

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306283

基于结构光测量技术的 DMD 自适应掩膜生成*

郑小钰^{1,2} 董社序^{1,2} 杨赫然^{1,2} 孙兴伟^{1,2} 刘寅^{1,2}

(1. 沈阳工业大学机械工程学院 沈阳 110870; 2. 辽宁省复杂曲面数控制造技术重点实验室 沈阳 110870)

摘要:为解决强反射表面物体测量过程中易发生局部镜面反射,影响测量精度的问题。将数字微镜添加到结构光测量光路中并设计搭建测量系统,包括数字微镜、CCD 相机、投影仪等器件。完成了系统的匹配、相机和投影仪的参数标定以及相位计算,采用麻雀搜索算法优化 BP 神经网络的方法建立数字微镜单元和相机像素单元之间的坐标映射关系,映射误差为 0.583 pixels。基于 PID 控制器提出一种自适应掩膜生成方法,并对具有强反射表面的量块进行了测量实验,实验表明该方法能有效降低过曝光区域的灰度,实现了高动态范围成像。提出的方法可为强反射表面的三维测量提供理论支撑。

关键词: 数字微镜;强反射表面;高动态范围;掩膜

中图分类号: TH74;TN247 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

DMD adaptive mask generation based on structured light measurement technology

Zheng Xiaoyu^{1,2} Dong Zhixu^{1,2} Yang Heran^{1,2} Sun Xingwei^{1,2} Liu Yin^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 2. Key Laboratory of Numerical Control Manufacturing Technology for Complex Surfaces of Liaoning Province, Shenyang 110870, China)

Abstract: In order to solve the problem that local specular reflection is easy to occur during the measurement of objects with strong reflection surface, which affects the measurement accuracy. The digital micro mirror is added to the structural light measurement optical path and the measurement system is designed and built, including the digital micro mirror, CCD camera, projector and other devices. The matching of the system, the parameter calibration of camera and projector and the phase calculation are completed. The coordinate mapping relationship between the digital micromirror device unit and the camera pixel unit is established by using the sparrow search algorithm to optimize the BP neural network. The mapping error is 0.583 pixels. An adaptive mask generation method based on PID controller is proposed, and the measurement experiment of the measure block with strong reflective surface is carried out. The experiment shows that the method can effectively reduce the gray level of the overexposed area, and achieve high dynamic range imaging. The proposed method can provide theoretical support for the three-dimensional measurement of strongly reflective surfaces.

Keywords: digital micromirror device; strong reflective surface; high dynamic range; mask

0 引言

结构光三维测量是一种主动式非接触测量技术,测量系统一般由一个相机和一个投影仪组成,首先通过投影仪向目标物体投射单幅或多幅特定的结构光编码图案,由于物体表面高度不一致图案会发生变形,利用相机

拍摄变形的结构光图像,然后通过计算机进行后续处理从而对被测物的三维测量,具有速度快、非接触、鲁棒性强等优点。但对于曲率变化较大的曲面和强反射物体表面等场合的三维测量还不够完善,因为强反射表面形成的局部高光区域容易使相机采集的结构光图像部分区域过曝光,导致被测表面信息获取不完整,从而影响测量精度。William 等^[1]利用二值相移条纹图像来计算摄像机

收稿日期: 2023-02-22 Received Date: 2023-02-22

* 基金项目: 2022 年度辽宁省教育厅高等学校基本科研项目面上项目 (LJKMZ20220459)、辽宁省应用基础研究计划项目 (2022JH2/101300214)、国家自然科学基金 (52005347) 项目资助

响应曲线,通过压缩辐射度图的动态范围对高光表面进行三维重建;林辉^[2]针对光亮表面结构光三维测量中数据丢失问题,提出一种自适应的高动态范围结构光测量方法,并对相位误差进行补偿,提高了测量精度;Zhao 等^[3]提出的区域投影条纹方法避免了高光导致捕获的条纹饱和现象;Liu 等^[4]提出了一种基于傅里叶变换轮廓术的实时三维测量方法,能够在实时三维测量系统中对具有光亮表面的动态物体进行测量。在结构光测量技术的研究过程中,一些场景的动态范围超出了一般传感器的动态范围而导致很难记录和测量,因此,高动态范围成像成为了研究热点。

