一种用于并行彩色共聚焦的三维重构方法,并在实践中予以验证该方法的可行性,此算法不仅计算量大大减少,处理效率明显提高,而且能行之有效地实现质心提取以及三维形貌的重构。

## 2 系统原理及实现

### 2.1 测量原理及系统搭建

基于光纤束的并行彩色共聚焦测量系统以传统的单点彩色共聚焦测量技术<sup>[21]</sup>为基础,利用光纤束作为光分束器件实现并行测量的效果。

其原理如图1所示。光源发出的复色光经光纤束分束后,通过分光镜到达色散管镜<sup>[22]</sup>产生色散效果,使得不同波长的光线按照一定规律聚焦在光轴不同高度位置处。其中,只有聚焦在被测物表面的光线,经被测物面反射后能够通过探测光路的小孔阵列,并由面阵彩色相机接收,而其他波长的光线则无法通过小孔阵列。这里,光纤束出瞳、小孔阵列和被测物表面相对应的焦点三者互为共轭关系。彩色相机拍照得到图像之后,利用标定结果,根据图像的不同颜色对应不同的物方高度,再结合位移平台的一维线扫描运动,即可得到整个被测物面的高度信息,从而还原被测物面的三维形貌,达到三维重构的效果。

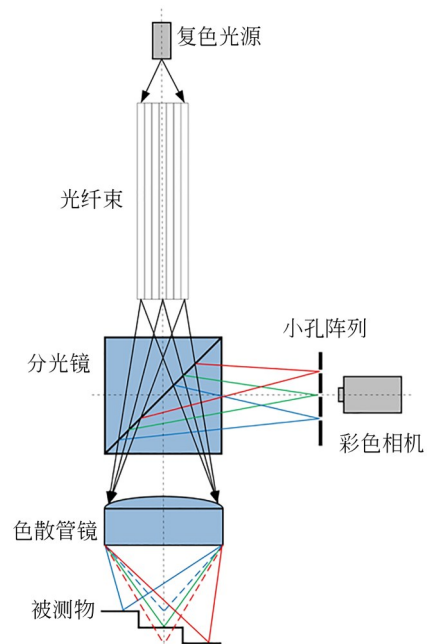


图1 基于光纤束的并行彩色共聚焦测量原理图  
Fig. 1 Schematic of parallel chromatic confocal measurement system based on optical fiber bundle

基于上述理论分析,构建了如图2所示的基于光纤束的并行彩色共聚焦测量实验平台<sup>[23]</sup>。

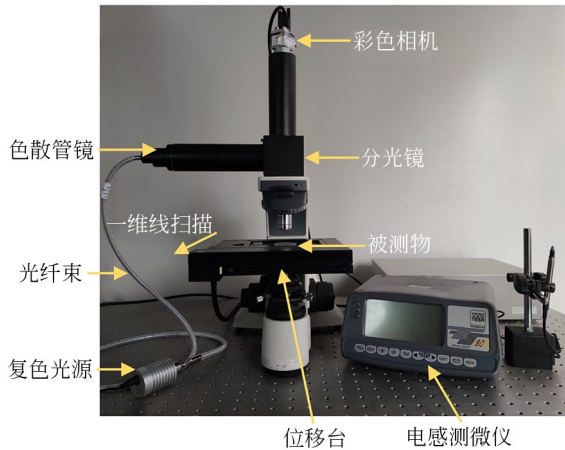


图2 并行彩色共聚焦测量实验平台

Fig.2 Parallel chromatic confocal measurement experimental platform

## 2.2 颜色转换算法

颜色空间是使用一组数值表示颜色的抽象数学模型。本文所述的系统中所涉及的颜色空间主要是RGB颜色空间和HSI颜色空间,示意图如图3所示。

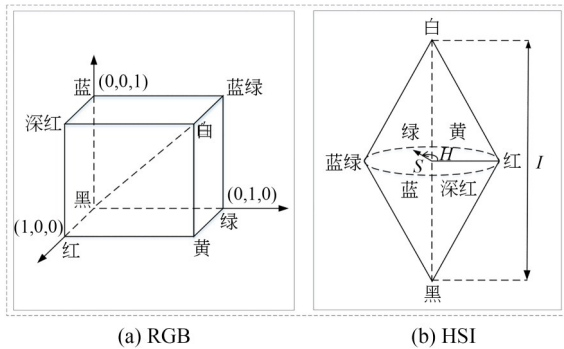


图3 RGB颜色空间与HSI颜色空间

Fig.3 RGB color space and HSI color space

实验室的前期研究工作表明,彩色图像的RGB颜色空间可以转换为HSI颜色空间,而HSI颜色空间中的色调 $H$ 值可以与物体高度值建立良好的对应关系,即“ $H$ 值-高度”对应关系,因此可以通过颜色转换算法得到被测点的 $H$ 值,进而得到各个被测点处相应的高度信息,并最终测得整个被测物面的三维形貌。色调 $H$ 表示角度,其范围为 $[0, 2\pi]$ ,其中,纯红色的角度为0,纯绿色的角度为 $2\pi/3$ ,纯蓝色的角度为 $4\pi/3$ 。

