

文章编号 1004-924X(2017)增-0012-08

不可见脉冲激光的聚焦系统

傅 星*, 李纪楷, 齐 慧

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

摘要:为了解决不可见脉冲激光加工系统中的位置定位与聚焦问题,介绍了一种实用的激光加工系统结构,并提出了基于该系统结构的适用于不可见脉冲激光的位置定位与自动聚焦方法。首先,CCD 采集不可见激光的一个脉冲加工样品表面的瞬间的图像。接着,对该图像通过合适的阈值进行二值化处理,提取图像中的亮点区域,再通过灰度重心法得到该亮点区域的几何中心的亚像素坐标值,这一坐标即为激光的焦点位置。然后,分析多个时域的图像清晰度评价算子,并对图像的各个分量进行研究,得到了由 Sobel 梯度算子评价样品表面图像的绿色分量的自动聚焦算法。之后,提出了采用以焦点位置为中心的局部图像来进行评价的局部自动聚焦算法。实验结果表明:位置定位的精度为 1 个像素,自动聚焦的精度为 1 μm 。同时,以上所述的位置定位与聚焦方法可以有效地提高激光加工系统加工不同参数的样品形貌的能力,满足了更多不同的加工需求。

关键词:激光加工;不可见脉冲激光;位置定位;自动聚焦;局部聚焦;计算机视觉

中图分类号:TN249;TP394.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172513.0012

Autofocus system for invisible pulsed laser

FU Xing*, LI Ji-kai, QI Hui

(School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

* Corresponding author, E-mail: xingfu@tju.edu.cn

Abstract: It is more difficult for invisible laser to position locating and local autofocus in the invisible pulse laser processing system. In this paper, a useful laser processing system was introduced, and the methods of the position locating and autofocus were proposed based on the system. First, the image of the interaction between one pulse laser and the sample surface was captured by CCD. Then, the image was turned into binary image by a proper threshold value. Extracting the area of the light spot, the coordinate of the subpixel of the centroid of the focused laser spot was calculated by the gray centroid method. Meanwhile several operators were employed to evaluate the sharpness of the image in time domain, thus analyzing different components of the image in the operators. Subsequently, the autofocus algorithm was presented based on the evaluation of green component of the sample surface with Sobel gradient operator. Furthermore, the local autofocus algorithm was proposed based on the local image centered with the focused laser spot rather than the whole image to reduce the error of the global autofocus algorithm. Experimental results show that the precision of the position locating algorithm is 1 pixel and the accuracy of the autofocus algorithm is 1 μm , which indicates that the proposed autofocus method can improve the

收稿日期:2017-05-31;修订日期:2017-06-11.

基金项目:高等学校学科创新引智计划资助项目(No. B07014)

performance of laser processing systems to meet the increasing need of the laser processing.

Key words: laser processing; invisible pulsed laser; position locating; autofocus; local autofocus; computer vision

1 引 言

近年来,脉冲激光加工技术被广泛应用于 MEMS 设备制造、精密仪器制造以及印刷电路板制造等领域^[1-3]。其中,不可见脉冲激光在加工系统中的应用越来越广泛,例如紫外脉冲激光可以在金属以及金属氧化物薄膜上得到可见光波段内激光无法达到的加工效果^[4-5]。对于一般的脉冲激光加工系统而言,通常都会有相应的图像采集系统,来得到待加工样品表面的图像,以更好地指导加工^[6]。其中,可见脉冲激光的光斑位置可由 CCD 十分容易地观察到。针对可见光斑几何中心位置的提取,文献[7]采用霍夫变换来提取光斑,文献[8]采用高斯拟合来得到光斑的中心。同时,可见激光的聚焦方法也比较简便,光斑越小,说明光斑聚焦得越好,所以只要得到光斑的最小位置即可^[9]。然而,上述方法无法适用于不可见脉冲激光,因为其光斑无法从 CCD 采集到的图像中观察到,从而光斑的位置定位和聚焦问题便无法通过上述适用于可见激光的方法来获取。虽然针对上述问题的相关文献较少,但针对图像的聚焦问题,国内外学者进行了大量研究。在显微镜图像的自动聚焦方面,文献[10]结合提升小波变换和 Sobel-Tenengrad 算子作为新型的聚焦评价函数,文献[11]结合采用最大灰度差来评价图像清晰度,并引入阈值区分边缘点和非边缘点来增加评价函数的自适应性。在遥感图像聚焦方面,文献[12]在合成孔径雷达中采用了多方位局部自动聚焦方法,文献[13]则提出了用于合成孔径雷达中聚焦算法的结合分解几何方法的搜索策略^[13]。不过,目前很少有研究将聚焦方面的技术运用在激光加工领域,尤其是不可见激光的聚焦问题上。

