

一种基于 DMD 二值振幅调制的多模光纤出射 光斑聚焦扫描技术

赵广智^{1,2}, 耿焱^{1,2}, 陈慧^{1,2}, 许程访^{1,2}, 庄斌^{1,2}, 贺正权¹, 胡宝文¹, 任立勇^{1*}

¹中国科学院西安光学精密机械研究所 信息光子学研究室, 陕西 西安 710119;

²中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049

摘要 受限于空间光调制器(SLM)有限的刷新速率,现有的基于 SLM 的多模光纤(MMF)成像方法并不能满足对活体生物组织内窥成像的需求。考虑到数字微镜器件(DMD)的刷新速率比 SLM 高两个数量级,因此提出了一种基于 DMD 二值振幅调制的 MMF 出射光斑聚焦扫描技术。理论分析表明,MMF 出射端任意聚焦区域内的总光强与 DMD 子区域的振幅调制系数之间存在二次函数关系,因此,通过 DMD 对 MMF 入射波前进行二值振幅调制,可实现对 MMF 出射光斑的聚焦和扫描。对于给定数目的可调制子区域,该二值振幅调制算法的调制次数是基于纯相位迭代优化算法的 1/256,是基于三步移相最优相位算法的 1/3。基于该技术实现了对长度为 5 m、直径为 105 μm 的 MMF 出射光斑在三维空间上的聚焦和扫描。研究表明,该技术具有调制速度快、算法可靠性高、聚焦点均匀性好等优点。

关键词 成像系统; 多模光纤内窥成像; 聚焦扫描; 二值振幅调制; 数字微镜器件; 全局最优解

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0911004

A Method for Focusing and Scanning Light Through Multimode Fiber Based on Binary Amplitude Modulation DMD Technique

Zhao Guangzhi^{1,2}, Geng Yi^{1,2}, Chen Hui^{1,2}, Xu Chengfang^{1,2}, Zhuang Bin^{1,2},
He Zhengquan¹, Hu Baowen¹, Ren Liyong^{1*}

¹Research Department of Information Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China;

²College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100049, China

Abstract Due to the limited updating rate of spatial light modulator (SLM), the reported methods based on SLM can't satisfy the requirements of biological tissues endoscopic imaging in vivo. Considering the updating rate of digital micro-mirror device (DMD) is two orders of magnitude higher than the fastest SLM, a method is proposed for focusing and scanning light through a multimode fiber (MMF) based on binary amplitude modulation DMD technique. Theoretical analysis shows that there exists a quadratic function between the total light intensity within the focused region at the distal end of the MMF and the amplitude modulation coefficient of the sub-region on DMD. Thus, it can be realized that focusing and scanning light through a MMF by modifying the incident wavefront with the binary amplitude modulation DMD technique. What's more, for a given number of modulation sub-regions, the number of iterations for this method is 1/256 of that for the phase iterative optimization methods or 1/3 of that for the optimal phase computation optimization methods with three-step phase shift. We demonstrate that focusing and scanning light in three-dimensional space through a 5 m length and 105 μm core diameter MMF with this method. The results show that the proposed method has the advantages of fast modulation speed, high algorithm reliability and good uniformity of focused spots.

Key words imaging systems; multimode fiber endoscope imaging; focusing and scanning light; binary amplitude modulation; digital micro-mirror device; global optimal solution

收稿日期: 2018-03-19; 修回日期: 2018-04-13; 录用日期: 2018-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(61535015)

* E-mail: renliy@opt.ac.cn

1 引 言

内窥成像技术在生物医学领域具有极其重要的应用价值。传统的内窥镜基于梯度折射率透镜、光纤束或者复杂的机械扫描装置^[1]实现对生物组织的内窥成像。然而这些内窥镜的探头尺寸较大^[2],无法满足现代医学在微创检查、手术和治疗中的更高需求。但注意到,多模光纤(MMF)可并行传输多个独立的空间模式^[2-3],可独立作为成像和传像器件^[4],是实现小型化光纤内窥镜的最佳选择。然而,受模间色散的影响,MMF的出射光斑无法直接用于对生物组织的内窥成像,因而,研究MMF成像技术的关键在于如何消除模间色散的影响。

