

基于过曝连通域投影强度自适应分布的 三维成像(特邀)

卫自强^{1,2}, 丁苏东^{1,2}, 胡岩^{1,2,*}, 牟双³, 王克惠⁴, 桂坤⁴, 冯世杰^{1,2}, 左超^{1,2}, 陈钱²

¹南京理工大学电子工程与光电技术学院智能计算成像实验室(SCILab), 江苏 南京 210094;

²江苏省光谱成像与智能感知重点实验室, 江苏 南京 210094;

³上海航天控制技术研究所, 上海 201109;

⁴宁波江丰生物信息技术有限公司, 浙江 宁波 315400

摘要 针对高反光表面三维成像,提出了一种简单、稳健的自适应条纹投影方法。该方法首先通过投影白色均匀图案帮助确定过曝光区域,并提取该区域的边界;然后将边界映射到投影仪像素坐标系,并降低该区域内的像素强度,重新生成一组亮度分布适应样品亮度分布的条纹图;最后迭代重复上述步骤,直至所采集的图中无过曝光区域。与以往采用多次曝光、自适应投影、需要捕获大量条纹图像、操作繁琐、计算复杂的成像方法相比,所提出的方法需要捕获的图案更少且更容易实现。实验结果表明,所提出的方法能够准确测量生物组织高亮表面,并最终重建出完整、高精度的三维轮廓。

关键词 条纹投影轮廓术; 高反光表面; 自适应投影; 三维重建; 结构光

中图分类号 TP391

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP241569

3D Imaging Based on the Adaptive Distribution of Projection Intensity in Overexposed Connected Domains (Invited)

Wei Ziqiang^{1,2}, Ding Sudong^{1,2}, Hu Yan^{1,2,*}, Mu Shuang³, Wang Kehui⁴, Gui Kun⁴,
Feng Shijie^{1,2}, Zuo Chao^{1,2}, Chen Qian²

¹Smart Computational Imaging Laboratory (SCILab), School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing
University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;

²Jiangsu Key Laboratory of Spectral Imaging & Intelligence Sense, Nanjing 210094, Jiangsu, China;

³Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China;

⁴Konfoong Bioinformation Technology CO., LTD., Ningbo 315400, Zhejiang, China

Abstract This study proposes a simple and robust adaptive fringe projection method for the 3D measurement of highlighted surfaces. The method initially projects a uniform white pattern to help identify overexposed regions and extract boundaries. These boundaries are then mapped to a projector pixel coordinate system. The pixel intensities within the boundaries are reduced to regenerate new fringe maps with brightness distributions adapted to the sample. Finally, this process is repeated until no overexposed regions remain in the acquired images. Conventional methods use multiple exposures and adaptive projection, have complicated operations and calculations, and must capture a large number of fringe images. By contrast, the proposed method just needs to capture fewer patterns and is easier to implement. Experimental results demonstrate that the proposed method can accurately measure the highlighted surface of biological tissue and reconstruct complete and high-precision 3D profiles.

Key words fringe projection profilometry; highlight surface; adaptive projection; 3D reconstruction; structured light

收稿日期: 2024-06-28; 修回日期: 2024-07-22; 录用日期: 2024-07-29; 网络首发日期: 2024-08-15

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB2804603)、国家自然科学基金(62005121, U21B2033)、青年人才托举工程(2022QN-RC001)、中国博士后科学基金(2022M721619)、江苏省光谱成像与智能感知重点实验室开放基金(JSJP202103)、中央高校基本科研业务费专项资金资助(30924010814)

通信作者: hu_yan@njust.edu.cn

1 引言

随着数字化技术的发展,三维测量技术在各个领域的需求日益增长^[1-2]。三维测量技术通常分为接触式测量方法和非接触式测量方法。三坐标测量机是一种典型的接触式测量设备,其通过探针接触测量物体表面,逐点测量其三维信息。这种方法的测量精度较高,可达微米级,但对测量环境要求苛刻,效率低下,且探针与柔软物体接触容易改变物体的形貌特征^[3]。在非接触式测量方法中,光学方法因其灵活、高效、无接触等特点,在测量速度方面远超三坐标测量机^[4]。基于光学的测量方法多种多样,主要包括多(双)目立体视觉、飞行时间法、结构光投影法等^[5]。其中,结构光条纹投影法^[6-9]被认为是目前最有前途的技术之一。最简单的条纹投影成像系统由相机、投影仪和计算机组成。通过计算机控制投影仪将预先设计好的条纹图投影到物体上,同时利用相机捕获相应的变形条纹并传输到计算机,计算机再从捕获的条纹图像中提取出相位信息,结合提前标定获得的系统参数,最终计算出物体真实的三维坐标^[10-11]。

条纹投影技术已在多方面得到应用,但在测量物体高反射区域时容易出现过曝光现象。虽然可以通过改变光圈或曝光时间来缩小图像饱和范围,但同时会降低反射区域的强度调制能力,导致测量精度下降^[12]。针对高反射区域的三维测量仍是一个具有挑战性的难题。为了解决图像饱和问题,学术界已提出多种解决方法^[13-15]。其中,基于多重曝光的技术,通过改变曝光时间多次采集同一场景下的变形条纹图像,在低曝光条件下的高反射区域可以捕获到良好的条纹质量,在高曝光条件下的低反射区域也可以捕获到良好的条纹质量,从而生成高动态范围的复合条纹图像,用于三维重建^[16-18]。还有一种方法则是通过调整投影图案的强度。Waddington等^[19]提出了根据环境光和表面反射率来调整投影模式的全局最大输入灰度级的方法以避免图像饱和,但比较耗时。Lin等^[20]通过投影多个统一的灰度图像,结合单应性矩阵确定投影仪图像和相机的灰度值对应关系,调整了条纹图像的像素强度。Zhou等^[21]通过求解相机与投影仪之间的响应关系,得到测量所需要的投影亮度。Liu等^[22]通过分别投影高强度和低强度的图案到物体上,计算其反射率,在像素级层面计算其适当的投影强度,最终实现对小闪亮物体的测量。Zhang等^[23]投影三幅均匀灰度图来估计被测表面的投影强度,再通过灰度编码图案建立投影图像和捕获图像之间的映射关系,得到最佳条纹。Lei等^[24]考虑拍摄的图片进行直方图分析,通过计算表面反射率不同的区域分别计算每个组别的曝光时间来获取最佳图案。Sun等^[25]考虑到相机和投影仪的分辨率差异,为每个投影仪像素建立投影强度模型,获得准确的映射关系后再生成自适应的条纹图案。此外有学者

通过分离彩色相机对单色条纹投影的不同颜色通道响应,提出了一种基于单色条纹投影的高动态范围物体表面三维测量方法,这一方法在一定程度上也可以解决高动态问题^[26]。

