

光学空间滤波对变形镜生成贝塞尔光束的性能影响

李文来, 韩洪民, 代超宜, 马剑强*

宁波大学机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211

摘要 采用光学空间滤波方法,对基于变形镜生成的贝塞尔光束的质量进行改善。设计了一种环形滤波器,在贝塞尔光束的空间谱平面上滤除由变形镜圆顶误差引起的频谱分量,使贝塞尔光束的轴向光强分布更加均匀;设计了扇形和环形组合的滤波器,将圆对称的贝塞尔光束整形成椭圆贝塞尔光束,其主瓣的长短轴之比约为 1.72,轴向光强半峰全宽达到 247 mm,具有良好的无衍射特性。提出的空间滤波方法可有效提高基于变形镜生成的贝塞尔光束的性能,有利于其应用。

关键词 激光光学; 贝塞尔光束; 变形镜; 光学空间滤波; 圆顶误差

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1205001

Influence of Optical Spatial Filtering on Bessel Beam Generated by Deformable Mirror

Li Wenlai, Han Hongmin, Dai Chaoyi, Ma Jianqiang*

Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China

Abstract In this study, we employ optical spatial filtering to improve the quality of the Bessel beam generated by a deformable mirror. An annular filter is designed to filter the spectral components produced by the round tip error of the deformable mirror on the spatial spectrum plane of the generated Bessel beam, making the axial intensity distribution of the Bessel beam increasingly uniform. Furthermore, a filter that combines a sectorial filter and an annular filter is designed, which directly transforms a circularly symmetric Bessel beam into an elliptic Bessel beam. The aspect ratio of the main lobe of the generated elliptical Bessel beam is approximately 1.72. The axial full width at half maximum exhibits a maximum of 247 mm, denoting an excellent non-diffraction property. The proposed optical spatial filtering method can effectively improve the performance of the Bessel beam generated by a deformable mirror and advance its applications.

Key words laser optics; Bessel beam; deformable mirror; optical spatial filtering; round tip error

OCIS codes 140.3300; 190.4360; 070.6110

1 引言

贝塞尔光束由于其自恢复和无衍射特性受到广泛关注^[1-2],在高深径比激光打孔^[3-4]、激光隐形切割^[5]、生物显微成像^[6]、微粒子光操纵^[7]和空间光通信^[8]等领域有重要的应用价值。高质量的贝塞尔光束是其应用的基础。目前,贝塞尔光束的生成方法主要有轴棱锥^[9]、环缝透镜^[10]、空间光调制器^[11-12]和变形镜^[13-15]等。前两种方法在不添加额外光学元器件的情况下无法生成参数可调的贝塞尔光束,且

易受到加工和安装误差的干扰^[16]。空间光调制器具有像素高、可调性强等优点,可生成可调的贝塞尔光束,但其损伤阈值低,难以承受高功率激光。近年来提出的变形镜生成方法,不仅能够校正光学系统中的像差,还能够生成可调的贝塞尔光束,且能承受高功率激光,具有重要的应用前景。但是,变形镜连续镜面固有的圆顶误差,会使生成的贝塞尔光束在起始位置产生类似高斯光聚焦的现象,使轴向光强发生震荡,不利于变形镜的实际应用^[13]。李文来等^[17]研究表明,提高变形镜致动器的环数可降低圆

收稿日期: 2019-07-29; 修回日期: 2019-08-18; 录用日期: 2019-08-29

基金项目: 国家自然科学基金(51805280)、浙江省公益技术研究(LGF18E050001)

* E-mail: majianqiang@nbu.edu.cn

顶误差的影响,但增加了变形镜的成本。光学空间滤波是一种重要的光信息处理技术,通过在光学系统的空间频谱面上放置适当的滤波器(如狭缝、光阑、相位板等),去掉(或选择通过)某些空间频率或改变他们的振幅和相位,在输出面上获得所需光场分布^[18-19]。

本文拟采用光学空间滤波技术改善变形镜生成的无衍射光束的质量。对变形镜生成的贝塞尔光束进行空间频谱分析,设计了一种环形滤波器。该环形滤波器滤除了因圆顶误差产生的频谱分量,提高了贝塞尔光束的质量。