目前,MMF成像方法主要包括传输矩阵法^[3-9]和点扫描成像法^[2,10-31],此外,梁子等^[32]通过傅里叶全息技术实现了对隐藏在散射介质中目标物体的成像。传输矩阵表示系统输入与输出之间的关系,基于传输矩阵的MMF光纤成像技术无需扫描便可实现对目标物体的重建。然而,该方法需要大量的运算来标定传输矩阵。点扫描成像法采用动态衍射光学元件作为调制和扫描器件,通过调制MMF入射波前,实现对MMF出射光斑的聚焦扫描,用以对目标物体进行采样,再根据成像模型,重建目标物体。点扫描成像法的核心是如何在MMF的出射端形成一系列高质量的聚焦点,这是该领域现阶段研究的热点和重点。目前常用的方法包括相位共轭法^[10-16]和基于目标函数的波前整形法^[2,17-31]。相位共轭法通过数字全息技术记录MMF出射散斑的相位,通过相位求解算法提取该相位,并将共轭相位加载到空间光调制器(SLM)上,通过时空反演,实现对MMF出射光斑的聚焦扫描。该方法无需迭代,一次测量即可获得一个聚焦点,但相位提取过程需要解包裹运算^[33-34],计算量较大,聚焦点的质量依赖于提取相位的准确性,此外,该方法依旧无法摆脱传统的机械扫描方式^[10-11]。基于目标函数的波前整形法通过求解目标函数的最优值,驱动SLM对MMF入射波前进行调制,实现对MMF出射光斑的聚焦扫描,该类方法需要多次访问SLM,优化时间依赖外设的刷新速率,且无法保证可以获得全局最优解。为了缩短优化时间,Yin等^[26-27]提出了一种基于目标函数的并行坐标算法,通过一次采集,多次计算实现对MMF出射光斑的聚焦扫描。此外,有文章报

道了基于SLM的二值振幅调制技术^[28-30],减少了调制次数。然而,受限于SLM有限的刷新速率,上述基于SLM的MMF成像技术并不能满足对活体生物组织成像的需求^[31]。相比于SLM,数字微镜器件(DMD)具有更高的刷新速率,市场上主流DMD的刷新速率可以达到22 kHz,比最快的SLM的刷新速率高两个数量级^[31,35-36],能够更好地满足活体生物组织内窥成像的要求。此外,有研究表明,除了在刷新速率方面具有优势外,DMD还具有更高的波前整形保真度^[35]。因此,研究基于DMD的波前整形技术是非常有意义的,特别是在对活体生物组织的内窥成像方面具有非常重要的研究价值。目前已有研究者通过采用二值振幅全息^[31]和Hadamard矩阵^[2]实现了对MMF出射光斑的聚焦扫描。

本文报道了一种基于DMD二值振幅调制的MMF出射光斑聚焦扫描技术。理论上,根据传输矩阵理论^[3,6]和模式分解理论^[37-38]建立了MMF出射光场的物理模型,分析了MMF出射端聚焦区域内总光强与DMD振幅调制系数之间的关系。实验上,通过控制DMD对MMF入射波前进行二值振幅调制,实现了对纤芯直径为105 μm ,长度为5 m的MMF出射光斑在三维空间上的聚焦扫描。研究表明该技术具有调制速度快、算法可靠性高、聚焦点均匀性好等优点。相比于双光路干涉系统,本文报道的共光路干涉系统具有更强的抗干扰能力。

2 基本原理

2.1 基于DMD的二值振幅调制技术

基于DMD二值振幅调制的MMF出射光斑聚焦扫描技术原理如图1所示。图1(a)所示为平面波通过MMF后,出射光斑是一个散斑。图1(b)所示为当MMF入射波前经二值振幅调制后,在MMF出射端获得了一个聚焦点。基于DMD二值振幅调制算法的流程如图1(c)所示:将DMD分成 M 个子区域,每个子区域代表一个模式,依次调制每一个子区域,确定其开关状态(能使聚焦质量提升,状态为开;反之,则为关),遍历所有子区域,可在MMF的出射端形成一个聚焦点。对不同的聚焦区域,重复上述过程,可在MMF出射端的不同位置处形成聚焦点,即实现了对MMF出射光斑的聚焦扫描。

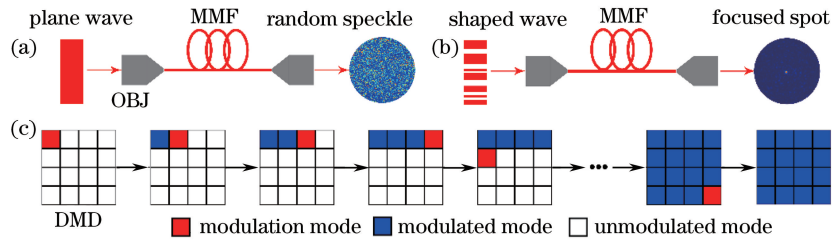


图 1 基于 DMD 二值振幅调制的 MMF 出射光斑聚焦扫描技术原理图。(a)平面波通过 MMF,出射光斑是一个散斑;
(b)通过调制 MMF 入射波前,在 MMF 出射端获得聚焦点;(c)二值振幅调制的算法流程

Fig. 1 Focusing and scanning light through a multimode fiber based on binary amplitude modulation DMD technique.

