

光学非球面元件机器人柔性抛光技术

王 健*, 郭隐彪**, 朱 睿

(厦门大学物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 计算机控制光学表面成型技术在光学元件冷加工中占据重要的地位, 是对平面及非球面光学元件进行最后阶段修整抛光的必要手段. 现有的计算机控制光学表面成型技术大都基于数控机床来进行. 随着机器人技术的发展和广泛应用, 将机器人引入到光学元件数控加工领域是一种新的有效尝试. 因此, 对一种基于机器人的光学非球面柔性抛光技术进行了运动学分析, 并建立了控制模型, 利用控制模型进行工件加工, 获得了较好的加工效果.

关键词: 机器人抛光; 工具坐标系; 非球面加工

中图分类号: TG 701

文献标识码: A

文章编号: 0438-0479(2010)05-0636-04

计算机控制光学表面成型技术(Computer controlled optical surfacing, CCOS), 是由美国 Itek 公司的 Wiktor J Rupp 在 20 世纪 70 年代初期最先提出的. 这种方法的原理和特点是用一个尺寸比被加工零件小得多的抛光模, 根据定量的面形检测数据, 在计算机的控制下, 以一定的路线、速度和压力抛光工件表面. CCOS 的实质是让计算机尽可能地吸取高级光学技术人员的经验, 模仿他们的操作技巧用于光学加工. CCOS 技术使用的小工具可按非球面曲线运动, 只在需加工的区域内去除多余材料, 对操作者的经验要求较低, 可重复性更好, 而且 CCOS 采用计算机数字模拟方式预测面形和制定加工方案, 在提高工效的同时保证了加工质量. 机器人柔性抛光技术就是属于 CCOS 的一个分支, 国内外均有报道机器人用于光学元件表面的计算机控制抛光^[1-3].

1 机器人柔性抛光技术概述

在非球面加工过程中, 使用机器人柔性抛光技术, 需要通用的 6 关节机器人和 1 个双行星运动的抛光头. 如果采用数控抛光机床加工, 这需要 5 轴 3 联动的数控机床和 1 个双行星运动的抛光头. 比较数控抛光机床和抛光机器人的加工区别可见表 1.

由表 1 可见, 机器人抛光相比数控抛光机床设备,

优势在于价格低、能耗小、质量小, 劣势在于运动刚度和运动准确性上. 然而, 在小工具抛光加工中这些劣势对加工过程的影响并不十分明显, 这主要是基于小工具抛光的特点, 它不需要很高的重复定位精度, 抛光中的作用力也不大. 同时, 对于更大尺寸或搬运不便的光学元件, 机器人抛光反而比数控机床抛光更有优势, 这是因为可以通过移动机器人而不是移动光学元件来开展加工. 因此, 选用机器人实现光学元件的计算机控制光学表面成型是合适并且经济的.

表 1 数控与机器人抛光机床区别

Tab. 1 Differences between NC polishing machine and robot polishing machine

抛控装置	重复定位精度/ μm	运动刚度	能耗/kW
机器人	70~100	小	约 3
数控机床	10	大	约 5

注: 机器人的价格约为数控机床的 1/2, 质量约为数控机床的 1/3~1/6.

2 机器人柔性抛光控制模型

2.1 机器人柔性抛光系统

如图 1 所示的机器人抛光系统, 其中 A 为机器人运动本体, B1 为机器人控制器, B2 为机器人驱动器, C 和 D 为远程控制软件和说明文档, E 为机器人控制器上的机器人系统软件, F 为离线编程软件及相关服务程序, G 为系统校正数据, H 为示教控制器, J、PC K 和 PC X 都是服务器, N 为校准数据, M 为许可密钥. 整个系统的构成类似于数控机床^[4-5].