2 贝塞尔光束的滤波原理

零阶贝塞尔光束可认为是具有锥形波前的自相干光束,基于压电变形镜的贝塞尔光束的原理图如图 1 所示。将变形镜镜面形重构为底角为 α_{DM} 的锥形面形。准直的高斯光束经过变形镜反射后,所有光束与光轴成 α 角($\alpha = 2\alpha_{DM}$)会聚并向前传播,光束发生重叠并干涉形成贝塞尔光束(阴影部分), α 角称之为贝塞尔光束的锥角。锥角和波长决定贝塞尔光束主瓣的直径,而锥角和光束直径决定其无衍射长度^[13]。由于变形镜变形能力有限,直接生成的锥角较小,可通过望远系统(由图 1 中透镜 1 和透镜 2 组成)进行缩束增加锥角,减小贝塞尔光束的主瓣直径。增加后的锥角为 α' 可表示为

$$\alpha' = (1/M)\alpha, \quad (1)$$

式中: M 为望远系统的放大倍率。

图 2(a)所示为变形镜生成的锥形波前(波前幅值为变形镜镜面物理变形量的两倍),中心部分呈圆顶状,这是由连续镜面不能实现尖峰重构导致的。根据透镜的傅里叶变换可知,透镜 1 的后焦点即为贝塞尔光束的频谱面。图 2(b)和(c)分别为理想锥和变形镜生成的贝塞尔光束在频谱平面上的光强分布,图中的环形曲线为光环截面的光强分布。可知,理想锥得到的光强分布为环形,而实际变形镜由于圆顶的影响在圆环外产生了额外的频谱分量。这些频谱分量使贝塞尔光束在起始位置产生类似高斯聚焦的现象,且轴向光强出现震荡^[18]。因此,可以根据理想贝塞尔光束的频谱特点,设计一种环形滤波器放置于望远镜系统内部的焦平面位置,通过滤除额外的频谱分量,从而提高贝塞尔光束的质量。设计的环形滤波器如图 2(d)所示,白色部分透射率为 1,黑色部分的透射率为 0,圆形虚线表示圆环中心线,直径为 D ,环缝宽度为 b 。圆环直径可表示为

$$D = 2f \tan \alpha, \quad (2)$$

式中: f 为透镜 1 的焦距。

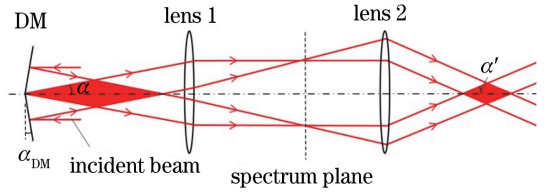


图 1 变形镜生成贝塞尔光束的原理图

Fig. 1 Schematic of Bessel beam generated by deformable mirror

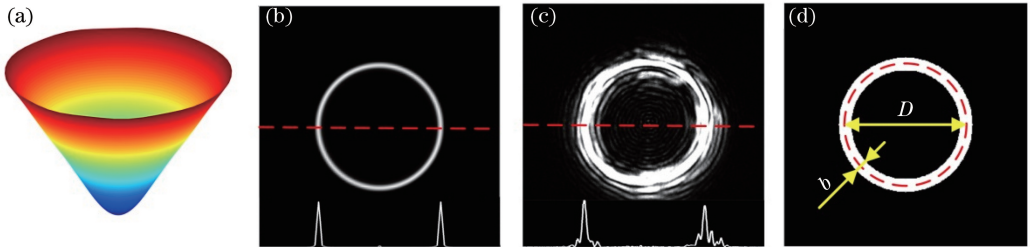


图 2 变形镜圆顶误差对贝塞尔光束空间频谱影响。(a)变形镜重构的锥形波前;(b)和(c)分别为理想锥和变形镜生成的贝塞尔光束在空间谱平面上的光强分布;(d)设计的空间滤波器

Fig. 2 Influence of round tip error of deformable mirror on spatial spectrum of generated Bessel beams. (a) Conical wavefront generated by deformable mirror; (b) (c) light intensity distributions on spectrum plane of Bessel beams generated by ideal axicon and practical deformable mirror, respectively; (d) designed spatial filter

