



DOI: 10.12086/oe.2018.170710

工业机器人轮式抛光技术研究

杨锐¹, 云宇¹, 刘子维², 刘晨星¹, 王安苏²,
解滨^{2*}

¹中国久远高新技术装备公司, 北京 100094;

²苏州大学物理与光电能源学院, 江苏 苏州 215006



摘要: 本文结合机器人控制和轮式抛光技术的优点, 开展了轮式技术研究。运用数值仿真模拟其抛光加工, 论证了轮式抛光工具在精密元件抛光过程中的可行性; 设计了可在机器人末端安装的轮式抛光工具, 分析机器人轮式抛光控制逻辑和控制框架, 建立基于轨迹和驻留时间的机器人抛光控制模型; 开展机器人轮式抛光单点去除特性和环带去除特性性能测试实验, 确定机器人轮式抛光工艺参数, 实现样件表面整体自动研抛加工, 面形误差由初始值 PV: 2.357 λ , RMS: 0.565 λ , 收敛到 PV: 1.431 λ , RMS: 0.242 λ , 初步达到预期的去除效果。研究表明, 工业机器人轮式抛光方法是一种有效的表面抛光方法, 在中高精度非球面元件的抛光中具有很大的潜力。

关键词: 轮式抛光; 去除函数; 工业机器人

中图分类号: O436.3

文献标志码: A

引用格式: 杨锐, 云宇, 刘子维, 等. 工业机器人轮式抛光技术研究[J]. 光电工程, 2018, 45(5): 170710

Study on wheeled polishing technology based on industrial robot

Yang Rui¹, Yun Yu¹, Liu Ziwei², Liu Chengxing¹, Wang Ansu², Xie Bin^{2*}

¹China JiuYuan Hi-tech Equipment Corporation, Beijing 100094, China;

²College of Physics, Optoelectronics and Energy, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

Abstract: The wheeled polishing technique based on industrial robot is established by combining the advantages of robot control and wheeled polishing technology. The feasibility of wheeled polishing tool in high-precision polishing processing is validated by numerical simulation. The wheeled polishing tool installed at the end of the robot is designed, and the robot wheeled polishing control logic and framework are analyzed, thus a robot polishing control mode based on trajectory and dwell time is established. By carrying out the experiments of robot's single-point and belt removal characteristics, the parameters of robot wheeled polishing processing are confirmed. At last, the automatic polishing processing of the mirror surface is done. The surface error decreases from the initial value of components PV: 2.357 λ (RMS: 0.565 λ) to PV: 1.431 λ (RMS: 0.242 λ) as expected. As the research shows, the industrial robot with wheeled polishing tool is an effective surface polishing method, which has great potential in high-precision aspherical mirrors.

Keywords: wheeled polishing; removal function; industrial robot

Citation: Yang R, Yun Y, Liu Z W, *et al.* Study on wheeled polishing technology based on industrial robot[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(5): 170710

收稿日期: 2017-12-21; 收到修改稿日期: 2018-03-01

作者简介: 杨锐(1977-), 男, 硕士, 主要从事光学工程设计。E-mail: youngriver0023@sina.com

通信作者: 解滨(1977-), 男, 博士, 主要从事光学加工和检测的研究。E-mail: xiebin@suda.edu.cn

1 引言

非球面光学元件的加工一般经过毛坯成型、铣磨、抛光等工艺阶段，成为符合精度要求的镜片^[1]。传统非球面抛光严重依赖经验丰富的技术工人且加工效率低，现代确定性抛光技术引入数控技术，位置移动精确并使用新的抛光去除机理，如磁流体力学和离子束等抛光技术，将人工经验数字化、量化，以极高的精度来实现元件表面材料的精确去除，满足元件精度要求^[2]。随着工业机器人技术的快速发展，机器人机构具有体积相对较小，空间占用少、加工范围大、适应元件尺寸和外形等优点^[3]，因此在非球面工业化加工方面具有很大的应用前景。

目前，国内外关于轮式抛光的研究还比较少，德国的 Optotech 公司生产的 MCG 150 抛光机可以实现 4 轴联动抛光，中国科学院长春光学精密机械与物理研究所设计了针对大口径反射镜的具有高自转运动模式的高效轮式抛光工具^[4]，如图 1 所示。而国内关于轮式抛光用于非球面的研究也比较少，因此本文就非球面轮式抛光技术展开研究。轮式抛光使用接触式柔性抛光轮，当抛光轮挤压工件表面时，接触部分发生形变，并与元件表面紧密贴合，形成可靠抛光接触区，即使在元件边缘附近也可以保证接触区域的稳定性。旋转的抛光轮带动微小抛光颗粒磨抛元件表面实现表面材料去除，如图 2 所示。