(a) A plane wave is focused at the proximal end of a MMF, while a random speckle pattern is usually obtained at the distal end of it; (b) wavefront of the incident light is shaped, so that the scattered light through a MMF focuses at a target area; (c) process of the binary amplitude modulation

2.2 MMF 出射光场的数学模型

根据传输矩阵理论^[3,6],存在一个特定的传输

$$\text{矩阵 } \mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{1N} \\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{2N} \\ \vdots & \vdots & t_{mn} & \vdots \\ t_{M1} & t_{M2} & \cdots & t_{MN} \end{bmatrix}, \text{表示系统输入输出之间的全部关系。传输系数 } t_{mn} = r_m A_{\text{lens},m}$$

$A_{\text{fiber},mn} \exp[i(\varphi_{\text{lens},m} + \varphi_{\text{fiber},mn})]$, r_m 为 DMD 上第 m 个子区域的振幅调制系数; $A_{\text{lens},m}$ 和 $A_{\text{fiber},mn}$ 分别表示透镜和 MMF 对光场振幅的调制作用; $\varphi_{\text{lens},m}$ 和 $\varphi_{\text{fiber},mn}$ 分别表示透镜和 MMF 对光场相位的调制作用; M 和 N 分别表示输入与输出的模式数目。系统的输入光场和输出光场可分别表示为

$$\begin{cases} \mathbf{E}_{\text{DMD,in}} = [A_{\text{in},1} \exp(i\varphi_{\text{in},1}), A_{\text{in},2} \exp(i\varphi_{\text{in},2}), \cdots, A_{\text{in},m} \exp(i\varphi_{\text{in},m}), \cdots, A_{\text{in},M} \exp(i\varphi_{\text{in},M})]^T \\ \mathbf{E}_{\text{fiber,out}} = [A_{\text{out},1} \exp(i\varphi_{\text{out},1}), A_{\text{out},2} \exp(i\varphi_{\text{out},2}), \cdots, A_{\text{out},n} \exp(i\varphi_{\text{out},n}), \cdots, A_{\text{out},N} \exp(i\varphi_{\text{out},N})]^T \end{cases} \quad (1)$$

根据传输矩阵理论^[3,6], $\mathbf{E}_{\text{DMD,in}}$ 与 $\mathbf{E}_{\text{fiber,out}}$ 之间的关系可表示为

$$\mathbf{E}_{\text{fiber,out}} = \mathbf{T}^T \mathbf{E}_{\text{DMD,in}} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{1N} \\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{2N} \\ \vdots & \vdots & t_{mn} & \vdots \\ t_{M1} & t_{M2} & \cdots & t_{MN} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} A_{\text{in},1} \exp(i\varphi_{\text{in},1}) \\ A_{\text{in},2} \exp(i\varphi_{\text{in},2}) \\ \vdots \\ A_{\text{in},m} \exp(i\varphi_{\text{in},m}) \\ \vdots \\ A_{\text{in},M} \exp(i\varphi_{\text{in},M}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^M t_{m1} A_{\text{in},m} \exp(i\varphi_{\text{in},m}) \\ \sum_{m=1}^M t_{m2} A_{\text{in},m} \exp(i\varphi_{\text{in},m}) \\ \vdots \\ \sum_{m=1}^M t_{mn} A_{\text{in},m} \exp(i\varphi_{\text{in},m}) \\ \vdots \\ \sum_{m=1}^M t_{mN} A_{\text{in},m} \exp(i\varphi_{\text{in},m}) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 $\sum_{m=1}^M t_{mn} A_{\text{in},m} \exp(i\varphi_{\text{in},m})$ 表示 MMF 第 n 个输出模式 $A_{\text{out},n} \exp(i\varphi_{\text{out},n})$ 。

根据模式分解理论^[37-38], MMF 的出射光场可以表示为

$$\mathbf{E}_{\text{fiber,out}} = \sum_{n=1}^N A_{\text{out},n} \exp(i\varphi_{\text{out},n}) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M t_{mn} A_{\text{in},m} \exp(i\varphi_{\text{in},m}) =$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M r_m A_{\text{lens},m} A_{\text{fiber},mn} A_{\text{in},m} \exp[i(\varphi_{\text{lens},m} + \varphi_{\text{fiber},mn} + \varphi_{\text{in},m})] = \sum_{m=1}^M r_m A_m \exp(i\varphi_m), \quad (3)$$