尽管现有的自适应投影方法在实践中证明了其有效性和实用性,但普遍存在操作复杂、计算量大等问题。针对这一挑战,本文提出了一种通过迭代降低过曝光区域投影强度的简便方法。该方法首先通过投影条纹图像来获得连续相位信息,然后利用最大输入灰度图确定过曝光区域并提取其边界,最后基于边界位置相位信息的准确性假设,将相机像素坐标系下的边界映射至投影仪像素坐标系,并降低该区域内部像素的强度,从而重新生成最大输入灰度图和条纹图。通过多次迭代这一过程,最终生成合适的条纹图像,实现对生物组织的三维测量。

2 基础理论

2.1 成像模型

基于条纹投影的结构光系统通常由相机和投影仪组成。投影仪将结构光条纹投射至生物组织表面,条纹图案被样品高度调制因而发生变形,并经过漫反射被相机捕捉。在成像过程中,需要考虑多个因素,例如被测生物组织的表面颜色丰富、光滑,易造成图像过曝光。此外,生物组织对投射光的影响多样,包括漫反射、镜面反射、透射和吸收等。

为了解决这些问题,系统采用了一种针对样品表面高反射率区域的投影强度自适应迭代算法。该算法通过分析图像中的亮度信息,识别出镜面反射区域并降低该区域的投影强度,有效地减少了镜面反射对图像质量的影响,提高了图像的清晰度和对比度,能够更加准确地获取生物组织的真实信息。图1显示了基于条纹投影结构光系统的模型图,其中 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 表示世界坐标系, $O_p - X_p Y_p Z_p$ 表示投影仪坐标系,

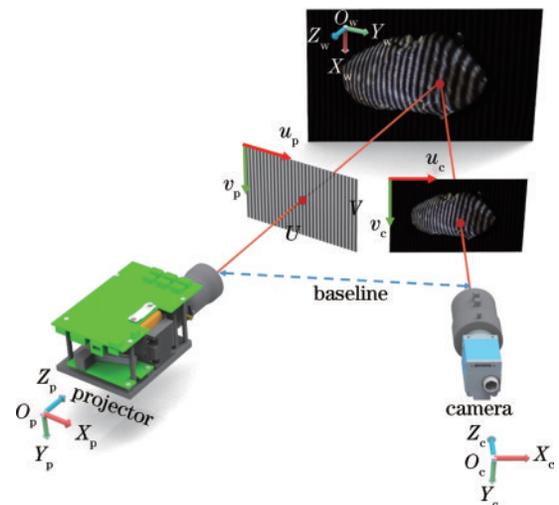


图1 条纹投影系统成像模型

Fig. 1 Imaging model of fringe projection system

(u_p, v_p) 表示投影仪对应的像素坐标系, $O_c - X_c Y_c Z_c$ 表示相机坐标系, (u_c, v_c) 表示相机对应的像素坐标系。

2.2 相位计算

本文采用了多步相移算法, 通过投影一系列具有不同频率的相移图案来获取相位信息。以水平方向为例, 投影空间中的点 $p(u_p, v_p)$ 的强度值分配与 u_p 有关, 二者满足的关系为

$$I_{p,n}(u_p, v_p) = M_{\text{migi}} [a_p + b_p \cos(2\pi f_p u_p - \delta_n)], \quad (1)$$

式中: M_{migi} 为最大输入灰度图, 其是投影仪下像素坐标 (u_p, v_p) 的函数; $\delta_n = 2\pi/n, n = 1, 2, 3, 4, \dots, N$ 为当前相移步数级次; a_p 为平均强度; b_p 为幅度, 通常取 0.5; f_p 为投影条纹的频率。将条纹图案投影到样品表面后, 相机捕获到的条纹分布可表示为

$$I_{c,n}(u_c, v_c) = A(u_c, v_c) + B(u_c, v_c) \cos[f(u_c, v_c) - \delta_n], \quad (2)$$

式中: A 为平均强度; B 为强度调制度。 ϕ 为包裹相位, 其可通过提取得到

$$\phi(u_c, v_c) = \arctan \left[\frac{\sum_{n=1}^N I_{c,n}(u_c, v_c) \sin(\delta_n)}{\sum_{n=1}^N I_{c,n}(u_c, v_c) \cos(\delta_n)} \right]. \quad (3)$$

最后采用时间相位展开法^[27], 便可以获得包裹相位展开的连续相位 Φ 。

2.3 相机和投影仪的标定

为了实现相机和投影仪构成的系统的精确测量, 首先需要对系统进行标定。目前, 针对相机的标定算法已较为成熟, 因此本文主要针对投影仪标定方法进行详细阐述。采用棋盘格标定板进行系统标定, 棋盘格边长为 4 mm。如图 2 所示, 展示了特征点在标定过程中其对应投影仪像素坐标的计算流程, 主要包括以下几个步骤:

1) 向棋盘格标定板投影强度为 255 的最大输入灰度图, 并由相机采集图像。识别图像中的棋盘格角点, 并通过对角线插值的方法获得白色矩阵几何中心对应的相机像素坐标。将世界坐标系的原点定义在棋盘格的左上角, 即可采用张正友标定法对相机进行标定。