本文利用工业机器人本体，结合轮式抛光和机器人运动机构的优点，开发非球面抛光技术，以获得一种既具有较高加工精度又具有较低成本的高效抛光方法。

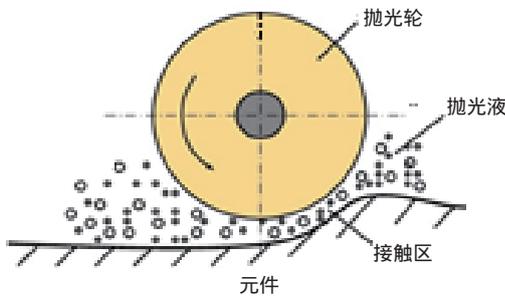


图 1 轮式抛光去除原理图

Fig. 1 The diagram of wheeled polishing removal machine

2 轮式抛光机理与数值仿真加工

轮式抛光通过控制轮子中心与元件表面的相对位置来改变抛光接触区的大小，控制轮子旋转速度来控制材料的去除速度，控制抛光轮在元件表面的轨迹移动实现对整个表面的去除，如图 2 所示。

根据 Preston 方程描述的光学表面材料去除量与各种工艺参数的关系，去除量与接触区域压强、相对速度、时间三者有关，材料去除量、压力和瞬时速度的关系式^[5]：

$$\frac{dE}{dt} = kPV \quad (1)$$

其中： E 为材料去除量，比例常数 k 与加工过程有关，如温度、抛光颗粒等， $P(x, y)$ 表示 (x, y) 点的压强， $V(x, y)$ 为 (x, y) 点的瞬时相对速度。由式(1)可以看出，在压强、速度以及环境已知条件下，通过加工时间的控制就可以实现对材料的定量去除。

理想的去除函数形状，其中心应具有最大去除量，随着区域增大，去除量减小到零。轮式抛光的去除函数形状可表示^[6]：

$$R(x) = kf(x)r\omega \quad (2)$$

其中： r 为抛光轮半径， $f(x)$ 为与压力相关的函数，其去除形状取决于接触面的压强分布，既具有良好的收敛特性，又有效抑制了加工后期的高频误差。

利用 ABAQUS 软件对抛光轮进行仿真，通过施加合理的边界条件和载荷，可以得出轮式抛光运动去除函数曲线比较接近“几”字形，可由高斯函数拟合出，其中心处具有最大值，随半径的增大而减小，且在峰值处斜率为零。

本文以对称分布离焦和非对称分布彗差^[7]两种面

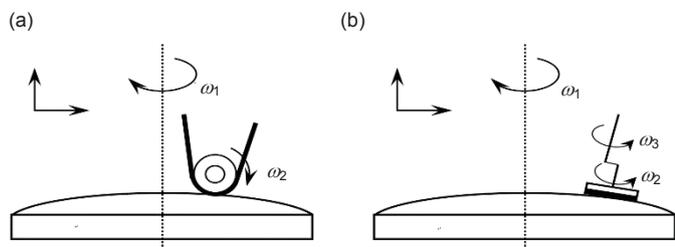


图 2 轮式抛光(a)与传统抛光(b)运动方式对比图

Fig. 2 Wheel polishing (a) contrast with (b) the traditional polishing movement

形误差的修正进行了仿真加工：光学元件口径 100 mm，初始面形误差，离焦(PV : 1.31λ ,RMS : 1.1269λ)，彗差(PV : 1.41λ ,RMS : 1.0326λ)。根据上述去除函数，经过循环迭代算法模拟加工，加工后离焦(PV : 0.1012λ ,RMS : 0.0195λ)，彗差(PV : 0.1156λ ,RMS : 0.0121λ)，获得较好的表面质量，如图 3、图 4 所示。

由模拟结果可以看出轮式抛光仍然存在边缘效应，从残余误差曲线(图 5)可以看出边缘附近误差跳跃较大，收敛程度较差，但因抛光头与元件接触面积小，边缘区域范围较小，在 95%口径时面形精度浮动在 0.02λ 左右。在 95%口径以内时面形精度 RMS 均在 0.02λ 以下，基本满足加工要求。

