

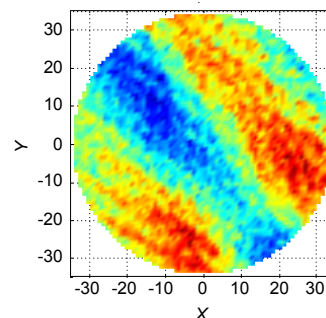


光学加工机器人定位误差测量与分析

韩哈斯额尔敦^{1,2*}, 曾志革¹, 刘海涛¹, 赵洪深¹

¹中国科学院光电技术研究所, 成都 610209;

²中国科学院大学, 北京 100049



摘要: 基于工业机器人的高灵活度光学加工系统可以加工大型或形状复杂的工件。但是, 机器人自身定位误差特性会引起磨盘在工件表面上的定位精度降低, 从而导致加工精度和加工效率的下降。本文研究了减小定位误差的方法并在仿真和光学加工实验中进行了验证。首先用 API T3 激光跟踪仪实时测出固定在机械臂末端的抛光工具在工作区域内的定位误差, 以此为基础对驻留点进行误差补偿。实验测量结果表明, 通过补偿后抛光工具的定位精度达到了光学精密加工的要求。通过仿真, 计算了误差补偿前后磨盘的定位误差引起的驻留时间误差及去除量误差。结果表明, 补偿之后, 80%口径内去除量误差由整体去除量的 3.68%降低至 0.90%。最后, 通过抛光实验验证了, 经过位置误差的补偿并重新规划加工轨迹后, 有效提高了加工效率, 磨削量控制更精确。

关键词: 光学加工机器人; 定位误差; 去除量误差; 抛光

中图分类号: TP242.2

文献标志码: A

Measurement and analyses on positioning accuracy for optical processing robots

Hasirden^{1,2*}, Zhige Zeng¹, Haitao Liu¹ and Hongshen Zhao¹

¹Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The high flexibility optical processing system based on the industrial robot can process large or complex workpieces. But the positioning error characteristics of the industrial robot will cause the decrease of positioning accuracy during grinding, which leads to a lower processing efficiency and processing precision. This paper studies the method of decreasing positioning error, which is verified by simulation and optical processing experiments: Firstly, the positioning error of the polishing tool that fixed at the end of robot in the working area is measured in real-time by using an API T3 laser tracker, and the errors of dwell points are compensated. The measurement experimental results show that the positioning accuracy of the polishing tool meets the high-precision optical processing requirements with the compensation. The dwell time error and the removal error caused by the positioning error before and after compensation are simulated, and the results show that after compensation, the removal error on 80% full aperture is reduced from 3.68% to 0.90%. At last, through the method of the position error compensation to replan the trajectory, the improvement of the processing efficiency and the accurate control on grinding are verified by polishing experiments.

Keywords: optical processing robot; positioning accuracy; removal rate; polishing

