

DOI: 10.7652/xjtuxb201708013

面曝光 3D 打印机光强检测补偿系统研究与实现

邱志惠¹, 陈号^{1,2}, 黄祺², 戴晨雨²

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 苏州秉创科技有限公司, 215152, 江苏苏州)

摘要: 针对面曝光 3D 打印设备投影仪光强分布不匀的问题, 提出了一套完整的修正方案, 通过在上位机软件中添加灰度掩膜的方式实施光强补偿。利用紫外光传感器、Arduino 控制板、步进电机等搭建自动化数据采集设备; 设计算法剔除测量误差, 提升传感器测量精度至 $\pm 10^{-5}$ W/cm²。本系统可根据传感器反馈逼近直接获取离散的补偿掩膜灰度数据, 建立灰度分布数学模型并利用 Qt setPixel 函数完成掩膜绘制, 在简化计算、提高校准效率方面效果显著。经仪器检测及实际打印验证, 提出的投影仪光强检测及补偿方案能够有效消除数字投影仪光强分布误差, 将所测投影仪光强极差由 5×10^{-4} W/cm² 缩小至 5×10^{-5} W/cm² 以下。对于文中选用的树脂材料, 可在 0.1 mm 成形精度等级降低投影仪光强不匀造成的负面影响。

关键词: 面曝光 3D 打印; DLP 投影仪; 光强补偿

中图分类号: TH164 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)08-0077-07

Measurement and Compensation of DLP Projector Light Intensity for Mask Projection Stereolithography

QIU Zhihui¹, CHEN Hao^{1,2}, HUANG Qi², DAI Chenyu²

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Suzhou Bing Chuang Technology Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215152, China)

Abstract: A novel method is proposed to solve inhomogeneous light distribution existing in DLP projector by inserting a calibration mask into the upper-computer software. An automatic data acquisition equipment with UV light sensor, Arduino and stepping motors is invented, where the designed strategy is able to improve UV sensor precision to $\pm 10^{-5}$ W/cm². This system directly collects calibration mask gray data according to the feedback of light sensor, establishes mathematical model of the mask, and draws it with Qt setPixel function, which significantly improves work efficiency. The calibration results of this system are verified by measurement and experiment. DLP projector light intensity range is diminished from 5×10^{-4} W/cm² to 5×10^{-5} W/cm². For the photosensitive resin, the negative impact of inhomogeneous light intensity can be reduced at the forming accuracy of 0.1 mm.

Keywords: mask projection stereolithography; DLP projector; light intensity compensation

面曝光 3D 打印^[1]是一种利用动态掩膜直接实现光敏树脂整面曝光固化的快速成形工艺, 具有成形速度快、打印精度高等突出优点, 在精密铸造, 生物医疗等方面应用十分广泛^[2-3]。随着德州仪器

收稿日期: 2017-02-09。 作者简介: 邱志惠(1962—), 女, 副教授, 硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375372)。

网络出版时间: 2017-05-05 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170505.0950.002.html>

DLP 数字投影仪发展日益成熟,基于 DLP 的面曝光 3D 打印愈加受到广泛关注^[4]。

作为面曝光成形设备的关键组成部分,DLP 投影仪因光学器件加工、装配精度所限普遍存在光强分布误差^[5]。同一灰度图像经投影仪投出后各像素点之间光强差距较大,导致树脂材料固化深度出现差异,单层模型翘曲^[6],影响成形质量甚至造成打印失败,是进一步提升本工艺成形精度急需解决的关键问题之一。针对这一问题,西安工程大学胥光申、罗声等人做了大量研究^[7-9],开发出基于硅光电池的光照度测量系统,并利用数据拟合技术实现了投影仪像面光强均匀化。文献[10]利用光敏电阻测量光强作为计算依据进行校准,虽然能够较为精确地解决问题,但校准设备结构复杂,距离产业化应用仍有一定距离。文献[11-13]采用相机拍照反馈作为像面光强均匀性评价手段,但该方法主要针对投影仪常规彩色成像特性,与面曝光工艺中投影仪校准需求存在一定差距,尚未得到广泛应用。