式中 $A_m = A_{\text{lens},m} A_{\text{fiber},m} A_{\text{in},m}$ 和 $\varphi_m = \varphi_{\text{lens},m} + \varphi_{\text{fiber},m} + \varphi_{\text{in},m}$ 分别表示当只有第 m 个模式输入时, MMF 出射光场的振幅和相位。透镜和 MMF 对光场振幅、相位的调制作用只与光的传输路径有关,而与 DMD 的振

幅调制系数无关,因此, A_m 和 φ_m 均为常数。

当对 DMD 上第 k 个子区域进行调制时,第 1 到第 $k-1$ 个子区域的振幅调制系数已经被确定下来了,而第 $k+1$ 到第 M 个子区域的振幅调制系数全部为 0。因此第 k 个子区域和其他子区域对应的 MMF 出射光场可分别表示为 $E_{\text{fiber,out},k} = r_k A_k \exp(i\varphi_k)$ 和 $E_{\text{fiber,out,others}} = \sum_{m=1}^{k-1} r_m A_m \exp(i\varphi_m) = A_{\text{others}} \exp(i\varphi_{\text{others}})$ 。MMF 出射端聚焦区域内的总光强表示为

$$I_{\text{focused}} = \sum_{R_1} |E_{\text{fiber,out},k} + E_{\text{fiber,out,others}}|^2 = r_k^2 \sum_{R_1} |A_k|^2 + 2r_k \sum_{R_1} |A_k| |A_{\text{others}}| \cos(\varphi_k - \varphi_{\text{others}}) + \sum_{R_1} |A_{\text{others}}|^2 = Ar_k^2 + Br_k + C, \quad (4)$$

式中 $A = \sum_{R_1} |A_k|^2$, $B = \sum_{R_1} 2|A_k| |A_{\text{others}}| \cos(\varphi_k - \varphi_{\text{others}})$, $C = \sum_{R_1} |A_{\text{others}}|^2$, R_1 代表聚焦区域。

根据(4)式,MMF 出射端聚焦区域内总光强与 DMD 上第 k 个子区域的振幅调制系数之间存在二次函数关系,其中 r_k 的取值范围为 $[0, 1]$ 。根据二次函数的性质可知,聚焦区域总光强的最大值总是在振幅调制系数 $r_k = 1$ 或 $r_k = 0$ 处取得,其中 $r_k = 1$ 对应第 k 个子区域的状态为开, $r_k = 0$ 对应第 k 个子区域的状态为关。因此,对一个特定的聚焦区域,

存在一个由 DMD 各个调制子区域开关状态构成的全局最优解,驱动 DMD 对 MMF 入射波前进行二值振幅调制,实现对 MMF 出射光斑的聚焦扫描。

3 实验与分析

3.1 实验装置

实验装置如图 2 所示,He-Ne 激光器 (HNL050R-EC, THORLABS 公司,美国) 输出的线偏振光经扩束器 BE (GBE20-A-20X, THORLABS 公司,美国) 准直放大,光斑直径扩大为原来的 20 倍。衰减片 ND、半波片 $\lambda/2$ 和偏振片 P 分别用于对光强和偏振态的控制。光垂直照射 DMD (VIALX V-7001VIS, 1024 pixel \times 768 pixel, 13.68 $\mu\text{m} \times 13.68 \mu\text{m}$)。光阑 I、双胶合透镜 L1 (AC254-125-A-ML, THORLABS 公司,美国, $f = 125 \text{ mm}$) 和 L2 (AC254-125-A-ML, THORLABS 公司,美国, $f = 125 \text{ mm}$) 组成 $4f$ 系统,将 DMD 出射的单缝衍射零级主极大成像到物镜 OBJ1 (10 \times , NA=0.25)上,当入射光垂直照射 DMD 时,其单缝衍射的零级主极大方向与 DMD 法线成 24° 夹角。包含有全部调制信息的单缝衍射零级主极大经物镜 OBJ1 耦合输入 MMF (MM-S105/125-22A, NUFERN 公司,芬兰,直径为 105 μm ,长度为 5 m,数值孔径为 0.21),MMF 的出射光斑经显微镜系统 OBJ2 (20 \times , NA = 0.30) 耦合输出,通过 CCD (C13440-20CU, Hamamatsu, 日本) 采集。

