

## 激光并行加工DM码实验研究

翟中生 李梦雨 刘春利 陈波 刘顿

### Experimental study on laser parallel processing of DM code

ZHAI Zhongsheng, LI Mengyu, LIU Chunli, CHEN Bo, LIU Dun

引用本文:

翟中生, 李梦雨, 刘春利, 等. 激光并行加工DM码实验研究[J]. 应用光学, 2021, 42(6): 1115–1121. DOI: 10.5768/JAO202142.0605002

ZHAI Zhongsheng, LI Mengyu, LIU Chunli, et al. Experimental study on laser parallel processing of DM code[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(6): 1115–1121. DOI: 10.5768/JAO202142.0605002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0605002>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 复杂光照下QR码图像二值化算法研究及应用

Research and application of binarization algorithm of QR code image under complex illumination

应用光学. 2018, 39(5): 667–673 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0502002>

#### 层析法计算三维物体全息图的并行加速研究

Hologram speed-up computation of slice-based 3D objects using GPU parallel computing method

应用光学. 2019, 40(4): 620–626 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0402006>

#### 椭球粒子烟雾浓度对激光偏振度影响的实验研究

Experimental study on impact of ellipsoidal particle smoke particle smoke concentration on laser DOP

应用光学. 2018, 39(6): 921–928 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0607002>

#### Y波导调制器残余强度调制研究

Residual intensity modulation of Y-waveguide modulator

应用光学. 2017, 38(6): 974–978 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0605002>

#### 批量高速二维码视觉检测识别系统

Identification system for batch of two-dimensional code with high speed based on machine vision

应用光学. 2021, 42(2): 276–282 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0202004>

#### 半导体激光器在激光遥控制导中的空间耦合

Spatial coupling of semiconductor laser in guidance of laser remote control

应用光学. 2017, 38(6): 1006–1011 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0607001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2021) 06-1115-07

# 激光并行加工 DM 码实验研究

翟中生, 李梦雨, 刘春利, 陈 波, 刘 顿

(湖北工业大学 机械工程学院 现代制造质量工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068)

**摘 要:** DM (data matrix) 码信息存储容量大、编码范围广、可靠性高, 是信息交流的重要载体。为了实现 DM 码并行加工方法, 分析了 DM 码间距值与灰度值对识别时间的影响规律, 并对不同情况下的 DM 码进行多次扫描, 记录识读时间, 确定了 DM 码识读成功的临界圆点直径为 11 像素, 临界灰度值为 220。在此基础上, 设计了一种基于空间光调制器的 DM 码并行加工方法, 并在石英玻璃内部进行了激光并行加工 DM 码实验验证, 与传统的单光束激光标刻二维码的方式相比, 加工效率得到了提高。

**关键词:** DM 码; 圆点直径; 灰度值; 空间光调制器; 激光并行加工

中图分类号: TN249

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202142.0605002

## Experimental study on laser parallel processing of DM code

ZHAI Zhongsheng, LI Mengyu, LIU Chunli, CHEN Bo, LIU Dun

(Hubei Key Laboratory of Modern Manufacturing Quality Engineering, School of Mechanical Engineering,  
Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

**Abstract:** The data matrix (DM) code has large information storage capacity, wide coding range and high reliability, which is an important carrier of people's daily information exchange. In order to realize the parallel processing method of DM code, the influence of the distance value and gray value of DM code on the recognition time was analyzed experimentally. The DM codes under different conditions were scanned several times, and the reading time was recorded. The critical dot diameter value of DM code was determined to be 11 pixels, and the critical gray value was 220. On this basis, a parallel processing method of DM code based on spatial light modulator was designed, and experimental verification of laser parallel processing of DM code was carried out in quartz glass. Compared with the traditional single-beam laser marking two-dimensional code, the processing efficiency was improved.