本文基于前人的研究工作,结合 DLP 3D 打印设备特点,提出一种简便的紫外光源投影仪光强测量补偿方案,并开发出相应自动化校准设备。

1 光强补偿方案及数据检测系统

1.1 补偿方案概述

在面曝光快速成形设备中,切片后的模型掩膜图像经投影仪投射至高透玻璃树脂槽,引发光敏树脂聚合反应^[14]。由于不同投影区域光强差距较大,树脂固化程度亦存在较大差别。本文所提出补偿方案基本原理如图 1 所示,通过在 3D 打印设备上位机软件中添加灰度掩膜的方式实现投影仪光强补偿,在原始光强较强处设置较低灰度值,在原始光强较弱处设置较高灰度值,使补偿掩膜与原始曝光掩膜相互叠加,实现了整个投影区域光强均匀分布的效果。

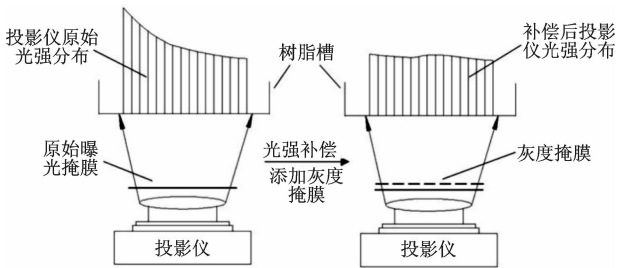


图 1 投影仪光强补偿方案

由上述可知,获得精确的补偿掩膜灰度数据是保证修正效果的关键。采用如图 2 所示数据采集方

案,首先将整个投影区域划分为若干个相同大小的单元格,每一小格对应一个投射至传感器的光斑。根据样本点数据确定光斑初始灰度,将所反馈的光强与参考光强进行对比,调整光斑灰度直至满足要求,记录下来。然后进入下一检测点,重复上述步骤完成整个投影区域测量,照此方法直接完成补偿掩膜灰度数据的获取,省去已有补偿方案中求解投影仪投射光强与所投掩膜灰度值函数关系的步骤。最后,将测得的离散校准掩膜灰度数据导入数据拟合软件,计算可得以投影区域 XY 坐标为自变量、掩膜灰度 H 为因变量的函数关系,进而得出连续分布的掩膜灰度数据,获得补偿掩膜。

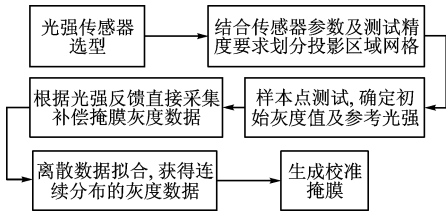


图 2 补偿掩膜灰度数据采集方案

依照以上方案,投影仪光强测量补偿系统的构建主要包括光强传感器选型、检测设备设计、数据采集及处理算法实现等部分,下文将针对这些部分进行详细论述。

1.2 光强传感器选型

结合本文实验中 3D 打印设备所用 NVM 紫外光投影仪性能参数,选用上海容久科技 RGS-UVA 紫外线传感器作为光强数据测量装置。该传感器光谱响应为 320~400 nm,线性度为 0.1%,能够主动剔除可见光影响,并根据所测紫外线强度输出 0~5 V 的对应电压。测试系统中将其反馈信号连入数模转换设备,可获得量程为 0~0.004 W/cm² 的光强数据。为了排除采集过程中传感器随机误差对设备精度的影响,获取更加精确的测量数据,采用数理统计方式对测量数据进行处理^[15],相关算法如图 3 所示。

为验证误差剔除效果,处理前后分别以 1 s 间隔针对同一紫外光源采集 50 个数据点,绘制如图 4 所示的散点图。从图中可见,该算法可将传感器测量波动限制在 $\pm 10^{-5}$ W/cm² 以内,有效提高数据采集质量。