动态范围指图像中包含“最暗”至“最亮”的范围^[5],动态范围越大表示该成像设备所记录视场中的明暗部细节越丰富。在成像光路中加入空间光调制器,通过对入射光线的编码调制获得更宽的动态范围,可实现对高动态场景的采集和恢复。数字微镜器件 DMD (digital micromirror device) 是一种依靠数字电压信号控制微镜单元执行机械运动来实现光学调制功能的器件^[6-8],由许多小型铝制反射镜面的阵列组成,具有可靠性高、响应时间快和高对比度等特点。然而,目前利用 DMD 器件对强反射表面进行三维测量的相关研究较少,本文利用 DMD 可控调光及高速转换的特性,将其与结构光测量技术相结合建立高动态范围测量系统。并在实现像素级匹配的基础上,针对 DMD 掩膜生成方法进行研究,以解决高反光面物体三维测量过程中点云缺失问题,为提高基于 DMD 测量系统的测量精度、拓宽其适用范围提供了技术支撑。

1 测量系统的搭建与调试

分析 DMD 的成像原理和性能特点,设计测量系统的整体结构,如图 1 所示,将 DMD 器件设计于 CCD 相机前以便于调节进入相机的入射光线,DMD 的成像平面与相机的成像平面相垂直;投影仪向被测物表面投射结构光图案,光线在被测物表面发生变形,被反射后经过透镜 1 进入 TIR 棱镜,在棱镜内再次全反射投影在 CCD 像平面上;透镜 2 处于 TIR 棱镜和 CCD 相机之间,用来将 DMD 像平面上所成的像汇聚于相机像平面上。

搭建的高动态范围测量系统实验平台如图 2 所示。其中,数字微镜选用德州仪器公司的 DLP650LNIR DMD,选择 MV 系列千兆以太网工业相机作为图像采集器件,固定于六维位移平台上。投影仪的型号为 L-MIX P12。成像光路中添加 TIR 棱镜,起到改变光路方向的作用,同时避免入射光线与反射光线的干扰,减少光能损耗。

1.1 调光

由于 DMD 芯片与 CCD 相机芯片的尺寸大小差异且有可能出现一定的角度倾斜,导致两者像素单元空间频

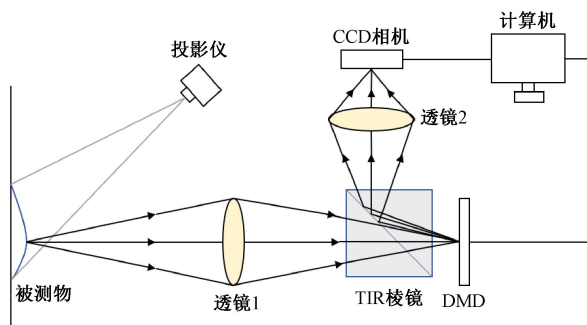


图 1 结构光测量系统光学原理结构

Fig. 1 Optical principle structure diagram of structured light measurement system

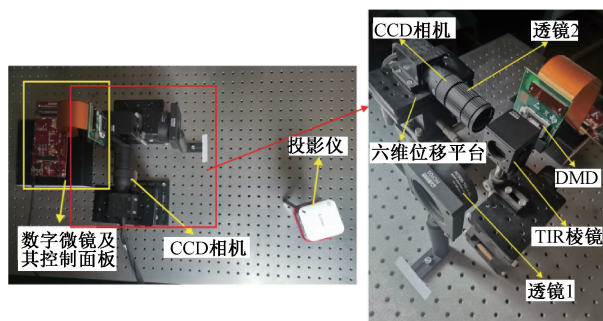


图 2 测量系统实物

Fig. 2 Physical diagram of the measurement system

率不一致^[8],因此需要消除两者之间的误差,使 DMD 微镜单元与 CCD 相机像元之间相互匹配。当两个空间频率相近的周期性光栅以很小的角度叠加时会产生放大的光栅,即莫尔条纹^[9]。因此可把 DMD 微镜单元和 CCD 相机像元看作两块二维光栅,通过对相机采集的图像稀释、复制处理,观察是否存在莫尔条纹来判别两者是否完全匹配。设计周期性黑白条纹图案上传到数字微镜中,CCD 相机采集 DMD 上的图案,如图 3 所示,可见出现莫尔条纹,此时 DMD 与 CCD 尚不匹配。通过微调六维位移平台和透镜 1,莫尔条纹逐渐消失,说明已完成 DMD 微镜单元与 CCD 相机像素单元的校正。