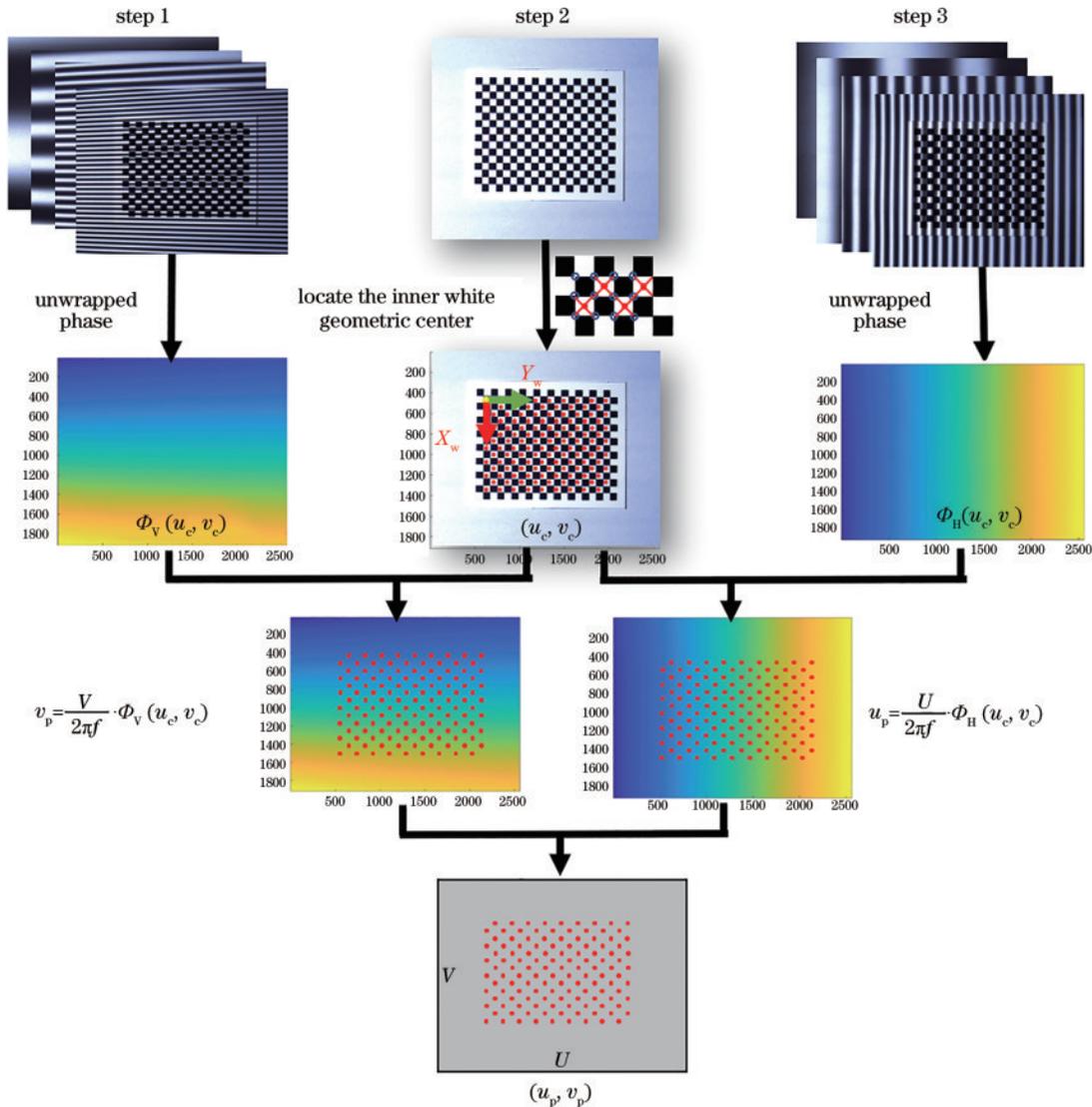


图 2 特征点对应的投影仪像素坐标的计算流程

Fig. 2 Calculation process of feature points in the projector's coordinate system

2) 投影一系列横向与竖向条纹至标定板表面,并由相机采集对应图像。通过相位展开,可以获得对应的连续相位图 Φ_H 、 Φ_V 。为了避免在标定过程中特征点的相位在黑白交界处产生跳变,本文创新性地将白色矩阵的几何中心作为特征点。

3) 针对投影仪标定难题,可以将其视为一个逆相机。通过相机和投影仪相位一致性准则,便可计算出棋盘格中心特征点在投影仪空间的像素坐标,具体可表示为

$$\begin{cases} u_p = \frac{U}{2\pi f} \times \Phi_H(u_c, v_c) \\ v_p = \frac{V}{2\pi f} \times \Phi_V(u_c, v_c) \end{cases}, \quad (4)$$

式中: Φ_H 和 Φ_V 分别为通过正弦条纹图案展开后获得的水平和垂直方向的绝对相位值; U 为投影仪横向分辨率; V 为投影仪纵向分辨率; f 为编码正弦图案的空间频率。利用这些参数,便可再次采用张正友标定法对投影仪进行标定,得到标定结果。

2.4 重建过程

对于一个已知的相机像素坐标 $p(u_c, v_c)$, 其和 world 坐标 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 的关系可表示为

$$z_c \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ 1 \end{bmatrix} = A_c [R_c t_c] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: A_c 为相机的内参矩阵; R_c 和 t_c 分别为世界坐标系转换到相机坐标系的旋转矩阵和平移向量; z_c 为物点相对于相机坐标系的坐标值。式(5)中,可将相机的投影矩阵表示为

$$P_c = A_c [R_c t_c] = \begin{bmatrix} p_{c,11} & p_{c,12} & p_{c,13} & p_{c,14} \\ p_{c,21} & p_{c,22} & p_{c,23} & p_{c,24} \\ p_{c,31} & p_{c,32} & p_{c,33} & p_{c,34} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

同样,世界坐标转换到投影仪的像素坐标满足

$$z_p \begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ 1 \end{bmatrix} = A_p [R_p t_p] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中: A_p 为投影仪的内参矩阵; R_p 和 t_p 分别为世界坐标系转换到投影仪坐标系的旋转矩阵和平移向量; z_p 为物点相对于投影仪坐标系的坐标值。因此可将投影仪的投影矩阵表示为

$$P_p = A_p [R_p t_p] = \begin{bmatrix} p_{p,11} & p_{p,12} & p_{p,13} & p_{p,14} \\ p_{p,21} & p_{p,22} & p_{p,23} & p_{p,24} \\ p_{p,31} & p_{p,32} & p_{p,33} & p_{p,34} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

由式(4)~(8)可知,通过获取相机像素坐标位置 $p(u_c, v_c)$ 以及该点相位值 $\Phi_H(u_c, v_c)$ 转换的投影仪横向坐标 u_p , 结合对系统标定后获得的参数,便可建立世界坐标系和像素坐标的关系,具体可表示为

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{c,11} - p_{c,31}u_c & p_{c,12} - p_{c,32}u_c & p_{c,13} - p_{c,33}u_c \\ p_{c,21} - p_{c,31}v_c & p_{c,22} - p_{c,32}v_c & p_{c,23} - p_{c,33}v_c \\ p_{p,11} - p_{p,31}u_p & p_{p,12} - p_{p,32}u_p & p_{p,13} - p_{p,33}u_p \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} p_{c,14} - p_{c,34}u_c \\ p_{c,24} - p_{c,34}v_c \\ p_{p,14} - p_{p,34}u_p \end{bmatrix}. \quad (9)$$

3 自适应投影方法

3.1 过曝光区域标记

相移条纹在空间分布上是亮暗变化的,有一些高光区域在多步相移图像中不一定出现过曝成像。为了准确快速地得到过曝区域,首先投影一张 M_{img} 图案至样品表面,相机同时采集到的图像强度分布图为 $I_c(u_c, v_c)$ 。定义掩码图像 $M_{c,oe}(u_c, v_c)$ 用来标记过曝光区域。由于环境中存在噪声影响,因此可以设置灰度饱和阈值为 250,当相机采集的该像素点灰度饱和时,该点被设置为 1,具体可表示为

$$M_{c,oe}(u_c, v_c) = \begin{cases} 1, I_c(u_c, v_c) > 250 \\ 0, I_c(u_c, v_c) \leq 250 \end{cases}. \quad (10)$$

通过对二值图像 $M_{c,oe}(u_c, v_c)$ 进行连通域分析,识别并标记图像中的各个连通域。实际上,当投影条纹图像时,对于某些较小的过曝光区域,采集到的条纹图像并不会出现过曝光现象,可以去除其中较小的连通域。接着,采用微分算子对剩余饱和和像素区域的边界进行提取,其被定义为 $M_{c,broder}(u_c, v_c)$,如图 3(a)所示。

