

文章编号: 1001-3806(2015)02-0206-03

激光加工机械手系统工件位姿自动校正的方法

赵艳丽, 肖金陵*

(华中科技大学 激光加工国家工程研究中心, 武汉 430074)

摘要: 为了减小在数控加工系统中工件位姿无法精确定位引起的加工误差, 采用通过实时检测工件上2个点分别在实际工件坐标系下偏离理想坐标系的坐标来实现机械手自动校正的方法, 阐述了工件坐标校正的数学模型、算法和算法程序设计的实现。结果表明, 通过6组模拟数据得到位移误差不足0.01mm, 角度误差不足0.02°, 验证了该方法的正确性。

关键词: 激光技术; 坐标校正; 2点法; 机械手; 位姿

中图分类号: TH165; TP241.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.02.013

Autocorrection of work-piece pose for laser processing industrial robot systems

ZHAO Yanli, XIAO Jinling

(National Engineering Research for Laser Processing, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: To solve the operation deviation due to rough-localization of workpieces in a computer numerical control (CNC) machining system, the coordinates of two points on the workpiece in the actual CNC coordinate system deviating from the ideal coordinate system was detected so that the robot autocalibrate. The mathematical model of the workpiece coordinate correction, algorithm design and algorithm implementation were described. 6 sets of simulation data show that the displacement error is less than 0.01mm and angle error is less than 0.02°. The correctness of the method is verified.

Key words: laser technique; coordination correction; method of two points; robot; pose

引言

随着工业自动化的不断发展, 工业机械手被广泛应用于自动化生产线, 比如在机械手末端执行端安装激光器, 可以执行激光切割、激光焊接等操作。激光加工过程中不仅对激光光束有较严格的要求^[1], 即要求激光光束轴与被加工件表面垂直或与其法线成某一固定的空间角度, 而且要求激光聚焦透镜与工件表面的距离恒定。机器人离线编程技术已经被证明是一个有利的工具, 用以提高生产效率、降低成本和增加安全性等^[2]。在实际的生产过程中, 由于工件安装误差, 导致工件相对理想工件位姿有一定的偏差。这种情况下, 如果无法完成机械手针对工件位姿偏差对末端工具坐标系进行坐标校正, 会导致工件加工误差, 严重影响生产质量。

机械手加工系统中对工件误差补偿采用工件不动、工具动的方法。这就需要计算实际工件坐标系和理想工件坐标系之间的转换关系, 通过编程对机械手进行位姿误差补偿控制, 从而减小因工件位姿偏差引起的加工误差。

作者提出了一种利用工件上2个点分别在理想工件坐标系和实际工件坐标系中的坐标值计算坐标系转换关系, 进而求得转换参量(包括旋转参量和平移参量)的方法, 该方法的全部计算过程均为等价计算, 计算精度较高。

1 系统工作原理

机械手系统包括机械手本身、运动控制系统、加工系统和位姿检测等多部分组成, 系统结构框图如图1所示。

利用工业机器人的通用模块 CN11 的 I/O 端口 IN9 ~ IN16、OUT9 ~ OUT16^[3] 与位姿检测系统建立握手信号, 向检测系统发出模式选择、启动位姿偏差检测等命令, 同时监测检测所处的状态、定位点是否找到、报警信息等。位姿检测系统中用3维坐标测

作者简介: 赵艳丽(1989-), 女, 硕士研究生, 现主要从事激光加工控制系统的研究。

* 通讯联系人。E-mail: xjl1510@126.com

收稿日期: 2014-03-24; 收到修改稿日期: 2014-04-15

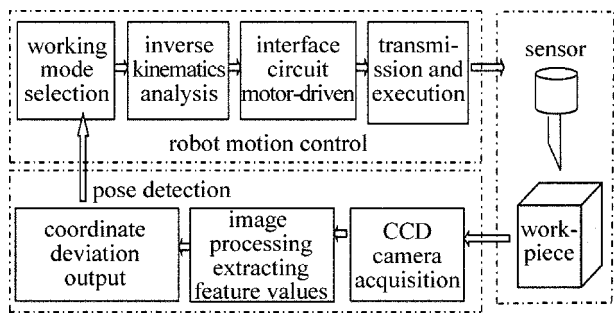


Fig. 1 Block diagram of the robotic system

量仪检测工件位姿是否产生偏差,将检测结果传送到机械手运动控制系统,系统的机械手选择工作模式,进行加工。

2 空间坐标转换原理

拟将工件底部固定为实际工件坐标系的 W - xy 平面^[4],将绕3个坐标轴的转换转化为绕2个坐标轴的问题,这样可以简化计算。利用2点法计算理想工件坐标系和实际工件坐标系之间坐标转换的参量。取机械手底座坐标系为基本坐标系 $\{W\}$,机械手末端坐标系为 $\{E\}$ 、末端的工具坐标系为 $\{T\}$ 、理想工件坐标系为 $\{O\}$ 、实际工件坐标系为 $\{M\}$ 。通过常规的3点示教法和7点示教法^[5-9]可以对机械手末端坐标系为 $\{E\}$ 、末端的工具坐标系为 $\{T\}$ 、理想工件坐标系为 $\{O\}$ 进行标定,即可获得齐次变换矩阵 $T_{O,W}$ (下标表示坐标系 $\{O\}$ 在参考坐标系 $\{W\}$ 上的变换) 和 $T_{T,E}$ (下标表示坐标系 $\{T\}$ 在参考坐标系 $\{E\}$ 上的变换),如图2所示。