**Key words:** data matrix code; dot diameter; gray value; spatial light modulator; laser parallel machining

## 引言

直接标识技术<sup>[1-2]</sup>和条码技术的结合发展, 以其准确率高、可靠性强、耐久性、防伪等技术特点, 已成为产品信息提取和信息跟踪的重要途径, 手机扫码以其方便快捷的特点在我们日常生活中越来越普遍。20 世纪末, 美国国家航空航天局、美国国防部与工业领域的波音、空客等共同研制直接标识技术, 经过多年的努力, 最终确定以撞击、电化学腐蚀标识<sup>[3]</sup>、激光标刻<sup>[4]</sup>、

喷墨标识等作为零部件的主要标识方式。在这几种标识方法中, 激光标刻在标刻速度与标刻质量上具有很大优势, 能较大程度上保证标刻图像的质量<sup>[5-6]</sup>。

DM(data matrix)二维条码原名 Data code, 由美国国际资料公司(international data matrix, ID matrix)于 1989 年发明<sup>[7]</sup>。DM 码是一种矩阵式二维条码, 其设计初衷是为了能够在更小的条码标签上储存更多数据信息。DM 码有 ECC000-140

收稿日期: 2021-06-04; 修回日期: 2021-08-13

基金项目: 国家自然科学基金(32071457)

作者简介: 翟中生(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光加工、光电检测方面的研究。E-mail: zs.zhai@mail.hbut.edu.cn

与 ECC200 两种类型,其中 ECC200 由于演算法比较容易且尺寸大小弹性可调,较为普遍<sup>[8]</sup>。

激光标刻二维码有着精度高、速度快、标注持久性强、非接触、无污染等优势,近年来众多科研人员参与到激光标刻二维码的研究当中。西北工业大学王苏安博士<sup>[9]</sup>采用激光标刻技术和二维条码技术相结合的方式,在刀具表面激光标刻出了 DM 二维条码,对影响刀具表面激光标刻二维码识别的因素做了全面的分析,为刀具标识以及信息跟踪提供了新的方法和技术。李夏霜<sup>[10]</sup>等人用 YLP-H10 光纤激光打标机在铝合金表面激光标刻出了 DM 码,研究了 DM 码的识读质量、制作效率与激光标刻工艺参数之间的关系,并获取了识读质量、标记制作时间综合最优的激光标刻工艺参数组合,为铝合金及其他金属激光标刻 DM 码的识读质量与标刻时间的控制提供了理论基础和实现方法。Th. Dumont<sup>[11]</sup>等人研究了在玻璃上激光标刻 DM 码,通过确定激光通量、脉冲数和激光波长等参数,证明了该技术在工业环境的可行性,为玻璃标签在制药行业的应用奠定了基础。

国内外对于激光直接标刻二维条码技术的研究已经取得了一定的成果,但大都是利用扫描振镜进行的单束激光标刻方法,这种方法加工效率低,标记制作时间长,不利于产业化发展。本文在利用电脑画图软件绘制 DM 码图像确定其识读成功的临界值基础上,提出了一种基于空间光调制器(spatial light modulator, SLM)的激光并行加工方法,将 DM 码以多光束点阵的形式生成,在石英玻璃内部完成了并行加工 DM 码的实验,提高了加工效率。表面加工主要用于非透明材料,内部加工用于透明材料。在透明材料内部加工 DM 码,可增强防伪性,不影响材料的表面质量,同时可避免 DM 码的磨损。

## 1 实验原理

DM 码的形状为正方形或长方形,由众多黑色和白色小方格以二位元码(binary-code)的编码方式组成,黑色和白色小方格为数据单元。DM 码的符号结构分为“L”型寻边区(“L” pattern)、数据区(data region)、静区(quiet zone)。“L”型寻边区是 DM 码图形与数据区域的边界,包括实心边界和虚线边界,宽度为一个数据单位,起到定位和定义条

二维码大小的作用。静区包围着“L”型寻边区,一般为一个数据单位宽度,主要作用是将二维条码与其他背景信息隔离。数据区包含了二维条码的编码信息,由规则排列的多个数据单元组成,图 1 是 DM 码的结构示意图。