根据以上分析,可以将彩色相机直接采集到的颜色信息RGB值转换为与波长相关的色调参数 $H$ 值,转换公式如下:

$$H = \begin{cases} \theta, & G \geq B \\ 2\pi - \theta, & G < B \end{cases} \quad (1)$$

这里,

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{(R - G) + (R - B)}{2\sqrt{(R - G)^2 + (R - B)(G - B)}} \right)$$

## 2.3 三维图像采集

### 2.3.1 标定

首先,需要对系统进行标定实验。在标定过程中,被测物以 $50 \mu\text{m}$ 为固定步距进行轴向移动,在轴向的不同高度位置处彩色相机拍照得到系统成像面的不同颜色变化,以光纤束其中的一根光纤为例,利用实验室自主研发的颜色转换算法得到“ $H$ 值-高度”曲线如图4所示。

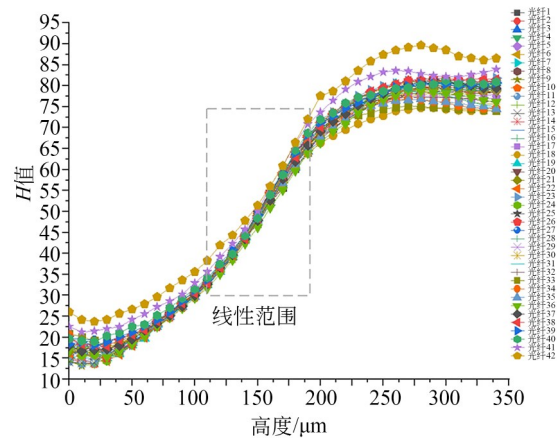


图4 标定实验结果

Fig.4 Experiment results of calibration

最后,对“ $H$ 值-高度”曲线 $80 \mu\text{m}$ 线性范围内的数据进行直线拟合,以光纤1为例,拟合结果如图5所示。

对应的“ $H$ 值-高度”拟合关系式为:

$$y = 0.3919x - 8.0791, \quad (2)$$

其中, $y$ 代表 $H$ 值; $x$ 为载物台的轴向高度,单位为 $\mu\text{m}$ 。根据标定实验结果可知:该系统的测量范围约为 $80 \mu\text{m}$ ;且所有光纤对应的拟合方程的线性相关系数均在0.99左右。

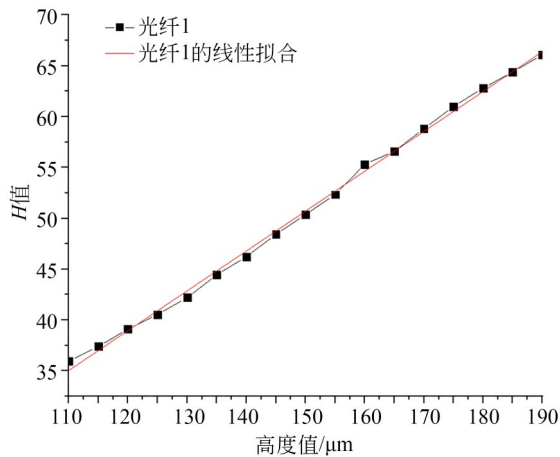


图5 线性拟合结果

Fig. 5 Linear fitting results

### 2.3.2 三维图像采集

在进行物体表面三维重构实验时,我们选择一元硬币背面的“N”字和“E”字作为测量目标,如图6所示。在测量过程中,位移台沿垂直于光纤束和系统光轴的方向进行一维线扫描运动。与光纤束的垂直关系如图7中的白色箭头所示,同时也与系统光轴保持垂直关系。位移台一维线扫描速度为0.025 mm/s,扫描长度为2.5 mm,彩色相机以5张/s的拍照频率共拍照得到500张图像,每张图像上有42个光纤测量点,共对21 000个光纤测量点进行处理。接下来的图像处理算法部分是对三维重构过程中得到的500张图像的测量点进行处理。



图6 一元硬币实物图

Fig. 6 Physical diagram of one-yuan coin

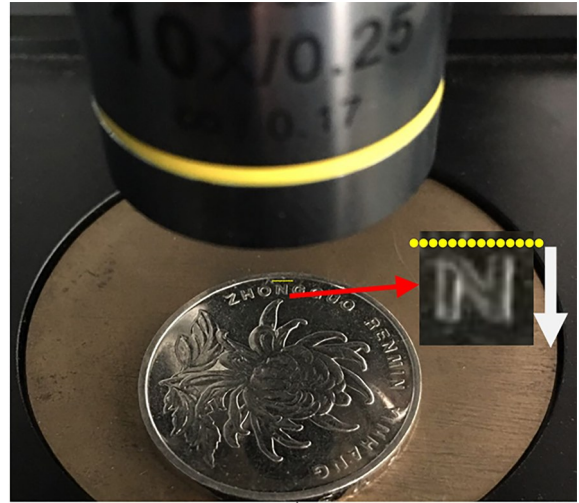


图7 “N”字测量示意图

Fig. 7 Measurement diagram of letter “N”