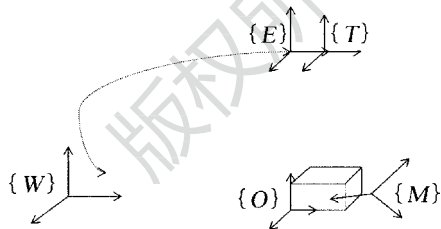


Fig. 2 Schematic diagram of the robot coordinate

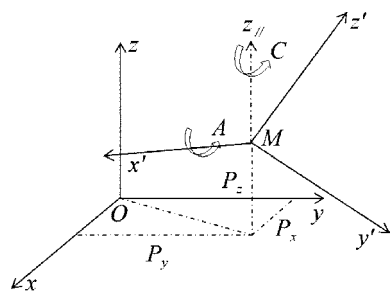


Fig. 3 Schematic diagram of the ideal work-piece coordinate and the actual work-piece coordinate

由图3可知:实际坐标系 $\{M\}$ 的坐标原点在理想坐标系 $\{O\}$ 中的坐标为 $P_{off} = [P_x \ P_y \ P_z]^T$,转换过程为:把 M - $x'y'z'$ 坐标系原点与 O - xyz 坐标系原点重合,并设 M - $x'y'$ 所在平面为工件底部所在平面,且保持 z' (M 坐标系下) 为外法线方向。在 M 处先绕 z 轴旋转角度 C ,再绕新的 x' 轴旋转角度 A 得到 $\{M\}$ 。

假设工件上有两个点 $P_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T (i=1, 2)$,它们在理想坐标系 O - xyz 中的坐标为 $P_{O_i} = [x_{O_i} \ y_{O_i} \ z_{O_i}]^T (i=1, 2)$,在实际坐标系中的坐标为 $P_{M_i} = [x_{M_i} \ y_{M_i} \ z_{M_i}]^T (i=1, 2)$,则根据坐标系转换理论^[10]: $P_{O_i} = RP_{M_i} + P_{off}$,其中 P_{off} 称为平移矩阵(即实际坐标系 $\{M\}$ 的坐标原点在理想坐标系 $\{O\}$ 中的坐标); P_x, P_y, P_z 称为平移参量; R 称为由实际工件坐标系向理想工件坐标系的旋转矩阵, $R = R_z(C)R_x(A)$ (其中 $R_z(C)$ 表示绕 z 轴逆时针旋转角度 C 对应的变换矩阵, $R_x(A)$ 表示绕 x 轴逆时针旋转角度 A 对应的变换矩阵),其中:

$$\begin{cases} R_x(A) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos A & -\sin A \\ 0 & \sin A & \cos A \end{bmatrix} \\ R_z(C) = \begin{bmatrix} \cos C & -\sin C & 0 \\ \sin C & \cos C & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

从而计算出:

$$R = \begin{bmatrix} \cos C & -\sin C \cos A & \sin C \sin A \\ \sin C & \cos A \cos C & -\cos C \sin A \\ 0 & \sin A & \cos A \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\text{即有: } \begin{bmatrix} x_{M_i}' \\ y_{M_i}' \\ z_{M_i}' \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_{O_i} \\ y_{O_i} \\ z_{O_i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

将公共点 P_1, P_2 的坐标代入(3)式可得2组6个方程,用 P_2 点方程减去 P_1 点方程,可得:

$$\begin{bmatrix} x_{M_2}' - x_{M_1}' \\ y_{M_2}' - y_{M_1}' \\ z_{M_2}' - z_{M_1}' \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_{O_2} - x_{O_1} \\ y_{O_2} - y_{O_1} \\ z_{O_2} - z_{O_1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{记为: } \begin{bmatrix} x_{M_{21}}' \\ y_{M_{21}}' \\ z_{M_{21}}' \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_{O_{21}} \\ y_{O_{21}} \\ z_{O_{21}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

展开得:

$$\begin{cases} x_{M_{21}}' = x_{o_{21}} \cos C - y_{o_{21}} \sin C \cos A + z_{o_{21}} \sin C \sin A \\ y_{M_{21}}' = x_{o_{21}} \sin C + y_{o_{21}} \cos C \cos A - z_{o_{21}} \cos C \sin A \\ z_{M_{21}}' = y_{o_{21}} \sin A + z_{o_{21}} \cos A \end{cases} \quad (6)$$