3 贝塞尔光束的滤波整形实验

3.1 贝塞尔光束的环形滤波实验

根据图 1 中的滤波原理进行实验,实验中准直的高斯激光波长为 632 nm,直径为 4 mm,贝塞尔光

束的锥角 α 为 5 mrad, f 为 100 mm,通过计算(2)式得到贝塞尔光束在空间频谱中的理论环形直径 D 为 1.0 mm,仿真得到理想情况下的光环宽度约为 105 μm 。为研究不同环缝宽度对贝塞尔光束的滤波性能,设计了直径为 1.0 mm、环缝宽度分别

为 100, 200, 400 μm 的 3 种环形滤波器。滤波器采用菲林胶片打印而成,有图案处的透过率为 0,无图案处的透过率为 1,更高精度的滤波器可通过在玻璃片上制作金属图案来实现。

实验中,通过变形镜重构锥形相位,其残余误差均方根约为 40 nm。虽然残余误差很小,但圆顶误差依然对生成的贝塞尔光束的质量影响很大。通过施加不同环缝宽度的环形滤波器进行实验,并通过移动 CCD 相机位置采集贝塞尔光束不同传播距离处的光强分布,得到的轴向光强分布如图 3 所示,提取光束主瓣的光强得到的轴上光强曲线对比如图 4 所示。未滤波时,由于圆顶误差的影响,起始位置产

生了类似聚焦的光点,其强度甚至超过了后续的贝塞尔光束,轴向光强分布产生了较大的起伏,不利于应用。在 3 种滤波条件下,贝塞尔光束的均匀性都得到了明显改善。随着环缝宽度的减小,阻挡的光束分量增加,在靠近镜面处的尖峰光强降低,轴向光强分布变化更平滑,对应的轴向半峰全宽分别约为 147, 244, 244 mm。但减小环缝宽度的同时会减少透过光束的能量,采用环缝宽度由宽到窄的环形滤波器时,贝塞尔光束最大光强为无滤波器时(取类高斯焦点后贝塞尔光束的最大光强为参考)的 91.3%、80.3% 和 46.5%。实验可知,200 μm 环宽的滤波器具有较好的性能。

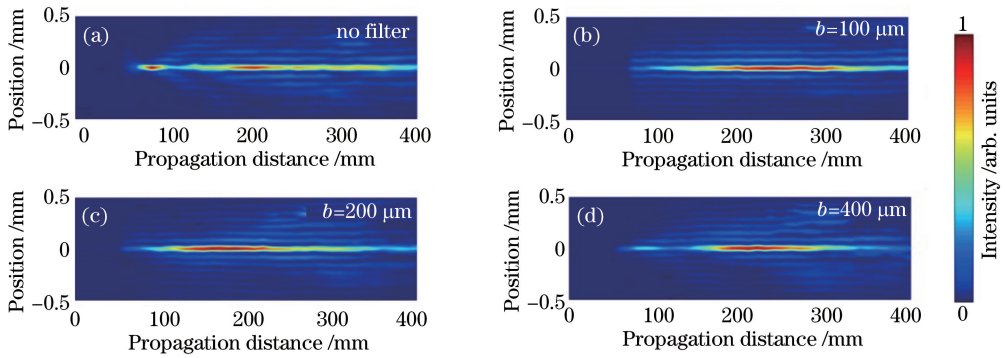


图 3 不同滤波条件产生的贝塞尔光束的轴向光强分布(b 为环缝宽度)。

(a) 未滤波;(b) $b=100 \mu\text{m}$;(c) $b=200 \mu\text{m}$;(d) $b=400 \mu\text{m}$

Fig. 3 Axial light intensity distributions of generated Bessel beams under different filtering conditions, in which b is width of ring slit. (a) Unfiltered; (b) $b=100 \mu\text{m}$; (c) $b=200 \mu\text{m}$; (d) $b=400 \mu\text{m}$