3.2 坐标映射过程

在获取相机采集的图像中过曝光区域的边界后,由于投影图案是通过投影仪进行投射,因此需要将曝光区域的边界映射到投影仪像素坐标系。通过投影相移条纹图获取样品的三维信息 $P(X_w, Y_w, Z_w)$,然后将三维信息映射到投影仪的像素坐标系,确定过曝光区域在投影仪空间下的坐标范围。相机和投影仪的分辨率存在差异,且投影和采集的幅面大小不同,导致相机像素坐标系下的坐标与投影仪像素坐标系下的坐标并不一一对应。在本文所搭建的系统中,投影和采集幅面的大小相近,但相机分辨率高于投影仪分辨率,导致单个投影仪像素的光投射到物体上时,可能对应多个相机像素坐标。另一个需要注意的问题是,提取过曝光区域的边界相机像素坐标 $p(u_c, v_c)$ 是整数形式,其经过空间坐标映射所得到的投影仪像素点 (u_p, v_p) 却是亚像素精度。因此,可将其进行最近邻插值处理,获得其对应的整数坐标,并且得到的坐标应满足

$$\begin{cases} 0 < u_p \leq U \\ 0 < v_p \leq V \end{cases}. \quad (11)$$

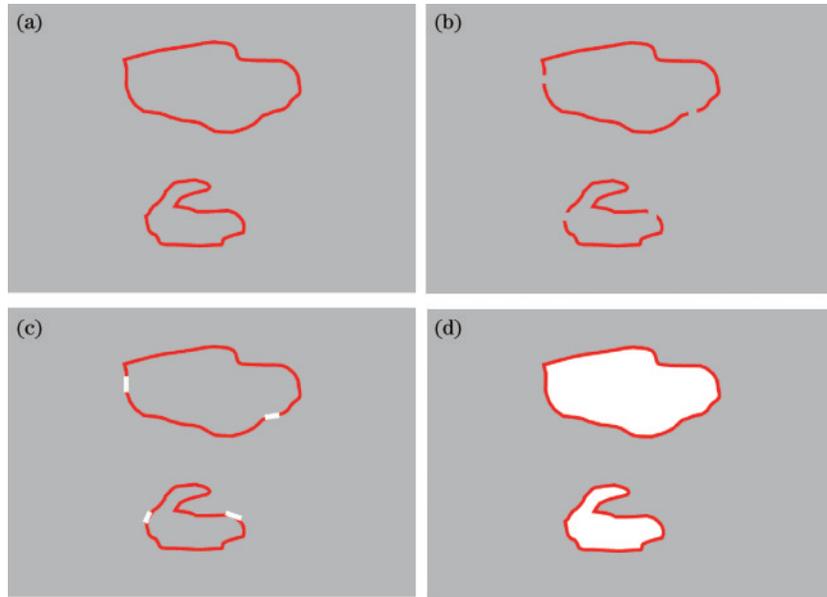


图3 边界掩码映射处理过程。(a)过曝光区域边界对应的掩码;(b)边界直接映射到投影仪的像素坐标系;(c)对映射后的边界进行自动连接;(d)获得投影仪坐标系下过曝光区域的掩码

Fig. 3 Processing of boundary mask mapping. (a) Mask corresponding to the boundary of the overexposed region; (b) boundaries are mapped directly to the pixel coordinate system of the projector; (c) automatically connect mapped boundaries; (d) obtained mask of overexposed region in the projector coordinate system

经过上面的处理过程,映射到投影仪空间下的过曝光区域边界可能不再闭合,如图3(b)所示。可以通过以下方式来获取闭合的连通区域:在投影空间下连接各个边界点,形成闭合边界映射结果 $M_{p, broder}(u_p, v_p)$,如图3(c)所示。在投影空间下,取闭合边界内部的像素值为1,边界外部的像素值为0,确定采集图片中过曝光区域 $M_{c, oe}(u_c, v_c)$ 对应的二值投影空间连通掩码 $M_{p, oe}(u_p, v_p)$,如图3(d)所示。

3.3 重新生成最大输入灰度图和条纹图

在相机拍摄的图像中,采集到的过曝光区域均显

示为白色,但真实的光辐射强度是不同的,通常由外向内过曝光的程度递增。在实际应用中,单次降低过曝光区域对应的最大输入灰度值往往不足以解决区域高反射问题。因此,在获得过曝光区域对应的二值掩码后,可以采用逐级迭代降低投影空间掩码区域 $M_{p, oe}(u_p, v_p)$ 中图案投影强度值的方法,重新生成调整强度后的最大输入灰度图以及条纹图,如图4所示。最大输入灰度图中的该区域投影强度值的迭代过程满足

$$M_{m, migl}(u_p, v_p) = M_{m-1, migl} - M_{p, oe} \cdot r, \quad (12)$$

式中: m 为迭代次数; r 为过曝光区域降低的灰度强度。

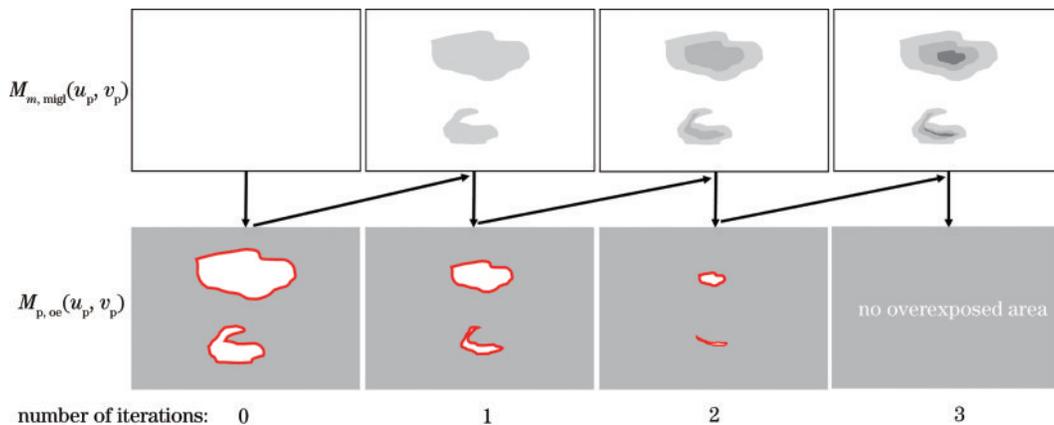


图4 最大输入灰度图迭代调整的过程

Fig. 4 Process of iterative adjustment of the maximum input grayscale

在投影迭代过程中,将重新生成最大输入灰度图 $M_{m, migl}$ 并投影至样品表面。通过采集到的最大输入灰度图确定过曝光区域,并使用投影相移条纹建立过曝

光区域边界与投影空间下像素坐标的映射关系。在获得 $M_{m, migl}$ 后,通过式(12)即可重新生成自适应后的相移条纹图。如此迭代生成最大输入灰度图和相移条纹