针对不可见脉冲激光的光斑位置定位与聚焦问题,本文先是介绍了一种实用的激光加工系统结构,然后结合该系统提出了不可见脉冲激光光斑几何中心的提取方法,以及适用于不可见激光的自动聚焦方法。该方法可以有效地定位激光光

斑,提高了激光加工系统的加工能力,以满足更多的加工需求。

2 激光加工系统的组成

本文所采用的激光加工系统主要由激光器、辅助照明系统、光路机械系统、位移台、CCD 相机和计算机等组成,如图 1 所示。其中,激光器采用不可见脉冲激光器,辅助照明系统提供可见光源,光路机械系统负责对激光器产生的激光进行传输、引导和准直,使其垂直作用于待加工样品表面。透镜组提供同轴照明功能。分光棱镜在激光器一侧镀有对应与激光器波长的高反射膜,用于保护 CCD 相机不受激光器的影响以及使得大部分激光都可以作用于样品表面。同时,聚焦物镜采用带有复消色差功能的物镜,具体原因在 3.2 节中会进行阐述。光路机械系统的传导部分由两个全反射棱镜进行示意。整个系统由计算机进行控制。

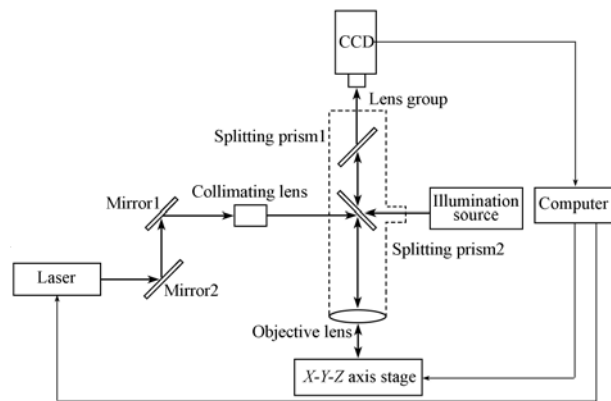


图 1 激光加工系统结构图

Fig. 1 Schematic diagram of laser processing system

3 激光加工系统软件的关键算法

3.1 位置定位算法

由于辅助光源的存在,样品表面的图像可以由 CCD 观察得到,但经过物镜聚焦后激光束焦点在图像中的位置仍无法确定,这无疑会对后续的

加工过程造成较大的影响。分析加工系统的结构可知,激光束在 CCD 相机采集图像中的相对位置是不变的,因为在整个系统中只有位移台在运动,而其他系统部件是不动的,比如 CCD 相机与光路机械系统之间的相对位置保持不变。同时,在加工过程中发现,虽然脉冲激光本身不可见,但当一个脉冲激光作用于样品表面时,两者之间的相互作用,即激光烧蚀样品表面的过程是可见的,本文以硅为例(之后的实验均以硅为例)展示了这一过程,如图 2 所示。