收稿日期: 2009-09-10

基金项目: 福建省科技重大专项(2006HZ002-4); 厦门市科技计划项目(3502Z20083010)

* 现工作单位: 成都精密光学工程研究中心

** 通讯作者: guoyb@xmu.edu.cn

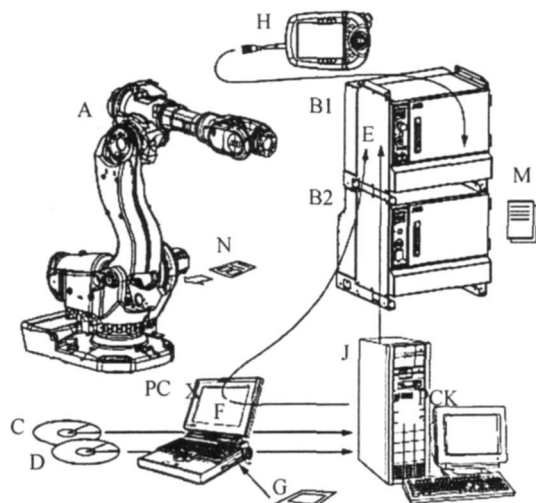


图1 机器人柔性抛光系统

Fig. 1 The system of robot polishing

对于6关节机器人本身,在机器人本体最后一个关节的法兰上安装抛光用的双行星抛光头,这样用机器人本体实现抛光头与元件表面法向一致.因此,可以按规划的路径来移动整个抛光头,并控制移动速度,实现在元件表面不同部位的不同抛光驻留时间,去除不同数量的材料.

2.2 机器人柔性抛光的运动学控制

机器人实现光学元件的计算机控制光学表面成型的关键是

- 1) 规划抛光路径和划分路径上的控制点;
- 2) 计算各控制点抛光时抛光头的位置和方向,转换成机器人的控制点;
- 3) 计算各控制点间的移动速度,转换成机器人的运动速度;
- 4) 形成机器人抛光控制指令.

机器人控制抛光头主要需要两个参数,一个是机器人工具中心点(TCP)的位置,这是一个已定义参考坐标系中的三维坐标值.另一个是工具坐标系相对于一个已定义参考坐标系的旋转关系.工具坐标系是指跟随抛光工具一同运动的一个坐标系,而工具中心点可以看作是工具坐标系的原点.工具坐标系的原点定义在机器人的第6轴轴线与抛光运动轴线的焦点上,工具坐标系的 z 轴沿抛光运动轴线指向工件, x 轴由原点指向机器人手臂. y 轴也就随之确定下来,如图2所示.

假设所加工光学元件的曲面方程为

$$F(x, y, z) = 0. \quad (1)$$

其坐标系即为机器人的参考坐标系,那么在曲面上—

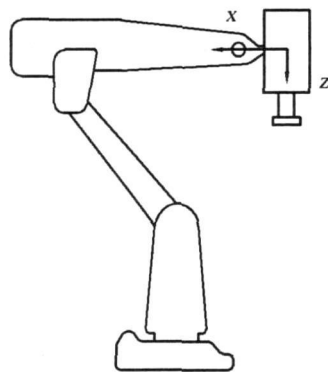


图2 工具坐标系

Fig. 2 The tool's axis

点 $M(x_0, y_0, z_0)$ 处,其曲面的法向量为

$$\mathbf{n} = \{F'_x(x_0, y_0, z_0), F'_y(x_0, y_0, z_0), F'_z(x_0, y_0, z_0)\}. \quad (2)$$

下面计算确定工具坐标系的3个坐标轴单位向量在参考坐标系中的向量 $\mathbf{n}_x, \mathbf{n}_y$ 和 $\mathbf{n}_z$.

首先根据工具坐标系的定义, $\mathbf{n}_z$ 可以最容易地确定下来,其方向与曲面法向量反向.

$$\mathbf{n}_z = \left\{ \frac{-F'_x(x_0, y_0, z_0)}{c_1}, \frac{-F'_y(x_0, y_0, z_0)}{c_1}, \frac{-F'_z(x_0, y_0, z_0)}{c_1} \right\}, \quad (3)$$

其中 $c_1 = (F'_x(x_0, y_0, z_0))^2 + (F'_y(x_0, y_0, z_0))^2 + (F'_z(x_0, y_0, z_0))^2$,进而根据曲面的空间运算可得 $\mathbf{n}_x, \mathbf{n}_y$,

$$\mathbf{n}_x = \left\{ \frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + \left(\frac{-x_0 \cdot F'_x(x_0, y_0, z_0)}{F'_z(x_0, y_0, z_0)} \right)^2}}, 0, \frac{\left(\frac{-x_0 \cdot F'_x(x_0, y_0, z_0)}{F'_z(x_0, y_0, z_0)} \right)}{\sqrt{x_0^2 + \left(\frac{-x_0 \cdot F'_x(x_0, y_0, z_0)}{F'_z(x_0, y_0, z_0)} \right)^2}} \right\}, \quad (4)$$