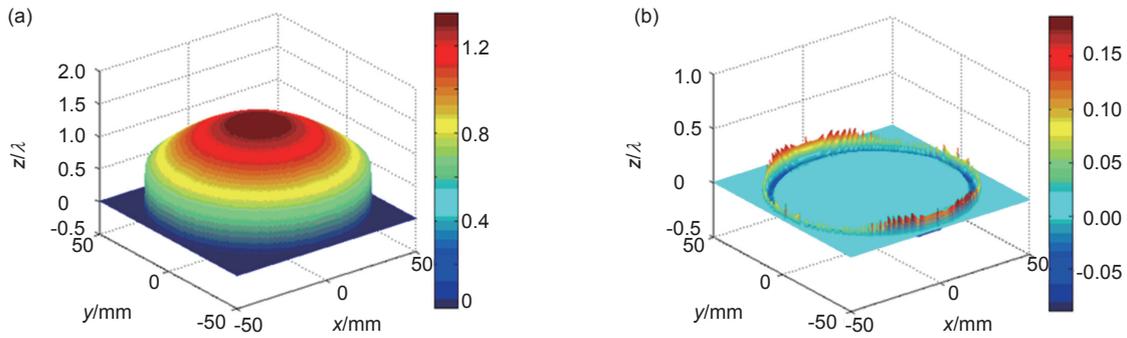


图 3 离焦型误差的仿真加工
Fig. 3 The stimulation processing of defocussing error

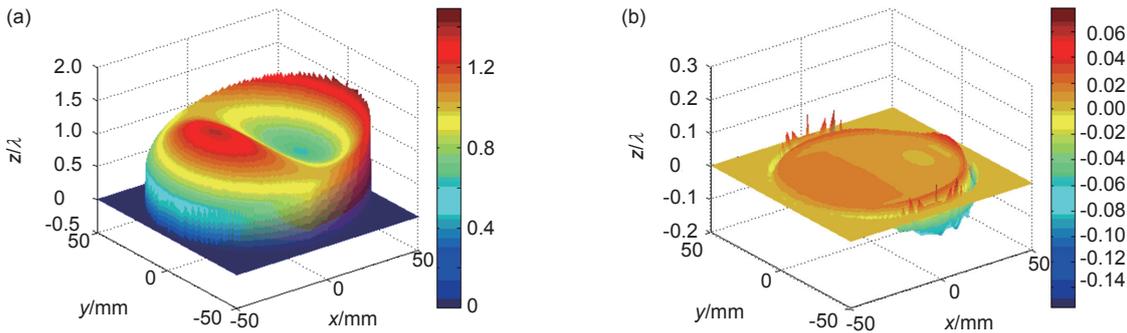


图 4 彗差型面形误差的仿真加工
Fig. 4 The stimulation processing of comatic aberration

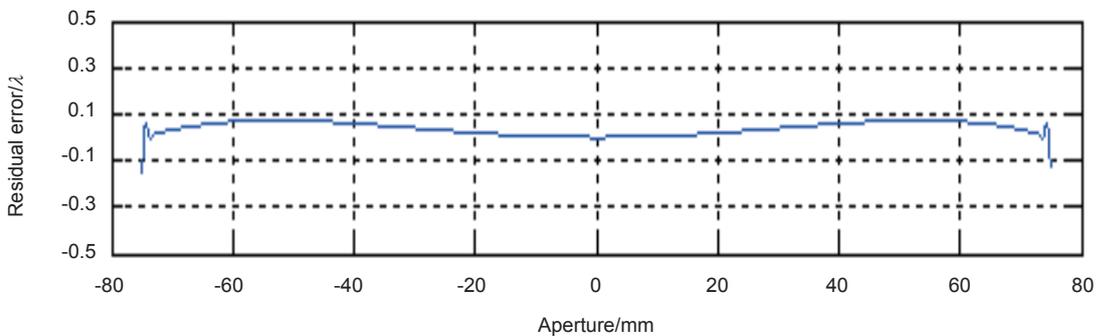


图 5 抛光后残余误差
Fig. 5 Residual error after polishing

3 机器人抛光系统设计及运动控制

本研究在总结前人结构的基础上根据轮式抛光的特点设计了轮带式抛光结构，通过机器人来控制抛光路径，通过该机械手臂的下压量和精准的位置控制来进行压力控制。

图 6 为该轮式抛光，其工具包括：法兰 1 用于与机器人连接；驱动电机 2 安装在支架 4 上；驱动力输出轴 3 表面附有防滑材料；长度调节装置 5 配有弹簧阻尼可以调节伸长量紧绷抛光带同时可以调节伸出方向防止抛光带脱落；弹性橡胶轮 7 轮子内部为轴承外表面包裹橡胶增加其弹性；抛光带 6 一端连接电机输出轴另一端连接抛光轮，负责动力传输以及抛光研磨，其内表面为柔软布基，外表面粘贴了一圈聚氨酯抛光垫或柔软阻尼布，抛光垫经过打磨其截面呈圆弧形，表面中心高边缘低；待加工元件 8 放置在工作台上。

机器人作为控制机构，控制工具末端按照上节求解的姿态接触到元件表面，通过对驻留时间的控制来达到某个期望的去除量，轨迹坐标和驻留时间构成了控制指令最重要的内容。机器人光学加工控制程序框架如图 7 所示。