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.05.007

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, **44**(5): 516–522

收稿日期: 2017-01-15; 收到修改稿日期: 2017-03-21

*E-mail: hasi315@sina.com

1 引言

计算机控制光学表面成型技术(Computer controlled optical surfacing, CCOS)^[1]是用计算机控制小磨头对光学元件进行研磨和抛光,能够有效跟踪面型各点的曲率变化并能精确控制各点的驻留时间和研磨压力,从而提高了非球面及自由曲面的加工精度和加工效率。同时,随着机器人技术的不断完善和成熟,工业机器人已经成为一个高精度、高自由度的加工系统。光学加工机器人是一种结合工业机器人技术与CCOS技术的研磨抛光系统^[2]。该系统在光学加工技术中具有传统CCOS加工所不具有的优势:1)工业机器人作为一种灵活的加工平台,可以加工大口径或特殊形状工件(如扇形、瓦片形、马蹄形等);2)机器人不需要高精度导轨,只需配合固定和旋转工件的转台,经济成本低;3)通过坐标示教,机器人对工件摆放位置的要求降低,尤其对异形镜面加工有优势。为此,国内外先进光学研究机构和科研工作者先后开展了机器人研抛技术的相关研究:德国HTW大学Klem等人运用机器人研抛技术研究摩擦系数变化,并提出了一种提高仿真加工量精度的方法^[3];德国ZEISS针对大尺寸光学元件,开发了基于AAB机器人的初抛光加工设备^[4];英国国家超精密表面制造中心(national facility for ultra precision surfaces)为缩短加工周期及局部研抛时间,提出基于机器人的快速研抛方法^[5,6];复旦大学的王伟等人,研究工业机器人的坐标变换及在光加工领域的应用,分析ABB IRB6620机器人及zeeko IRP600气囊加工机床的加工去除率,并分别加工400×400石英平面玻璃,对比加工效果^[7];中国科学院上海技术物理研究所开发了一套基于ABB IRB2400机器人的光学加工系统,并在国内首次采用工业机器人加工小口径光学元件,面型PV从28 μm收敛到13 μm^[8]。雷存栋等人基于该系统,研究控制大口径光学表面中频误差的方法,加工766 mm口径的非球面微晶玻璃,有效抑制了中高频误差^[9];沈阳理工大学田凤杰等人使用KUKA 30-3机器人为实验平台,研究力控制机器人对有机玻璃的加工效果^[10];中国科学院光电技术研究所刘海涛等人使用Staubli TX200机器人研磨、抛光自由曲面光学元件,双曲面加工结果达到PV 19.35 μm、RMS 2.25 μm,离轴非球面加工结果达到5个波长^[11]。

综上所述,目前针对机器人研抛系统的轨迹控制、材料去除率、研抛工具及其研抛压力等加工特性做了

大量的研究,但是缺少关于机器人自身定位特性的研究,特别是由于机器人手臂的刚性引起的磨头定位误差对加工精度和效率的影响。本文对测量光学加工机器人磨头定位精度的方法进行了研究,包括:1)测量磨头在加工区域内的定位误差,得出平面上 X,Y 方向的误差分布,分别对每个测量点空间位置进行误差补偿,并实时测出补偿之后 X,Y 平面坐标点上的误差分布;2)将测量点补偿前后的定位误差分别生成新的加工路径,通过仿真加工,得出定位误差变化对去除量的影响;3)通过光学加工实验来验证磨头的定位误差对光学加工精度的影响。

2 机器人定位特性及对光学加工的影响

2.1 机器人定位特性

机器人手臂末端的定位误差主要误差源为动力学误差和运动学误差。动力学误差主要是机器人所受外力、惯性力、机器人自重和负载等所引起的机器人连杆和关节的弹性变形及振动。运动学误差主要是由于零部件设计、制造、装配和安装过程中存在误差以及伺服电机的码盘误差和关节运动副磨损引起的关节角误差,所以导致实际连杆参数与名义连杆参数之间的微小偏差^[12]。

目前,工业机器人手臂末端具有重复定位精度高,而绝对定位精度比较低的特性^[13]。在通过示教的方式来控制机器人运动时,机器人有良好的重复性。但是光学加工过程中的工件表面的驻留点都是由离线编程生成,因控制点数量庞大,并不能以示教的方式来控制。对于未示教过的点,机器人控制器通过逆运动学的方式将笛卡尔位姿转化成关节角控制序列,由此引入连杆参数误差,并且相关研究表明该误差占总体误差的80%^[14]。因此机器人手臂末端的绝对定位精度对于工业机器人在光学加工中的可靠性起着重要的作用。下文中定位误差指绝对定位误差。

2.2 光学加工模型

光学材料研磨抛光的过程复杂,还没有模型能够精确地描述材料去除量与加工参数以及其他各个影响因素之间的数学关系。目前广泛使用的模型都是以Preston假设^[15]为基础。在Preston假设中,将速度和压力以外其他一切因素的作用全部归为一个比例常数 k ,并建立了材料去除量与压力和速度之间的线性关系