图,直至所采集的最大输入灰度图中无过曝光区域,即满足迭代终止条件。所提出的算法的详细步骤如图 5 所示。

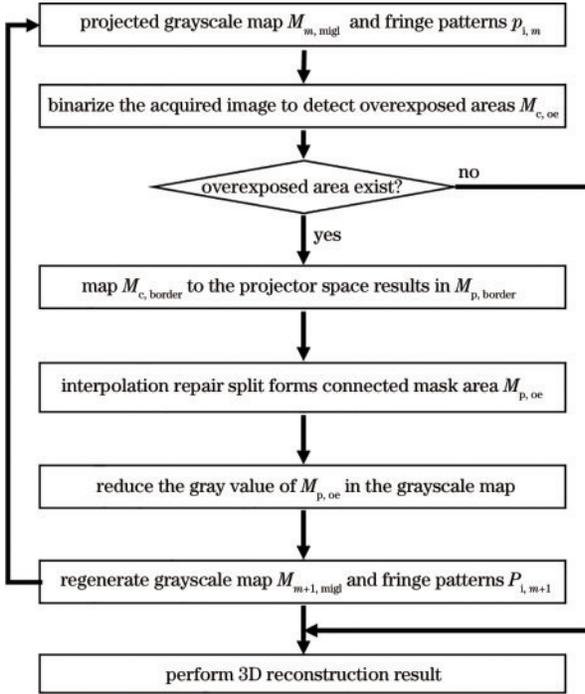


图 5 基于迭代自适应投影的三维重建流程图

Fig. 5 Flow chart of 3D reconstruction based on iteratively adaptive projection

4 实验与分析

测量系统如图 6 所示,包括以下设备:一台北京闻亭泰科公司生产的 Pro4500CV 型号投影仪,其在 Video 工作模式下的最大分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times$

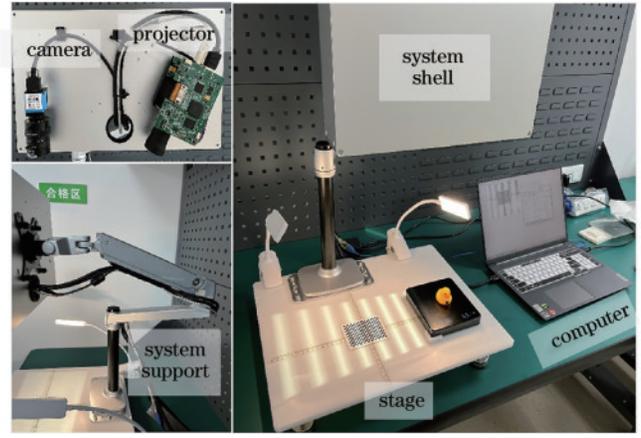


图 6 系统实物图

Fig. 6 Physical picture of system

800 pixel;一台映美精公司生产的 DFK 33UX183 型号相机,具有 $2560 \text{ pixel} \times 1920 \text{ pixel}$ 的分辨率;一个康标达公司生产的 M3Z1228C-MP 型号变焦镜头,焦距为 $12 \sim 36 \text{ mm}$ 。投影仪将一系列四步相移条纹图案投影到被测生物组织表面,条纹图案频率分别为 1、7、57,这 3 个频率表示在光栅条纹方向上的正弦条纹个数。相机捕获包含高度调制信息的变形条纹图案,测量范围约为 $20 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$ 。系统的标定结果如表 1 所示。

选择白色圆网格黑色平面板和鱼泡生物组织样品进行实验分析。生物组织表面的薄膜容易导致过曝光成像,其形态相比于标准结构和单一颜色的样品更加复杂,测量难度较高。而黑底白圆平面目标则具有较大的反射率变化,也是一种典型的高动态样品。因此,这些实验样品的选择能够有效验证该算法在应对高动态问题时的有效性和可靠性。

表 1 系统标定结果

Table 1 System calibration results

Calibration parameter	Camera	Projector
Intrinsic matrix	$\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} 5035.07 & 0 & 1263.08 \\ 0 & 5035.07 & 894.80 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\mathbf{A}_p = \begin{bmatrix} 1959.71 & 0 & 651.28 \\ 0 & 1963.62 & 404.86 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Rotation matrix	$\mathbf{R}_c = \begin{bmatrix} -0.0080 & 0.9997 & -0.0235 \\ 0.9999 & 0.0080 & -0.0004 \\ -0.0002 & -0.0235 & -0.9997 \end{bmatrix}$	$\mathbf{R}_p = \begin{bmatrix} 0.0020 & 0.9090 & 0.4167 \\ 0.9999 & -0.0024 & 0.0004 \\ 0.0013 & 0.4167 & -0.9090 \end{bmatrix}$
Translation vector	$\mathbf{t}_c = [10.3788 \quad -46.5238 \quad 419.3431]^T$	$\mathbf{t}_p = [18.1418 \quad -50.4354 \quad 467.3217]^T$
Reprojection error /pixel	0.0824	0.0528

4.1 平面板的自适应投影重建

基于传统方法对一个表面反射率变化较大的 5×4 白色圆网格黑色平面板进行三维重建,黑色平面板的实物图如图 7(a)所示。首先,利用初始全局强度为 255 的最大输入灰度图生成条纹图,并将初始四步相移条纹图投影到平面板,采集到的条纹图如图 7(b)所

示。然后对条纹图进行包裹相位提取和时间相位展开,可获得对应的绝对相位,如图 7(c)所示。在图 7 中,可以看见过曝光区域的相位信息存在明显错误。如果使用传统重建方法,可以观察到平面板中的像素饱和区域出现了数据丢失和测量误差,如图 9(c)所示。