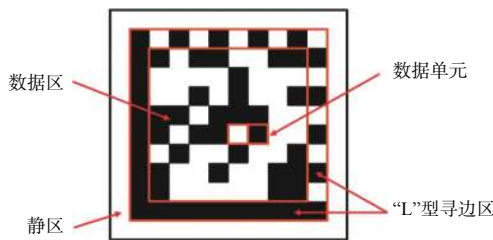


图 1 DM 码结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of DM code structure

不同于每个数据单元区域被标记充满的情况,对于以打点的方法来标刻每一个数据单元区域的激光标刻 DM 码的方式,标刻区域为圆形区域,不能充满每一个数据单元区域,如图 2 所示。

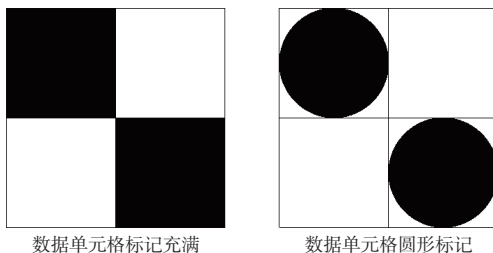


图 2 二维码数据单元格标记方法

Fig. 2 Two-dimensional code data cell marking method

单元格内圆点相切时,放大 10 倍后的像素图形如图 3 所示,其中圆点直径 $d=15$  pixel,灰度值为 0。

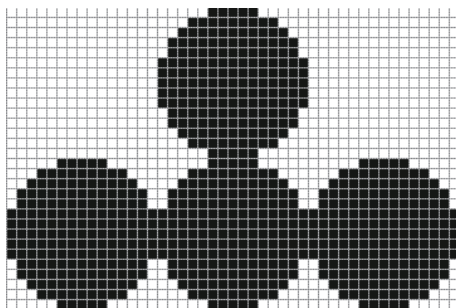


图 3 圆点放大 10 倍后的像素图像

Fig. 3 Pixel image of dot magnified 10 times

圆点直径大小以及间距对二维码的识读效果产生影响,美国国家航天航空局给出了相关技术

标准, 圆点间距(相邻 2 个圆点圆心之间的距离)应等于二维码数据单元格大小, 容许 $\pm 10\%$ 的尺寸偏差, 为了保证好的识读效果, 圆点间隙应小于圆点直径的 1/2, 不允许圆形区域相互重叠, 如图 4、图 5 所示。