图 2 中的亮点便是一个脉冲的激光与样品表面相互作用的区域,而这一区域恰好反映出物镜

聚焦后激光束焦点在图像中的位置。



图 2 一个脉冲的激光与样品表面相互作用过程
Fig. 2 Interaction between one pulse laser and sample

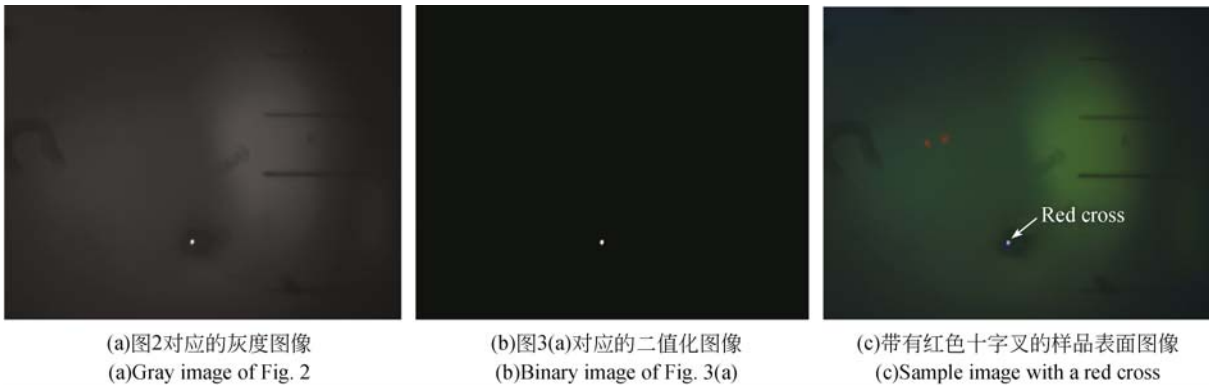


图 3 亮点几何中心提取过程

Fig. 3 Extraction process of light spot

如图 3 所示,只要提取出该亮点区域的几何中心,激光束焦点在图像中的位置便可确定。图 3(a),3(b)和 3(c)共同展示了提取亮点几何中心的过程。图 3(a)是图 2 对应的灰度图像。从图 3(a)可以看出,亮点区域相对于周围区域的灰度值较高,所以只要选择合适的阈值,便可以分割出亮点区域。最终,图 3(a)通过阈值 110(灰度值为 0~255)进行二值化,得到了图 3(b)。图 3(b)中的白色区域对应于原始图像(图 2)中的亮点区域。在得到亮点区域之后,利用灰度重心法便可以得到亮点区域的几何中心^[14],即:

$$x_{\text{focus}} = \frac{\sum f(x_i, y_i) \cdot x_i}{\sum f(x_i, y_i)}, \quad (1)$$

$$y_{\text{focus}} = \frac{\sum f(x_i, y_i) \cdot y_i}{\sum f(x_i, y_i)}, \quad (2)$$

式中: $(x_{\text{focus}}, y_{\text{focus}})$ 为聚焦后激光束焦点在 CCD 相机采集图像上的几何中心, x_i, y_i 分别是图 3(a)

和 3(b)所示图像白色区域中的点的行值和列值, $f(x_i, y_i)$ 是图 3(a)中图像坐标为 (x_i, y_i) 的点的灰度值。为了减少误差,对上述所示的计算在不同背景下(样品材料仍为硅,但将脉冲打在样品的不同区域)重复 30 次,最终得到图像几何中心的亚像素坐标为 $(603.5, 772.1)$, 对应的 CCD 采集图像的大小为 1024×1280 。之后,只要以这一个坐标为中心,画一个红色十字叉,如图 3(c)所示,那么在下次加工时便可以知道聚焦后激光束的焦点位置,以此就可以实现样品指定位置的加工。

3.2 自动聚焦算法

位置定位算法可以确定由物镜聚焦后的激光束焦点在 CCD 相机采集图像中的位置,这相当于解决了焦点位置 X 向和 Y 向的坐标定位问题,但 Z 向的聚焦位置仍无法确定,而 Z 向的聚焦精度会对激光加工质量造成较大影响^[15]。对于可见激光来说,由于其光斑可见,而当样品台的 Z 向

位置距离理想焦平面越远时,光斑越大。因此,可见激光的聚焦可以通过激光光斑在 CCD 相机采集图像中的大小来判断,这里不再赘述。而不可见激光由于其光斑不可见,这一方法不再适用。从先前的分析可知,不可见激光的光斑虽然不可见,但样品表面的图像在辅助光源的帮助下仍然能被 CCD 相机采集到,因此可以利用对图像清晰度的评价来完成聚焦。由于辅助光源的波长处于可见光波段,在波长上与不可见激光的波长相差较大,所以经过同一物镜聚焦后,聚焦位置必然存在一定的偏差。在加工系统结构的介绍中提到,本文采用复消色差物镜,因此可以有效地减少这一偏差^[16]。综上所述,对不可见激光的聚焦可以通过对样品表面图像的清晰度评价来完成。