1.3 补偿掩膜灰度数据采集与掩膜生成

补偿掩膜灰度数据采集工作较为繁琐且费时费力,为此我们基于 Qt 程序开发框架编写一套上位机数据采集软件,并依托 Arduino UNO R3 控制板设计如图 5 所示的自动化数据采集平台。上位机软

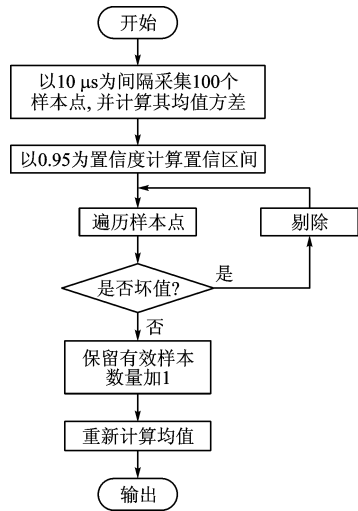
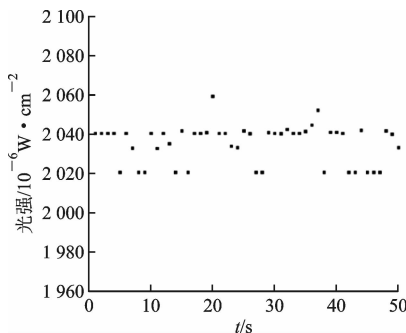
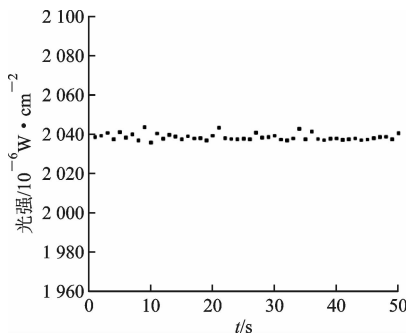


图 3 传感器数据校准算法



(a) 优化前传感器数据散点图



(b) 优化后传感器数据散点图

图 4 优化前后传感器采集精度对比

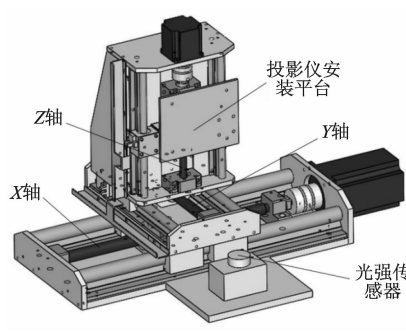


图 5 投影仪光强检测平台

件通过串口通讯获得掩膜灰度数据,并指导 Arduino 驱动板控制步进电机转动,驱动丝杠滑块机构带动投影仪沿 XY 平面运动,保证单元格切换后测试光斑仍能投射至传感器中央区域。本系统步进电机步距角 e 为 0.9° ,丝杠导程 p 为 2 mm,带入滑块单步行程 L 的计算公式

$$L = \frac{e}{360} p$$

可得投影仪单步运动距离为 0.005 mm。经测量传感器有效感应区域直径为 6 mm,投射至其上的方形光斑边长约为 3 mm,故该设备运动系统满足测量定位精度需求。

实际测量时,首先将待测投影仪安装至 3D 打印设备上,调整镜头焦距至树脂槽底部固化平面投影清晰,进行树脂成形试验,确定目标光强并记录。然后保持焦距不变将投影仪安装至测量设备,调整 Z 轴高度至传感器探头平面投影清晰,整个测试过程中保持 Z 轴坐标不变,确保测试系统与实际打印系统坐标统一。以边长为 60 像素的小正方形,将 NVM 投影仪 $1\,920 \times 1\,080$ 像素投影区域划分为 576 等份,如图 6 所示,分别将各个单元格投射至光强传感器,以前文所述传感器优化算法中反馈的光强均值为参照,获取整张补偿掩膜灰度数据。首先选取左上角第 1 单元为参考单元格,调整投射单元格的灰度数值,使该点传感器反馈的光强 I_1 为某一常用固化光强。针对本文选取的树脂材料,可取 $I_1 = 2\,050 \times 10^{-6} \text{ W/cm}^2$ 。若更换其他树脂,该参数还需事先进行固化测试确定。上位机记录该点灰度 H_1 同时发送指令,控制 XY 轴步进电机按照事先计算的移动距离移动投影仪,待到达预定位置后切换投射单元格,保证下一单元格光斑投射至光强传感器感应区域中央。保持 H_1 灰度不变,传感器反馈第 2 单元格光强 I_2 ,若 I_2 大于 I_1 说明此区域原始光强较高,应降低补偿掩膜灰度加以抵消。反之,若 I_2 小于 I_1 ,则应提高掩膜灰度加以补偿。如此反复调