## 3 图像处理算法

### 3.1 三维重构算法整体流程

本文提出的三维重构算法结合 OpenCV 和 MATLAB 来实现。首先通过 OpenCV 库实现图像拼接。图像拼接的过程分为:依次读取图像、对图像进行预处理、利用掩膜抠图和拼接。得到完整拼接图像之后利用 MATLAB 中的 regionprops 函数识别质心并提取质心连通区域。regionprops (Get the Properties of Region) 函数是 MATLAB 中用来度量图像区域属性的函数,可以用来测量标注矩阵 L 中每一个标注区域的一系列属性。利用该函数结合形态学处理得到被测点质心之后,再对每个质心连通区域都进行“H值-高度”转换,实现自动识别、定位和处理拼接图像上的所有被测光点,最终还原得到物体表面三维形貌。本文提出的图像处理算法的整体流程图如图8所示。

#### 3.1.1 图像拼接

图像拼接的整体流程包括依次读取图像之后进行图像预处理、掩膜抠图、底片融合拼接等环节。

第一步,图像预处理。由于相机接收端获取的图像像素和尺寸较大,且冗余的背景区域占据较大的处理空间,因此首先需采用相应的预处理操作,即对所有待处理图像进行批量旋转、裁剪等方式来去除冗余的背景区域,只保留待处理的

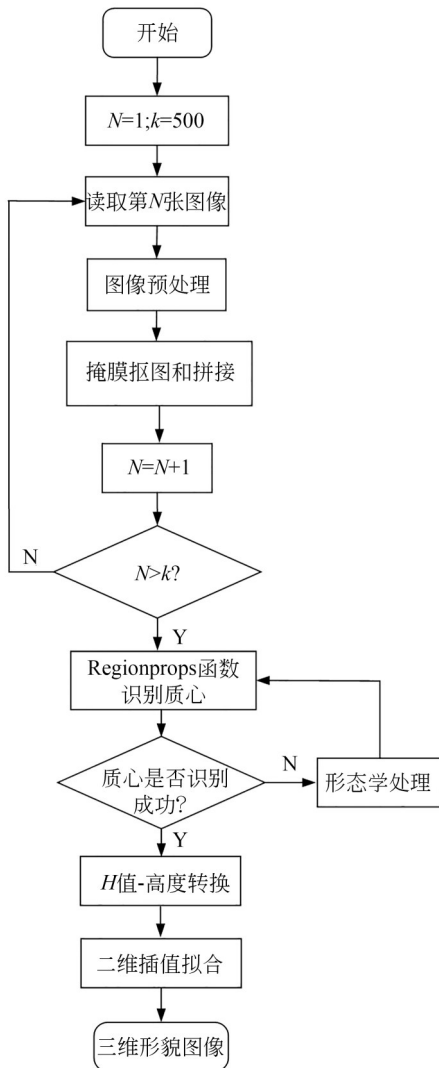


图8 图像处理算法整体流程图

Fig. 8 Overall flow chart of image processing algorithm

光点区域,以节省内存空间,提高处理效率,预处理前后的图像如图9所示。

第二步,掩膜抠图。掩膜,又称为掩码,相当于硬件系统中的滤光片,当使用掩膜参数时,操作只会在掩膜值为非空的像素点上执行,并将其他像素点的值置为0,从而可以提取所需要的光点目标像素,屏蔽冗余背景像素,直接生成呈行排列的圆形光点图像。在这里,我们利用自制的掩膜抠取目标图像,目的是避免图像中不同位置的光点质量情况不一致而造成根据原图生成的掩膜不够准确,影响目标图像的精度以及后续光点质心的识别。自制掩膜图像以及利用掩膜抠取的图像如图10所示。

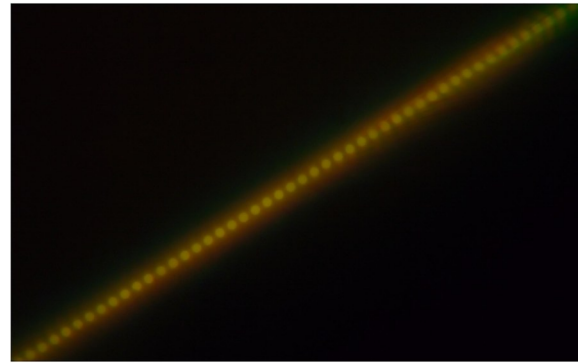
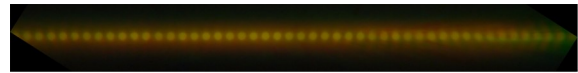
(a) 预处理前的图像  
(a) Image before preprocessing(b) 预处理后的图像  
(b) Image after preprocessing