$$\mathbf{n}_y = \left\{ \frac{x_0 \cdot F'_x(x_0, y_0, z_0) \cdot F'_y(x_0, y_0, z_0)}{F'_z(x_0, y_0, z_0) \cdot c_1 \cdot c_2}, \frac{-F'_z(x_0, y_0, z_0) \cdot x_0 - \frac{x_0 \cdot F'_x(x_0, y_0, z_0)}{F'_z(x_0, y_0, z_0)}}{c_1 \cdot c_2}, \frac{F'_y(x_0, y_0, z_0) \cdot x_0}{c_1 \cdot c_2} \right\}, \quad (5)$$

其中 $c_2 = \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{-x_0 \cdot F'_x(x_0, y_0, z_0)}{F'_z(x_0, y_0, z_0)} \right)^2}$.

由此,式(3)、(4)、(5)即可以给出工具坐标系单位向量在参考坐标系中的表达形式.此为凸面的方程形式,当非球面方程为凹面时,往往 $\mathbf{n}$ 就是曲面的法向量,随之而来的方程也有相应的变化.

2.3 机器人编程中工具坐标系的旋转表示

机器人编程中,工具坐标系与参考坐标系的旋转关系并不是用上面工具坐标系各轴的单位向量在参考坐标系中的向量值来表示,而是用一个四元数(Quaternions)来表示.四元数是最简单的超复数.四元数的乘法不符合交换律.明确地说,四元数是复数的不可交换延伸.如把四元数的集合考虑成多维实数空间的话,四元数就代表着一个四维空间,相对于复数为二维空间.四元数一般定义如下:

$$q = q^1 + q^2 \cdot i + q^3 \cdot j + q^4 \cdot k, \quad (6)$$

其中三维向量 $\{q^2 \cdot i, q^3 \cdot j, q^4 \cdot k\}$ 描述了两个坐标系旋转的旋转轴,而 q^1 表示绕此转轴的旋转角度.四元数也是可以归一化的,并且只有单位化的四元数才用来描述旋转,四元数的单位化与向量类似,

$$q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 + q_4^2 = 1, \quad (7)$$

假设工具坐标系的各个轴向量在参考坐标系中表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{n}_x &= (x_1, x_2, x_3), & \mathbf{n}_y &= (y_1, y_2, y_3), \\ \mathbf{n}_z &= (z_1, z_2, z_3), \end{aligned} \quad (8)$$

那么由此可以推出同样表示其旋转的四元数为:

$$q\{q^1, q^2, q^3, q^4\}.$$

其中,

$$\begin{aligned} q^1 &= \frac{\sqrt{x_1 + y_2 + z_3 + 1}}{2}, & q^2 &= \frac{\sqrt{x_1 - y_2 - z_3 + 1}}{2}, \\ q^3 &= \frac{\sqrt{y_2 - x_1 - z_3 + 1}}{2}, & q^4 &= \frac{\sqrt{z_3 - x_1 - y_2 + 1}}{2}, \end{aligned} \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} \text{sign } q^2 &= \text{sign}(y_3 - z_2), \\ \text{sign } q^3 &= \text{sign}(z_1 - x_3), \\ \text{sign } q^4 &= \text{sign}(x_2 - y_1). \end{aligned} \quad (10)$$

因此只要将式(3)、(4)、(5)带入式(9)、(10)就可以求出机器人编程中表示工具坐标系相对于参考坐标系的旋转四元数.

3 机器人柔性抛光试验

根据所建立的机器人控制模型,给出了工具坐标系单位向量在参考坐标系中的表达形式,并求出了工具坐标系相对于参考坐标系的旋转四元数.运用这个控制模型,控制点抛光时抛光头的位置和方向转换成机器人的控制点,并计算过各控制点间的移动速度,转换成机器人的运动速度,形成机器人抛光控制指令,对工件进行抛光试验.

试验加工焦距 2 m, 直径 460 mm 的非球面聚焦透镜,透镜一面为球面,一面为非球面,非球面方程为

$$\begin{aligned} y^2 &= 3\,522.355\,73x - 0.163\,98x^2 + 1971\,21 \times \\ &\quad 10^{-4}x^3 - 6.878\,09 \times 10^{-6}x^4 + 2.370\,36 \times \\ &\quad 10^{-7}x^5. \end{aligned} \quad (11)$$

此非球面的最接近球面半径为 1 767.657 mm. 通过理论计算,可得由该最接近球面加工到非球面的加工量,部分数据如图 3 所示,最大处达到 $14\,\mu\text{m}$ ^[67].

