基于BMP图像边缘跟踪的飞秒激光微加工技术研究

张东石, 陈烽*, 刘贺炜, 王先华, 杜凯, 司金海, 侯洵

西安交通大学电子与信息工程学院, 陕西省信息光子技术重点实验室, 西安 710049

* 联系人, E-mail: chenfeng@mail.xjtu.edu.cn

2008-11-07 收稿, 2009-06-09 接受

国家自然科学基金资助项目(批准号: 60678011, 10674107)

摘要 针对复杂结构和图案的飞秒激光微加工, 提出了一种基于 BMP 图像边缘跟踪的飞秒激光微加工方法. 介绍了采用该方法实现复杂图形飞秒激光微加工的总体思路, 讨论了加工路径的提取、优化、跟踪和加工过程的反馈, 以及在此基础上开发的飞秒激光微加工数控程序等. 并利用此技术成功制备出二维微纳图案. 研究表明, 利用该技术可实现微米至亚微米级特征尺寸复杂图案和微纳结构的飞秒激光数控加工.

关键词

飞秒激光
图像边缘检测
微加工
微纳图案

飞秒激光微加工是一种新型的微纳制造技术, 有着许多不可比拟的独特优势. 飞秒激光脉冲宽度极短(10^{-15} s), 在较低的脉冲能量能获得极高的峰值功率, 从而大大降低加工所需能量, 如使用 10 fs 激光, 0.3 mJ 能量就可在聚焦为直径 2 μm 的焦点达到 10^{18} W/cm² 的峰值强度. 飞秒激光能量集中在趋肤深度范围内且热影响区非常小, 没有熔化及再凝固痕迹, 大大减弱甚至消除了传统加工中热效应带来的诸多负面影响. 飞秒激光焦点处的非线性吸收可使入射激光聚焦在透明材料内部任何位置, 从而实现三维微纳加工. 此外, 由于飞秒激光的烧蚀阈值精确, 可将激光的能量控制在等于或稍高于烧蚀阈值的范围内, 可进行超越衍射极限的亚微米加工.

当脉冲持续时间足够短、峰值功率足够高时, 飞秒激光可对多种材料进行二维和三维精细加工、修复和处理, 尤其对高硬度、高熔点、抗腐蚀和脆性材料(如金属、玻璃、陶瓷等)具有明显的加工优势. 目前, 国内外学者针对飞秒激光微加工在微光学、微电子学、微机械器件及生物化学分析系统领域的应用已经开展了广泛的研究工作, 如波导^[1-3]、光栅^[4,5]、微电极^[6]、Mach-Zehnder干涉仪(MZI)^[7]等简单微纳图案的

加工, 以及光开关^[8]、三维光学回路^[9,10]、多层光栅^[11]等复杂微结构的加工. 飞秒激光微加工在微纳加工领域扮演着越来越重要的角色. 所以针对精密运动平台开发可以自动生成加工路径、并且能够实现二维、三维复杂图案和微纳器件加工的飞秒激光数控微加工软件, 具有重要的实用意义. 本文研究了BMP图像边缘轮廓的提取、优化、跟踪与反馈技术, 并开发了基于此技术的飞秒激光数控微加工程序, 结合飞秒激光微加工工艺的优化, 可以实现复杂图案和微纳器件在微纳尺度上的加工. 通过对加工图案的三维CAD模型分层切片进行扫描线生成及扫描路径优化. 利用聚焦的飞秒激光束在材料表面或透明材料内部进行刻蚀, 形成单层的平面图形, 然后逐层进行加工, 最终可实现模型的三维加工, 从而为微米与亚微米级特征尺寸的复杂三维微结构的数控加工提供一种有效的方法和手段.