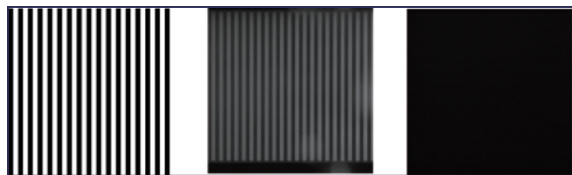


图 3 匹配结果

Fig. 3 Matching results

1.2 系统的参数标定

为确定空间物体表面某点的三维几何位置与其在图

像中像点之间的相互对应关系,需要建立相机成像的几何模型^[9-12],计算相机和投影仪的相关参数,测定这些参数的过程即为参数标定。相机和投影仪的精确标定很大程度上影响后续结构光三维测量的精度。相机标定采用常用的张正友平面标定法^[13-15],通过多张照片上角点像素坐标与其在世界坐标系下的坐标之间的对应关系求出多个转换矩阵,再进一步求内外参矩阵。该方法利用平面棋盘格进行标定实验,标定精度高,不需要高精度三维标定物且操作过程灵活方便,鲁棒性好。

投影仪投射的过程与相机成像的过程正好相反,因

此可将投影仪看作一个逆向的相机^[16],同样可以完成对投影仪的参数标定。实验选用边长为 15 mm 的黑白棋盘格标定板,使用数字标定工具箱 (procamcalib) 对投影棋盘格和棋盘格标定板一起联合标定。投影的棋盘格与棋盘格标定板在同一平面,多次变换不同的角度方位调整标定板位置,同时相机拍摄多组照片。从中选择效果最佳的 12 幅图像导入工具箱中,计算相机和投影仪的相关参数,如表 1 所示,相机的重投影误差为 0.37 pixels,投影仪的重投影误差为 0.70 pixels。一般认为小于 1 pixel,即满足实验要求。

表 1 标定参数
Table 1 The calibration parameters

相机参数		投影仪参数	
内参数 矩阵	$A_c = \begin{bmatrix} 9\,394.075 & 0 & 564.787 \\ 0 & 9\,370.492 & 548.437 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$A_p = \begin{bmatrix} 8\,392.132 & 0 & 1\,755.322 \\ 0 & 8\,718.542 & 1\,758.535 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
外参数 矩阵	$M_c = \begin{bmatrix} -0.023 & 0.986 & 0.166 & -21.686 \\ 0.996 & 0.020 & 0.019 & -31.981 \\ 0.016 & 0.166 & -0.986 & 793.799 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$M_p = \begin{bmatrix} 0.099 & -0.993 & 0.218 & -107.639 \\ -0.991 & -0.105 & 0.079 & -131.510 \\ -0.086 & 0.064 & 0.064 & 1\,024.545 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
畸变参数 重投影误差	$k_c = [-4.266 \quad -123.167 \quad -0.099 \quad 0.059 \quad 0]$ 0.37 pixel	$k_p = [-0.208 \quad 3.922 \quad -0.006 \quad 0.008 \quad 0]$ 0.70 pixel	

1.3 相位计算

融合结构光三维测量技术是将正弦条纹作为面结构光向物体投影,并采集光栅图像来进行三维重建,测量系统中相机内每一点与投影仪的像素应一一对应。正弦条纹的相位值蕴含着位置信息,相位信息的计算过程一般分为求解主值相位和相位展开两步^[17-18],利用相移法可以求解真实的相位信息。相移法使用多幅光栅图像计算被测物体的相位主值,图像之间的相减运算可以消除采集图像过程中存在的固定噪声,具有运算速度快,测量精度高的优点,且受物体表面反射率变化影响较小。正弦光栅条纹的强度函数为:

$$I_n(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\cos(2\pi(n-1)/N + \varphi(x,y)), n = 1, 2, \cdots, N$$
 (1)

其中, $a(x,y)$ 为条纹的背景光强, $b(x,y)$ 为条纹的调制振幅, N 为相移步数, $\varphi(x,y)$ 就是所要求取的实际相位值,利用最小二乘法可计算出 $\varphi(x,y)$ 。

$$\varphi(x,y) = \arctan \left[- \frac{\sum_{n=1}^N I_n \sin(2\pi(n-1)/N)}{\sum_{n=1}^N I_n \cos(2\pi(n-1)/N)} \right]$$
 (2)