利用 $\cos A = \sqrt{1 - \sin^2 A}$ 将(6)式中 $z_{M_{21}}'$ 转换为:

$$z_{M_{21}}' = y_{o_{21}} \sin A + z_{o_{21}} \sqrt{1 - \sin^2 A} \quad (7)$$

由于实际测得的坐标数值是实数且符合(5)式,所以(7)式一定有实数解,可以求得:

$$\begin{cases} \Delta = 4z_{o_{21}}^2 (y_{o_{21}}^2 - z_{M_{21}}'^2 + z_{o_{21}}^2) \\ \sin A = \frac{2z_{M_{21}}' y_{o_{21}} \pm \sqrt{\Delta}}{2(y_{o_{21}}^2 + z_{o_{21}}^2)} \end{cases} \quad (8)$$

至此可以求得 $\sin A$ 的数值,再取反正弦可得:

$$A = \arcsin(\sin A) \quad (9)$$

由于是微小的扰动,所以转角很小,看作在 $-10^\circ \sim 10^\circ$ 之间,因而可以直接将此数值用作 A 的角度值。同理,将(8)式带入(6)式还可求得 C 。

3 程序设计

在机械手操作系统中包括对工件位姿的检测和校正两个阶段,因而程序设计的流程图如图 4 所示。

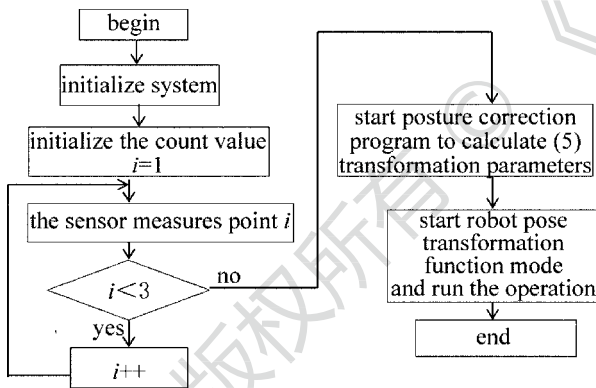


Fig. 4 Flowchart of robot operation

4 位姿校正程序验证

根据上述算法编写 C++ 程序,并取 $A = 2.45^\circ$, $C = 3.77^\circ$, $\mathbf{P}_{off} = [0.11 \ 0.23 \ 0.35]^T$,本文中选用 UG 系列 3 维坐标测量仪(测量精度可达 $0.1 \mu\text{m}$)选取 6 组数据,利用该程序计算相应的 A, C 以及 \mathbf{P}_{off} ,并与理想值进行比较,结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出,由该算法获得的旋转参量与

Table 1 Comparison of transformation parameters

points	transformation parameters (differences between the calculated and ideal value)				
	$C/^\circ$	$A/^\circ$	P_x/mm	P_y/mm	P_z/mm
1	0.006	0.007	0.00004	0.00047	0.000031
2	0.02	0.06	0.001	0.009	-0.001
3	-0.007	-0.015	-0.001	0.009	0
4	-0.017	0.009	0.0031	0.01	0.001
5	-0.001	-0.001	-0.0003	0.01	0
6	0.001	-0.001	0.0004	0.009	0.0003

理想值的差值不足 0.02° , 平移参量与理想值的差值不足 0.01mm , 有较高的精确度。

5 结论

推导了工件坐标系的转换参量,只需要 2 点的坐标,条件易于满足、简单直接,并通过模拟取点验证了该方法的正确性和较高的精度,有较好的适应性,可以应用于多种加工系统。

参 考 文 献

- [1] YU G, YU H J. Integrated laser intelligent manufacturing[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002:1-40(in Chinese).
- [2] SONG L J, ZHANG G X, ZHAO J, et al. Analysis and realization of off-line programming system of laser welding robot[J]. Manufacturing Technology & Machine, 2008, 36(12): 113-115(in Chinese).
- [3] LIU L Y, LUO M, FANG K. Design and implementation of glue-robot for the rough-location work-piece[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2010, 25(3): 63-66(in Chinese).
- [4] LIN S Y. Welding robot and its application[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2000:73-80(in Chinese).
- [5] LIU Z Y, CHEN Y L, QU D K, et al. Research on robot calibration[J]. Robot, 2002, 24(5): 447-450(in Chinese).
- [6] ZHANG W Z, CHEN Q, SUN Z G. Quick calibration method of part coordinates for arc welding robot[J]. Transaction of the Welding Institution, 2005, 26(7): 1-4(in Chinese).
- [7] PU Y J, QIU T, CHEN S B. Calibration of TCF parameters of arc welding robot[J]. Robot, 2001, 23(2): 109-112(in Chinese).
- [8] MENG Y, ZHUANG H. Autonomous robot calibration using vision technology[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2007, 23(4): 436-446.
- [9] WANG D, BAI Y, ZHAO J. Autonomous robot calibration using vision technology[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2012, 34(1): 105-121.
- [10] CAI Z X. Robotics[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2009:1-100(in Chinese).