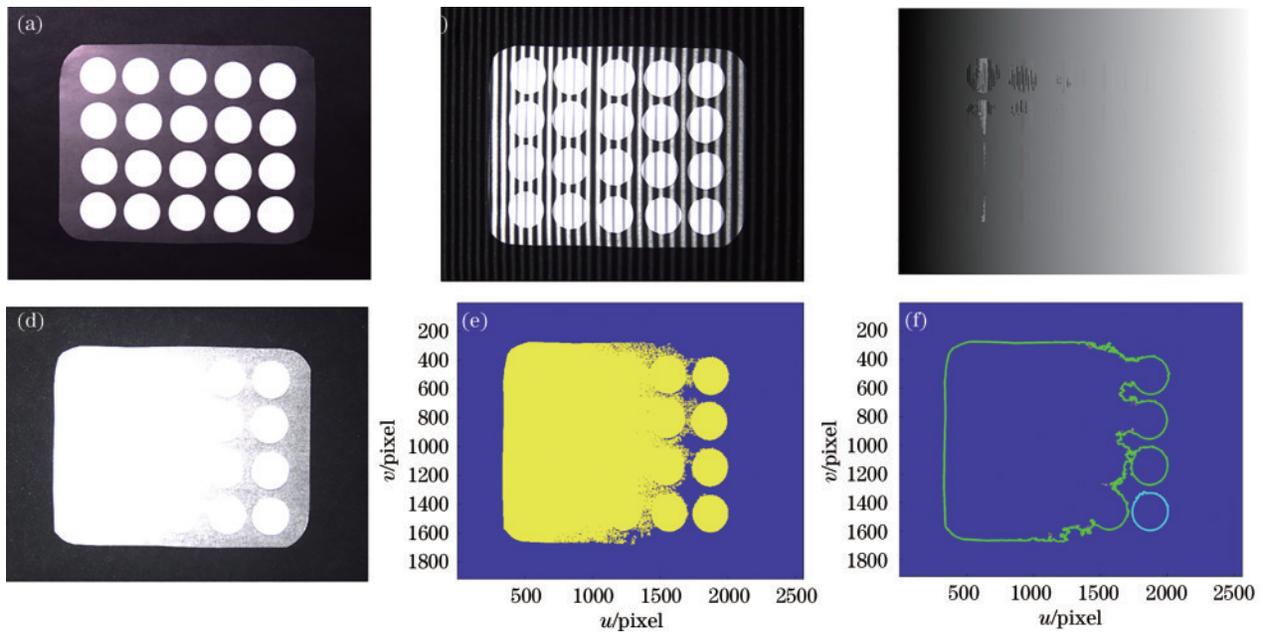


图7 圆点平板图的处理过程。(a)平板实物图;(b)采集到的条纹图;(c)获得的连续相位图;(d)采集到的最大输入灰度图;(e)标记的过曝区域;(f)提取的过曝区域边界

Fig. 7 Process of dot plate. (a) Plate image; (b) captured fringe pattern; (c) obtained continuous phase map; (d) obtained maximum input grayscale; (e) marked overexposed regions; (f) extracted boundary of the overexposed regions

接着利用所提出的方法进行对比实验,对平面板进行自适应投影三维重建。所获得的二值掩码如图7(e)所示,通过跟踪二值图像中的区域边界,获得其边界所在像素坐标,并用不同颜色显示不同的边界对象,如图7(f)所示。之后将相机像素坐标系下的边

界映射到投影仪像素坐标系下,但映射后的边界轮廓不一定是闭合的,如图8(a)所示。因此使用了下述步骤进行处理:对边界进行跟踪,在像素层面自动连接缺失的边界,将闭合边界内部的像素值设为1,边界外部的像素值设为0,获得相机像素坐标系下过曝光区域

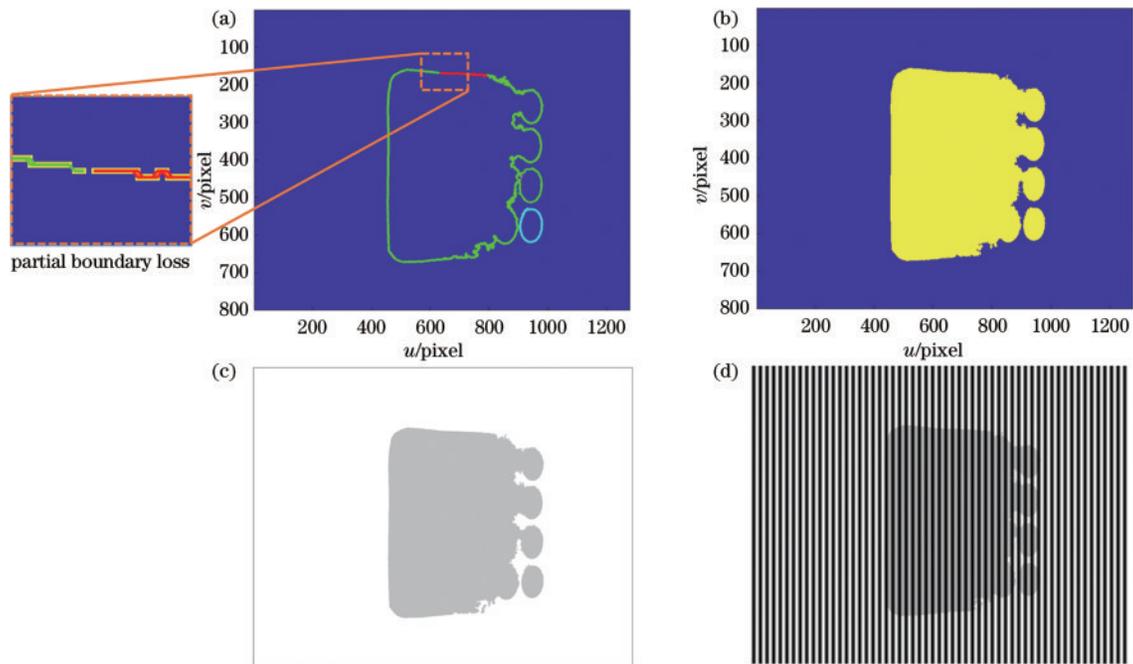


图8 条纹投影强度自适应过程。(a)过曝光区域边界直接映射的边界结果;(b)连通过曝区域边界后对应的投影空间掩码;(c)降低过曝光区域亮度的投影强度分布图;(d)重新生成的条纹图

Fig. 8 Process of adaptive intensity of fringe projection. (a) Boundary results of direct mapping of overexposed region boundary; (b) corresponding projection space mask after connecting boundary of exposed area; (c) input grayscale map with reduced intensity of overexposed regions; (d) regenerated fringe pattern

对应的二值投影空间掩码,如图 8(b)所示。

在式(12)中,根据多次实验过程的经验选取过曝光区域降低灰度值 r 为 60。该值的选取有效减少了因较多迭代次数带来的数据计算量,同时降低了在寻找最优值时增加的算法复杂性,并且保证了较好的重建质量;此外,在该值下,投影强度的迭代调整过程具有较大的变化范围,使其能够较好进行高动态样品的高质量重建工作。利用式 12 重新生成最大输入灰度图和相移条纹图,如图 8(c)和(d)所示。

再次投影新生成的条纹图和最大输入灰度图到平板表面,对其进行迭代自适应投影计算。如此迭代 3 次,获得如图 9(a)所示的条纹图,将其投影到平板上,所采集到的图像已无明显的过曝光区域,如图 9(b)所示。将这些图案用于三维计算中,得到的结果如图 9(d)所示,与图 9(c)相比重建效果得到了明显改善。在每次迭代过程中,提取平板位置的三维信息进行平面拟合,并根据被测点到拟合平面的距离计算各点的测量误差和标准差,如表 2 所示。