图9 预处理前后的图像

Fig. 9 Images before and after preprocessing

(a) 掩膜图像  
(a) Mask image(b) 利用掩膜抠取的图像  
(b) Image taken with mask

图10 掩膜抠图相关图像

Fig. 10 Relative image of mask matting

第三步,底片融合。需要先根据并行彩色共聚焦测量得到的彩色图像的数量和预处理后的尺寸设计一个合适大小的空白图片,称之为底片。ROI区域(Region of Interest, ROI)是指感兴趣区域,设定好底片的ROI区域之后,就可以将步骤二中利用掩膜抠取出来的图像——按图11所示的位置关系叠加到底片的ROI区域中。在图11中, $M_1, M_2, \dots, M_{42}$ 分别代表光纤束的光纤根序号(在图10中从左至右依次排列); $N_1, N_2, \dots, N_{500}$ 分别代表按照时刻依次拍照得到的照片张数序号。现将每张照片中每根光纤的位置按照图11所示的位置关系相对应,得到图12为拼接完成的图像,从图像中可以看到拼接后轮廓清晰的字母“N”和“E”。

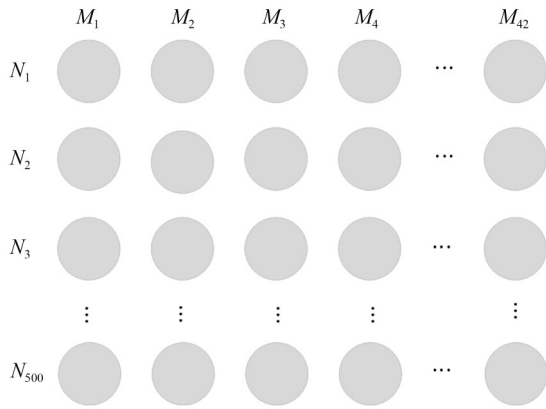


图11 ROI区域中光点的位置关系

Fig. 11 Position relationship of light points in ROI region

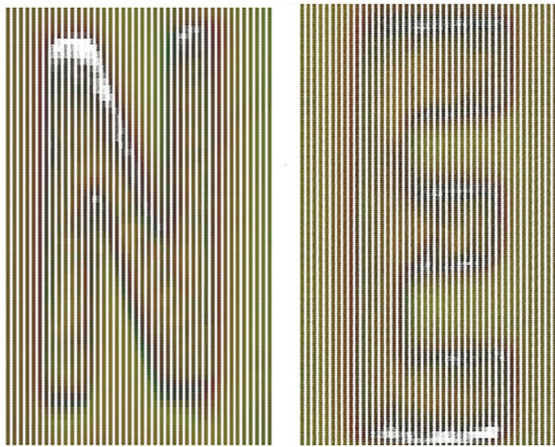


图12 拼接后的“N”字和“E”字

Fig. 12 "N" and "E" after splicing

### 3.1.2 质心连通区域提取

对拼接好的图像,需要得到每个被测光点质心的位置坐标以及质心连通区域。在对拼接图像直接进行质心提取之前,需要先将拼接后的字母进行形态学处理,主要涉及数学形态学中的开运算,即先将图像腐蚀,再对腐蚀的结果进行膨胀,从而去除图像的噪点,选取拼接图像的局部如图13(a)所示,对该原图进行二值化并取反后

的图像如图13(b)所示。如果不经过形态学处理直接利用MATLAB中的regionprops函数进行质心识别,图像中的噪点会对质心识别产生一定的干扰,产生如图13(c)中的红色圆圈所示的错误识别结果。经过形态学处理后如图13(d)所示,图像中的光点在去噪后更趋于圆滑,可以更准确地利用regionprops函数的属性“Centroid”和“BoundingBox”来提取出质心坐标及质心连通区域,如图13(e)所示。

这里,regionprops函数的调用格式为 $STATS=regionprops(L, properties)$ ,该函数可用于测量标注矩阵L中每一个标注区域的一系列属性。L中不同的正整数元素对应不同的区域,例如:L中等于整数1的元素对应区域1;L中等于整数2的元素对应区域2;以此类推。返回值STATS是一个长度为 $\max(L(:))$ 的结构数组,结构数组的相应域定义了每一个区域相应属性properties下的度量。本文中的properties没有指定,等于'basic',即属性:'Area', 'Centroid', 和 'BoundingBox'。如表1所示,表1中的ndims(L)是指图像包含的相应区域的个数。

本例的各部分区域的“Centroid”(质心)和“BoundingBox”(质心连通区域)如图13(e),其中,光点圆心处的红色点即为光点质心,光点外部的矩形虚线轮廓即为该光点的质心连通区域。依据图13(e)为例,可以利用MATLAB中的regionprops函数将 $500 \times 42$ 个光点的质心位置及质心连通区域全部提取出来。

### 3.1.3 二维差值拟合

在得到每个被测光点的质心及质心连通区域之后,将标定实验得到的“H值-高度”线性关系式和图像中的各个质心连通区域相对应,通过计算每个质心连通区域的平均H值,得到相应的高度值,再结合三维绘图指令进行二维插值拟合。图14为进行二维插值拟合前的“N”字原始图像。