模型,其表达式为

$$\Delta z(x, y) = kp(x, y, t) \cdot v(x, y, t), \quad (1)$$

式中: $\Delta z(x, y)$ 表示单位时间内磨盘与工件接触点 (x, y) 的材料去除量; p 表示磨盘与工件表面的相对压力, v 为磨盘与工件表面的相对运动速度, k 为比例常数, t 为作用时间。在 CCOS 技术中,当磨盘与工件不产生相对移动或者磨盘的转动速度远大于相对工件的移动速度时,工件与磨盘在相互作用区域内的材料平均去除量被定义为去除函数,用 $R(x, y)$ 表示:

$$R(x, y) = \frac{1}{T} \int_0^T kp(x, y, t) \cdot v(x, y, t) dt, \quad (2)$$

其中 T 为作用时间。再设 $D(x, y)$ 为驻留时间函数,用它表示磨头中心在加工工件中点 (x, y) 处的停留时间。根据 LSI 假设^[16],如果将磨头在工件表面单点单位时间加工去除量保持不变,整个工件表面的材料去除量分布就可以表示为每一区域材料去除量的线性叠加,即:

$$\Delta Z(x, y) = \sum_{\zeta} \sum_{\eta} (R(x - \zeta, y - \eta) \cdot D(\zeta, \eta)) \delta\zeta \delta\eta, \quad (3)$$

其中 ζ, η 为去除函数坐标系。并且当 $(\delta\zeta, \delta\eta) \rightarrow 0$ 时,式(3)将转化为二维空间的卷积。

$$\Delta Z(x, y) = R(x, y) \otimes D(x, y), \quad (4)$$

式(4)即为 CCOS 技术材料去除模型^[16]。因此,机器人的定位误差会导致实际运动轨迹发生偏移,则整个工件表面的材料去除量分布也随之发生偏移:

$$\Delta Z'_i(x, y) = R(x_i + \Delta x_i, y_i + \Delta y_i) \otimes D(x_i, y_i). \quad (5)$$

光学机器人手臂末端驻留模式为速度模式^[17],即以相邻两个加工点之间的运行时间作为驻留时间。因此点间距发生变化也将造成驻留时间误差。在不考虑磨盘与工件表面之间的相对运动速度误差的前提下,则由点 A 移动到点 B 驻留时间误差为

$$\Delta t_{dw} = \left(\frac{A'B'}{AB} - 1 \right) \cdot t_{dw}. \quad (6)$$

因此,机器人手臂末端的定位误差对磨盘运动轨迹和驻留时间的影响,最终会引起加工去除量变化。接下来进行测量,并仿真分析定位误差对光学加工的影响。

3 定位误差测量

定位误差测量主要目的是观察机器人手臂末端的运行状态及定位误差分布情况。本文使用中国科学院光电技术研究所研发的 SIAI 机器人,如图 1 所示,并采用 API Tracker3 激光跟踪仪来测量 SIAI 光学加工机器人的定位精度。在使用激光跟踪仪进行测量时,需

要将激光跟踪仪的靶球通过靶球固定装置固定在机器人磨头的末端,并且靶球的中心与实际磨盘的中心重合,如图 2 所示。该方法可保证靶球中心位于末端执行机构旋转轴线上,以便模拟磨盘的实际位置和运动轨迹。图 3 为定位误差测量过程。



图 1 SIAI 光学加工机器人。
Fig. 1 SIAI optical processing robot.

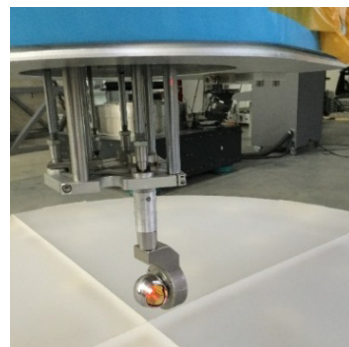


图 2 安装激光跟踪仪靶球。
Fig. 2 The installation of target ball.

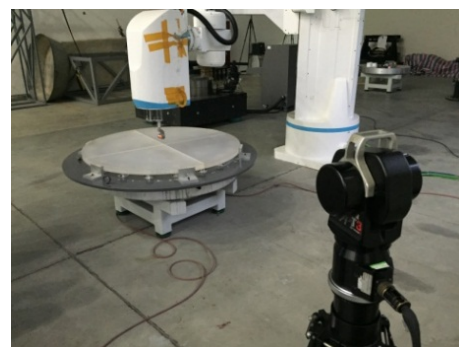


图 3 测量光学加工机器人定位误差。
Fig. 3 Error measurement of optical processing robot.