在进行相位提取时,所得的相位因反正切函数影响会被局限在 $(-\pi, \pi)$ 区间内而形成包裹相位,为了还原

其原始的相位值,最终的绝对相位需要通过相位展开的方式获得。采用四步相移法求解主值相位,格雷码法解包裹的方法来求取相位信息。

首先向一块白板投射一组由计算机编程好的相移光栅图案和格雷码编码图案,如图 4 所示。图 5 为相机实时拍摄的对应该图像。之后对拍摄图像进行解码得到相移光栅图像的包裹相位和绝对相位,计算结果如图 6 所示。



图 4 相移图像和格雷码编码图像
Fig. 4 Phase-shift images and Gray code encoded images

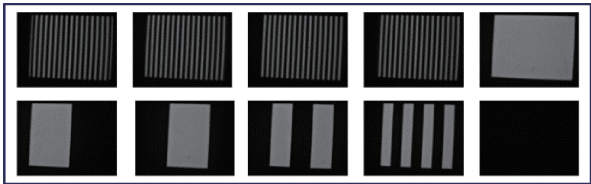


图 5 相机拍摄图像
Fig. 5 The camera takes the image

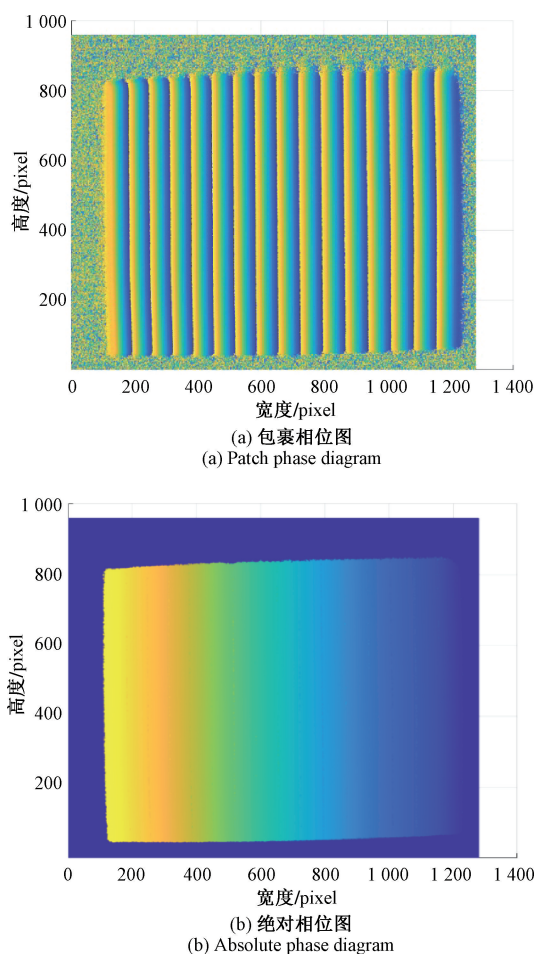


图 6 相位计算结果

Fig. 6 Phase calculation results

2 基于 DMD 的自适应掩膜

2.1 DMD-CCD 坐标映射

在高动态范围测量系统中,被测物的反射光线先经 DMD 再汇聚于 CCD 相机相平面,因此 DMD 微镜单元与 CCD 相机的像素单元存在一一对应的坐标映射关系^[19],映射精度越高,则 DMD 对被测物成像区域的调制越准确。为获取高动态图像,使 DMD 能够精确调制入射光线,需要设计映射算法解算该映射关系。BP (back propagation) 神经网络是一种多层前馈神经网络,按照误差反向传播算法为基本训练方式,不断调整网络的权值和阈值使网络误差平方和最小,具有高速的计算能力和一定的容错性,结构简单,可操作性好。麻雀搜索算法 (sparrow search algorithm, SSA) 作为近年的新型智能优化算法,受麻雀觅食和反捕食行为的启发而提出^[20],具有较好的全局搜能力,稳定性强。采用基于麻雀搜索算法优化的 BP 神经网络的方法计算得到系统内部的坐标映射,其计算流程如图 7 所示。