表1 部分properties属性介绍

Tab. 1 Part of the properties property description

properties		作用
Area	标量	计算出在图像各个相应区域中像素总个数;
Centroid	1行ndims(L)列的向量	给出每个相应区域的重心,以及重心的水平坐标和垂直坐标;
BoundingBox	1行ndims(L)*2列的向量	给出包含相应区域的最小矩形、相应最小矩形的左上角坐标以及沿着每一个维度方向上的长度;

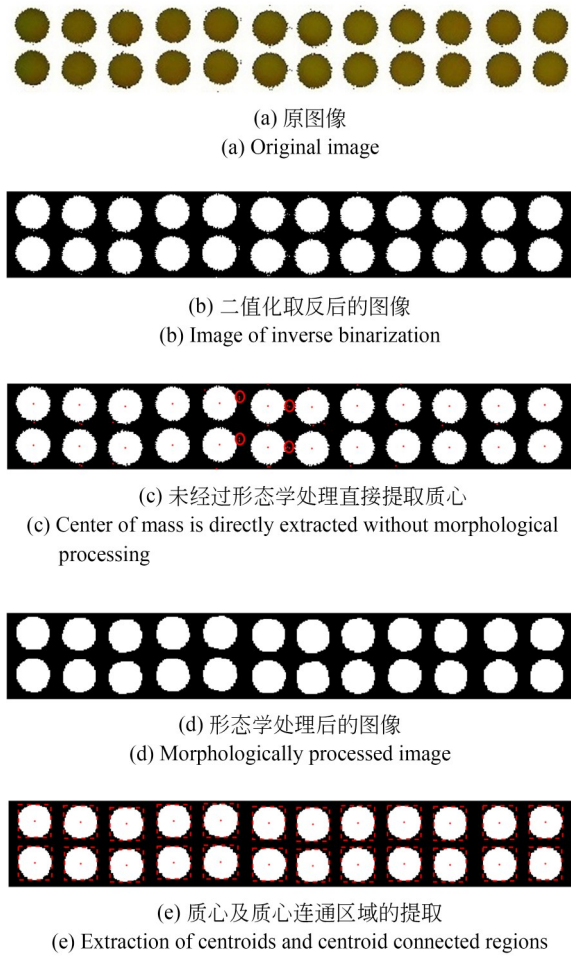


图 13 质心连通区域提取相关图像

Fig. 13 Correlation image extraction of connected region of centroid

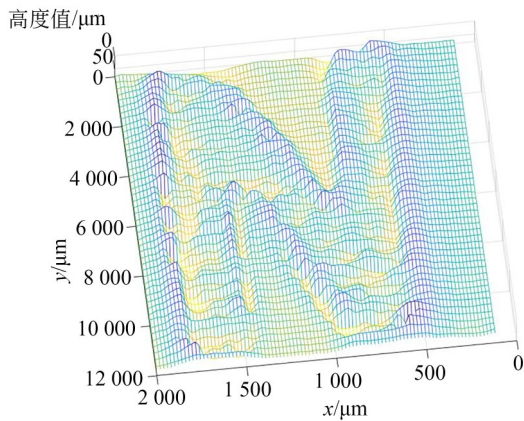


图 14 “N”字原始图像

Fig. 14 Original image of “N”

二维数据插值,即曲面插值。通过构造一个二元插值函数  $z=g(x,y)$  去近似  $z=f(x,y)$  插入

更多的插值点使得图像更为精确和平滑。常用的几种插值方法如下:双线性插值、自然邻域插值、最近邻域插值和双三次插值等。

比较不同插值算法的原理,最近邻域插值法计算量小,算法简单,因为它仅考虑了离待测采样点最近的像素的灰度值的作为该采样点的灰度值,而没有考虑其他相邻像素点的影响,会造成生成的图像灰度上的不连续,插值拟合后的图像如图 15(a)所示,在灰度变化的地方出现明显的锯齿状,如图中红色圆圈 1 所示。自然邻域插值法可找到距查询点最近的输入样本子集,并基于区域大小按比例对这些样本应用权重来进行插值,该方法相较于最近邻域插值精度要更高,但仍有具有局部性,仅使用查询点周围的样本子集,且需要保证插值高度在所使用的样本范围之内。如图 15(b)所示,在图中的红色圆圈 2 处对于边缘的插值拟合具有一定的不连续性。双线性插值法的计算比最近邻域插值和自然邻域插值要复杂,计算量较大,没有灰度不连续的缺点,考虑了待测样点周围的四个直接邻点灰度值的影响,而未考虑到各邻点间灰度值变化率的影响,因此具有低通滤波性质,容易使高频分量受损,可能会导致图像轮廓(边缘)的模糊。插值拟