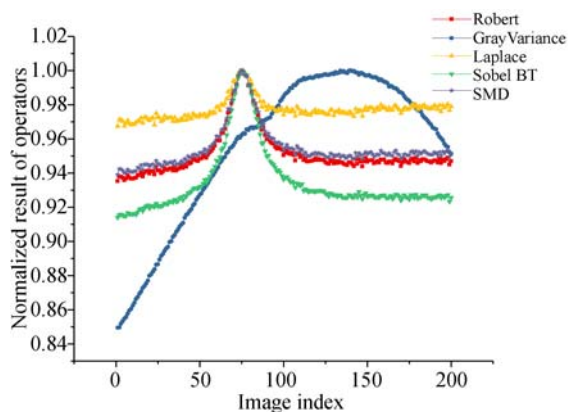
图像清晰度评价算法主要分为时域和频域两种^[17]。时域评价算法利用图像的梯度信息,图像细节越清晰,梯度信息越多,聚焦越准确;频域聚焦算法则利用图像的高频信息,高频信息越丰富,聚焦越准确。由此可知,以上两种算法实际上都要求样品表面图像的特征越多越好。但激光加工样品的表面图像是否包含较多的特征这一点无法确定,表面较为光滑的样品所对应的图像细节较少,而表面较为粗糙的样品所对应的图像细节相对较多。因此,本文选取了几种常见的时域评价算子来进行实验,而频域评价算子由于算法运行时间较长,不具有实时性^[18],所以本文不予讨论。本文选取的时域评价算子有灰度方差(Gray variance)、Robert、拉普拉斯(Laplace)、Sobel 梯度(Sobel based Tenengrad, Sobel BT)以及灰度方差绝对值之和(Sum of the absolute value of the gray degree variance, SMD)^[18]。

本文先采集了 200 幅不同离焦距离下的样品表面图像(其中包含聚焦图像),图像编号为 0~199,每幅图像的离焦距离相差 $1 \mu\text{m}$,然后分别使用上述几种算子对这 200 幅图像进行评价。同时,为了更好地比较不同算子的评价过程,每个算子的评价结果由各自评价结果中的最大值进行归一化,结果如图 4(a)所示。

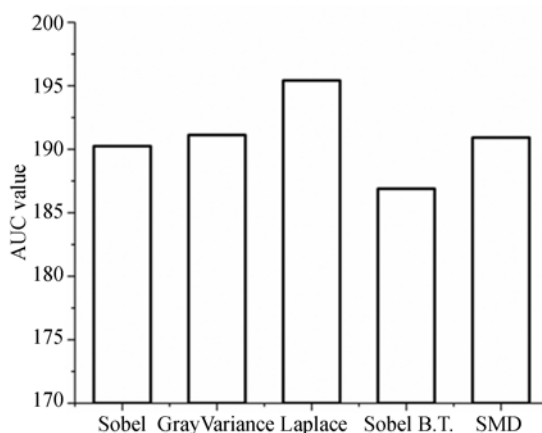
从图 4(a)可以看出,除了灰度方差法,其他聚焦评价算子都在同一位置取得了最大值,同时,为了更好地区分出各个算子的性能差异,本文定义了一种评价指标 AUC(Area of the Curve),即有:

$$\text{AUC} = \sum_i^N f_i, \quad (3)$$

其中: f_i 对应于算子归一化后的评价结果; N 为归一化后曲线上的点的个数,也就是用于聚焦评价的图像个数。AUC 反映的是算子归一化后评价曲线的面积。图 4(b)展示的是不同算子的 AUC 值比较。从图 4(b)可以看出, Sobel 梯度算子的 AUC 值最小; AUC 越小,说明算子的评价结果在聚焦情况下和离焦情况下的差异越大,而差异越大,则说明该算子能更好地区分出处于聚焦情况下的图像和处于离焦情况下的图像。因此,本文选用 Sobel 梯度算子来进行自动聚焦计算。