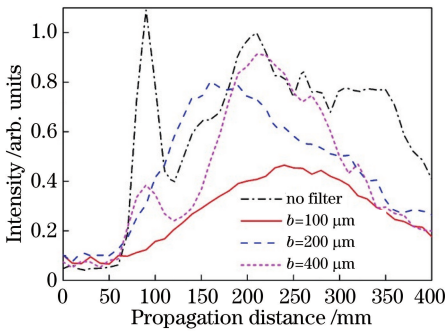


图 4 不同滤波情况下贝塞尔光束的轴上强度分布对比

Fig. 4 Comparison of axial intensity distributions of Bessel beams under different filtering conditions

3.2 滤波实现椭圆贝塞尔光束的生成

进一步设计了由扇形滤波器和环形滤波器组合而成的滤波器,用来生成主瓣椭圆形的贝塞尔光束,如图 5 所示。扇形滤波器可以去除轴对称方向上相同的光谱分量部分,从而产生非圆对称的强度分布,形成椭圆贝塞尔光束(X 、 Y 方向分别为短轴、长轴方向),扇形的角度越小,椭圆的长短轴之比越

大^[20-21];而环形滤波器能够优化椭圆贝塞尔光束的光强分布,使其分布更加平滑。为了保证光能量透过率,取环缝宽度 b 为 200 μm ,扇形顶角为 120° 。

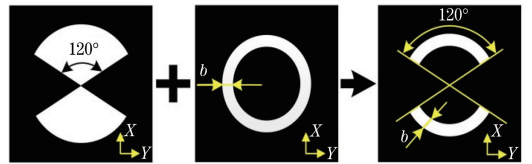


图 5 组合滤波器

Fig. 5 Combined filter

图 6 分别展示了扇形滤波、组合滤波生成的椭圆贝塞尔光束在短轴(XZ 平面)和长轴(YZ 平面)截面上的光强分布。其中:短轴截面的光强分布都表现出 3 条能量较强的条形分布,其中光束中心部分能量最高;长轴截面的光强分布为一条较宽的光强分布。采用扇形滤波器的光强分布不均匀。采用组合滤波器能够有效地对光束进行滤波,消除了在靠近镜面处的尖峰光强,使贝塞尔光束在传播过程中的光强分布更加平滑,且主瓣的长轴和短轴在传输过程中基本保持

不变,实验与仿真效果一致性较好,且实验中的轴向半峰全宽达到 247 mm 左右,光束的无衍射距离较长。组合滤波器生成的椭圆贝塞尔光束在不同传播距离处的截面光强分布如图 7 所示,通过滤波整形后

的贝塞尔光束形成椭圆形的中心主瓣,且各位置的主瓣尺寸的一致性较好,光强分布一致。各位置主瓣的长轴和短轴长度如表 1 所示,贝塞尔主瓣的长短轴之比约为 1.72,与仿真值1.71基本一致。