1 基于图像边缘跟踪的飞秒激光微加工技术的总体构建

BMP格式文件是目前应用最广泛的图像格式, 基于BMP文件图像处理开发的微加工技术已有广泛

引用格式: 张东石, 陈烽, 刘贺炜, 等. 0B 基于 BMP 图像边缘跟踪的飞秒激光微加工技术研究. 科学通报, 2009, 54: 2586~2589

Zhang D S, Chen F, Liu H W, et al. Research on the technology of femtosecond laser micro-machining based on image edge tracing. Chinese Sci Bull, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0550-3

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2009-54-17-2586>

的应用^[12,13]。由于以图像数据为基础的图像微缩数控加工技术可以很容易地实现从复杂图形和复杂结构图像文件向加工材料上的转移,从而为许多复杂结构的高质高效加工提供了一种有效的途径。

通过特定的图像数据处理技术可以快速从图像文件中提取出待加工路径数据,并根据加工要求对加工路径进行优化处理、根据设计的加工尺度进行比例缩放,同时结合飞秒激光微加工工艺参数的优化,最终实现在特定材料上复杂图形的微纳加工。

本文提出的基于图像边缘跟踪的飞秒激光微加工技术方案主要包括以下内容:待加工图案或复杂结构的图像处理(图像边缘轮廓提取和优化)、加工过程的控制(加工路径的跟踪与反馈)、电脑数控程序的开发、飞秒激光微加工工艺优化等,其中图像处理部分和加工过程控制部分流程图如图1所示。

图1 图像处理部分和加工过程控制部分流程关系图

图像边缘轮廓提取可以通过BMP图像加载,灰度处理、图像二值化、8-连通Laplace算子^[14]处理得到。图像边缘轮廓的优化主要是对位图进行细化处理,去掉一些孤立点和非连通点,连接本应相连的加工线段断点,得到闭合性更好的边缘轮廓图。采用图像边缘轮廓跟踪算法,并利用Bezier函数细化加工路径,可实现位图的平滑加工;在加工的同时,通过标记图像的加工点,可做到加工过程的实时监控。控制程序可实现加工位图的加载和轮廓处理,以及加工参数的设置和加工过程的实时监测。

2 系统设计

2.1 图像边缘轮廓提取

在VC++6.0环境下,通过Windows API函数载

入BMP图像文件,用相关函数提取各点颜色RGB分量存入数组中,计算得到各点灰度值,并设定阈值进行二值化处理,此时连续灰度的黑白图像转换为黑白图像,最后用8-连通Laplace算子进行图像边缘轮廓提取。此时,白色像素为加工点,黑色为背景色。

2.2 图像边缘轮廓的优化

经过算子处理得到的图像边缘轮廓间断点多,线段闭合差,这样加工出的图案平滑性差,容易出现局部缺损,严重影响加工效果。因此,为了使加工图案更加平滑,必须对图像中存在的三类点进行处理。第一种是孤立点,该点周围的颜色都为黑色。第二种非连通点,这是在每条加工路径标记后留下的白色孤立点。第三种点是曲线的端点,即所谓的断点。采取的具体措施以下:

() 处理孤立点:提取各白色点的周围8点颜色,如果都为黑色,则把此白色点设置为黑色。

() 处理非连通点:利用边缘跟踪算法跟踪现有边缘轮廓,将跟踪路径设置为灰色。当标注完一条线段后,对图中加工残留的白色孤立点进行处理,将之设置为黑色。重复以上步骤,直至所有线条都加工完成。最后将灰色的加工路径转化为白色。

() 连接断点:对所有间断点进行标记,并以某间断点为中心,在 5×5 矩阵范围内寻找其他间断点,在两点之间利用DDA算法^[15]补充数据点。

2.3 微加工过程的控制

() 图像边缘轮廓跟踪算法。由于利用搜索白色像素点实现BMP图像边缘轮廓的微加工,所以在跟踪过程中,已跟踪的白色像素点需设置成背景色或其他颜色,这样就可避免重复跟踪,但为了区分背景和已加工点,并且为了实现监控加工进度,把已跟踪像素点设置成灰色。

图像边缘跟踪首先完成对开曲线的加工,再完成对闭合曲线的加工,从而实现整幅位图的加工。

() 加工路径优化。由于位图的点阵行列坐标值皆为整数,加工的图案不可避免出现阶梯状,所以需要加工路径进行曲线拟合,使曲线段更加平滑。采用三次Bezier曲线拟合,将加工路径上相邻的7个白色像素点隔点抽样,均匀插入8个拟合点,从而提高了曲线的平滑度。

() 数控平移台定位控制。PC机执行指令时间远远小于电机移动时间,如果在执行下一指令时平移

台还未到达指定位置, 容易导致控制失准, 产生所谓的“丢步”现象, 从而导致微纳图案的加工失败. 所以在控制系统中, 平移台的精确定位非常重要.