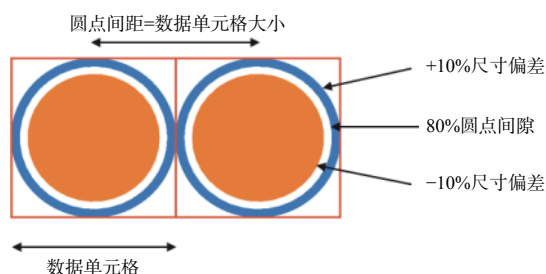


图 4 圆点直径尺寸偏差

Fig. 4 Dot diameter size deviation

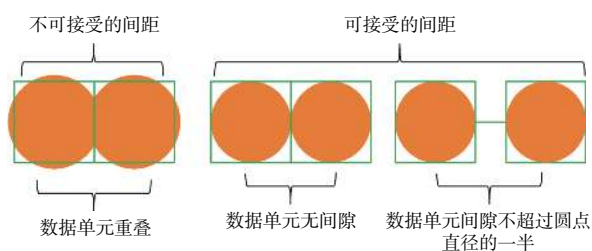


图 5 圆点间距合适范围

Fig. 5 Suitable range of dot spacing

## 2 实验结果分析

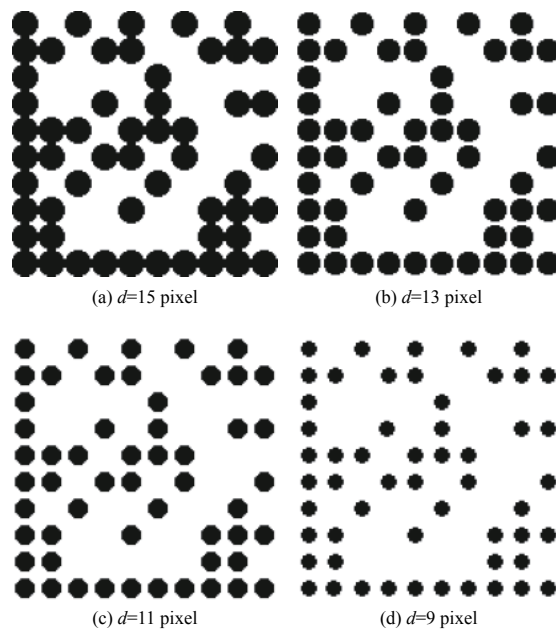
根据美国国家航空航天局制定的技术标准<sup>[12]</sup>, 评价二维码识读质量最重要的参数是对比度。对比度就是激光标刻出的二维码与基底材料的灰度差, 灰度通常以数值的形式来表示, 即灰度值, 灰度值共有 256 个等级, 黑色为 0, 白色为 255。实验模拟了不同圆点直径以及不同灰度值的 DM 图像, 并记录了相应的识读时间。

### 2.1 圆点直径对识读时间的影响

实验模拟了圆点直径 $d$ 为不同像素情况下的 DM 码图像(见图 6), 利用手机扫码工具, 记录了对应的识读时间(见表 1)。

对圆点不同直径 $d$ 的 DM 码图像分别进行多次扫描, 记录识读时间 $T_1$ , 并计算平均值 $T_{S1}$ , 如表 1 所示。

由以上数据可知, 随着圆点直径 $d$ 的减小, 圆点间隙增大, 因此识读时间增加, 即平均识读时间 $T_{S1}$ 随圆点直径 $d$ 的减小而增加。当圆点直径 $d=$

图 6 圆点直径 $d$ 不同像素情况下的 DM 码图像, 灰度值均为 0Fig. 6 DM code images of dot diameter  $d$  in different pixels (gray value is 0)表 1 不同直径 $d$ 所对应的识读时间 $T_1$ Table 1 Corresponding reading time  $T_1$  for different diameters  $d$ 

圆点半径 $d/\text{pixel}$	识读时间 $T_1/\text{s}$					
	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次	平均值
15	19	15	17	10	22	17
13	70	93	72	87	76	80
11	238	234	246	261	237	243
9	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$

11 pixel 时, 识读时间急剧上升;  $d=9$  pixel 时, DM 码识读时间为无穷大, 即读取信息失败, 这表明  $d=11$  pixel 为该 DM 码能否读取成功的临界圆点直径值。