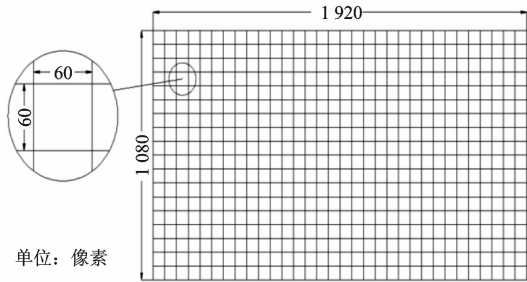


图 6 投影区域单元格的划分

整直至 I_2 与 I_1 相等或满足某一精度区间,记录该单元格灰度 H_2 ,进入下一单元格,重复上述步骤直至完成整个投影区域补偿掩膜灰度数据采集工作。详细算法如图 7 所示。

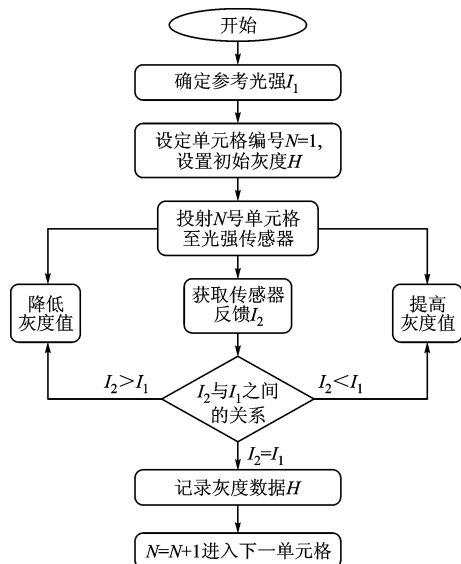


图 7 灰度数据采集算法

编写脚本文件,将所测灰度数据及对应的 XY 坐标数值导入数据拟合软件,利用拟合公式搜索功能确定最佳公式模型为多项式,其中 X 项最高次数为 4, Y 项最高次数为 3。然后,以投影区域 X 轴、 Y 轴坐标为自变量,补偿掩膜灰度 H 为因变量求解函数关系,获得数学模型如下

$$\begin{aligned}
 H = & 189.3 + 0.031\ 62X + 0.007\ 488Y + \\
 & 6.549 \times 10^{-5} X^2 + 4.873 \times 10^{-5} XY - \\
 & 3.353 \times 10^{-5} Y^2 - 7.771 \times 10^{-8} X^3 - \\
 & 2.164 \times 10^{-8} X^2 Y - 4.854 \times 10^{-8} XY^2 + \\
 & 2.114 \times 10^{-8} Y^3 + 2.122 \times 10^{-11} X^4 - \\
 & 3.83 \times 10^{-12} X^3 Y + 3.601 \times 10^{-11} X^2 Y^2 - \\
 & 1.306 \times 10^{-11} XY^3
 \end{aligned} \quad (2)$$