图 8 为输出的控制文件：tid 文件中每一行代表一个坐标点的空间参数，包含位置(x, y, z)和姿态(a, b, c)；tip 文件中每一行代表一个运动指令，Lin 为直线插补指令，WaitTime 为该点的停留时长。

c)；tip 文件中每一行代表一个运动指令，Lin 为直线插补指令，WaitTime 为该点的停留时长。

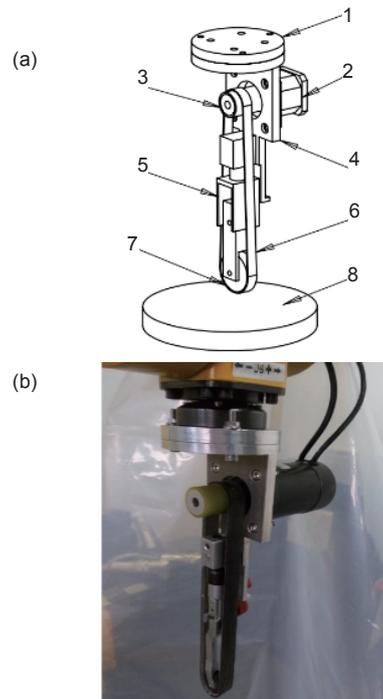


图 6 抛光工具机械结构示意图及实物图

Fig. 6 The schematic of wheeled tool's mechanical structure and physical map

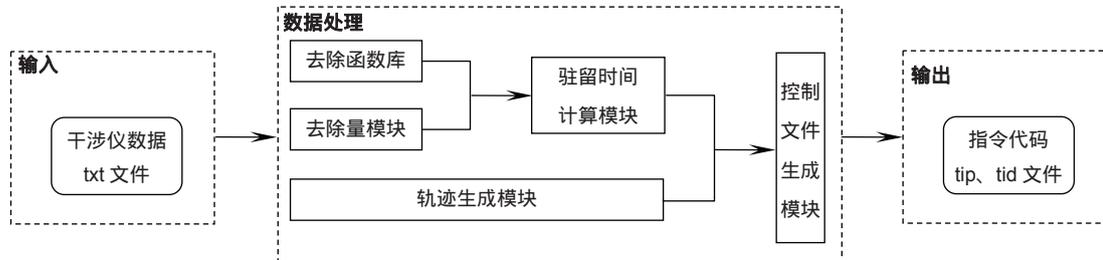


图 7 机器人光学加工控制程序架构

Fig. 7 The control program architecture of robot optical processing

```

F11 : DMPFPOS :>:x:= -40, y:= 0, z:= -8.35, a:= 0, b:= -0.47, c:= 0, mode:= 20;
F12 : DMPFPOS :>:x:= -40, y:= 0, z:= -7.35, a:= 0, b:= -1.0, c:= 0, mode:= 1;
F13 : DMPFPOS :>:x:= -40, y:= 0, z:= -7.25, a:= 0, b:= -1.0, c:= 0, mode:= 20;
F14 : DMPFPOS :>:x:= -40, y:= 0, z:= -6.45, a:= 0, b:= -1.7, c:= 0, mode:= 1;
F15 : DMPFPOS :>:x:= -40, y:= 0, z:= -6.35, a:= 0, b:= -1.7, c:= 0, mode:= 20;
F16 : DMPFPOS :>:x:= -40, y:= 0, z:= -5.45, a:= 0, b:= -1.8, c:= 0, mode:= 1;
F17 : DMPFPOS :>:x:= -40, y:= 0, z:= -4.45, a:= 0, b:= -1.8, c:= 0, mode:= 20;
F18 : DMPFPOS :>:x:= -40, y:= 0, z:= -3.45, a:= 0, b:= -1.8, c:= 0, mode:= 1;
F19 : DMPFPOS :>:x:= -40, y:= 0, z:= -2.45, a:= 0, b:= -1.8, c:= 0, mode:= 20;
F20 : CARTPOS :>:x:= -35, y:= 0, z:= -0.45, a:= 0, b:= -0.25, c:= 0, mode:= 1;
F21 : CARTPOS :>:x:= -35, y:= 0, z:= -0.45, a:= 0, b:= -0.25, c:= 0, mode:= 20;
F22 : CARTPOS :>:x:= -35, y:= 0, z:= -0.45, a:= 0, b:= -0.25, c:= 0, mode:= 1;
F23 : CARTPOS :>:x:= -35, y:= 0, z:= -0.45, a:= 0, b:= -0.25, c:= 0, mode:= 20;
F24 : CARTPOS :>:x:= -35, y:= 0, z:= -0.45, a:= 0, b:= -0.25, c:= 0, mode:= 1;
F25 : CARTPOS :>:x:= -35, y:= 0, z:= -0.45, a:= 0, b:= -0.25, c:= 0, mode:= 20;
F26 : CARTPOS :>:x:= -35, y:= 0, z:= -0.45, a:= 0, b:= -0.25, c:= 0, mode:= 1;
F27 : CARTPOS :>:x:= -35, y:= 0, z:= -0.45, a:= 0, b:= -0.25, c:= 0, mode:= 20;
F28 : CARTPOS :>:x:= -35, y:= 0, z:= -0.45, a:= 0, b:= -0.25, c:= 0, mode:= 1;
F29 : CARTPOS :>:x:= -35, y:= 0, z:= -0.45, a:= 0, b:= -0.25, c:= 0, mode:= 20;
F30 : CARTPOS :>:x:= -35, y:= 0, z:= -0.45, a:= 0, b:= -0.25, c:= 0, mode:= 1;
F31 : CARTPOS :>:x:= -35, y:= 0, z:= -0.45, a:= 0, b:= -0.25, c:= 0, mode:= 20;
F32 : CARTPOS :>:x:= -35, y:= 0, z:= -0.45, a:= 0, b:= -0.25, c:= 0, mode:= 1;
F33 : CARTPOS :>:x:= -35, y:= 0, z:= -0.45, a:= 0, b:= -0.25, c:= 0, mode:= 20;
F34 : CARTPOS :>:x:= -35, y:= 0, z:= -0.45, a:= 0, b:= -0.25, c:= 0, mode:= 1;
F35 : CARTPOS :>:x:= -35, y:= 0, z:= -0.45, a:= 0, b:= -0.25, c:= 0, mode:= 20;
F36 : CARTPOS :>:x:= -35, y:= 0, z:= -0.45, a:= 0, b:= -0.25, c:= 0, mode:= 1;
F37 : CARTPOS :>:x:= -35, y:= 0, z:= -0.45, a:= 0, b:= -0.25, c:= 0, mode:= 20;
F38 : CARTPOS :>:x:= -35, y:= 0, z:= -0.45, a:= 0, b:= -0.25, c:= 0, mode:= 1;
F39 : CARTPOS :>:x:= -35, y:= 0, z:= -0.45, a:= 0, b:= -0.25, c:= 0, mode:= 20;
F40 : CARTPOS :>:x:= -35, y:= 0, z:= -0.45, a:= 0, b:= -0.25, c:= 0, mode:= 1;
F41 : CARTPOS :>:x:= -35, y:= 0, z:= -0.45, a:= 0, b:= -0.25, c:= 0, mode:= 20;
    
```