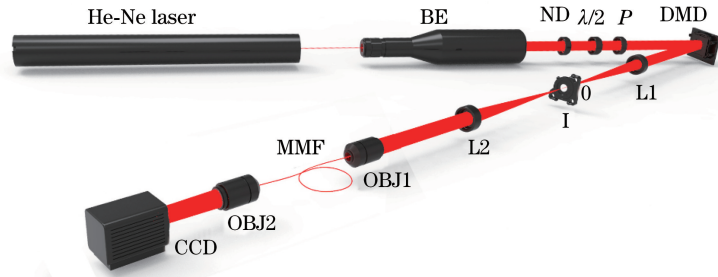


图 2 实验装置图

Fig. 2 Experimental setup

3.2 MMF 出射光斑聚焦扫描实验结果与分析

为了更好地评价聚焦质量,采用聚焦效率作为目标函数,其定义为聚焦区域总光强与 MMF 出射总光强的比值

$$F(r_k) = \frac{\sum_{R_1} I_{\text{fiber,out}}(u, v)}{\sum_{R_1+R_2} I_{\text{fiber,out}}(u, v)}, \quad (5)$$

式中 R_1 代表聚焦区域, R_2 代表 MMF 出射端除 R_1 之外的区域。

考虑到聚焦区域总光强与 DMD 子区域振幅调制系数之间存在二次函数关系,因此,可依据如下评价标准,依次确定 DMD 上每一个子区域的振幅调制系数:

$$r_k = \begin{cases} 0, & \text{if } F(0) \geq F(1) \\ 1, & \text{if } F(0) < F(1) \end{cases} \quad (6)$$

当调制第 k 个子区域时,由其他子区域确定的 MMF 出射光场是确定的,即 $F(0)$ 是已知的;打开第 k 个子区域,通过 CCD 采集 MMF 的出射光斑,根据(5)式,得到 $F(1)$;第 k 个子区域的振幅调制系数可根据(6)式确定。对不同的聚焦区域,依次调制 DMD 上每一个子区域,可实现对 MMF 出射光斑的聚焦扫描。

基于该算法对长度为 5 m、直径为 105 μm 的 MMF 的出射光斑进行了聚焦扫描实验,如图 3(a) 所示,当未对 MMF 的入射波前进行调制时,其出射光斑是一个散斑。将 DMD 上 512 pixel \times 512 pixel 大小的区域分为 $32 \times 32 = 1024$ 个子区域,代表 1024 个模式;依次打开每一个子区域,同时采集 MMF 出射光斑,根据(6)式确定其振幅调制系数,并刷新 DMD;通过 1024 次采集和计算得到一个全局最优解,驱动 DMD 对 MMF 入射波前进行二值振幅调制,在 MMF 的出射端获得了一个聚焦点。当 CCD 所在平面与 MMF 出射端面满足

物像共轭关系时,聚焦平面为 MMF 出射端面,通过对 MMF 入射波前进行二值振幅调制,在 CCD 不同位置处观察到了聚焦点,即实现了对 MMF 出射光斑在聚焦平面内的聚焦扫描。为了展示该方法可在 MMF 出射端面内任意位置处形成有效聚焦,不失一般性,本文选择了 9 个具有代表性的聚焦区域,其分别位于 MMF 出射端面圆内左上、左中、左下、中上、中心、中下、右上、右中、右下,实验结果如图 3(b) 所示,聚焦点的横向与纵向位置均可控,红色圆代表 MMF 出射端面。向后移动 CCD,即聚焦平面沿轴向发生平移,采用该算法对 MMF 入射波前进行二值振幅调制,依旧在 CCD 上观察到了聚焦点,即实现了对 MMF 出射光斑沿轴向的聚焦扫描,实验结果如图 3(c) 所示。实验中,CCD 每次沿轴向的移动距离为 0.05 mm,即聚焦平面的间隔为 0.05 mm,纵向聚焦的极限位置与 MMF 的纤芯直径和数值孔径相关,具体讨论详见参考文献[10]。

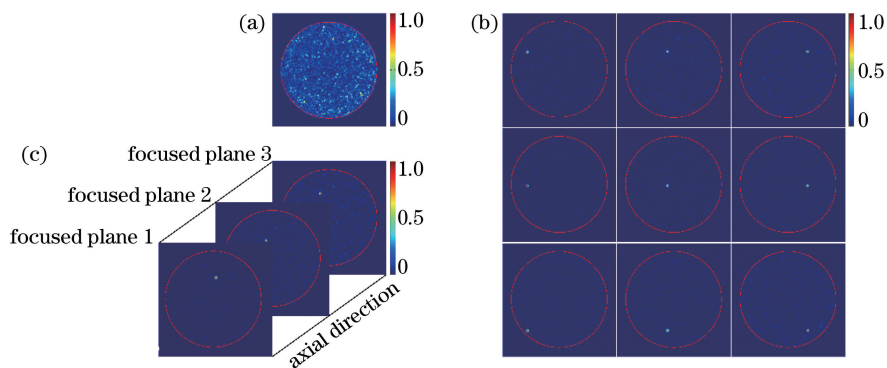


图 3 聚焦扫描实验。(a)未对 MMF 的入射波前进行调制时,其出射光斑是一个散斑;
(b)采用基于 DMD 的二值振幅调制算法在 MMF 出射端 9 个位置不同的聚焦区域内形成了聚焦点;
(c)在沿轴向的三个平面内对 MMF 出射光斑进行聚焦扫描