### 2.2 灰度值对识读时间的影响

实验模拟了圆点直径 $d=13$  pixel 时, 不同灰度值下的 DM 图像, 如图 7 所示。

对不同灰度值下的 DM 图像分布进行多次扫描, 记录扫描时间 $T_2$ , 并计算平均值 $T_{S2}$ , 如表 2 所示。

由以上数据可知, 灰度值越大, 圆点灰度与背景灰度越接近, 图像识别度越低, 识读时间越长, 即平均识读时间 $T_{S2}$ 随灰度值的增大而增加。当

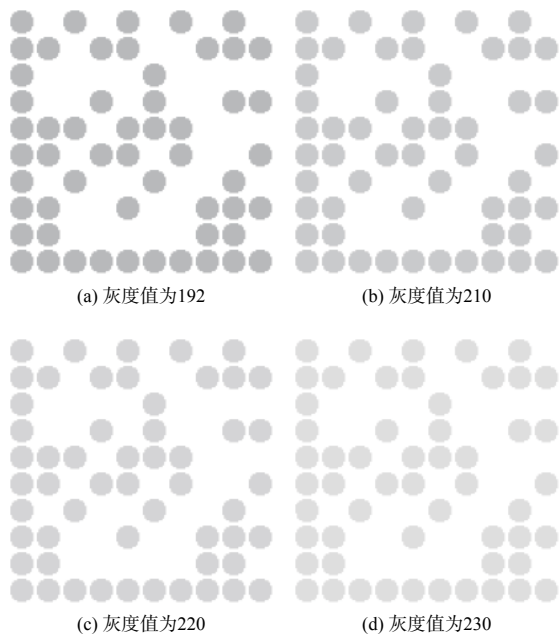


图 7  $d=13$  pixel 时,不同灰度值下的 DM 图像

Fig. 7 When  $d=13$  pixel, DM images with different gray values

灰度值为 220 时,识读时间急剧上升。当灰度值为 230 时,DM 码读取时间为无穷大,即读取信息失败,这表明灰度值 220 为该 DM 码能否读取成功的临界灰度值。

但识读时间与扫描设备、光照影响、扫描角度以及扫描距离有关。以上扫描结果是在用普通安卓手机(oppo reno4 se)在白天无强光照射的较明亮的室内,手机正对 DM 码且两者之间距离为 20 cm 的(允许 $\pm 2$  cm 的误差)情况下扫描得到的。

表 2 不同灰度值所对应的识读时间  $T_2$

Table 2 Corresponding reading time  $T_2$  for different gray values

灰度值	识读时间 $T_2$ /s					
	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次	平均值
192	95	121	82	130	126	110
210	119	131	140	135	142	133
220	188	200	207	175	192	192
230	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$

### 3 实验结果

#### 3.1 实验装置

激光并行加工实验光路图如图 8 所示。本文选用的激光器为美国 coherent 公司生产的 Libra 掺 Ti 蓝宝石飞秒激光器(激光波长为 800 nm,脉冲宽度为 100 fs,重复频率为 10 kHz,光斑直径  $D=9$  mm,最大单脉冲能量为 0.4 mJ,平均输出功率为 0~4 W)。1/2 波片可以对线偏振光的偏振角进行调节,为了使激光偏振方向与空间光调制器的液晶分子方向相同的激光入射到空间光调制器,需经过偏振分光棱镜,偏振分光棱镜将激光一分为二,分别是水平偏振的光和垂直偏振的光,只允许水平偏振的光入射到空间光调制器。用定时器快门控制加工时间,空间光调制器对于入射光与反射光之间的夹角要求小于  $20^\circ$ 。反射镜 3 是翻转镜,这样能够形成 2 路光路,一路光进入到 CCD 相机中,便于监测光束质量以保证实验正常进行;另一