图 8 机器人最终控制文件

Fig. 8 Robot's final control file

4 机器人轮式抛光测试试验

在本节中进行去除特性测试时,针对口径 80 mm 的平面微晶玻璃,先根据定点抛光实验以及环带抛光实验基本确定抛光时各个工艺参数的参考取值范围,在此基础上完成了自动抛光性能测试,如图 9 所示。

4.1 工具的单点去除特性

先后在区域①、区域②、区域③(a、b、c、d、e、f)进行了不同条件下的单点去除效果测试,其抛光效果如图 10 所示。

区域①:下压量 1.5 mm,定点抛光 30 s。去除函数分布较乱,分析其原因可能是下压量过大导致摩擦力过大,接近电机扭矩极限。

区域②:将下压量调整为 0.5 mm,定点抛光 30 s,去除函数形状比较稳定且具有一定规律性,沿去除区域水平和垂直方向提取数据,如图 11 所示,水平方向呈高斯型分布,中心去除量最大,而垂直方向两端去除量大,中心去除量略小,分析其原因可能是抛光带

表层形状引起。

区域③:下压量设置为 0.5 mm,抛光带表层进行曲率处理 a~f 点的抛光时间依次为 10 s, 20 s, 30 s, 40 s, 50 s, 60 s, 其他参数不变。

1) 去除区大小稳定:除了 a 和 b 点分布区域较小外,其余 4 个试验点分布接近椭圆形,尺寸大约为 4.6 mm×9.5 mm,区域大小基本稳定,且基本符合赫兹分布特征在区域中心处具有峰值。

2) 去除特性稳定:c 点和 d 点在去除峰值上大致相同,如图 12 所示。e 点曲线底部有明显的起伏波动,c 点底部保持一致;抛光带表层修整后,c 点外形更接近质量更好,其长轴方向曲线底部保持一致,可见,具有一定曲率的表层可以提高去除函数质量。

3) 去除量具有规律性:如图 13 所示,不同点去除区域短轴方向去除量曲线的峰值随抛光时间的增长逐渐变大:a, 0.0776λ; b, 0.1738λ; c, 0.2992λ; d, 0.3612λ; e, 0.4665λ; f, 0.5153λ,去除量峰值与抛光时间成正比关系,其单位时间材料去除量约为 0.01λ/s。