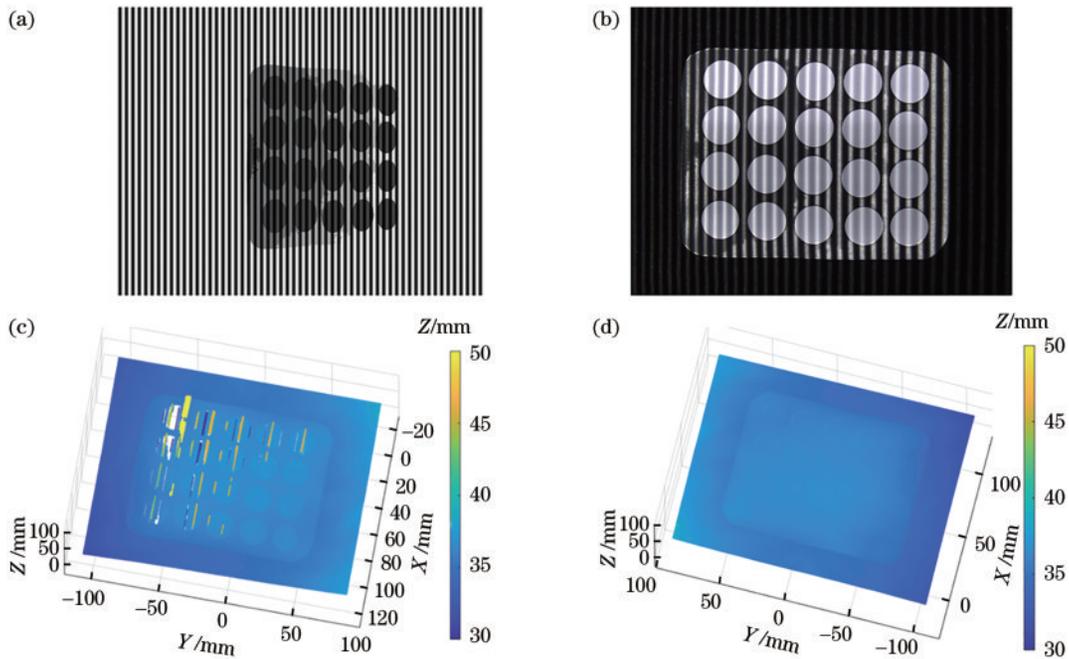


图 9 自适应投影前后效果对比。(a)迭代三次生成的条纹图;(b)采集到的条纹图;(c)使用原始条纹对平面的重建;(d)使用自适应投影对平面的重建

Fig. 9 Comparison of the results before and after adaptive projection. (a) Generated fringe pattern after three iterations; (b) captured fringe pattern; (c) reconstruction of the plate using initial fringe images; (d) reconstruction of plate using adaptive projection

表 2 平板重建结果与拟合平面之间的标准差

Table 2 Standard deviations between reconstructed plane and fitted plane

Iteration	0	1	2	3
Standard deviation	6.8599	0.4483	0.3540	0.3126

投影初始条纹图重建的结果与拟合平面之间存在较大的标准差,这主要是因为对图像饱和区域的相位解算错误。采用本文提出的方法逐步迭代生成条纹图,并重新投影后进行重建,第 1 次迭代投影重建后的标准差明显下降,随后每次迭代投影重建后的标准差也有所下降。这表明本文方法在处理过曝光区域的重建方面是有效的。经过多次自适应投影后,重建平面的平整度提升超过原有水平的 20 倍。

4.2 生物组织三维形貌测量

接着利用本文方法对具有高反射范围的生物组织进行三维测量,以鱼泡组织为例。为了减少环境光的影响,这里采用了黑色背景板。相机曝光时间设置为较大值,这会使得相机在黑暗处采集到的图像也会拥

有更高的图像质量,但这会导致生物组织中某些颜色较亮的区域出现图像饱和。

表 3 显示了对鱼泡组织的迭代自适应投影过程,第 1 行是迭代的次数,第 2 行是迭代所生成的条纹图案,第 3 行是对应自适应投影的图像后采集到的高频条纹图,第 4 行显示了对应条纹重建出的三维结果。当投影初始全局图案为强度值为 255 的图案时,鱼泡组织中间有明显的过曝光现象。运用传统方法重建的样品表面中间区域的三维信息会产生缺失。

利用本文提出的自适应投影迭代方法进行试验,所采集到图像中的过曝光区域逐步减小,重建结果的完整性也得到改善。通过表 3 数据可以看出,第 2 次迭代和第 3 次迭代自适应后重建的结果相近。为了进一

表 3 鱼泡组织迭代自适应投影重建过程

Table 3 Adaptive projection reconstruction process of fish bubble tissue

Iteration	0	1	2	3
Fringe pattern				
Captured image				
3D result				

步定量分析,沿着 X 轴方向分别从第 2 次迭代重建和第 3 次迭代重建中提取红线的三维数据进行定量高度比较。图 10(a)显示了一个三维重建的表面,虚线标记了沿 X 轴方向的数据提取线,图 10(b)显示了沿

图 10(a)中虚线方向提取的高度数据的对比图。虚线表示第二次迭代后的数据,实线表示第三次迭代后的数据。从图 10 中可以看到,第 3 次迭代的表面更加平滑,过曝光区域得到了更好的校正。

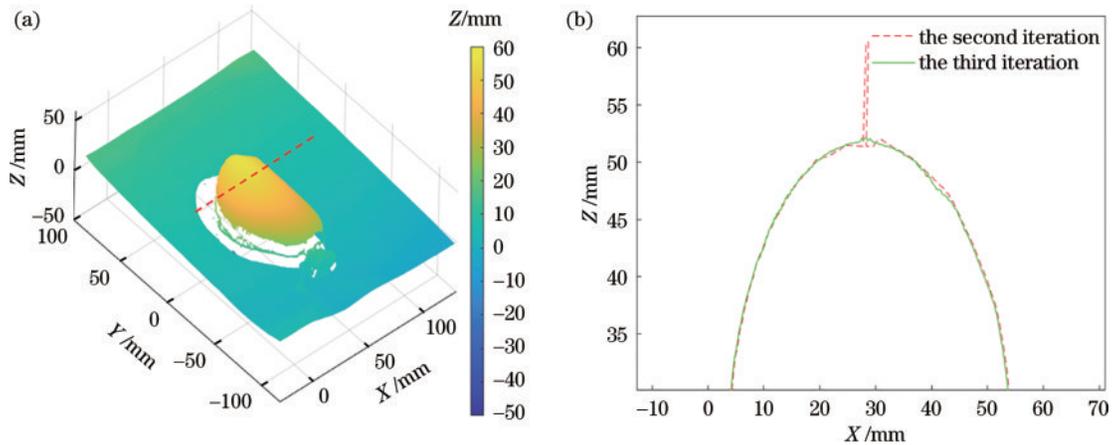


图 10 鱼泡组织自适应投影重建迭代优化过程。(a) 三维重建的表面,虚线标记了用于分析的数据;(b) 虚线标记处第 2 次和第 3 次迭代后的重建结果对比

Fig. 10 Optimization process of reconstructing a fish bubble using adaptive projection. (a) Reconstructed 3D surface with dashed lines marking data for analysis; (b) comparison of reconstruction results after the second and third iterations