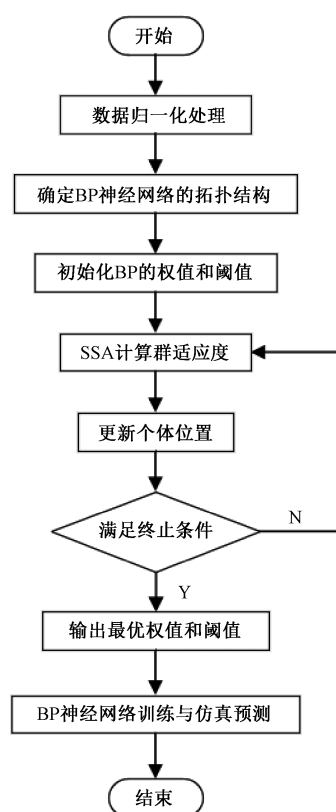


图 7 SSA 优化 BP 神经网络流程

Fig. 7 Flow chart of the BP neural network optimized by SSA

将测量系统的内部映射部分看作是未知量,采用只有一个隐含层的 3 层网络模型来计算 DMD 微镜阵列与相机像素单元之间的坐标映射关系。根据数字微镜的分辨率 1 280 pixels×800 pixels,设计 20 行 30 列的棋盘格图案。以上载 DMD 的棋盘格图像中已知图像角点坐 (x, y) 作为输入量,相机实际采集到的对应图像角点坐标 (x', y') 为输出量,剔除边缘误差较大的角点坐标,拆分 x, y 坐标分量,输入层与输出层节点个数均为 2,设置隐含层节点个数为 5,通过神经网络训练即可得到系统内部映射关系。

训练完成后,再以 7×5 的棋盘格作为上述算法精度评定的检测掩膜,如图 8 所示为利用角点检测^[21]方法检测 CCD 相机采集到的图像中的角点。

已知数字微镜上载的图像中和相机采集的图像中对应各角点的坐标,以两者之间的均方根误差作为评价标准。均方根误差 σ 越小,表示该坐标映射算法精度越高。实验数据如表 2 所示,采用改进的基于麻雀搜索算法的 BP 神经网络方法均方根误差为 0.583,这表明改进后的方法经多次重复过程所得网络的均方差精度较高,满足映射精度要求,因此选用基于麻雀搜索算法的 BP 神经网络方法实现 DMD 微镜阵列与 CCD 相机像素单元之间的映射。

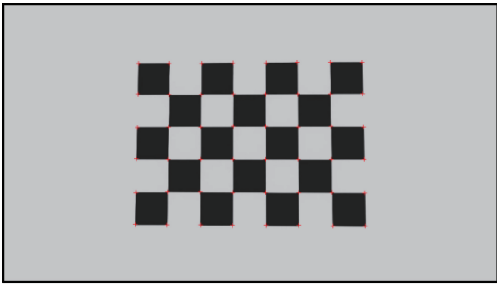


图 8 角点检测结果
Fig. 8 Corner detection results

表 2 映射算法结果
Table 2 Results of the mapping algorithm

	x	y	x'	y'
1	241	657	240.017	656.735
2	359	779	359.108	778.824
3	479	899	479.203	898.598
4	597	541	597.134	539.992
5	719	1 019	720.006	1 019.048
6	837	1 137	838.024	1 137.115
7	241	541	240.973	540.762
8	359	659	359.313	658.847
9	479	779	478.795	779.106
10	599	899	599.213	898.876

2.2 基于 PID 控制器的自适应掩膜算法

为使高动态范围扫描测量系统实现自适应调控,结合 PID 控制器设计高动态范围成像方法,能够根据相机采集到的图像生成对应的 DMD 掩膜^[22]。PID 控制算法结合比例、积分和微分 3 种环节构成控制量来实现对被控对象的控制^[23],根据输入的偏差值进行运算,结果以控制输出,因其算法简单、可靠性高、调整方便等优势而成为工业控制的主要技术之一。其中 PID 参数整定是控制系统设计的核心内容,为了加强 PID 控制器的参数整定^[24],提出一种 PID 控制器参数自整定方法,实现 PID 控制器的参数寻优,从而生成自适应掩膜,如图 9 所示为该方法的原理。

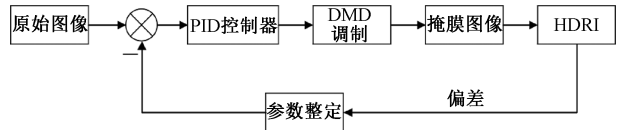


图 9 结合 PID 控制器的自适应掩膜生成方法原理
Fig. 9 Schematic of the adaptive mask generation method combined with the PID controller