图 9 工具去除特性实验图

Fig. 9 The experiment chart of tool's removal characteristics

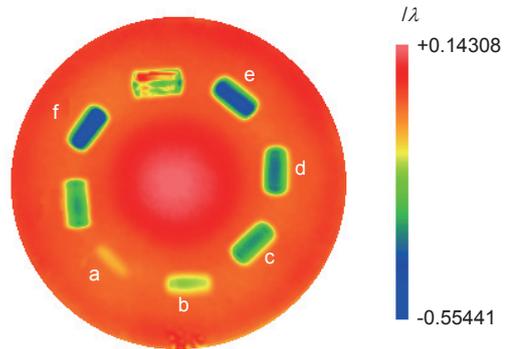


图 10 样品表面干涉仪面形图

Fig. 10 The interferometer surface map of sample's surface

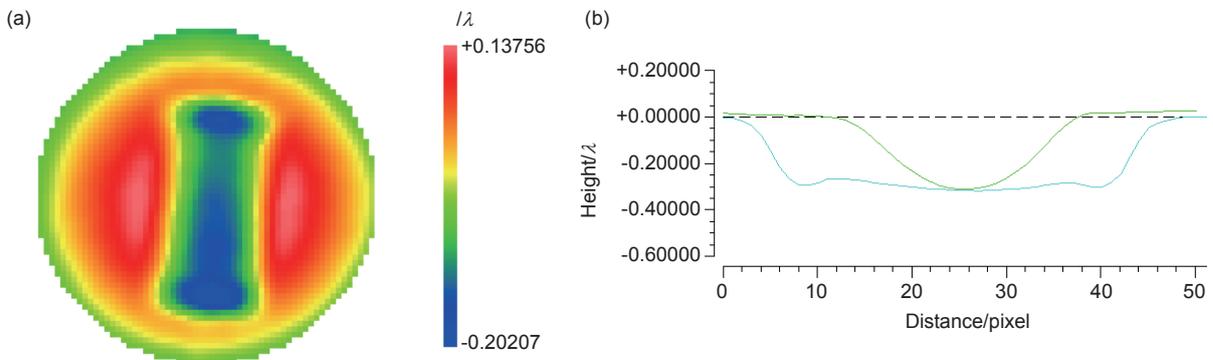


图 11 区域②去除量分布曲线

Fig. 11 The removal volume distribution curve of area

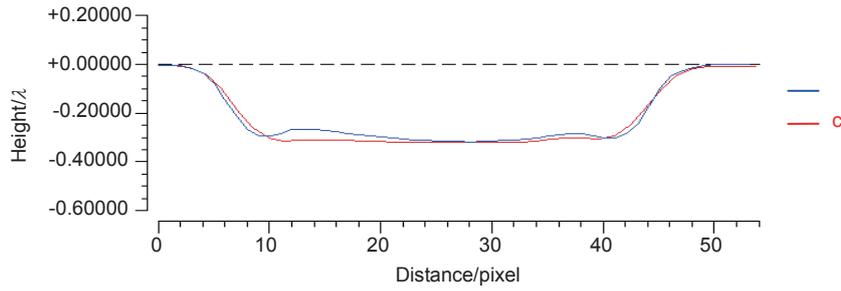


图 12 采样点 c 和②长轴方向分布曲线

Fig. 12 The long axis direction distribution curve of sample point c and area

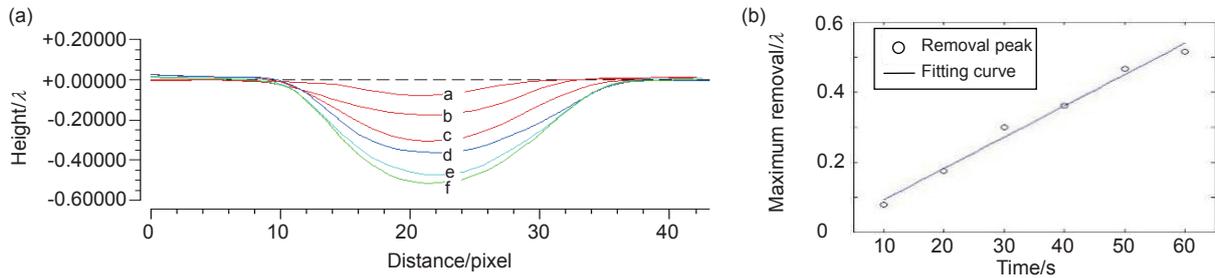


图 13 各采样点去除量峰值随时间的变化曲线

Fig. 13 The curve of sample point's removal peak with time

4.2 工具的环带去除特性

调节驱动电机的转速为 200 r/min, 调节元件旋转速度为 3 r/min, 工具压在元件某一点对该点所在的环带进行抛光, 抛光时间 2 min。如图 14 所示, 环带去除峰值约 0.1λ , 深度比较均匀; 如图 15 所示, 沿直径方向提取的去除函数曲线底部具有极大值, 其动态去除函数与定点去除函数具有一致性。

4.3 机器人自动化研抛加工

在自动研抛加工测试中, 由于样品表面“坑”的存在造成了误差分布的不对称, 根据实际抛光样品的大

小和抛光头的尺寸需要选择合理的扫描步长, 因抛光头去除函数的尺寸影响, 过大的扫描步长会导致相邻位置间出现不连续的波纹误差, 因此优化后的栅格扫描式抛光路径: 水平方向扫描步长 1 mm, 竖直方向扫描步长 2 mm, 表面总覆盖点为 2019 个, 每个点驻留时间各不相同, 规划的抛光路径如图 16 所示。