5 结 论

针对生物组织条纹投影重建过程中的图像饱和问题,本文提出了一种迭代自适应条纹投影方法。该方法首先利用投影最大输入灰度图确定过曝光区域,并使用投影相移条纹确定过曝光区域边界与投影空间下像素坐标的映射关系;然后,逐级降低所投影图案中过曝光对应区域的最大输入灰度级,其他区域的最大输入灰度级保持不变;最后重新投影到生物组织上,从而避免图像饱和,实现对生物组织过曝光区域的三维测量。

实验结果表明,本文提出的方法能够测量高反射率范围内的生物组织,其优势可以概括为如下几点:

1) 测量效率较高。针对生物组织,该方法一般只需要 3 次迭代过程即可有效地测量其三维结构,并保持了较高的信噪比。2) 具有成本低的优点。该方法只需要调整所投影图案上像素的强度,不需要额外的多摄像机视角、投影方向以及其他光学控制硬件。3) 操作简单且易于实现。避免了多次曝光采集图片或者投影不同强度图案再计算物体表面反射率等一系列复杂的过程。

未来工作将着重探索以下方向,以进一步提升该方法的性能:1) 优化算法效率,目前,该方法需要多次迭代,未来将研究更智能的迭代策略,例如基于深度学习的迭代优化方法,以减少迭代次数,提高测量效率;2) 提升鲁棒性,针对不同生物组织的复杂表面特性,将

研究更鲁棒的过曝光区域识别和边界提取方法,以提高算法的稳定性和可靠性。相信通过持续的研究和改进,该方法将在生物组织三维测量领域发挥更加重要的作用。

参 考 文 献

- [1] Liu C, Jiang Z, Wang X, et al. Continuous optical zoom microscope with extended depth of field and 3D reconstruction[J]. *Photonix*, 2022, 3(1): 20.
- [2] Su X Y, Zhang Q C. Dynamic 3-D shape measurement method: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 191-204.
- [3] Hocken R J, Pereira P H. Coordinate measuring machines and systems[M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press 2012.
- [4] Yin W, Feng S J, Tao T Y, et al. High-speed 3D shape measurement using the optimized composite fringe patterns and stereo-assisted structured light system[J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 2411-2431.
- [5] 左超, 张晓磊, 胡岩, 等. 3D真的来了吗? ——三维结构光传感器漫谈[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(3): 0303001. Zuo C, Zhang X L, Hu Y, et al. Has 3D finally come of age? —an introduction to 3D structured-light sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303001.
- [6] Zhang S. High-speed 3D shape measurement with structured light methods: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 106: 119-131.
- [7] Gorthi S S, Rastogi P. Fringe projection techniques: whither we are? [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 133-140.
- [8] Zhang Z H. Review of single-shot 3D shape measurement by phase calculation-based fringe projection techniques[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(8): 1097-1106.
- [9] van der Jeught S, Dirckx J J J. Real-time structured light profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 87: 18-31.
- [10] Feng S J, Zuo C, Zhang L, et al. Calibration of fringe projection profilometry: a comparative review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 143: 106622.
- [11] Hu Y, Chen Q, Feng S J, et al. A new microscopic telecentric stereo vision system-calibration, rectification, and three-dimensional reconstruction[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 113: 14-22.
- [12] Li D, Kofman J. Adaptive fringe-pattern projection for image saturation avoidance in 3D surface-shape measurement[J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 9887-9901.
- [13] Feng S J, Zhang L, Zuo C, et al. High dynamic range 3D measurements with fringe projection profilometry: a review[J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(12): 122001.
- [14] Hu Y, Chen Q, Liang Y C, et al. Microscopic 3D measurement of shiny surfaces based on a multi-frequency phase-shifting scheme[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 122: 1-7.
- [15] 刘泽隆, 李茂月, 卢新元, 等. 高动态范围条纹结构光在机检测技术及应用进展[J]. *中国光学(中英文)*, 2024, 17(1): 1-18. Liu Z L, Li M Y, Lu X Y, et al. On-machine detection technology and application progress of high dynamic range fringe structured light[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(1): 1-18.
- [16] Zhang S, Yau S T. High dynamic range scanning technique[J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(3): 033604.
- [17] Rao L, Da F P. High dynamic range 3D shape determination based on automatic exposure selection[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2018, 50: 217-226.
- [18] Wang J H, Zhou Y G, Yang Y X. A novel and fast three-dimensional measurement technology for the objects surface with non-uniform reflection[J]. *Results in Physics*, 2020, 16: 102878.
- [19] Waddington C, Kofman J. Saturation avoidance by adaptive fringe projection in phase-shifting 3D surface-shape measurement[C]//2010 International Symposium on Optomechatronic Technologies, October 25-27, 2010, Toronto, ON, Canada. New York: IEEE Press, 2010.
- [20] Lin H, Gao J, Mei Q, et al. Adaptive digital fringe projection technique for high dynamic range three-dimensional shape measurement[J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7703-7718.
- [21] Zhou G P, Zhu W T, Yi C H, et al. 3D shape measurement in fast high dynamic range based on projection intensity[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(1): 175-181.
- [22] Liu Y Z, Fu Y J, Cai X Q, et al. A novel high dynamic range 3D measurement method based on adaptive fringe projection technique[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 128: 106004.
- [23] Zhang S H, Yang Y X, Shi W W, et al. 3D shape measurement method for high-reflection surface based on fringe projection[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(34): 10555-10563.
- [24] 雷经发, 谢浩然, 李永玲, 等. 基于自适应多曝光融合的高动态范围表面测量方法[J]. *红外与激光工程*, 2024, 53(1): 20230370. Lei J F, Xie H R, Li Y L, et al. High dynamic range surface measurement method based on adaptive multi-exposure fusion[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(1): 20230370.
- [25] Sun J H, Zhang Q Y. A 3D shape measurement method for high-reflective surface based on accurate adaptive fringe projection[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 153: 106994.
- [26] 王张颖, 张宁宁, 高楠, 等. 基于单色条纹投影的高动态范围物体表面形貌三维测量[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(8): 20230327. Wang Z Y, Zhang N N, Gao N, et al. 3D surface shape measurement of high dynamic range object based on monochrome fringe projection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(8): 20230327.
- [27] Zuo C, Huang L, Zhang M L, et al. Temporal phase unwrapping algorithms for fringe projection profilometry: a comparative review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 85: 84-103.