在特定的工件坐标系中选取直径为 $\Phi 500$ mm 的圆形平面区域内点间距为 5 mm 的网格点,得到 7668 个点作为机器人的定位误差驻留点。控制机器人依次经过每个驻留点,同时激光跟踪仪采集每个驻留点在

工件坐标系下的坐标。驻留点的实际坐标与理论坐标之差即为定位误差。

图 4 为第一次测量结果与第二次测量结果的距离误差分布情况。

控制 SIAI 机器人从零点运行至工作区域内的一点, 并使用激光跟踪仪测量采集该点位置。测量 20 次后其重复性结果(单位: μm)如图 5 所示。

两次测量得出的驻留点最大距离误差分别为

1158.31 μm 、1114.6847 μm , 而机器人的重复定位精度为 56.60 μm , 并且由两次测量结果可以看出, 距离误差分布具有重复性, 因此该结果不是由于随机扰动造成。根据第一次得到的定位误差, 对程序中的原始驻留点进行位移补偿调整。使用激光跟踪仪重新采集补偿之后的驻留点在工件坐标系下的坐标位置, 图 6 为补偿之后的驻留点在 X,Y 方向的定位误差及距离误差分布情况。

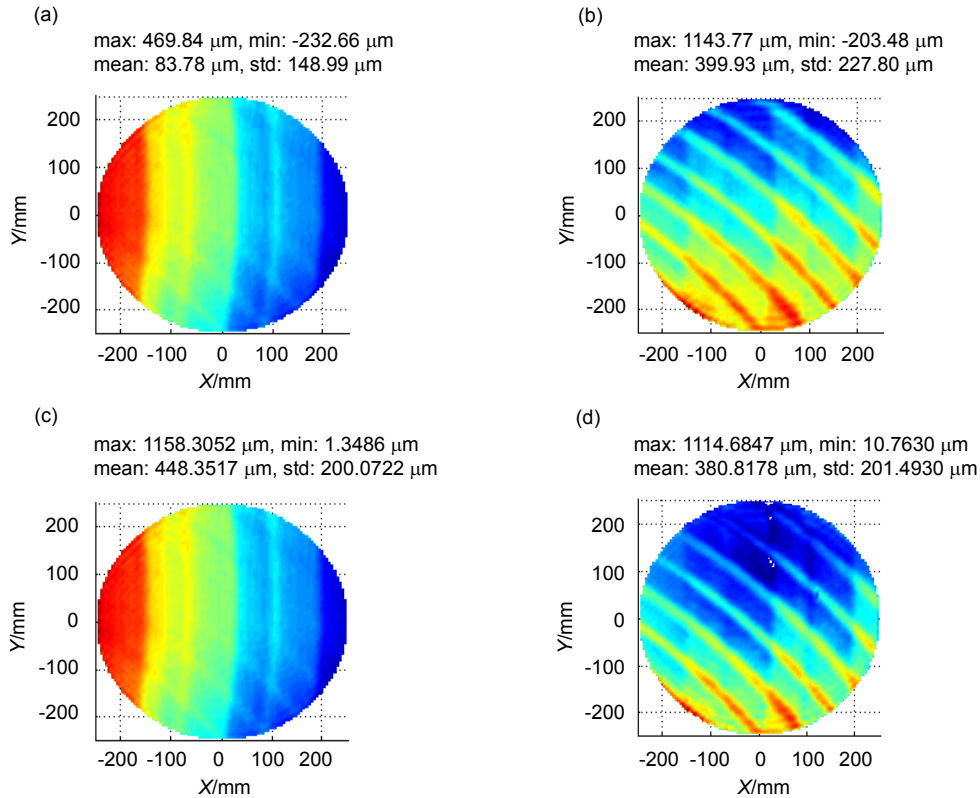


图 4 定位误差测量结果. (a) X 方向误差. (b) Y 方向误差. (c) 距离误差. (d) 距离误差(第二次测量结果).

Fig. 4 Positioning error measurement results. (a) X-direction error. (b) Y-direction error. (c) Distance error. (d) Distance error (The second measurement result).