以元件表面中心为原点建立工件坐标系, 将扫描路径各坐标点转换成机器人控制指令, 输入到控制器中, 经过两个周期的加工后, 元件的表面误差数据如图 17 所示, 由初始值 PV: 2.357λ , RMS: 0.565λ , 收敛到 PV: 1.431λ , RMS: 0.242λ , 基本达到预期的去除效果。

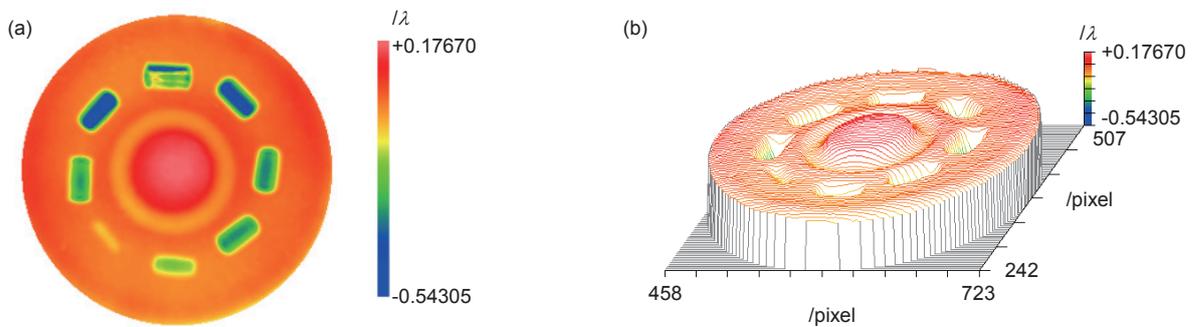


图 14 环带式动态去除结果

Fig. 14 The dynamic removal results of belt

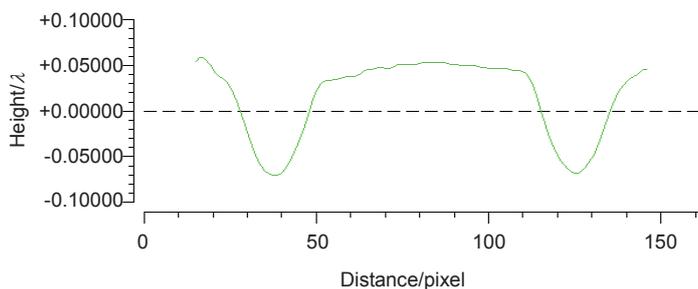


图 15 环带去除深度曲线

Fig. 15 The removal depth curve of ring band

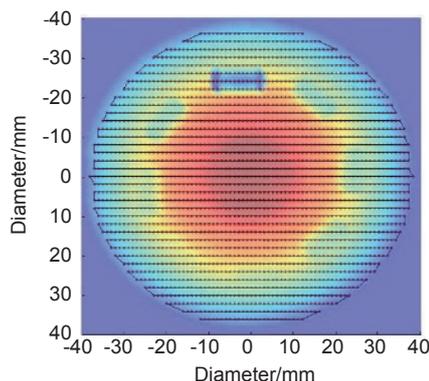


图 16 元件表面栅格式扫描路径

Fig. 16 The raster scan path of component's surface

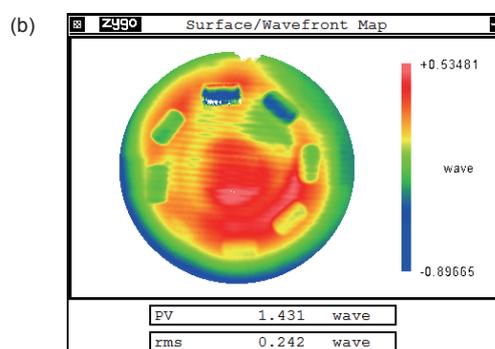
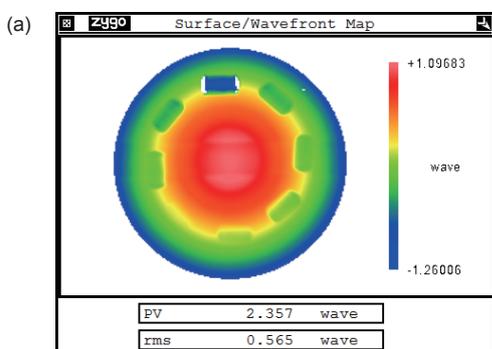


图 17 加工前后的面型误差对比

Fig. 17 The error comparison of surface before and after processing

5 结论

本文根据实际抛光加工要求需要，通过数值仿真模拟论证了轮式抛光的可行性，设计了工业机器人轮式抛光样机，进行了单点去除特性和环带去除特性性能测试实验，确定了机器人轮式抛光工艺参数范围，在此基础上进行的元件表面整体自动研抛加工，使元件表面误差由初始值 PV : 2.357λ, RMS : 0.565λ, 收敛到 PV : 1.431λ, RMS : 0.242λ, 基本达到预期的去除效果，表明工业机器人轮式抛光具有良好的可实现性。

参考文献

[1] Yuan J L, Wu Z, Lv B H, et al. Review on ultra-precision polishing technology of aspheric surface[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(23): 167-177.
袁巨龙, 吴喆, 吕冰海, 等. 非球面超精密抛光技术研究现状[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(23): 167-177.