该数据模型复相关系数为 0.996,均方根误差为 0.943,拟合效果如图 8 所示。

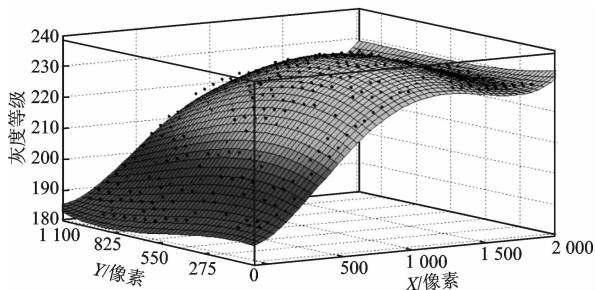


图 8 数据模型拟合效果

将数学模型带入程序求解投影区域内每一像素点对应补偿灰度数值,利用 Qt 开发框架 QImage 类 setPixel 函数,即可绘制如图 9 所示灰度补偿掩膜。



图 9 补偿掩膜示例

2 补偿效果验证

为验证补偿掩膜实际效果,分别采用传感器直接测量与实际打印后对比成形效果两种方式展开相关实验。

2.1 补偿前后光强分布比对

利用上文所述投影仪光强检测平台,在其上位机软件中添加补偿效果验证功能,利用 Qt 编程框架配置实现的 QPainter 类 ImageComposer 函数,将计算所得校准掩膜与原始投影图像叠加,叠加模式设为 QPainter::CompositionMode_SourceOver,叠加效果示例如图 10 所示。

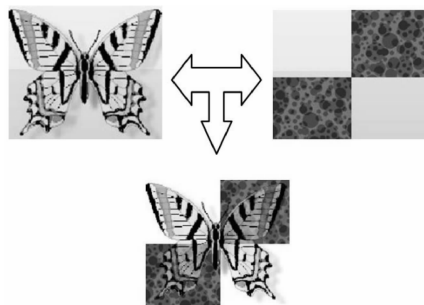
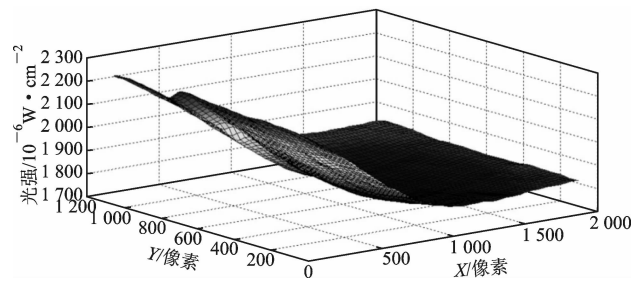


图 10 Qt 图像叠加示例

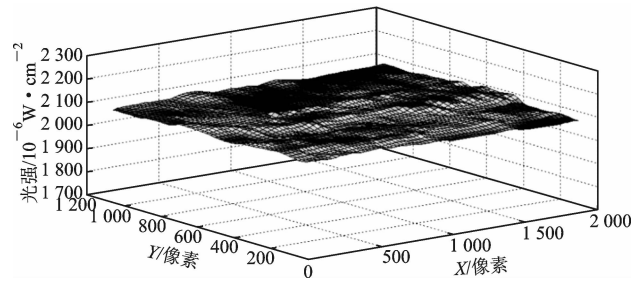
掩膜添加完成后,再次按照 1.3 小节所述测量方法,分别测试同等灰度曝光掩膜有无补偿情况下的投影仪光强分布,绘制如图 11 所示的光强分布曲面图。对比图 11a、图 11b 两图可见,补偿前投影仪原始光强分布均匀性较差,左侧光强较高,整体数值向右递减并趋于平稳,光强极差大于 $5 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2$ 。补偿后投影区域光强分布均匀,数值极差小于 $5 \times 10^{-5} \text{ W/cm}^2$,修正效果明显。