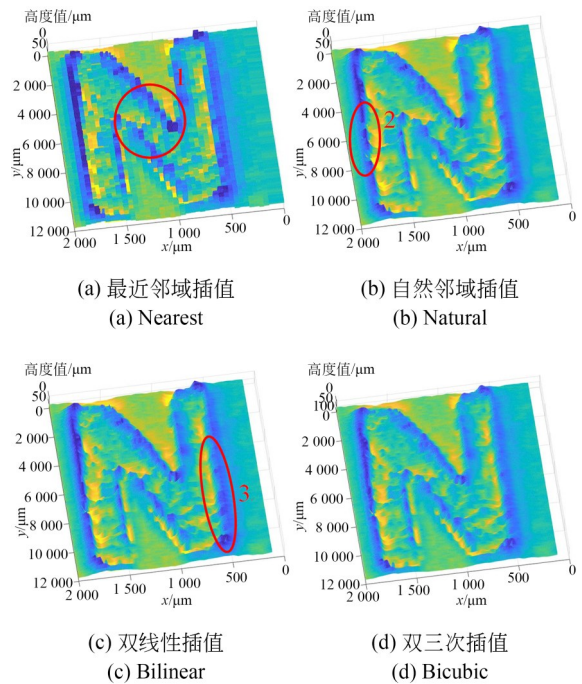


图 15 “N”字三维重构图

Fig. 15 3D reconstruction of “N”

合后的图像如图 15(c) 所示, 在红色圆圈 3 处图像不够平滑。双三次插值法计算量大, 算法最为复杂, 该方法利用三次多项式  $S(x)$  求逼近理论上最佳插值函数  $\sin(x)/x$ , 其数学表达式为:

$$S(x) = \begin{cases} 1 - 2|x|^2 + |x|^3 & 0 \leq |x| < 1 \\ 4 - 8|x| + 5|x|^2 - |x|^3 & 1 \leq |x| < 2 \\ 0 & |x| \geq 2 \end{cases} \quad (3)$$

双三次插值法不仅考虑到周围四个直接相邻像素点灰度值的影响, 还考虑到它们灰度值变化率的影响, 因此克服了前面三种方法的不足之处, 如图 15(c) 和 15(b) 所示, 双三次插值法能够产生比双线性插值更为平滑的边缘, 处理后的图像质量损失最少, 效果最佳。

综上所述, 我们选择双三次插值作为插值拟合算法进行物体表面三维形貌的还原。插值拟合后的图像如图 15(d) 所示。图 15 中的所有高度值均为物体实际高度值。为了验证双三次插值算法的可行性, 我们还对硬币表面的“E”字进行了双三次插值法处理, 得到处理前后的对比结果如图 16 所示, 可见利用双三次插值法进行插值拟合有较好的三维还原结果。

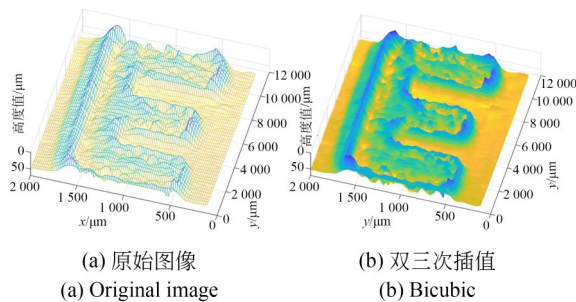


图 16 “E”字三维重构图

Fig. 16 3D recomposition of “E”

从还原结果可以看出, 该并行彩色共聚焦测量系统具备较好的三维形貌恢复能力, 且针对该系统研究的三维重构方法也具备较好的适用性。

### 3.2 不同算法的比较

根据图 8 的图像处理算法整体流程图, 本文提出的三维重构方法与其他方法的不同主要体现在图像拼接和质心连通区域提取这两个方面。传统的三维重构方法处理流程图如图 17 所示。

在图像拼接方面, 传统的三维重构方法在处理三维形貌扫描测量得到的多张图像时, 主要是

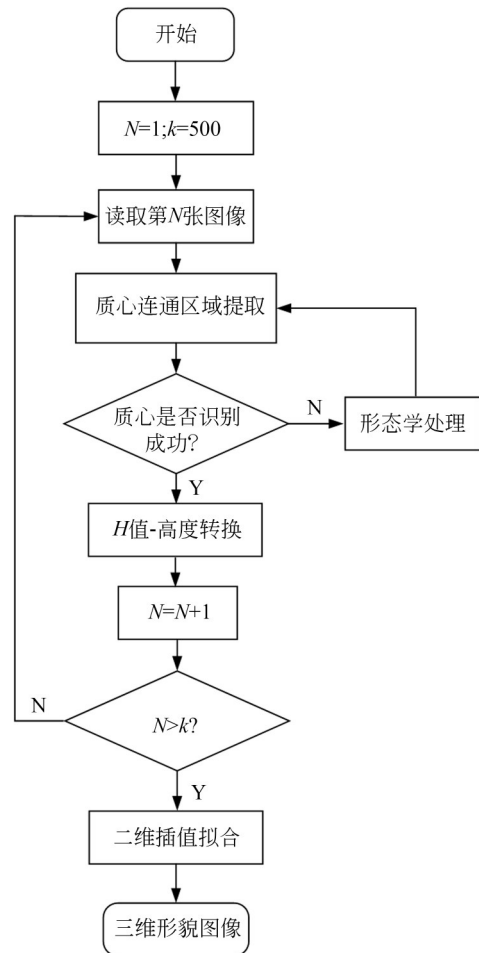


图 17 传统三维重构方法流程图

Fig. 17 Overall flow chart of traditional 3D reconstruction method

通过依次对单张图像进行截图和质心识别, 提取三维物体的对应质心位置, 并通过“H值-高度”转换得到对应质心位置的高度, 从而得到被测物体的三维重构图。与传统的依次对单张图像一一进行处理的三维重构方法相比, 本文提出的基于 regionprops 函数的并行彩色共聚焦测量系统三维重构方法的优势在于, 先利用 OpenCV 库将图像拼接, 再对拼接图像进行三维重构, 从根本上避免了同时对多张图像处理的长耗时和低效率, 一定程度上提高了处理效率;