Fig. 3 Focused scanning experiment. (a) A random speckle pattern is obtained at the distal end of the MMF before modulating the incident wavefront; (b) nine focused spots are generated at nine different locations by binary amplitude modulation DMD technique; (c) focusing and scanning light through MMF at three focused planes along the axial direction

利用聚焦点的均匀性来验证算法的可靠性,通过聚焦点直径和聚焦效率的相对标准偏差来进行量化评价。聚焦点的直径通过像素当量来计算,其定义为 MMF 端面直径与其像所占 CCD 像素数的比值。实验上,当对 MMF 出射端面清晰成像时,计算得到像素当量为 0.3 μm 。实验获得的 9 个聚焦点的直径和聚焦效率如图 4 所示。经计算,聚焦点直径的相对标准偏差为 6.62%,聚焦效率的相对标准偏差为 6.39%,表明采用该算法可在 MMF 出射端面任意位置处形成均匀性良好的聚焦光斑,从而

证明该算法的可靠性较高。

为了验证理论分析的正确性,对聚焦效率与振幅调制系数之间的关系及聚焦效率与已调制子区域数目之间的关系进行了分析。实验上,保证其他子区域的振幅调制系数不变,等步长的改变第 k 个子区域的振幅调制系数,步长为 0.01,同时采集 MMF 的出射光斑,根据(5)式计算聚焦效率,实验结果如图 5(a) 所示:聚焦效率的最大值总是在振幅调制系数为 0 或 1 处取得。进一步的,依次确定 DMD 上每一个子区域的振幅调制系数,同时

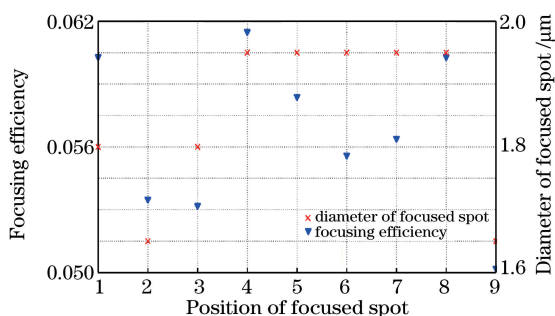


图 4 聚焦点的直径和聚焦效率

Fig. 4 Diameter and focusing efficiency of the focused spots

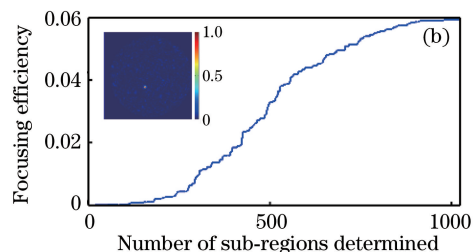
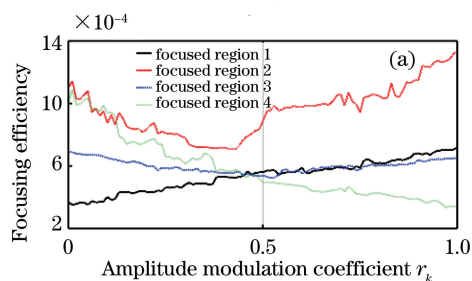


图 5 实验结果。(a) 聚焦效率随振幅调制系数的变化曲线；(b) 聚焦效率随已调制子区域数目的变化曲线

Fig. 5 Experimental results. (a) Variation of focusing efficiency with amplitude modulation coefficient; (b) variation of focusing efficiency with the number of sub-regions determined

4 结 论

提出了一种基于 DMD 二值振幅调制的 MMF 出射光斑聚焦扫描技术,通过控制 DMD 对 MMF 入射波前进行二值振幅调制,实现了对长度为 5 m、直径为 $105 \mu\text{m}$ 的 MMF 出射光斑在三维空间上的聚焦和扫描,为三维内窥成像提供了依据。研究表明:MMF 出射端聚焦区域内的总光强与 DMD 子区域的振幅调制系数之间存在二次函数关系,仅需对每个调制子区域进行一次拍摄和计算就可获得关于 DMD 各个子区域开关状态的全局最优解。基于 SLM 的顺序迭代算法^[17-18],需要对每个调制子区域进行 256 次拍摄和计算才能得到最优相位;基于 SLM 的三步移相算法^[19],需要对每个调制子区域进行 3 次拍摄,才能得到最优相位;因此,对于给定数目的调制子区域,为了获得全局最优解,该技术所需的调制次数是基于 SLM 顺序迭代算法的 $1/256$ ^[17-18],是基于三步移相最优相位算法的 $1/3$ ^[19]。该技术具有调制速度快、算法可靠性高、聚焦点均匀性好等优点,可用于 MMF 聚焦扫描成像。然而就实际应用而言,仍存在以下三点需要说明之处:1) 本文仅实现了对 MMF 出射光斑的聚焦扫描,通过聚焦扫描目标物体并采用筒探测器在 MMF 入