(a)不同算子的归一化后的评价曲线
(a)Normalized evaluation curve of different operators

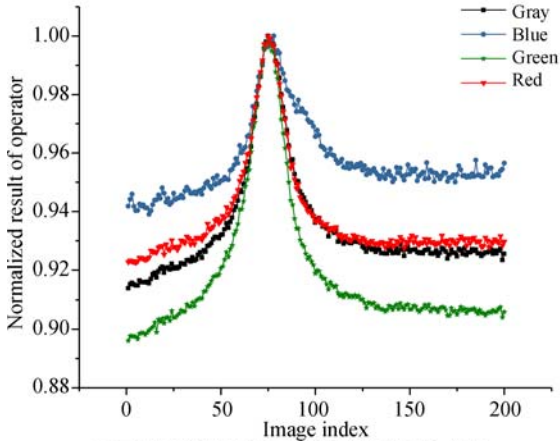


(b)不同算子的AUC值比较
(b)Comparison of AUC value between different operators

图 4 不同时域评价算子的评价结果对比

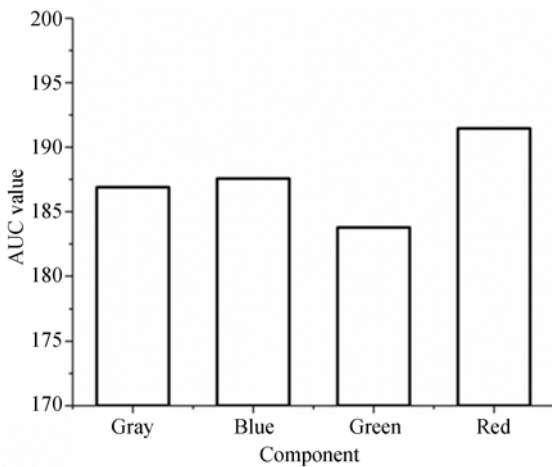
Fig. 4 Comparison of evaluation results between different time domain operators

由于 Sobel 梯度算子只适用于单通道图像, 在本文先前的讨论中, 采用的是灰度图像进行评价, 现对不同图像分量下 Sobel 梯度算子的效果进行评价, 结果如图 5(a)和图 5(b)所示。



(a)不同图像分量的Sobel梯度算子评价曲线

(a)Normalized evaluation curveS of different components of Sobel BT operator



(b)不同图像分量的Sobel梯度算子AUC值比较

(b)Comparison of AUC value of different components of Sobel BT operator

图 5 不同图像分量下 Sobel 梯度算子的评价结果
Fig. 5 Evaluation result of Sobel BT operater with different image components

结合图 5(a)和图 5(b)可以看出,在不同的图像分量中,绿色分量的 AUC 值最低,因此,本文采用样品表面图像的绿色分量的 Sobel 梯度算子来实现自动聚焦算法。同时,为了提高自动聚焦算法的准确性,本文采用全局搜索的方式,算法流程图如图 6 所示。首先,位移台先移动到一个相

对较高的离焦位置,此时图像一定是模糊的,接着位移台每次向下移动 $1 \mu\text{m}$ 。然后对采集到的图像进行一次评价,位移台再移动到评价结果值最大的图像对应的位置,此时便完成了自动聚焦过程。