在质心连通区域提取方面, 传统的三维重构方法主要是通过对每个质心区域进行二重循环, 通过对  $x$  轴和  $y$  轴的数据进行遍历计算, 即找到每个质心区域的所有像素值对应的  $x$  轴坐标和  $y$  轴坐标, 对它们做平均值处理, 从而求出质心位

置,再对每一个质心区域进行以一定像素为半径的圆形截取,即可得到每个光点对应的质心连通区域。而在本文提出的三维重构方法中,MATLAB中regionprops函数的应用可以直接快速实现对被测点质心及质心连通区域的识别,比一般的质心提取算法效率更高。

实际结果表明,利用本文提出的三维重构方法进行物体表面三维形貌还原耗时20 min左右,比传统并行彩色共聚焦测量处理效率提高了5~6倍。两种方法处理结果对比如表2所示。综上,基于OpenCV库的图像拼接和MATLAB中regionprops函数的应用提高了并行彩色共聚焦测量的处理效率,使得利用该方法进行三维重构具有一定的可行性。

表2 两种处理方法结果对比

Tab.2 Comparison of the results of the two treatment methods

名称	传统三维重构方法	本文的三维重构方法
耗时	约120 min	约20 min

### 3.3 不同三维重构方法的比较

除了上述本文所提到的三维重构方法之外,也有一些商用仪器用于三维形貌测量与重构,我们将蔡司激光共聚焦显微镜LSM700和泰勒霍普森表面轮廓仪PGI1240作为参考,与本文所提的并行彩色共聚焦测量方法进行对比,可以得到如表3所示的对比结果。

由表3可知,本文的系统在保证测量精度的前提下,具备耗时短、效率高的特点。结果表明,本文提出的并行彩色共聚焦三维测量方法具备

表3 与商用仪器的耗时对比

Tab.3 Time-consuming results compared with commercial instruments

名称	蔡司激光共聚焦显微镜 LSM700	泰勒霍普森表面轮廓仪 PGI1240	本文的并行彩色共聚焦三维测量方法
耗时	32 min	33 min	21 min

一定的实用性。

## 4 结 论

本文主要研究了一种基于regionprops函数的并行彩色共聚焦测量系统三维重构方法,在光纤束并行彩色共聚焦原理的基础上,首先对原始图像进行图像预处理,去除冗余背景区域,对预处理后的图像借助OpenCV库实现目标区域的抠取和图像拼接,再利用MATLAB中的regionprops函数提取目标光点的质心及其连通区域,进行“H值-高度”转换,最后根据不同测量位置处的光点对应的不同高度值建立三维图像,比较不同的插值算法的原理并选择双三次插值法进行插值拟合,完成物体表面三维形貌还原结果的优化。本文提出的算法避免了杂散光和离焦光所导致的图像噪声的影响,可以精确地提取出所需要处理的目标光点区域,提高了处理精度,精度可达到微米级别;同时,图像拼接的应用也极大地缩短了处理时长,提高了处理效率。实验结果和对比表明,利用该算法对材料表面三维形貌的还原结果具备良好的应用和参考价值。

### 参考文献:

- [1] 冯国华. 基于光谱共焦的厚度检测系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.  
FENG G H. *Research on Thickness Detection System Based on Spectral Confocal* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese)
- [2] BERKOVIC G, ZILBERMAN S, SHAFIR E, *et al.* Chromatic confocal displacement sensing at oblique incidence angles[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(10): 3183-3186.
- [3] 何宝凤, 丁思源, 魏翠城, 等. 三维表面粗糙度测

- 量方法综述[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(1): 78-93.
- HE B F, DING S Y, WEI C E, *et al.* Review of measurement methods for areal surface roughness [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(1): 78-93. (in Chinese)
- [4] DU H L, ZHANG W H, JU B F, *et al.* A new method for detecting surface defects on curved reflective optics using normalized reflectivity[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(3): 036103.
- [5] LUO D, TAPHANEL M, CLAUS D, *et al.* Area