实验采用德国 PI 公司 M-505.6DG 型号三维数控精密移动平台. 设计精度为 17 nm, 最小步进量为 50 nm, 工作距离 50 mm. 平移台与计算机内置的 C843 控制卡接口相连, 可通过软件调用 C-843 控制卡动态链接库函数实现平台的运动控制和定位控制.

通过平移台命令 pC843_IsMoving (ID, axes, mov) 检测 3 个平移台的运动状态, 将返回值存放于 BOOL mov^[3] 中, 平移台运动则返回值为 1, 停止则为 0. 当 3 个平台的返回值都为 0 时, 则表示 3 个平台都完成运动并停止, 可以进行后续加工.

2.4 控制程序

我们基于 VC++6.0 平台开发了通过调用纳米平移台运动库函数实现平台精密控制的飞秒激光微纳加工软件, 图 2 是该软件的控制界面. 该控制软件可方便地实现加工位图的处理和调用、平移台初始化和加工参数设置与优化、加工坐标缩放、坐标变换、准确定位、激光快门控制、加工过程监控等各种常用微加工控制功能, 并可实现各种常用简单与复杂图形的常规微加工, 如圆、线段、多边形、凹槽、齿轮、通孔等和某些功能器件的精密微加工. 图 3 为加工进程监控窗口 (已加工过线标记为灰色, 待加工部分为白色).

图 2 飞秒激光微加工控制软件界面

图 3 微加工过程监测窗口

3 实验结果

实验采用的飞秒激光放大器 (FEMTOPOWER-compact Pro) 中心波长为 800 nm, 脉冲宽度为 30 fs, 重复频率为 1 kHz. 飞秒激光经显微物镜聚焦后垂直照射在样品表面. 样品的加工通过图 2 所示飞秒激光微加工软件自动控制电子快门通断和平移台精密移动实现. 聚焦物镜采用 50 × (NA=0.5) 和 100 × (NA=0.9) 的 Nikon 物镜. 实验样品采用真空蒸镀的铜膜 (25 mm × 25 mm), 膜厚 100 nm, 石英衬底厚度为 1.2 mm. 加工结果通过光学显微镜观测和记录.

图 4 和 5 是在铜膜样品上加工出的微图案. 图 4 中的微图案宽约 300 μm, 高为 150 μm, 线条宽度 2 μm. 使用 50 × (NA=0.5) 物镜聚焦, 平台移动速度为 30 μm/s, 加工步距为 1 μm, 激光平均功率为 100 μW.

图 4 飞秒激光在铜膜上加工的“西安交通大学”图案

图 5 飞秒激光在铜膜上加工出的西安交通大学校训微图案

图 5 为加工出的西安交通大学校训的微图案, 长约 200 μm, 宽约 150 μm, 线宽为 1 μm. 激光平均功率为 10 μW, 平移台运动速度为 8 μm/s, 采用 100 × (NA=0.9) 物镜聚焦激光, 加工步距为 0.3 μm.

从图中可见, 加工出的图案边缘平滑平整, 加工线段长度准确, 无丢步与断点现象, 且线宽均匀, 一致性好. 由于飞秒激光脉冲能量较小, 有效地避免了加工时材料溅射对薄膜表面的污染, 薄膜未加工区仍保持原来的完整洁净状态.

在实际的微纳器件加工中必然存在实现不同尺寸与精度的制作要求,所以必须对飞秒激光加工参数进行精确的控制。飞秒激光微加工的线宽与精度主要受激光单脉冲能量影响,能量较低时,未达到材料的加工阈值,不能产生烧蚀,较高时加工线宽会明显增大且伴随有较明显的热效应。因此,在保证能流密度高于烧蚀阈值的前提下,能量越小,加工线宽越精细。同时,还要考虑到激光系统的稳定和平台移动系统的精度以及聚焦光斑的大小对加工精度的影响。在加工过程中选择较小的扫描速度可以获得更高的加工精度。飞秒激光通过高数值孔径物镜聚焦后光斑可以达到亚微米级,利用飞秒激光加工出纳米级微纳图案^[16]和阵列微孔^[17],横向加工精度可达几十纳米,而加工深度可达纳米级。飞秒激光微加工的典型速度为数十微米每秒,在加工面积较大的微图案或微结构时效率较低,而通过采用高重复频率的飞秒激光可以显著提高加工效率。