2.2 实际打印效果验证

投影仪光强分布不均造成树脂固化精度下降主要体现在细节成形方面,针对这一特点,设计如图 12 所示的曝光掩膜,该掩膜由数百个黑白相间单元



(a) 投影仪原始光强分布



(b) 补偿后投影仪光强分布

图 11 补偿前后投影仪光强分布

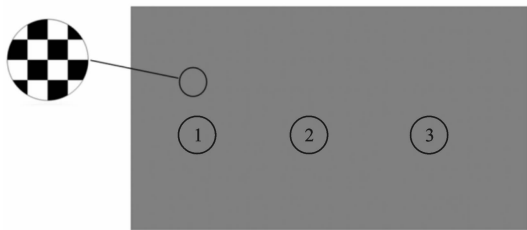
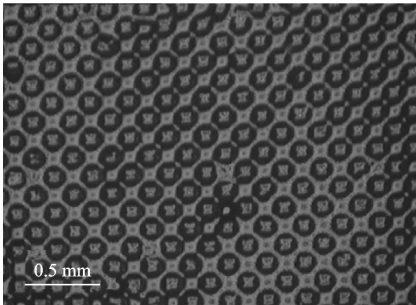
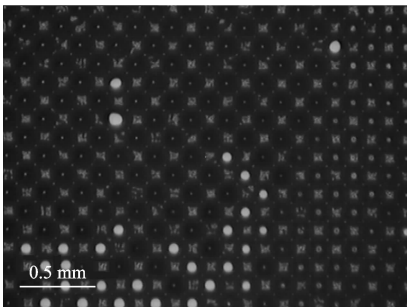


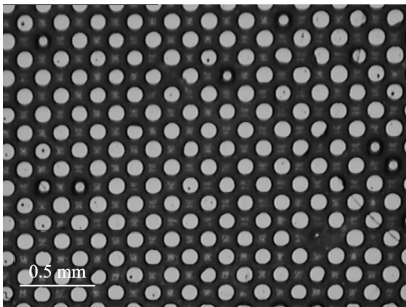
图 12 曝光验证掩膜



(a) 1 号区域显微影像



(b) 2 号区域显微影像

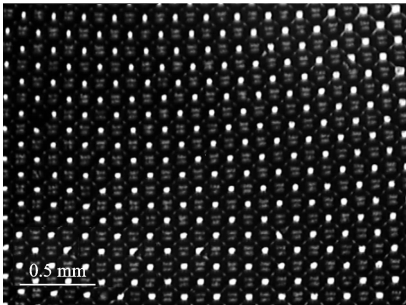


(c) 3 号区域显微影像

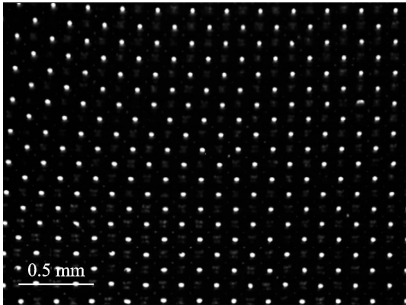
图 13 未补偿情况下树脂固化情况

格组成,每个单元格边长为 0.1 mm。

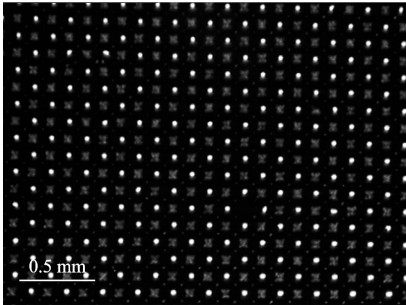
当光敏树脂细节成形状态较好时,黑色方格树脂不固化,白色方格固化,反之则会由于光强扩散作用^[16]致使白色方格阻塞。根据图 11a 投影仪原始光强分布状况,选取图 12 曝光验证掩膜中 1、2、3 号



(a) 1 号区域显微影像



(b) 2 号区域显微影像



(c) 3 号区域显微影像

图 14 补偿后树脂固化情况

区域,采用三丰 VMS-3020 影像仪,以 85 倍放大系数观测光强补偿前后成形的样件,相关图像如图 13、图 14 所示。结合图 11 投影仪光强分布及实际成形图片可知:未进行补偿操作时,1 号区域光强最强,实际成形样件表现为白色小孔全部阻塞;2 号区域光强逐渐变弱,样件相应表现为阻塞情况好转,部分小孔未阻塞;3 号区域光强最弱,样件小孔均未阻塞。与添加补偿掩膜进行对比,成形样件 1、2、3 号区域小孔阻塞情况基本类似,说明整个投影区域光强分布较为均匀,本方案修正效果良好。

3 结 论

本文针对面曝光快速成形中投影仪光强分布不均匀问题,提出一套完整的检测和补偿方案,利用光强传感器与相关算法相互结合,直接获得补偿掩膜灰度数据,并对投影仪光强补偿原理、系统设计、设备结构等进行了研究及表述。