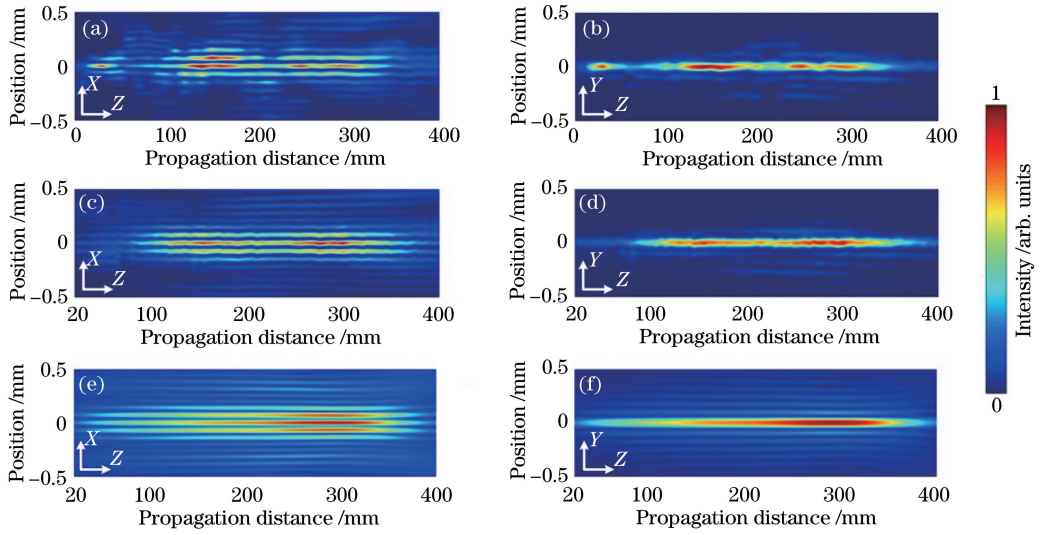


图 6 椭圆贝塞尔光束轴向光强分布。(a)(b)扇形滤波的实验结果；(c)(d)组合滤波的实验结果；(e)(f)组合滤波的理想锥仿真结果

Fig. 6 Axial light intensity distributions of elliptical Bessel beam. (a)(b) Experimental results of sectorial filter; (c)(d) experimental results of combined filter; (e)(f) ideal axicon simulation results of combined filter

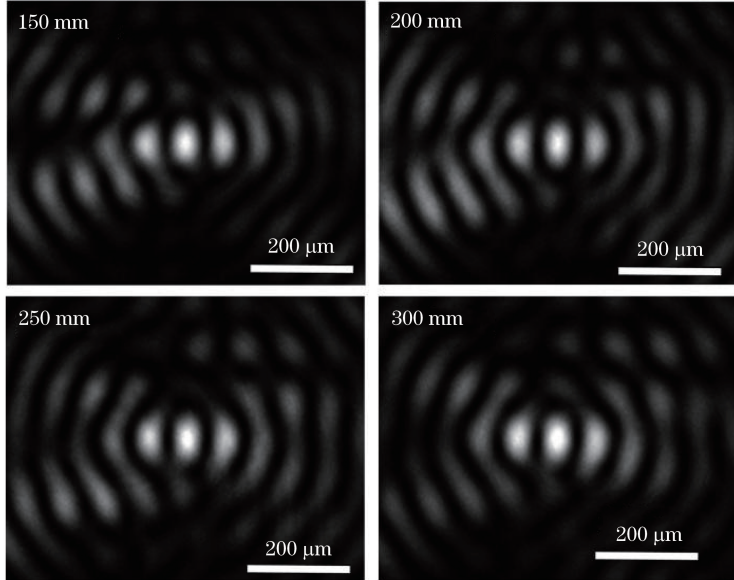


图 7 不同传播位置的光束截面光强

Fig. 7 Cross-sectional light intensity at different propagation distances

表 1 各位置椭圆贝塞尔光束的主瓣尺寸

Table 1 Main lobe sizes of elliptical Bessel beam under different propagation distances

Distance /mm	150	200	250	300
Width / μm	48.8	48.8	48.8	52.5
Height / μm	82.5	82.5	86.3	90.0
Aspect ratio	1.69	1.69	1.77	1.71

4 结 论

采用光学空间滤波技术改善变形镜生成的无衍射光束的质量。对变形镜生成的贝塞尔光束进行空间频谱分析,发现受变形镜圆顶误差的影响,圆环外产生了额外的频谱分量。基于此现象设计了一种环

形滤波器,实验结果显示,该滤波器可以很好地抑制圆顶误差带来的类高斯光聚焦及轴向光强震荡的现象,提高贝塞尔光束的质量。设计了一种由扇形滤波器和环形滤波器组合而成的滤波器,不仅能够提高贝塞尔光的光束质量,还能够生成焦深的椭圆贝塞尔光束,当滤波器的扇形顶角为 120° 时,贝塞尔光束主瓣的长短轴之比约为1.72。本研究提出的滤波器结构简单、成本低、易于实现,有利于变形镜生成的贝塞尔光束在激光加工、显微成像等领域的应用。