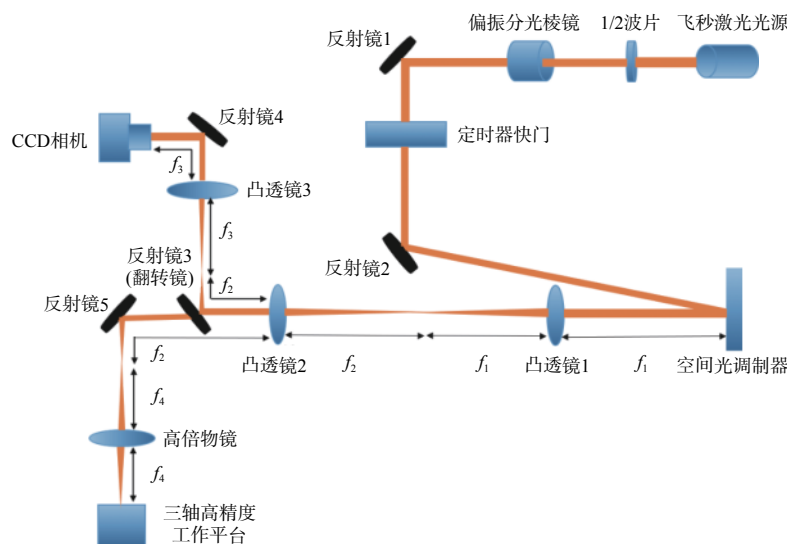


图 8 并行加工实验光路图

Fig. 8 Light path diagram of parallel processing experiment

路则在光束质量正常的情况下经 4*f* 光学成像系统 (*f*<sub>1</sub>=1 000 mm, *f*<sub>2</sub>=400 mm) 在三轴高精度工作平台上进行激光标刻实验。由于高倍聚焦物镜(放大倍数 20×, 数值孔径 *N*<sub>A</sub>=0.42, 焦距 *f*=10 mm) 的入瞳为 8.4 mm, 比飞秒激光光斑直径 *D*=9 mm 小, 所以利用 4*f* 光学系统 (*f*<sub>1</sub> > *f*<sub>2</sub>) 将光斑直径缩小 2.5 倍以保证光束全部进入高倍聚焦物镜。

实验所选用的空间光调制器是日本 Hamamatsu 公司生产的型号为 X10468-02 的反射式纯相位液晶空间光调制器, 相关参数如表 3 所示。该系列的空间光调制器可在不改变光束的振幅和偏振态的条件下, 对相位进行精确调制。其提供的软件能够生成多种光栅全息图, 并且能够随时调控光栅周期、灰度值以及叠加菲涅尔透镜和棱镜的参数和功能。

表 3 空间光调制器的主要参数

Table 3 Main parameters of spatial light modulator

参数	值
像素/pixel	475 200(792×600)
最大空间分辨率/(lp·mm <sup>-1</sup> )	25
输入阶数/level	256
像素间距/μm	20
有效面积/mm	16×12
输出光波长/nm	800±50
光转换效率/%	95
帧速率/Hz	60

实验中所采用的三轴高精度工作平台为 AEROTECH 公司生产的型号为 ANT130-L 的三轴运动平台, 其 *X* 轴和 *Y* 轴运动行程一致, 均为 ±55 mm, *Z* 轴运动行程为 ±17.5 mm。Z 轴 0 为气浮工作平台, 定位精度为 ±2 μm, 重复定位精度为 ±100 nm, 保证了实验加工的一致性。

3.2 飞秒激光并行加工过程及实验结果

并行加工技术提出的目的就是为了提高加工效率, 用来应对传统单光束激光在刻蚀体光栅<sup>[13]</sup>、光波导<sup>[14]</sup>等领域加工效率不足, 无法达到产业化标准的问题。在众多并行加工方法中, 基于空间光调制器的并行加工方法以其对光束数量和位置的灵活调控脱颖而出。本文提出的基于空间光调制器的 DM 码并行加工技术<sup>[15]</sup>以多光束点阵的形式组成 DM 码, 实现了对光束数量和位置的灵活调控, 同时提高了 DM 码的激光加工效率。

SLM 加载不同的全息图, 可以模拟不同的衍

射光学元件。本文产生多光束的原理是 SLM 模拟衍射光栅, 通过不同的光栅叠加, 可以产生任意二维图形的多光束。模拟具有不同光栅周期的光栅来改变衍射角, 即可在单一方向调制产生多光束的位置。同时, 通过旋转模拟的光栅角度, 就可实现在单个平面任意位置产生多光束。本文用来计算 DM 码多光束全息图的算法为 GS 反馈算法, GS 反馈算法弥补了传统 GS 算法进行开环迭代计算的缺点, 加入了 CCD 相机采集每一次迭代计算后的多光束能量分布信息, 重新计算用于迭代计算的光场振幅, GS 反馈算法流程如图 9 所示。

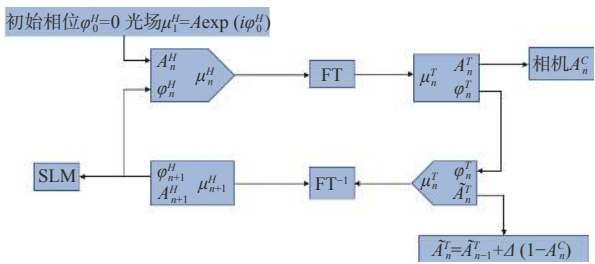


图 9 GS 反馈算法流程图  
Fig. 9 Flow chart of GS feedback algorithm

进行第一次反馈迭代时, 入射光振幅被替换成目标振幅与相机反馈振幅的加权值,  $A_1^T = 1 + \Delta(1 - A_1^C)$ , 对应第 *n* 次迭代,  $\bar{A}_n^T = \bar{A}_{n-1}^T + \Delta(1 - A_n^C)$ 。