通过验证实验结果可知,本文所提方案能够有效减小面曝光快速成形工艺中因投影仪光强分布不均匀造成的成形精度误差。本方案通过反馈逼近的闭环检测思路替代原有补偿方案中求解投影仪光强与掩膜灰度函数关系的步骤,直接获得补偿掩膜灰度数据,省去求解投影仪投射光强与像素灰度函数关系的步骤,可大大简化计算过程。该方案搭配开发的自动化数据采集系统,能够有效提升数据检测效率,可直接应用于面曝光 3D 打印设备工业化生产。

本测量补偿方案也有一些有待提高的不足之处。由于本实验 NVM 投影仪投射光强与像素灰度成正比关系,故即使实际打印成形中改变固化光强,补偿掩膜依旧适用。然而,仍有一些投影仪光强与像素灰度呈非线性相关,此时若改变树脂固化光强,还需重新生成补偿掩膜。根据当前市场调研显示,用户购买 3D 打印设备后,所用树脂型号相对固定,更改固化光强的需求较少,故本文仅针对成形设备光强固定案例。此外,实验受制于所选紫外线传感器物理性能,原始光强数据也存在较大的随机误差,本文虽应用概率统计相关算法对其加以剔除,但对于系统本身测量的不确定性,仍需进一步展开分析实验。

参考文献:

[1] 方浩博,陈继民. 基于数字光处理技术的 3D 打印技术[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(12): 1775-1782.

FANG Haobo, CHEN Jimin. 3D printing based on digital light processing technology [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41(12): 1775-1782.

[2] 黄宽,陈继民,方浩博,等. 面曝光快速成型过程中树脂收缩变形[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(12): 1828-1831.

HUANG Kuan, CHEN Jimin, FANG Haobo, et al. Shrinkage deformation research of photosensitive resin in mask projection stereolithography [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41(12): 1828-1831.

[3] 李东方,陈继民,袁艳萍,等. 光固化快速成型技术的进展及应用[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(12): 1769-1774.

LI Dongfang, CHEN Jimin, YUAN Yanping, et al. Development and application of stereo lithography apparatus [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41(12): 1769-1774.

[4] 王伊卿,贾志洋,赵万华,等. 面曝光快速成形关键技术及研究现状[J]. 机械设计与研究, 2009, 25(2): 96-100.

WANG Yiqing, JIA Zhiyang, ZHAO Wanhua, et al. The key technology and research status of mask projection stereolithography [J]. Machine Design and Research, 2009, 25(2): 96-100.

[5] 杨根,马训鸣,胥光申,等. 面曝光快速成形系统中图像的畸变校正[J]. 西安工程大学学报, 2011, 25(5): 712-716.

YANG Gen, MA Xunming, XU Guangshen, et al. The distortion correction of image in mask projection stereolithography system [J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2011, 25(5): 712-716.

[6] 谭东才,胥光申,罗声,等. 用于面曝光快速成形系统的光照度测量系统研究[J]. 光电技术应用, 2010, 25(3): 53-57.

TAN Dongcai, XU Guangshen, LUO Sheng, et al. Research on illumination measuring system for mask projection stereolithography [J]. Electro-Optic Technology Application, 2010, 25(3): 53-57.

[7] 杨剑. 面曝光快速成形光固化实验研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2011: 18-20.

[8] 杨剑,胥光申,罗声,等. 面曝光快速成形系统的光学成像系统设计[J]. 西安工程大学学报, 2011, 25(1): 68-72.