结合本测量系统的成像结构及 DMD 的成像特点,把

计算机看作是 PID 控制器,以相机采集到的原始场景图像 $x(n)$ 作为输入,输出 DMD 掩膜 $y(n)$,以当前输入和前一次采集的图像 $x(n-1)$ 作差构成一个负反馈系统,则输出掩膜公式为:

$$y(n) = K_p \cdot x(n) + K_i \cdot [x(n) - x(n-1)] + K_d \cdot [x(n) - x(n-1)] \quad (3)$$

其中, K_p 、 K_i 、 K_d 为 PID 控制器的比例积分微分系数,由于只有两个时刻的输入,可以化简为:

$$y(n) = a \cdot x(n) + b \cdot x(n-1) \quad (4)$$

其中, a 、 b 为简化系数,为避免图像像素过饱和,像素点灰度值应 ≤ 255 ,因此系统的输出公式可表示为:

$$y(n) = 255 - [a \cdot x(n) - b \cdot x(n-1)] \quad (5)$$

将拍摄的图像代入到公式中,达到稳定状态后,生成掩膜上载到数字微镜,即可获取高动态范围图像。

3 实验

在对具有强反射表面的物体进行三维测量时,其表面的局部镜面反光可能会影响测量结果,利用数字微镜参与调制,可以降低图像中过饱和区域的灰度值,扩大动态范围。根据 3.2 节所述方法,结合结构光三维扫描测量技术和基于 DMD 的高动态范围测量系统,对具有强反射表面的物体进行三维扫描测量并得到高动态范围图像。实验选用边长为 20 mm 白钢标准测量块,向被测物投射结构光,会看到相机采集到的图像中出现局部高亮区域,导致被测物表面信息不完整,如图 10 所示。基于 PID 控制器算法生成自适应掩膜,如图 11 为量块的掩膜图像,加载到数字微镜上,得到高动态范围图像,图像中量块表面信息更加清晰。

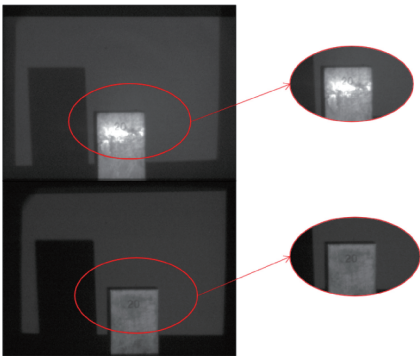


图 10 DMD 参与调制对比结果
Fig. 10 DMD involved in modulation contrast results

通过灰度直方图对 DMD 未参与调制和参与调制后的图像进行对比,如图 12 所示,调制后的图像像素点灰度值明显降低,说明该方法对局部强反射表面的三维扫描测量切实有效。

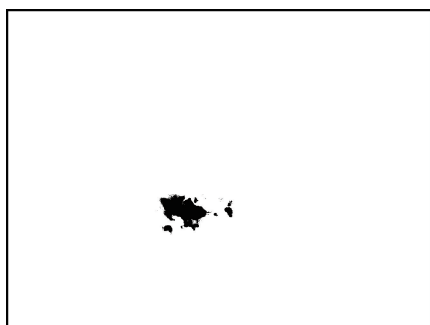
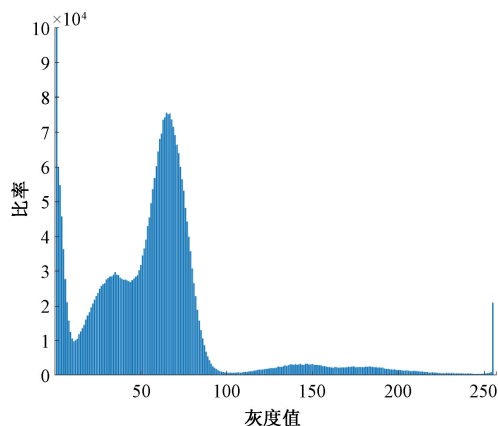