采集 MMF 的出射光斑,根据(5)式计算聚焦效率,实验结果如图 5(b)所示:随着已调制子区域数目的增大,聚焦效率增大或保持不变。聚焦效率增大,对应子区域的振幅调制系数为 1,即状态为开;聚焦效率保持不变,对应子区域的振幅调制系数为 0,即状态为关。以上实验结果与理论分析相一致,表明通过二值振幅调制可获得由 DMD 各个子区域开关状态构成的全局最优解,驱动 DMD 对 MMF 入射波前进行二值振幅调制,实现对 MMF 出射光斑的聚焦扫描。

射端收集目标反射光的能量,方可实现对目标物体的成像,这部分实验研究工作正在进行之中;2) 在实际应用过程中,MMF 不可避免地会受到外界环境的扰动而引起其状态发生变化,因此需进一步研究外界扰动对聚焦点质量及成像性能的影响;3) 就对活体生物组织的内窥成像应用而言,受限于 CCD 的采集速率,DMD 无法以最大刷新速率工作,探索替代 CCD 的 MMF 成像技术将会是十分必要的。

参 考 文 献

- [1] Oh G, Chung E, Yun S H. Optical fibers for high-resolution in vivo microendoscopic fluorescence imaging [J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, 19 (6): 760-771.
 - [2] Caravaca-Aguirre A M, Piestun R. Single multimode fiber endoscope [J]. *Optics Express*, 2017, 25 (3): 1656-1665.
 - [3] Choi Y, Yoon C, Kim M, *et al.* Scanner-free and wide-field endoscopic imaging by using a single multimode optical fiber [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(20): 203901.
 - [4] He Z Q, Ren L Y, Zhuang B, *et al.* Single optical fiber imaging technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(3): 030005.
- 贺正权, 任立勇, 庄斌, 等. 单光纤成像技术 [J]. 激