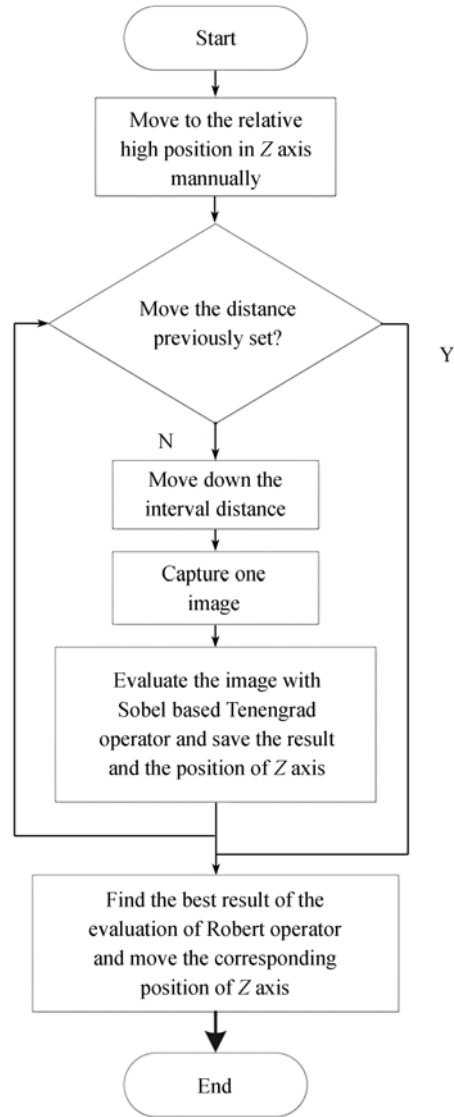


图 6 自动聚焦算法流程图

Fig. 6 Flow chart of autofocus algorithm

3.3 局部自动聚焦算法

上述所述的聚焦算法从整个样品表面图像的角度,以 $1 \mu\text{m}$ 的精度对不可见脉冲激光进行聚焦,但激光加工系统仍存在一定的偏差。因为加工系统要求激光束焦点与样品表面的某一点相重合,之后的加工便从那一点开始,而上述聚焦算法是以样品表面图像整体为对象实现聚焦,对样品

表面整体来说,达到了一个综合的较好的聚焦结果;但对激光束焦点所在位置而言,聚焦结果必然存在一定的偏差。基于以上分析,本文提出一种局部自动聚焦算法。先前的位置定位算法得到了激光束焦点在 CCD 相机采集图像中的位置,同时,这一位置在图像中保持不变。因此,本文采用以激光束焦点位置为中心的 200×200 的局部图像进行聚焦评价,以代替原先采用整幅图像的方式。局部自动聚焦示意图如图 7(a)所示,而全局自动聚焦与局部自动聚焦归一化后的评价函数曲线比较如图 7(b)所示。

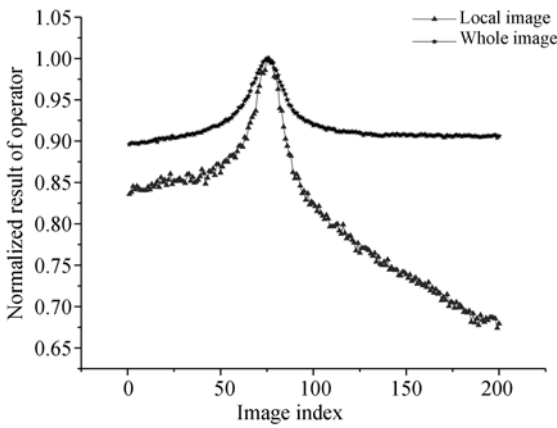
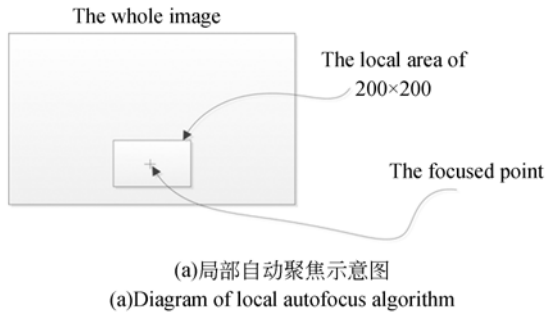


图 7 全局与局部自动聚焦评价结果对比

Fig. 7 Comparison of evaluation result between global and local autofocus algorithms

图 7(a)中以红色十字叉为中心的小矩形即为局部图像的位置。图 7(b)展示了全局自动聚焦于局部自动聚焦的差异,从图 7(b)可以看出,局部自动聚焦和全局自动聚焦算法得到的结果相差 $1 \mu\text{m}$,而这 $1 \mu\text{m}$ 便是上述所述的误差。同时,局部自动聚焦算法具有更小的 AUC 值,即