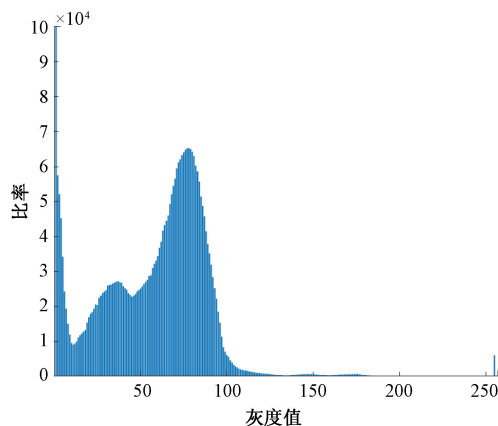
图 11 量块掩膜图像

Fig. 11 Measuring block mask image



(a) 原始图像灰度直方图

(a) Grayscale histogram of the raw image



(b) DMD参与调制的图像灰度直方图

(b) Image gray-scale histogram of the DMD involved in the modulation

图 12 灰度直方图对比

Fig. 12 Comparison of the gray-scale histogram

4 结 论

在对强反射表面物体进行三维测量时,由于表面存在过曝光区域,致使相机获取的图像出现局部像素过饱和现象,在测量系统中添加数字微镜对入射光线进行调

制可以降低图像灰度。利用麻雀搜索算法优化 BP 神经网络的方法建立了数字微镜单元与 CCD 相机像素单元的坐标映射关系,并结合 PID 控制器提出一种自适应掩膜生成方法,根据该方法对强反射金属进行了三维测量实验。实验表明,数字微镜上载掩膜后得到高动态范围图像中像素点灰度明显降低,被测物表面细节可清楚地呈现出来,便于观察。

利用数字微镜可调制入射光线的特性提出的自适应掩膜生成方法能有效消除强反射表面形成的局部反光,避免像素过饱和,为被测物三维测量时点云缺失问题提供了新思路。

参考文献

- [1] WILLIAM L, SONG Z. High-speed absolute three-dimensional shape measurement using three binary dithered patterns[J]. Optics Express, 2014, 22(22): 26752-26762.
- [2] 林辉. 高动态范围光亮表面的结构光三维形貌测量方法研究与实现[D]. 广州:广东工业大学,2017.
LIN H. Structured light based high dynamic range shiny surface 3D shape measurement technique and system development[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2017.
- [3] ZHAO S Q, ZHAO W, JUN H H, et al. Highlight removal based on the regional-projection fringe projection method [J]. Optical Engineering, 2018, 57(4): 041404.
- [4] LIU Y Z, FU Y J, ZHUAN Y H, et al. High dynamic range real-time 3D measurement based on Fourier transform profilometry[J]. Optics and Laser Technology, 2021, 138: 106833.
- [5] YANG K F, LI H, KUANG H L, et al. An adaptive method for image dynamic range adjustment[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2019, 29(3): 640-652.
- [6] SCHWARZ B, RITT G, EBERLE B. Impact of threshold assessment methods in laser-induced damage measurements using the examples of CCD, CMOS, and DMD[J]. Applied Optics, 2021, 60(22): 39-41.
- [7] 陈雪旗,姜爱民. 基于数字微镜器件的面源目标模拟实验系统研究[J]. 光学学报,2019,39(10):178-185.
CHEN X Q, JIANG AI M. Source simulation experimental system based on digital micromirror device[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 178-185.
- [8] 邢思远,王超,徐森,等. 数字微镜器件超分辨率成像光学系统装调误差影响研究[J]. 中国光学,2021,14(5):1194-1201.
XING S Y, WANG CH, XU M, et al. Influence of