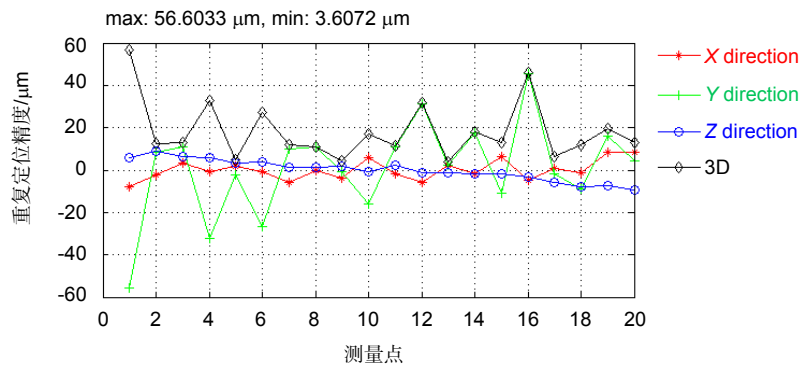


图 5 重复定位精度测量结果.

Fig. 5 Repeatability measurement results.

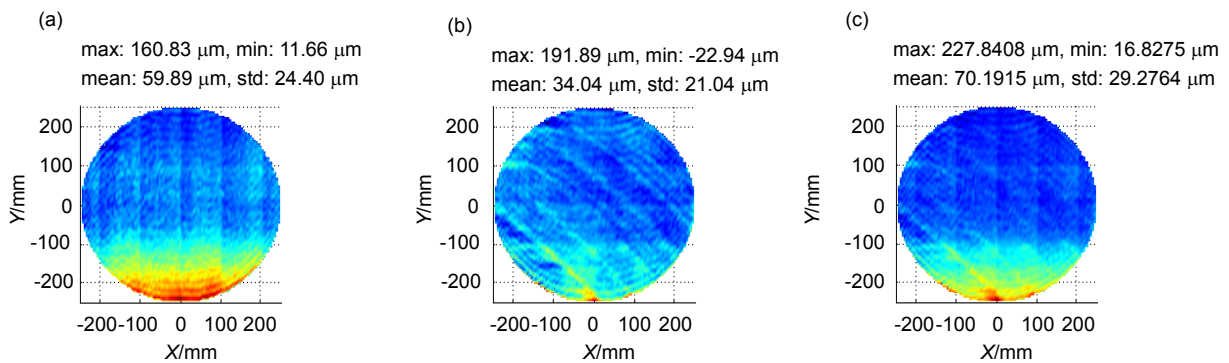


图6 定位误差补偿结果. (a) X方向误差. (b) Y方向误差. (c) 距离误差.

Fig. 6 Positioning error compensation results. (a) X-direction error. (b) Y-direction error. (c) Distance error.

补偿之后的驻留点最大距离误差为 227.84 μm , 定位误差降低至 19.67%。实验结果表明该机器人的绝对定位误差有 80%是可以被补偿的, 与文献[14]中的结论吻合。下面将使用补偿前后的两组数据进行去除量仿真, 观察定位误差变化对光学加工的影响。

4 去除量仿真

将之前测量得到的驻留点作为仿真的加工点。仿真采用磨盘口径为 25 mm, 磨盘压力 248 g/cm^2 , 行星

方式运动(偏心距 7 mm, 自转转速-120 r/min , 公转转速 100 r/min)的去除函数。图 7 为之前实验得到的去除函数。仿真均匀去除 $\Phi 500$ mm 口径圆形平面镜, 整体去除量为 1 μm 时, 根据 LR 迭代算法^[18]计算出每个加工点的驻留时间, 如图 8 所示。由于光学加工机器人的驻留时间是磨盘在相邻两个加工点之间的运行时间, 因此定位误差导致点间距发生变化, 驻留时间也随之改变。图 9 为根据加工点误差得出的驻留时间误差百分比。

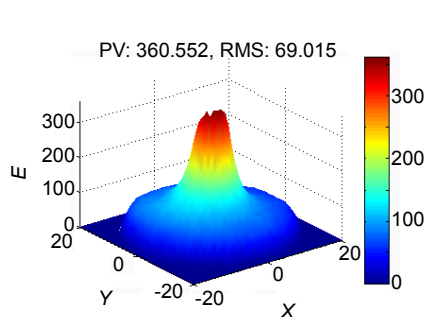


图7 仿真用去除函数.

Fig. 7 The removal function for simulation.

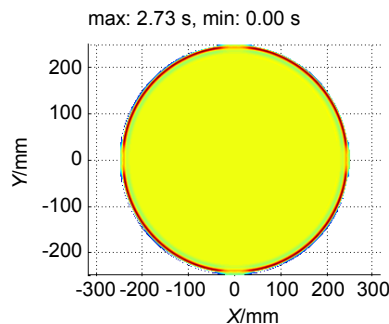


图8 驻留时间.