YANG Jian, XU Guangshen, LUO Sheng, et al. The design of imaging optical system in mask projection stereolithography system [J]. Journal of Xi'an Poly-

- technic University, 2011, 25(1): 68-72.
- [9] 潘焕, 罗声, 胥光申, 等. 面曝光快速成形系统中紫外光辐照度分布研究 [J]. 西安工程大学学报, 2009, 23(6): 53-57.
PAN Huan, LUO Shen, XU Guangshen, et al. Research on the distribution of ultraviolet irradiance in an integral stereolithography system [J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2009, 23(6): 53-57.
- [10] ZHOU Chi, CHEN Yang. Calibrating large-area mask projection stereolithography for its accuracy and resolution improvements [C]//Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, Texas, USA: [s. n.], 2009: 82-97.
- [11] 陶奇, 徐海松, 邹文海, 等. 投影显示亮度均匀性稳健校正方法 [J]. 光学报, 2009, 29(4): 918-922.
TAO Qi, XU Haisong, ZOU Wenhai, et al. Robust correction method for projection display luminance uniformity [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(4): 918-922.
- [12] MAJUMDER A, STEVENS R. LAM: luminance attenuation map for photometric uniformity in projection based displays [C]//Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. New York, USA: ACM, 2002: 147-154.
- [13] NAYAR S K, PERI H, GROSSBERG M D, et al. A projection system with radiometric compensation for screen imperfections [EB/OL]. [2016-12-10]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.147.3020&rep=rep1&type=pdf>.
- [14] 朱俊飞, 龚灵, 樊彬, 等. 光引发剂的研究现状及进展 [J]. 涂料工业, 2010, 40(5): 74-79.
ZHU Junfei, GONG Ling, FAN Bin, et al. Research status and progress of photoinitiator [J]. Paint & Coatings Industry, 2010, 40(5): 74-79.
- [15] 刘友霖. 测量数据处理中的坏值剔除及其算法 [J]. 南京邮电学院学报, 1986, 6(4): 76-82.
LIU Youlin. The exclusion and algorithm of errors in the measurement of data processing [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications, 1986, 6(4): 76-82.
- [16] ZHOU C, CHEN Y, WALTZ R A. Optimized mask image projection for solid freeform fabrication [J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2009, 131(6): 751-760.

(编辑 杜秀杰)

(上接第58页)

- [8] DANG U, RUDER M, SCHÖBER R, et al. MMSE beamforming for SC-FDMA transmission over MIMO ISI channels [J]. EURASIP Journal of Advances in Signal Processing, 2011, 58(11): 1-6.
- [9] WU P, SCHÖBER R, BHARGAVA V. Optimal Tx-BF for MIMO SC-FDE systems [J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(8): 1509-1512.
- [10] ZHAO L, SHA X, ZHENG F, et al. Achievable sum rates of MIMO SC-FDMA systems with different receivers [C]//Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 153-158.
- [11] 董增福. 矩阵分析教程 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005: 110-125.
- [12] CASTANHEIRA D, SILVA A, DINIS R, et al. Efficient transmitter and receiver designs for SC-FDMA based heterogeneous networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(7): 2500-2510.
- [13] MARSHALL A, OLKIN I, ARNOLD B. Inequalities: the theory of majorization and its applications [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2011: 297-343.
- [14] LOYKA S, CHARALAMBOUS C. Novel matrix singular value inequalities and their applications to uncertain MIMO channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2015, 61(12): 6623-6634.

[本刊相关文献链接]

- 朱正仓, 赵季红, 唐睿, 等. 移动中继协助下终端直通中的模式选择和资源分配方案. 2016, 50(10): 111-117. [doi: 10.7652/xjtuxb201610017]
- 严飞, 李国兵, 张国梅, 等. 大规模 MIMO 系统中单精度模数转换器的量化门限设置方案. 2016, 50(8): 45-51.
- 侯兴松, 张兰. 方向提升小波变换域稀疏滤波的自然图像贝叶斯压缩感知. 2014, 48(10): 15-21. [doi: 10.7652/xjtuxb201410003]
- 杨阳, 廖学文, 高贞贞, 等. 多小区终端直通异构网络中利用图论的资源分配方案. 2014, 48(10): 22-28. [doi: 10.7652/xjtuxb201410004]
- 李巍, 李国兵, 朱世华, 等. 一种采用空时网络编码的多向中继通信方案. 2014, 48(2): 80-85. [doi: 10.7652/xjtuxb201402014]

(编辑 刘杨)