[2] Han C S, Dong S, Tang Y Y. Geometric model of the ultra-precision grinding of large optical aspheric surfaces[J]. *Acta Armamentarii*, 2004, 25(6): 741-745.

韩成顺, 董中, 唐余勇. 大型光学非球面超精密磨削的几何模型研究[J]. *兵工学报*, 2004, 25(6): 741-745.

[3] Zhou X. The application of computer in automatic measure of the non-round degree of the parts[J]. *Basic Automation*, 2001, 8(6): 50-52.
周炬. 微机在工件不圆度自动测量中的应用[J]. *基础自动化*, 2001, 8(6): 50-52.

[4] Zhang Y, Zhang X J, Li R G, et al. Design of an high-efficiency wheeled polishing tool combined with co-rotation and self-rotation movement[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 199-166.
张毅, 张学军, 李锐钢, 等. 具有公自转运动模式的高效轮式抛光工具设计[J]. *中国光学*, 2016, 9(1): 199-166.

[5] Zheng L G, Zhang X J, Zhang F. NC surfacing of two off-axis aspheric mirrors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(1): 113-117.
郑立功, 张学军, 张峰. 矩形离轴非球面反射镜的数控加工[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(1): 113-117.

[6] Zhang L P, Yang H, Bao L X, et al. Optimization of dwell time algorithm for precession bonnet polishing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(12): 3303-3309.
张利鹏, 杨辉, 鲍龙祥, 等. 进动气囊抛光的驻留时间优化[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(12): 3303-3309.

[7] Yang L. *Advanced Optical Manufacturing Technology*[M]. Beijing: Science Press, 2001: 46-55.
杨力. *先进光学制造技术*[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 46-55.

Study on wheeled polishing technology based on industrial robot

Yang Rui¹, Yun Yu¹, Liu Ziwei², Liu Chengxing¹, Wang Ansu², Xie Bin^{2*}

¹China JiuYuan Hi-tech Equipment Corporation, Beijing 100094, China;

²College of Physics, Optoelectronics and Energy, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China



The experiment chart of tool's removal characteristics

Overview: The early aspherical optical processing relies on manual processing, which has low processing efficiency and great demand for workers with excellent skills. The modern processing technology is a deterministic polishing technique including the numerical control technology and new polishing mechanisms, such as electromagnetics and hydrodynamics polishing techniques. However, those modern polishing techniques are very expensive to buy and use. Considering the rapid development of industrial robot technology and its advantages, such as smaller size, less space occupation, large processing range, capability to meet the component size and shape, and so on, it would be a good way to polish high precision aspherical lens with industrial robot.

Wheeled polishing uses contact flexible buffing wheel to work. When the buffing wheel is pressed against the surface of the workpiece, the contact part of the wheel forms the polishing contact area. The rotating wheel provides the pressure and speed in polishing processing with the help of particles in polishing liquid. The wheeled polisher fits well to the surface of workpiece, even near the edge of the component. This paper aims at how to use the industrial robots and wheel polisher at the end of the robots to fulfill the precision position control and surface polishing.

The wheeled polishing technique based on industrial robot is established by combining the advantages of robot control and wheeled polishing technology. The feasibility of wheeled polishing tool in high-precision polishing processing is demonstrated by using numerical simulation. The residual error of the surface within 95% aperture is less than RMS 0.02λ , which meets the demand for high precision polishing. The wheeled polishing tool is designed and installed at the end of the robot. Two types of polishing path are researched. Pressure is controlled by the amount of depression of the robot arm and its precise position control. The robot wheeled polishing control logic and framework are analyzed. At last a robot polishing control mode based on trajectory and dwell time is established.

By carrying out the experiments of robot's single-point and belt polishing, the parameters of robot wheeled polishing is confirmed. The surface error decreases from the initial value of PV: 2.357λ (RMS: 0.565λ) to PV: 1.431λ (RMS: 0.242λ) after several cycles of polishing. As the research shows, the industrial robot with wheeled polishing tool is an effective method in high-precision aspherical surface polishing.

Citation: Yang R, Yun Y, Liu Z W, *et al.* Study on wheeled polishing technology based on industrial robot[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(5): 170710

* E-mail: xiebin@suda.edu.cn