Fig. 8 Theoretical dwell time.

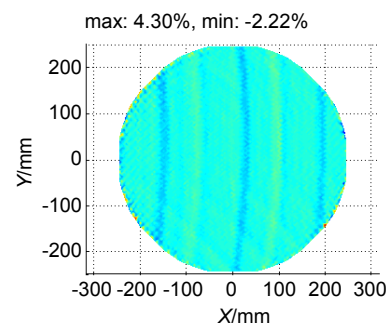


图9 驻留时间误差百分比分布.

Fig. 9 Percentage of dwell time error.

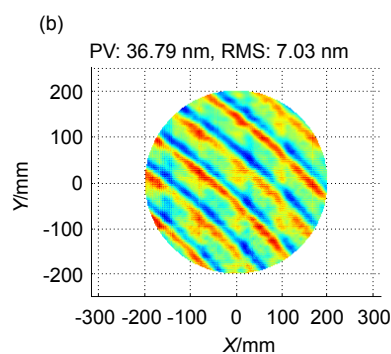
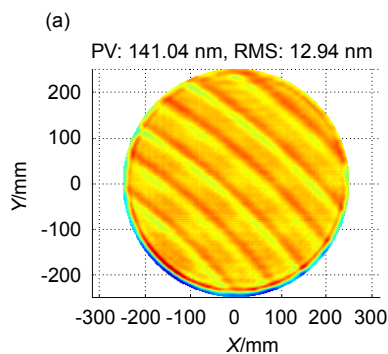


图10 去除量误差. (a) 全口径去除量误差. (b) 80%口径去除量误差.

Fig. 10 The removal rate error. (a) Full aperture removal rate error. (b) 80% aperture removal rate error.

机器人定位误差引起的驻留时间误差为-2.22%~4.30%。引入驻留时间误差,将测量得到的加工点实际位置作为新的加工路径,叠加计算每个加工点的去除量得到整面定位误差仿真去除量,再与理论去除量相减,得到去除量误差如图 10 所示。

从仿真结果可以看出:全口径去除量误差为 141.04 nm,占整个去除量的 14.10%;80%口径的去除量误差为 36.79 nm,占整个去除量的 3.68%。将补偿之后的加工点位置作为新的加工路径,重新计算去除量误差如图 11 所示。

补偿定位误差之后的全口径去除量误差为 21.12 nm,占整个去除量的 2.11%;80%口径的去除量误差为 9.01 nm,占整个去除量的 0.90%。补偿前后定位误差的仿真结果表明,加工设备定位误差越小,加工精度也会越高。

5 光学加工实验

本实验均匀抛光一块 $\Phi 130$ mm 口径的 K9 材料平面镜,抛光参数与仿真中的一致,整体去除深度为 600

nm,加工时间 60 min。实际加工过程如图 12 所示。分别检测加工前后的面型参数,加工前面型减去加工后面型,得到整体去除量。补偿前后的去除量见图 13。

由于磨盘有 7 mm 的偏心距,为了防止在边缘处翻盘,设置悬挂比为 0.4,实际加工过程中磨头中心最大加工半径为 55 mm。图 14 中,①为磨头距离中心最远处的作用区域;②为磨盘;③为完全叠加区域,即在该区域的去除量最大,且最完整,通过计算得出该区域半径为 36 mm。因此,为了排除边缘效应对结果的影响,选取了 $\Phi 70$ mm 口径区域内的数据进行观察,如图 15 所示。

通过实际光学加工实验发现,镜面均匀去除 600 nm 时,会引入 53.38 nm 的加工去除量误差。对定位误差进行补偿之后,加工去除量误差减小到 26.64 nm。实验表明,光学加工机器人的定位误差会引起加工误差,并通过补偿定位误差可以减小加工去除量误差。在本实验中补偿之后定位误差去除量误差由整体去除量的 8.89%减小至 4.44%,去除量误差的可补偿量与仿真相符。