区分出图像的聚焦情况与离焦情况的能力更强。

4 加工实验与结果

基于上述所述的聚焦算法,本文分别在离焦 $10 \mu\text{m}$ 和聚焦情况下,以不同的激光功率在硅上加工了多条直线进行对比,结果如图 8 所示。

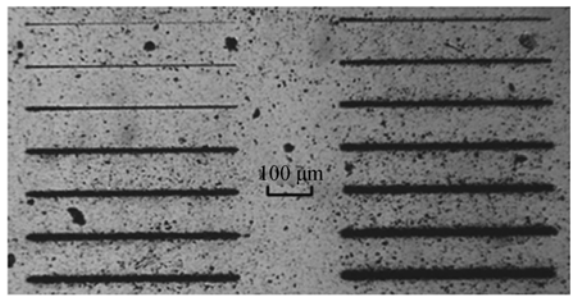


图 8 不同激光能量下加工的直线

Fig. 8 Lines of silicon fabricated with different laser powers

图 8 中共有 14 条直线,长度均为 $500 \mu\text{m}$,左侧 7 条直线在离焦情况下加工,右侧 7 条直线在聚焦情况下加工。同一行直线的激光加工功率相同。从上到下,每一行的最大加工激光功率相比上一行增加 1%,由此得到的线宽如图 9 所示。

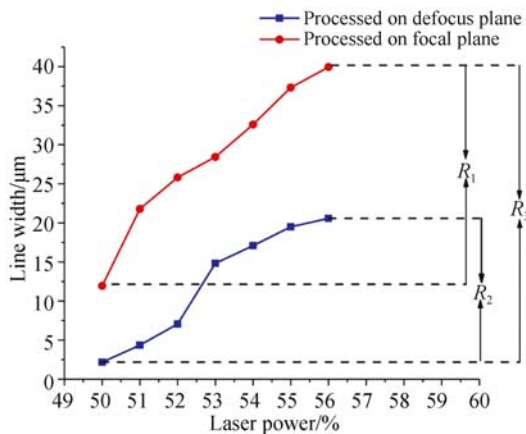


图 9 不同激光功率下加工的线宽曲线

Fig. 9 Curves of line width with different laser powers

如图 9 所示,当激光功率的范围为 $50\% \sim 56\%$ 时,聚焦情况下的线宽变化范围为 R_1 ,而离

焦情况下的线宽变化范围为 R_2 , 而 R_1 明显大于为 R_2 , 说明在聚焦情况下加工系统具有更宽的参数可调范围。同时, 在通过本文所述的方法完成自动聚焦之后, 还可以人工地进行离焦, 此时, 直线的线宽范围可以更大。图 9 中的 R_3 便是在同样的激光功率变化范围下, 结合了聚焦情况和离焦情况之后的线宽取值范围。而 R_3 约为 R_1 的 2 倍, R_1 约为 R_2 的 1.35 倍, 由此可见, 在相同的参数下, 本文提出的聚焦算法可以有效地拓展激光加工系统的加工能力, 从而满足更多不同的加工需求。

参考文献:

- [1] KOWALCZYK R, ZEBALA W. Analysis of laser cutting speed influence on the surface quality and shape deviation of steel parts[C]. *International Society for Optics and Photonics*, 2014: 929011-929011-9.
- [2] 贾振元, 赵凯, 刘巍, 等. 工程塑料表面金属覆层的激光定域精细去除[J]. *光学 精密工程*, 2016, 24(1):94-101.
- JIA ZH Y, ZHAO K, LIU W, *et al.*. Localized and precision removal of metal coating on engineering plastics using NC laser milling[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(1):94-101. (in Chinese)
- [3] SCINTILLA L D. Experimental investigation on fiber laser cutting of aluminium thin sheets [J]. *SPIE*, 2014, 8963:89630X.
- [4] FRAMIL CARPENO D, DICKINSON M, *et al.*. Induced hydrophobicity in micro- and nanostructured nickel thin films obtained by ultraviolet pulsed laser treatment[J]. *Physica Status Solidi*, 2016, 213(10):2709-2713.
- [5] NEDYALKOV N, NIKOV R, DIKOVSKA A, *et al.*. Gold nanostructures deposition by laser ablation in air using nano- and femtosecond laser pulses [J]. *Applied Physics A*, 2017, 123(5):306.
- [6] 黄文浩, 朱兰芳, 陈宇航, 等. 基于原子力显微镜的 PMMA 飞秒激光纳米加工[J]. *光学 精密工程*, 2007, 15(12):1959-1962.
- HUANG W H, ZHU L F, CHEN Y H, *et al.*. AFM based femto-second laser nanofabrication of PMMA[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(12):1959-1962. (in Chinese)
- [7] YE R, LIN C, LIN Z, *et al.*. A new algorithm to locate the laser spot center at a sub-pixel level[C]. *International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies*. *International Society for Optics and Photonics*, 2009.
- [8] 陈和, 杨志浩, 郭馨, 等. 激光光斑中心高精度定位算法研究[J]. *北京理工大学学报*, 2016, 36(2):181-185.
- CHEN H, YANG ZH H, GUO P, *et al.*. Research of the high precision laser spot center location algorithm[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2016, 36(2):181-185. (in Chinese)
- [9] XU D, YAO Y, FU X, *et al.*. Design of micromachining system based on nanosecond pulsed laser [J]. *Key Engineering Materials*, 2015, 645-646:1049-1053.
- [10] 周丽平, 孙志峻, 张泉. 显微视觉系统的自动聚焦及控制[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(3):807-812.
- ZHOU L P, SUN ZH J, ZHANG Q. Auto-focusing and control of micro-vision system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3):807-812. (in Chinese)
- [11] 洪裕珍, 任国强, 孙健. 离焦模糊图像清晰度评价函数的分析与改进[J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(12):3401-3408.
- HONG Y ZH, REN G Q, SUN J. Analysis and improvement on sharpness evaluation function of defocused image[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(12):3401-3408. (in Chinese)
- [12] RAN L, LIU Z, ZHANG L, *et al.*. Multiple lo-

5 结 论

本文为了解决不可见脉冲激光加工系统的位置定位与聚焦问题, 介绍了一种实用的激光加工系统结构, 并基于该系统提出了适用于不可见脉冲激光的位置定位方法, 以及对应的全局自动聚焦和局部自动聚焦方法。实验结果证明: 位置定位的精度为 1 个像素, 自动聚焦的精度为 $1 \mu\text{m}$, 说明通过以上聚焦方法可以有效地提高激光加工系统的加工能力。

- cal autofocus back-projection algorithm for space-variant phase-error correction in synthetic aperture radar[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2016, 13(9):1241-1245.
- [13] TORGRIMSSON J, DAMMERT P, HELLSTEN H, *et al.*. An Efficient solution to the factorized geometrical autofocus problem[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2016, 54(8):4732-4748.
- [14] XIAN W, QINWEI M, SHAOPENG M, *et al.*. A marker locating method based on gray centroid algorithm and its application to displacement and strain measurement[C]. *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, IEEE, 2011:932-935.
- [15] LIU C. *Design & Research of Nanosecond Pulse Laser Micromachining System*[D]. Tianjin: Tianjin University College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, 2008.
- [16] 齐敏珺,王新全,于翠荣,等. 静态显微光谱成像系统的研制[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(5):1240-1245.
- QI M J, WANG X Q, YU C R, *et al.*. Development of static microscopic spectral imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5):1240-1245. (in Chinese)
- [17] FONSECA E S R, FIADREIRO P T, PEREIRA M, *et al.*. Comparative analysis of autofocus functions in digital in-line phase-shifting holography[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(27):7663.
- [18] CAO J, CHENG Y, WANG P, *et al.*. Method based on bioinspired sample improves autofocusing performances[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(10):103103.

作者简介:



傅 星(1957—),男,河南南阳人,教授,博士生导师,主要从事微纳米测试技术、激光微加工技术的研究。E-mail: xingfu@tju.edu.cn



李纪楷(1993—),男,浙江台州人,硕士研究生,2015年于南昌大学获得学士学位,主要从事嵌入式系统设计,激光微加工系统与相关技术的研究。E-mail: jikailee@tju.edu.cn