- alignment error on DMD super-resolution imaging optical system[J]. Chinese Optics, 2021, 14(5): 1194-1201.
- [9] 张子健,程效军,曹宇杰,等. 结合激光与视觉点云的古遗迹三维重建应用[J]. 中国激光, 2020, 47(11): 273-282.
- ZHANG Z J, CHENG X J, CAO Y J, et al. Application of 3D reconstruction of relic sites combined with laser vision point cloud. [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(11): 273-282.
- [10] KARAMI A, MENNA F, REMONDINO F. Combining photogrammetry and photometric stereo to achieve precise and complete 3D reconstruction [J]. Sensors, 2022, 22(21): 8172-8172.
- [11] 万杰,张进,刘远航,等. 运用光线追迹算法的高温物体视觉三维测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(8): 122-131.
- WAN J, ZHANG J, LIU Y H, et al. Visual three-dimensional measurement of high temperature object using light tracing algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(8): 122-131.
- [12] YU Q, ZHAG Y L, ZHANG Y, et al. A novel chromatic confocal one-shot 3D measurement system based on DMD[J]. Measurement, 2021, 186: 110140.
- [13] 张春萍,王庆. 光场相机成像模型及参数标定方法综述[J]. 中国激光, 2016, 43(6): 270-281.
- ZHANG CH P, WANG Q. Survey on imaging model and calibration of light field camera[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(6): 270-281.
- [14] 朱勇建,黄振,马俊飞,等. 光栅投影三维测量系统标定技术研究[J]. 应用光学, 2020, 41(5): 938-946.
- ZHU Y J, HUANG ZH, MA J F, et al. Study on calibration method of grating projection 3D measuring system[J]. Journal of Applied Optics, 2020, 41(5): 938-946.
- [15] 石岩青,常彩霞,刘小红,等. 面阵相机内外参数标定方法及进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(24): 9-29.
- SHI Y Q, CHANG C X, LIU X H, et al. Calibration methods and progress for internal and external parameters of area-array camera [J]. Advances in Lasers and Optoelectronics, 2021, 58(24): 9-29.
- [16] 刘今越,刘佳斌,郭志红,等. 一种基于面结构光的刀具三维测量系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(12): 1884-1891.
- LIU J Y, LIU J B, GUO ZH H, et al. A three-dimensional tool measurement system based on surface structured light[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(12): 1884-1891.
- [17] 侯艳丽,梁瀚钢,李付谦,等. 相位测量轮廓术中时空结合的三频相位展开[J]. 光学学报, 2022, 42(1): 178-186.
- HOU Y L, LIANG H G, LI F Q, et al. Spatial-temporal combined phase unwrapping in phase measurement profilometry[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(1): 178-186.
- [18] 陈劲松,曹益平,吴海涛. 基于二元光栅特征提取的相位展开方法[J]. 光学与光电技术, 2022, 20(2): 17-25.
- CHEN J S, CAO Y P, WU M T. Phase unwrapping method based on feature extraction of binary grating[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2022, 20(2): 17-25.
- [19] 罗辉. 基于数字微镜器件的像素级调光技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- LUO H. Study of pixel-level light modulating technology based on DMD [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [20] GUO J H, LIU P Q, AN Z Y. Research on computer prediction model using SSA-BP neural network and sparrow search algorithm [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2033(1): 012003.
- [21] 江涛,李媛,贺晨龙. 基于轮廓角点检测的螺纹关键参数视觉测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(7): 54-61.
- JIANG T, LI Y, HE CH L. Visual measurement method of thread key parameters based on contour corner detection [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(7): 54-61.
- [22] LIN Q, SUN Z, CORBETT J. An adaptive masking method for beam halo measurement by a digital micro mirror device [J]. Journal of Instrumentation, 2021, 16(11): T11005.
- [23] 袁静雨,虞启凯,张凡雨. 基于 Matlab 的模糊自整定 PID 控制器仿真研究[J]. 仪器与设备, 2020, 8(4): 117-123.
- YUAN J Y, YU Q K, ZHANG F Y. Simulation study of fuzzy self-tuning PID controller based on MATLAB[J]. Instrumentation and Equipments, 2020, 8(4): 117-123.
- [24] 李恒,郭星,李炜. 基于改进的萤火虫算法的 PID 控制器参数寻优[J]. 计算机应用与软件, 2017, 34(7): 227-230.
- LI H, GUO X, LI W. PID controller parameter optimization based on improved glowworm swarm

optimization[J]. Computer Applications and Software, 2017, 34(7): 227-230.

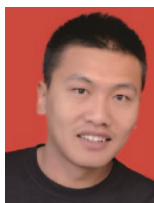
作者简介



郑小钰, 于 2020 年在沈阳工业大学获得学士学位, 现为沈阳工业大学硕士在读, 主要研究方向为光学测量。

E-mail: 1335054045@qq.com

Zheng Xiaoyu received a B. Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2020. She is now a M. Sc. degree candidate from Shenyang University of Technology. His main research interest includes optical measurement.



董祉序(通信作者), 分别于 2011 年和 2017 年在沈阳工业大学获得学士学位和博士学位, 现为沈阳工业大学教授, 主要研究方向为复杂曲面数控制造技术与装备、智能检测及信号处理。

E-mail: dong_zhixu@126.com

Dong Zhixu (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Shenyang University of Technology in 2011 and 2017, respectively. He is now a professor in Shenyang University of Technology. His main research interests include NC manufacture technology and equipment of complex surface, smart test and signal processing.