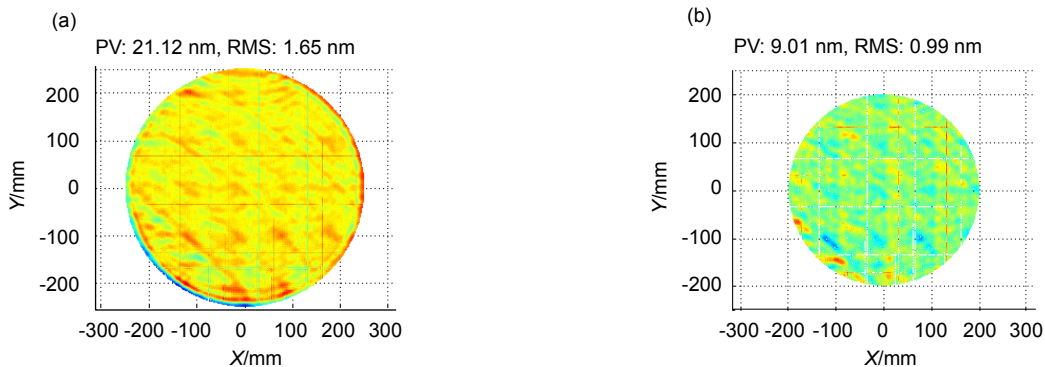


图 11 补偿定位误差之后的去除量误差。(a) 全口径去除量误差。(b) 80%口径去除量误差。

Fig. 11 The removal rate error after compensating the positioning error. (a) Full aperture removal rate error. (b) 80% aperture removal rate error.



图 12 实际加工过程。

Fig. 12 The actual processing.

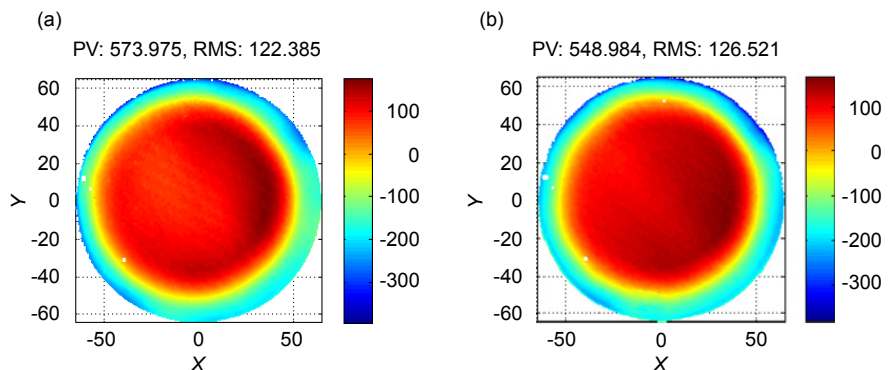


图 13 (a) 补偿前和 (b) 补偿后的全口径去除量。

Fig. 13 Full aperture removal rate before compensation (a) and after compensation (b).

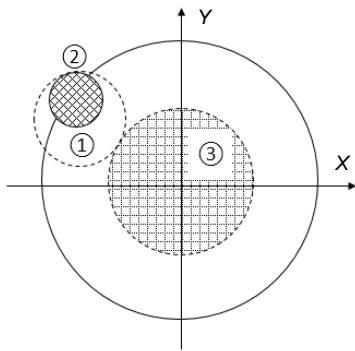


图 14 工件加工区域示意图.

Fig. 14 The sketch map of workpiece processing area.

6 结论与展望

本文通过测量光学加工机器人手臂末端在工件表面的定位误差,并在程序中进行位置补偿来减小定位误差。通过去除量仿真,计算出机器人定位误差对驻留时间及对去除量的影响,并在实验中得到验证。本文的仿真和实验结果表明光学加工机器人的绝对定位误差是可以补偿的。但由于在特定的工件坐标系下测量的定位误差,再重新标定工件坐标系时需重新测量,并且只能在该坐标系下进行误差补偿。但随着对机器人技术的研究愈加成熟,已有研究表明可以通过标定机器人连杆参数的方法来减小几何误差,并提高机器人的绝对定位精度。所以,光学机器人加工精度仍有可提升空间。