- scanning method for 3D surface profilometry based on an adaptive confocal microscope[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 124: 105819.
- [6] CHUN B S, KIM K, GWEON D. Three-dimensional surface profile measurement using a beam scanning chromatic confocal microscope[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2009, 80(7): 073706.
- [7] OLSOVSKY C, SHELTON R, CARRASCO-ZEVALLOS O, *et al.* Chromatic confocal microscopy for multi-depth imaging of epithelial tissue[J]. *Biomed Opt Express*, 2013, 4(5): 732-740.
- [8] 赵维谦, 王龙肖, 邱丽荣, 等. 激光聚变靶丸内表面轮廓测量系统的研制[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(5): 1013-1023.
- ZHAO W Q, WANG L X, QIU L R, *et al.* Development of inner-surface profile measurement system for ICF capsule[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(5): 1013-1023. (in Chinese)
- [9] 张一, 余卿, 张昆, 等. 基于数字微镜器件的并行彩色共聚焦测量系统[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(4): 859-866.
- ZHANG Y, YU Q, ZHANG K, *et al.* Parallel chromatic confocal measurement system based on digital micromirror device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(4): 859-866. (in Chinese)
- [10] HILLENBRAND M, WEISS R, ENDRÖDY C, *et al.* Chromatic confocal matrix sensor with actuated pinhole arrays [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(15): 4927-4936.
- [11] 余卿, 余晓芬, 崔长彩, 等. 并行共焦测量中的并行光源技术综述[J]. *中国光学*, 2013, 6(5): 652-659.
- YU Q, YU X F, CUI CH C, *et al.* Survey of parallel light source technology in parallel confocal measurement [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 652-659. (in Chinese)
- [12] CHEN L C, NGUYEN D T, CHANG Y W. Precise optical surface profilometry using innovative chromatic differential confocal microscopy[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(24): 5660.
- [13] 李玉峰, 李广泽, 谷绍湖, 等. 基于区域分块与尺度不变特征变换的图像拼接算法[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(5): 1197-1205.
- LI Y F, LI G Z, GU SH H, *et al.* Image mosaic algorithm based on area blocking and SIFT [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(5): 1197-1205. (in Chinese)
- [14] 代少升, 姚俐. 基于ROI的高精度红外全景拼接算法研究[J]. *半导体光电*, 2020, 41(4): 572-577.
- DAI SH SH, YAO L. Research on the method of infrared panoramic image mosaic based on ROI [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2020, 41(4): 572-577. (in Chinese)
- [15] 王云艳, 周志刚, 罗冷坤. 基于Sobel算子滤波的图像增强算法[J]. *计算机应用与软件*, 2019, 36(12): 184-188.
- WANG Y Y, ZHOU ZH G, LUO L K. Image enhancement algorithm based on sobel operator filtering [J]. *Computer Applications and Software*, 2019, 36(12): 184-188. (in Chinese)
- [16] 李波, 董明利, 张帆. 端面不透光的PDMS微柱阵列制备与图像处理研究方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(12): 380-387.
- LI B, DONG M L, ZHANG F. Research of preparation and image processing method of PDMS micropost arrays with opaque top surfaces [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(12): 380-387. (in Chinese)
- [17] YANG S W, LIN C S, LIN S K, *et al.* Automatic defect recognition of TFT array process using gray level co-occurrence matrix [J]. *Optik*, 2014, 125(11): 2671-2676.
- [18] 张昆, 余卿, 邵尊桂, 等. 基于彩色相机颜色转换算法的彩色共聚焦测量方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 151-158.
- ZHANG K, YU Q, SHAO Z G, *et al.* Chromatic confocal measurement method using color camera and color conversion algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 151-158. (in Chinese)
- [19] 马岩, 张超子, 刘也, 等. 采用双三次插值的空间目标偏振成像[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(12): 2555-2563.
- MA Y, ZHANG CH Z, LIU Y, *et al.* Polarization imaging of space target based on bicubic interpolation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(12): 2555-2563. (in Chinese)
- [20] 龚道然, 李思宁, 姜鹏, 等. 激光雷达三维距离像超分辨率重构方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(8): 60-66.
- GONG D R, LI S N, JIANG P, *et al.* Research on super resolution reconstruction of laser radar range profile [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(8): 60-66. (in Chinese)

- [21] RUPRECHT A K, WIESENDANGER T F, TIZIANI H J. Chromatic confocal microscopy with a finite pinhole size[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(18): 2130-2132.
- [22] 崔长彩, 李煌, 余卿, 等. 彩色共焦系统可调制色散物镜设计[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(4): 343-351.  
CUI CH C, LI H, YU Q, *et al.* Design of adjustable dispersive objective lens for chromatic confocal system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(4): 343-351. (in Chinese)
- [23] 张雅丽, 余卿, 程方, 等. 光纤束并行彩色共聚焦测量系统及实验研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(12): 23-31.  
ZHANG Y L, YU Q, CHENG F, *et al.* Parallel Chromatic confocal measurement system based on optical fiber bundle and its experimental study[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(12): 23-31. (in Chinese)

**作者简介:**

张雅丽(1997—),女,安徽六安人,硕士研究生,2019年于山东科技大学获得学士学位,主要研究方向为光电检测。E-mail:1612737648@qq.com.

**通讯作者:**

余卿(1983—),男,江西新余人,博士,副教授,2005年于合肥工业大学获得学士学位,2011年于合肥工业大学获得博士学位,主要研究方向为光电检测、精密机械设计等。E-mail:yuqing@hqu.edu.cn