- 光与光电子学进展, 2017, 54(3): 030005.
- [5] Choi Y, Kim M, Yoon C, *et al.* Synthetic aperture microscopy for high resolution imaging through a turbid medium[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(21): 4263-4265.
- [6] Popoff S M, Lerosey G, Carminati R, *et al.* Measuring the transmission matrix in optics: an approach to the study and control of light propagation in disordered media [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(10): 100601.
- [7] Popoff S, Lerosey G, Fink M, *et al.* Image transmission through an opaque material[J]. *Nature Communications*, 2010, 1: 81.
- [8] Zhao M, Zhao M J, Sun C W, *et al.* Measurement and light focusing by transmission matrices of scattering media based on phase-only modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0129001.
赵明, 赵美晶, 孙程伟, 等. 基于纯相位调制的散射介质传输矩阵测量与光波聚焦[J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0129001.
- [9] Zhuang B, Xu C F, Geng Y, *et al.* Round-trip imaging through scattering media based on optical transmission matrix [J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(4): 041102.
- [10] Papadopoulos I N, Farahi S, Moser C, *et al.* High-resolution, lensless endoscope based on digital scanning through a multimode optical fiber [J]. *Biomedical Optics Express*, 2013, 4(2): 260-270.
- [11] Papadopoulos I N, Farahi S, Moser C, *et al.* Focusing and scanning light through a multimode optical fiber using digital phase conjugation [J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 10583-10590.
- [12] Azimipour M, Atry F, Pashaie R. Calibration of digital optical phase conjugation setups based on orthonormal rectangular polynomials [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(11): 2873-2880.
- [13] Cui M, Yang C H. Implementation of a digital optical phase conjugation system and its application to study the robustness of turbidity suppression by phase conjugation[J]. *Optics Express*, 2010, 18(4): 3444-3455.
- [14] Shen Y C, Liu Y, Ma C, *et al.* Focusing light through scattering media by full-polarization digital optical phase conjugation[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(6): 1130-1133.
- [15] Wang D, Zhou E H, Brake J, *et al.* Focusing through dynamic tissue with millisecond digital optical phase conjugation[J]. *Optica*, 2015, 2(8): 728-735.
- [16] Liu Y, Ma C, Shen Y C, *et al.* Focusing light inside dynamic scattering media with millisecond digital optical phase conjugation[J]. *Optica*, 2017, 4(2): 280-288.
- [17] Vellekoop I M, Mosk A P. Focusing coherent light through opaque strongly scattering media[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(16): 2309-2311.
- [18] Vellekoop I M, Mosk A P. Phase control algorithms for focusing light through turbid media[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(11): 3071-3080.
- [19] Yin Z, Liu G D, Liu B G, *et al.* Research on the objective function of spatial light modulator-based output spot focusing for multimode fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(7): 0705003.
尹哲, 刘国栋, 刘炳国, 等. 基于空间光调制器的多模光纤出射光斑聚焦目标函数研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(7): 0705003.
- [20] Čižmár T, Dholakia K. Exploiting multimode waveguides for pure fibre-based imaging[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 1027.
- [21] Bianchi S, Di Leonardo R. A multi-mode fiber probe for holographic micromanipulation and microscopy [J]. *Lab on A Chip*, 2012, 12(3): 635-639.
- [22] Mahalati R N, Gu R Y, Kahn J M. Resolution limits for imaging through multi-mode fiber [J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 1656-1668.
- [23] Caravaca-Aguirre A M, Niv E, Conkey D B, *et al.* Real-time resilient focusing through a bending multimode fiber[J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12881-12887.
- [24] Di Leonardo R, Bianchi S. Hologram transmission through multi-mode optical fibers [J]. *Optics Express*, 2011, 19(1): 247-254.
- [25] Mahalati R N, Askarov D, Wilde J P, *et al.* Adaptive control of input field to achieve desired output intensity profile in multimode fiber with random mode coupling[J]. *Optics Express*, 2012, 20(13): 14321-14337.
- [26] Yin Z, Liu G D, Chen F D, *et al.* Fast-forming focused spots through a multimode fiber based on an adaptive parallel coordinate algorithm [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(7): 071404.
- [27] Liu G D, Yin Z, Liu B G. Single multi-mode fiber digital scanning imaging method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0422002.
刘国栋, 尹哲, 刘炳国, 等. 单根多模光纤数字扫描成像方法[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(4): 0422002.
- [28] Akbulut D, Huisman T J, van Putten E G, *et al.* Focusing light through random photonic media by binary amplitude modulation [J]. *Optics Express*, 2011, 19(5): 4017-4029.
- [29] Huang H L, Sun C Z, Chen Z Y, *et al.* Light

- focusing through strongly scattering media by binary amplitude modulation [J]. *Optoelectronics Letters*, 2015, 11(4): 313-316.
- [30] Sun C Z, Chen Z Y, Pu J X. Modulating the amplitude of scattering light for focusing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0829001.
孙存志, 陈子阳, 蒲继雄. 调制散射光束的振幅实现聚焦[J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 0829001.
- [31] Conkey D B, Caravaca-Aguirre A M, Piestun R. High-speed scattering medium characterization with application to focusing light through turbid media [J]. *Optics Express*, 2012, 20(2): 1733-1740.
- [32] Liang Z, An X Y, Zhang R, *et al.* Imaging through turbid media based on speckled illumination and holography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0811002.
梁子, 安晓英, 张茹, 等. 基于散斑照明和全息穿透散射介质成像 [J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0811002.
- [33] Tay C J, Quan C, Yang F J, *et al.* A new method for phase extraction from a single fringe pattern [J]. *Optics Communications*, 2004, 239(4/5/6): 251-258.
- [34] Qian X F, Rao F, Li X H, *et al.* Accurate least-squares phase unwrapping algorithm [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(2): 0209001.
钱晓凡, 饶帆, 李兴华, 等. 精确最小二乘相位解包裹算法 [J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0209001.
- [35] Turtaev S, Leite I T, Mitchell K J, *et al.* Comparison of nematic liquid-crystal and DMD based spatial light modulation in complex photonics [J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 29874-29884.
- [36] Mitchell K J, Turtaev S, Padgett M J, *et al.* High-speed spatial control of the intensity, phase and polarisation of vector beams using a digital micromirror device [J]. *Optics Express*, 2016, 24(25): 29269-29282.
- [37] Ashry I, Wang A, Xu Y. Mode-division-multiplexing of absorption-based fiber optical sensors [J]. *Optics Express*, 2016, 24(5): 5186-5202.
- [38] Rademacher G, Warm S, Petermann K. Nonlinear interaction in differential mode delay managed mode-division multiplexed transmission systems [J]. *Optics Express*, 2015, 23(1): 55-60.