参考文献

- Jones R A. Optimization of computer controlled polishing[J]. *Applied Optics*, 1977, **16**(1): 218–224.
- Wang Jian, Guo Yinbiao, Zhu Rui. Research on robotic polishing of optic aspheric component[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2010, **49**(5): 636–639.
王健, 郭隐彪, 朱睿. 光学非球面元件机器人柔性抛光技术[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2010, **49**(5): 636–639.
- Kelm A, Boerret R, Sinzinger S. Improving the polishing accuracy by determining the variance of the friction coefficient[J]. *Journal of the European Optical Society Rapid Publications*, 2012, **7**: 12049.
- Derst G, Giggel V. Fabrication technologies for large optical components at Carl Zeiss Jena GmbH[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, **7739**: 773903.
- Walker D, Yu G Y, Gray C, et al. Process Automation in Computer Controlled Polishing[J]. *Journal of the European Optical Society Rapid Publications*, 2016, **11**: 684–689.
- Walker D, Dunn C, Yu Guoyu, et al. The role of robotics in computer controlled polishing of large and small optics[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, **9575**: 95750B.

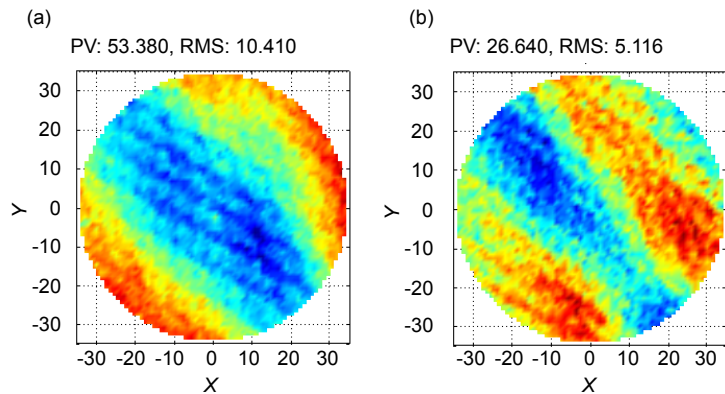
图 15 (a)补偿前和(b)补偿后的 $\Phi 70$ mm 口径去除量.

Fig. 15 $\Phi 70$ mm aperture removal rate before compensation (a) and after compensation (b).

- Wang Wei, Yu Guoyu, Xu Min, et al. Coordinate transformation of an industrial robot and its application in deterministic optical polishing[J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(5): 055102.
- Sha Shengchun, Guo Xiaoling. The solution to the edge figuring of optical fabrication based on industrial robots[J]. *Science Technology and Engineering*, 2012, **12**(12): 2800–2804.
沙晟春, 郭晓凌. 工业机器人光学加工中边缘问题的解决方法[J]. *科学技术与工程*, 2012, **12**(12): 2800–2804.
- Lei Cundong, Zheng Liehua. A method for controlling mid-spatial frequency errors in big aperture optical surface base on robot technology[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, **14**(25): 83–86.
雷存栋, 郑列华. 基于机器人技术控制大口径光学表面中频误差的方法[J]. *科学技术与工程*, 2014, **14**(25): 83–86.
- Tian Fengjie, Li Zhenguo, Lv Chong, et al. Polishing pressure investigations of robot automatic polishing on curved surfaces[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, **87**(1–4): 639–646.
- Liu Haitao, Wan Yongjian, Zeng Zhige, et al. Freeform surface grinding and polishing by CCOS based on industrial robot[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, **9683**: 96832D.
- 奚陶. 工业机器人运动学标定与误差补偿研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- 邓永刚. 工业机器人重复定位精度与不确定度研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- Lim H K, Kim D H, Kim S R, et al. A practical approach to enhance positioning accuracy for industrial robots[C]// Proceedings of ICCAS-SICE, Fukuoka, Japan, 2009: 2268–2273.
- Preston F W. The theory and design of plate glass polishing machines[J]. *Journal of the Society of Glass Technology*, 1927, **11**: 214–256.
- 汉语. 离轴非球面数控加工关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- Zhou Lin, Xie Xuhui, Dai Yifan, et al. Realization of velocity mode in flat optics machining using ion beam[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, **45**(7): 152–156.
周林, 解旭辉, 戴一帆, 等. 光学平面镜面离子束修形中速度模式的实现[J]. *机械工程学报*, 2009, **45**(7): 152–156.
- White R L. Image restoration using the damped Richardson-Lucy method[J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, **2198**: 1348.