参 考 文 献

- [1] Durnin J, Miceli J J, Jr, Eberly J H. Diffraction-free beams[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(15): 1499-1501.
- [2] Liu H L, Hu Z H, Xia J, *et al.* Generation and applications of non-diffraction beam[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(21): 214204.
刘会龙, 胡总华, 夏菁, 等. 无衍射光束的产生及其应用[J]. *物理学报*, 2018, 67(21): 214204.
- [3] Meyer R, Jacquot M, Giust R, *et al.* Single-shot ultrafast laser processing of high-aspect-ratio nanochannels using elliptical Bessel beams[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(21): 4307-4310.
- [4] Xie Q, Li X W, Jiang L, *et al.* High-aspect-ratio, high-quality microdrilling by electron density control using a femtosecond laser Bessel beam[J]. *Applied Physics A*, 2016, 122(2): 136.
- [5] Kumagai M, Uchiyama N, Ohmura E, *et al.* Advanced dicing technology for semiconductor wafer: stealth dicing [J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2007, 20(3): 259-265.
- [6] Gao L, Shao L, Chen B C, *et al.* 3D live fluorescence imaging of cellular dynamics using Bessel beam plane illumination microscopy [J]. *Nature Protocols*, 2014, 9(5): 1083-1101.
- [7] Dholakia K, Čižmár T. Shaping the future of manipulation[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(6): 335-342.
- [8] Li S H, Wang J. Adaptive free-space optical communications through turbulence using self-healing Bessel beams [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 43233.
- [9] Scott G, McArdle N. Efficient generation of nearly diffraction-free beams using an axicon [J]. *Optical Engineering*, 1992, 31(12): 2640-2643.
- [10] Chu X X, Sun Q, Wang J, *et al.* Generating a Bessel-Gaussian beam for the application in optical engineering[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 18665.
- [11] Ni D D, Xie C, Zhao Z Y, *et al.* Bessel-like beams with the precisely controllable central lobe size [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0714001.
倪丹丹, 谢辰, 赵振宇, 等. 中心主瓣尺寸可精细调控的类贝塞尔光束 [J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 0714001.
- [12] Walde M, Jost A, Wicker K, *et al.* Engineering an achromatic Bessel beam using a phase-only spatial light modulator and an iterative Fourier transformation algorithm [J]. *Optics Communications*, 2017, 383: 64-68.
- [13] Li Y, Yu Q Z, Yang Z F, *et al.* Tunable Bessel and annular beams generated by a unimorph deformable mirror [J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(10): 106107.
- [14] Brousseau D, Drapeau J, Piché M, *et al.* Generation of Bessel beams using a magnetic liquid deformable mirror [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(21): 4005-4010.
- [15] Yu X M, Todi A, Tang H M. Bessel beam generation using a segmented deformable mirror [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(16): 4677-4682.
- [16] Hu R, Wu F T. Influence of axicon vertex off axis machining error on Bessel beams [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1205002.
胡润, 吴逢铁. 轴棱锥顶点离轴加工误差对贝塞尔光束的影响 [J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1205002.
- [17] Li W L, Peng T R, Ma J Q. Analysis of influencing factors on quality of Bessel beam generated by deformable mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(8): 0826003.
李文来, 彭泰然, 马剑强. 变形镜生成贝塞尔光束的质量影响因素分析 [J]. *光学学报*, 2019, 39(8): 0826003.
- [18] Brzobohatý O, Čižmár T, Zemánek P. High quality quasi-Bessel beam generated by round-tip axicon [J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 12688-12700.
- [19] Bhuyan M K, Velpula P K, Somayaji M, *et al.* 3D nano-fabrication using controlled Bessel-glass interaction in ultra-fast modes [J]. *Journal of Laser Micro Nanoengineering*, 2017, 12(3): 274-280.
- [20] Fahrbach F O, Gurchenkov V, Alessandri K, *et al.* Self-reconstructing sectioned Bessel beams offer submicron optical sectioning for large fields of view in light-sheet microscopy [J]. *Optics Express*, 2013, 21(9): 11425-11440.
- [21] Xie X X, Li D, Wu F T. Ribbon quasi-nondiffracting beam obtained with elliptical aperture and axicon system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0126001.
谢晓霞, 李冬, 吴逢铁. 椭圆孔径与轴棱锥系统产生带状近似无衍射光束 [J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0126001.