在石英玻璃内部进行激光并行加工 DM 码实验, 激光功率分别设置为 1.6 W、2.4 W、2.8 W、3.2 W、3.6 W、4 W。用定时器快门控制加工时间为 0.1 s。在显微镜下用 10 倍物镜观察到的并行加工实验结果如图 10 所示。

由于石英玻璃内部加工所得 DM 码的形状、大小均匀性与理想状态有一定差距, 所以使用普通扫码功能无法识别, 需要利用 Scandit Barcode Scanner 软件中的 2D CODES 部分进行扫描识别。在白天无强光照射的较明亮的室内, 用 Scandit Barcode Scanner 软件的 2D CODES 部分正对 DM 码, 且两者之间距离为 20 cm(允许 ±2 cm 的误差)的情况下, 对以上不同功率下并行加工的石英玻璃内部的 DM 码进行扫描。扫描发现, 当激光功率在 2.4 W 以下(不包括 2.4 W)时, DM 码无法被识别。

本实验所使用的 DM 码光束数量为 62 束, 总的加工时间 *t*<sub>1</sub>=0.1 s, 若采用单光束激光进行加工, 总时间 *t*<sub>2</sub>=6.2 s, 并行加工技术的加工效率是单光束激光加工效率的 62 倍。通过以上加工效率对

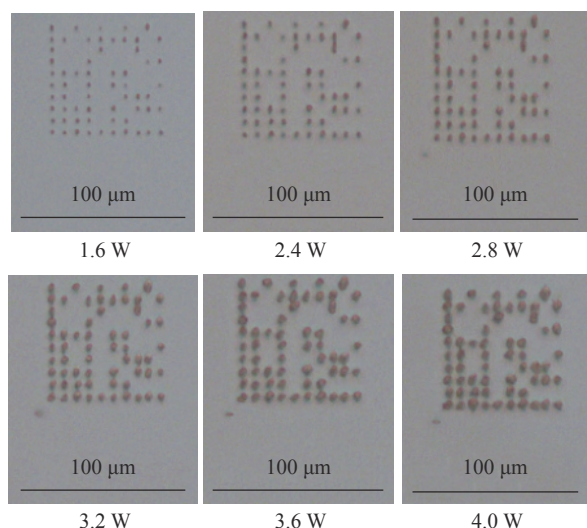


图 10 不同激光功率下石英玻璃内部 DM 码

Fig. 10 DM code inside quartz glass under different laser power

比,可以明显地看到并行加工技术相比单光束激光加工效率有显著提升。

## 4 结论

本文以圆点填充数据单元的方式,绘制了不同圆点直径 $d$ 以及不同灰度值的 DM 码图像。通过观察不同圆点直径 $d$ 与平均识读时间 $T_{S1}$ 以及不同灰度值与平均识读时间 $T_{S2}$ 之间的关系,可以看出平均识读时间 $T_{S1}$ 与圆点直径 $d$ 成反比,其中最大圆点直径为 15 pixel,临界圆点直径为 11 pixel;平均识读时间 $T_{S2}$ 与灰度值成正比,其中最小灰度值为 0,临界灰度值为 220。在此基础上,通过在石英玻璃内部进行飞秒激光并行加工 DM 码实验,验证了并行加工方法的可行性。