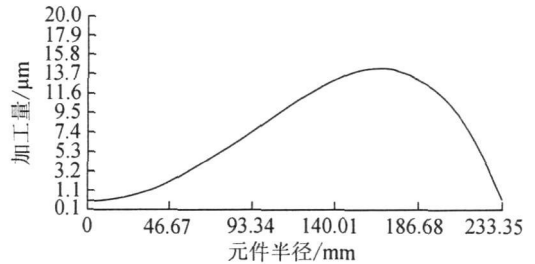


图3 球面抛光加工到非球面的加工量

Fig. 3 The material removal after the robot polishing

元件首先抛光加工为球面,随后根据图 3 所计算出的理论加工量采用机器人修正抛光向非球面面型加工.在采用机器人做非球面修抛的过程中需要使用球面干涉仪做非球面聚焦透镜汇聚效果的干涉测量.测量的光路如图 4 所示.

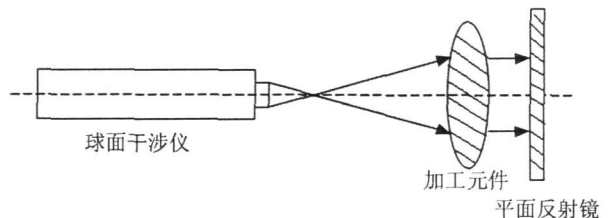


图4 工件测量光路

Fig. 4 The testing of the work piece surface

由非球面聚焦透镜所得到的透射测量结果可知, PV 值小于 0.2λ ($\lambda = 0.632\,8\,\mu\text{m}$),通过对机器人抛光的控制,可以抛光出面型符合要求的工件.

4 结论

本文建立了一种基于机器人的光学非球面柔性抛光控制模型,给出了工具坐标系单位向量在参考坐标系中的表达形式,并求出了工具坐标系相对于参考坐标系的旋转四元数.运用这个控制模型,控制点抛光时抛光头的位置和方向,转换成机器人的控制点,并计算

过各控制点间的移动速度, 转换成机器人的运动速度, 形成机器人抛光控制指令, 对工件进行抛光试验, 获得了较好的加工效果.

参考文献:

- [1] Tsai M J, Huang J F, Kao W L. Robotic polishing of precision molds with uniform material removal control[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(5) : 885-895.
- [2] Han Guangchao, Sun Ming. Path control based robotic polishing technology[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2009, 37(2) : 75-77.
- [3] Lin Fengyun, Wang Xiaodong, Lin Fengbo. Development of a dual robot system for parametric surfaces polishing[C]// 2009 International Asia Conference on Informatics in Control, Automation, and Robotics. USA: IEEE, 2009: 161-165.
- [4] Han Guangchao, Sun Ming. Compound control of the robotic polishing process basing on the assistant electromagnetic field[C]//2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. USA: IEEE, 2009: 1551-1555.
- [5] Ji Shiming, Jin Mingsheng, Zhang Li, et al. Path generation and posture angle control of tool for robotic polishing system[J]. Advanced Materials Research, 2010, 102(3) : 568-572.
- [6] Qi H S, Mills B, Xu X P. Applications of contact length models in grinding processes[J]. Key Engineering Materials, 2009, 404(5) : 113-122.
- [7] 仇谷烽, 郭培基, 懈滨, 等. 接触式非球面轮廓测量的数据处理模型[J]. 光学精密工程, 2007, 15(4) : 492-498.

Research on Robotic Polishing of Optic Aspheric Component

WANG Jian^{*}, GUO Yirbiao^{**}, ZHU Rui

(School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Computer controlled optical finishing (CCOS) is important in the optic component machining and it is an essential method to polish the plane and aspheric optic work piece. Up to now, the CCOS is usually based on the numerical control machine. However, it is a novel technology to use the robot in the machining. This paper establishes a controlled model for the flexible robot polishing. The experiment verifies that the machining effect is very good by using the model.

Key words: flexible robot polishing; tool axis; aspheric machining