4 结论

基于 BMP 图像边缘跟踪的飞秒激光数控微加工技术,可以实现复杂图像各种比例的微缩加工。且由于这种方法各曲线闭合性好,相邻点加工是连续的,并采用了 Bezier 曲线拟合,可以大大提高微加工的效率和加工图案的平滑性。通过调节和优化飞秒激光参数、纳米平移台移动速度和物镜放大倍数等飞秒激光微加工参数,可以方便地实现毫米、微米甚至亚微米尺寸微图形或复杂微结构的加工。

研究表明,基于 BMP 图像边缘跟踪的飞秒激光数控微加工技术可以实现复杂结构与图形向加工材料上的转移,从而可以利用飞秒激光在各种材料上制备出具有微米与亚微米级特征尺寸的二维复杂的微结构或微图形。这种技术为二维和三维复杂结构的微纳器件制备提供一种新的途径。

参考文献

- 1 Szameit A, Blomer D, Burghoff J, et al. Hexagonal waveguide arrays written with fs-laser pulses. *Appl Phys B*, 2006, 82: 507—512^[DOI]
- 2 Nandi P, Jose G. Femtosecond laser written channel waveguides in tellurite glass. *Opt Exp*, 2006, 14: 12145—12150^[DOI]
- 3 Borca C N, Apostolopoulos V, Gardillou F, et al. Buried channel waveguides in Yb-doped KY(WO₄)₂ crystals fabricated by femtosecond laser irradiation. *Appl Sur Sci*, 2007, 253: 8300—8303^[DOI]
- 4 Cheng Y, Koji S, Masashi M, et al. Optical gratings embedded in photosensitive glass by photochemical reaction using a femtosecond laser. *Opt Exp*, 2003, 11: 1809—1816
- 5 Vishnubhatla K C, Venugopal S, Sai R, et al. Micro-raman mapping of micro-gratings in baccarat glass directly written using femtosecond laser. *SPIE*, 2008, 6881: 1—10
- 6 Liao Y, Xu J, Sun H Y, et al. Fabrication of microelectrodes deeply embedded in LiNbO₃ using a femtosecond laser. *Appl Surf Sci*, 2008, 254: 7018—7021^[DOI]
- 7 Mendez C, Torchia G A, Delgado D, et al. Fabrication of Characterization of Mach-Zehnder devices in LiNbO₃ written with femtosecond laser pulses. *Fibres Opt Passive Compon*, 2005, 22-24: 131—134
- 8 Zheng H Y, Liu H, Wan S, et al. Ultra pulse laser micromachined microchannels and their application in an optical switch. *Int J Adv Manuf Technol*, 2006, 27: 925—929^[DOI]
- 9 Sugioka K, Cheng Y, Katsumi M. Microfluidic laser embedded in glass by three-dimensional femtosecond laser microprocessing. *Opt Lett*, 2004, 29: 2007—2009^[DOI]
- 10 Sugioka K, Cheng Y, Katsumi M. Three-dimensional micro and nanochips fabricated by femtosecond laser for biomedical applications. *Photon-based Nanosci Nanobiotech*, 2006, 239: 307—332^[DOI]
- 11 Liu J, Zhang Z, Lu Z, et al. Fabrication and stitching of embedded multi-layer micro-gratings in fused silica glass by fs laser pulses. *Appl Phys B*, 2007, 86: 151—154
- 12 谢明红. 激光加工 CAD/CAM 系统的开发. *华侨大学学报*, 2007, 28: 337—340
- 13 谢明红. 基于图像的影雕激光加工技术研究. *制造业自动化*, 2007, 29: 8—10
- 14 艾海舟, 武勃译. 图像处理、分析与机器视觉. 第 2 版. 北京: 人民邮电出版社, 2003. 52—55
- 15 刘鸿健. 泛欧几何—图文编码与模式识别. 广州: 中山大学出版社, 2003. 41—42
- 16 Miyaji G, Miyazaki K. Nanoscale ablation on patterned diamondlike carbon film with femtosecond laser pulses. *Appl Phys Lett*, 2007, 91: 123102^[DOI]
- 17 Yelena V W, Li X X, Sikorski Z, et al. Single-pulse ultrafast-laser machining of high aspect nano-holes at the surface of SiO₂. *Opt Exp*, 2008, 16: 14411—14420^[DOI]