### 参考文献:

- [1] VEDEL-SMITH N K, LENAU T A. Casting traceability with direct part marking using reconfigurable pin-type tooling based on paraffin-graphite actuators[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2012, 31(2): 113-120.
- [2] MOSS C, CHAKRABARTI S, SCOTT D W. Parts quality management: Direct part marking of data matrix symbol for mission assurance[C]//2013 IEEE Aerospace Conference. March 2-9, 2013, Big Sky, MT, USA: IEEE, 2013: 1-12.
- [3] 姜国强. 零部件直接标记二维条码技术初探[J]. *条码与信息系统*, 2016(1): 41-43.
- JIANG Guoqiang. A preliminary study of two-dimensional barcode technology for component direct labeling[J]. *Bar Code & Information System*, 2016(1): 41-43.
- [4] LI Xiashuang, YANG Lijun, CHANG Bo, et al. Simulation and process optimization for laser marking of submillimetre rasterizing 2D code on stainless steel[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2020, 34(28): 2050266.
- [5] NASA. Applying data matrix identification symbols on aerospace parts: NASA-STD-6002[S]. USA: NASA Technical Standard Program Office, 2007:17-57.
- [6] KEEGAN W B. Application of data matrix identification symbols to aerospace parts using direct part marking methods/techniques: NASA-HDBK-6003[S]. USA: Materials, Processes and Manufacturing Department of NASA, 2008: 10-56.
- [7] 王虎, 朴红吉, 吴振宇, 等. Data matrix 二维条码在票务系统中的应用与研究[J]. *计算机与数字工程*, 2008, 36(3): 154-156.
- WANG Hu, PU Hongji, WU Zhenyu, et al. Application and research of Data matrix 2D barcode in ticketing system[J]. *Computer and Digital Engineering*, 2008, 36(3): 154-156.
- [8] 康三顺. 应用于方阵式 DM 码定位的图像分割技术研究[J]. *现代信息科技*, 2020, 4(22): 91-94.
- KANG Sanshun. Research on image segmentation technology applied to square matrix DM code location[J]. *Modern Information Technology*, 2020, 4(22): 91-94.
- [9] 王苏安, 何卫平, 张维, 等. 直接激光标刻和二维条码技术在刀具标识中的应用研究[J]. *中国机械工程*, 2007, 18(6): 676-680.
- WANG Su'an, HE Weiping, ZHANG Wei, et al. Application research on the direct laser marking & 2D barcode technology on tool marking and identification[J]. *China Mechanical Engineering*, 2007, 18(6): 676-680.
- [10] 李夏霜, 何卫平, 雷蕾, 等. 激光标刻二维码工艺及最优参数域研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(7): 84-90.
- LI Xiashuang, HE Weiping, LEI Lei, et al. Process and optimal parameter domain of laser marking two-dimensional code[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(7): 84-90.
- [11] DUMONT T, LIPPERT T, WOKAUN A, et al. Laser writing of 2D data matrices in glass[J]. *Thin Solid Films*, 2004, 453/454: 42-45.
- [12] NASA. Applying data matrix identification symbols on

- aerospace parts: NASA-STD-6002D[S]. Washington, DC: NASA Technical Standard Program Office, 2008: 16-33.
- [13] 张恒, 周云, 周雷, 等. 纳秒激光刻蚀玻璃基质铬薄膜直写微光栅结构[J]. 光子学报, 2009, 38(2): 241-244.
- ZHANG Heng, ZHOU Yun, ZHOU Lei, et al. Fabrication of micro-grating structures by nanosecond laser ablation of chrome film on glass substrate[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(2): 241-244.
- [14] 杨斌, 尹小杰, 李绍洋, 等. 二氧化硅平面光波导器件的研究进展[J]. 半导体光电, 2021, 42(2): 151-157.
- YANG Bin, YIN Xiaojie, LI Shaoyang, et al. Recent progresses about silica-based planar lightwave circuit devices[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(2): 151-157.
- [15] 胡勇涛, 翟中生, 吕清花, 等. 基于空间光调制器的飞秒并行加工方法研究[J]. 应用光学, 2016, 37(2): 315-320.
- HU Yongtao, ZHAI Zhongsheng, LYU Qinghua, et al. Parallel processing with femtosecond laser using spatial light modulator[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(2): 315-320.