

DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2014.17.024

## 提高工业机器人铣削精度的方法研究

於亚斌<sup>1</sup>, 席文明<sup>2</sup>, 刘英<sup>1</sup>, 於明亮<sup>1</sup>

(1. 南京林业大学, 江苏南京 210037;

2. 厦门大学, 福建厦门 361000)

**摘要:** 工业机器人普遍采用示教编程的方法, 该方法利用操作者的观察获得精度, 是制约工业机器人铣削精度的主要因素。为了提高工业机器人的铣削精度, 提出了利用软件编程的方法, 利用标定工具对工业机器人、零件夹具、铣刀夹具进行标定, 求取它们之间的转换矩阵; 利用标定时获得的转换矩阵, 调整软件中的零件夹具、铣刀夹具的位置与姿态, 使实际空间中的工业机器人、零件夹具和铣刀夹具的位置、姿态与软件空间中的工业机器人、零件夹具和铣刀夹具模型的位置、姿态关系一致; 将软件空间编制的工业机器人铣削加工程序映射到实际机器人空间。由于建立的软件空间与实际空间具有一致性, 所以工业机器人的标定精度即为铣削精度, 实验结果表明: 在标定后的软件空间编程, 其铣削的位置精度可以达到 0.2 mm, 姿态精度可以达到 0.1°, 而示教编程一般的位置精度为 0.5 mm, 姿态精度为 0.5°。

**关键词:** 工业机器人; 铣削精度; 标定工具; 软件编程

**中图分类号:** TP24    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-3881(2014)17-089-4

### Method Research of Improving Milling Precision of Industrial Robot

YU Yabin<sup>1</sup>, XI Wenming<sup>2</sup>, LIU Ying<sup>1</sup>, YU Mingliang<sup>1</sup>

(1. Nanjing Forestry University, Nanjing Jiangsu 210037, China;

2. Xiamen University, Xiamen Fujian 361000, China)

**Abstract:** At present, teaching programming is commonly used in industrial robot. The precision was obtained in this way through the watching of operator, which was the main reason that restricted industrial robot's milling precision. The software programming is proposed to use in order to improving the industrial robot's milling precision. First, calibration tool was used to calibrate industrial robot, parts fixture and milling cutter fixture to get the transition matrix among them. Then, the matrix was used to adjust parts fixture's and milling cutter fixture's position and posture in the software so that the industrial robot's, parts fixture's and milling cutter fixture's position and gesture in actual space were consistent with them in software space. At last, the industrial robot's milling procedure programmed in software space was mapped in actual space. Because the software space was consistent with the actual space, the industrial robot's calibration precision was the milling precision. The experimental results show that if the procedure is programmed in calibration software space, the positional accuracy can be 0.2 mm and the posture accuracy can be 0.1°. But if the procedure is programmed by teaching programming, the positional accuracy is common 0.5 mm, and the posture accuracy is common 0.5°.

**Keywords:** Industrial robot; Milling precision; Calibration tool; Software programming

#### 0 前言

工业机器人主要应用于工业生产中的焊接、喷涂、上下料、码垛等作业中。随着工业机器人技术的发展以及工业生产的需要, 工业机器人也逐渐向零件加工领域扩展, 如焊接件磨平<sup>[1]</sup>, 铸造件去毛边<sup>[2]</sup>, 冲压件去毛刺<sup>[3]</sup>, 轮毂、模具和复杂外形零件的抛光<sup>[4]</sup>等。与工业机器人焊接、喷涂、上下料、码垛相比, 工业机器人铣削需要更高的精度。与加工机床不同, 工业机器人是强耦合的串联式结构, 与此结构相适应, 工业机器人常采用一种简单、易学的示教编程

方式, 该方法是操作者利用示教盒控制工业机器人运动到一个编程点, 操作者通过观察调整好工业机器人的位置和姿态, 记录下该编程点, 重复上述过程, 记录下一系列编程点, 工业机器人利用这一系列编程点自动生成工业机器人程序。从示教编程的过程可以看出, 该方法的编程精度取决于操作者的观察能力, 由于精度低, 一般只能满足焊接、喷涂、上下料、码垛等精度要求不高的作业。

软件编程可有效提高工业机器人的铣削精度<sup>[5]</sup>, 所谓软件编程是在软件中导入工业机器人模型、零件

收稿日期: 2013-08-02

作者简介: 於亚斌(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为工业机器人的系统控制。E-mail: 408188850@qq.com。

夹具模型、铣刀夹具模型等，然后在被加工零件模型表面上取点，由软件根据所取点自动生成工业机器人轨迹程序。软件编程是在被加工零件模型表面取点，其精度高，理论上的轨迹误差为零。

虽然软件编程可以获得高精度，但要想在高编程精度基础上获得高铣削精度，需要建立软件空间中的各模型与实际空间中的各模型对象的一致性关系，即软件中的工业机器人模型、零件夹具模型、铣刀夹具模型与实际空间中的工业机器人、零件夹具、铣刀夹具之间的位置和姿态关系一致。

首先利用标定工具对实际空间中各对象间的转换矩阵进行标定，其次，利用标定时求取的转换矩阵调整软件中各模型间的位置与姿态，使实际空间中的各对象位置、姿态与软件空间中的各对象模型的位置、姿态关系一致。

### 1 实际空间与软件空间一致性简介

如图 1 (a) 所示，软件空间的工业机器人模型、铣刀夹具模型及零件夹具模型的坐标系分别为  $\Sigma_{x_0y_0z_0}$ 、 $\Sigma_{x_ny_nz_n}$  和  $\Sigma_{x_Ty_Tz_T}$ ；实际空间中的工业机器人、铣刀夹具及零件夹具坐标系分别为  $\Sigma_{X_0Y_0Z_0}$ 、 $\Sigma_{X_nY_nZ_n}$  和  $\Sigma_{X_TY_TZ_T}$ 。由于零件夹具、铣刀夹具、工业机器人存在制造和安装误差，使得实际空间中零件夹具、铣刀夹具与工业机器人之间的位置、姿态关系与软件空间中零件夹具模型、铣刀夹具模型与工业机器人模型之间的位置、姿态关系不一致。图 1 (b) 中，机器人与铣刀夹具间的转换矩阵  $J_1$ 、机器人与零件夹具间的转换矩阵  $J_2$ 、零件夹具与铣刀夹具间的转换矩阵  $J_3$ ，为了建立软件空间与实际空间的一致性，需要标定上述 3 个转换矩阵中的两个。 $M$  是实际空间与软件空间之间的比例映射矩阵， $J_{T1}$  是软件空间中工业机器人模型与铣刀夹具模型之间的转换矩阵， $J_{T2}$  是软件空间中机器人模型与零件夹具模型之间的转换矩阵， $J_{T3}$  是软件空间中零件夹具模型与铣刀夹具模型之间的转换矩阵。要想使软件空间中编制的铣削加工程序在实际加工时没有误差，需要保证如下的关系

$$\begin{cases} J_{T1} = mJ_1 \\ J_{T2} = mJ_2 \\ J_{T3} = mJ_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中： $J_1$ 、 $J_2$ 、 $J_3$ 、 $J_{T1}$ 、 $J_{T2}$ 、 $J_{T3}$  为  $4 \times 4$  的齐次坐标矩阵； $m$  是比例系数， $M = mI$ ； $I$  是  $4 \times 4$  单位矩阵。

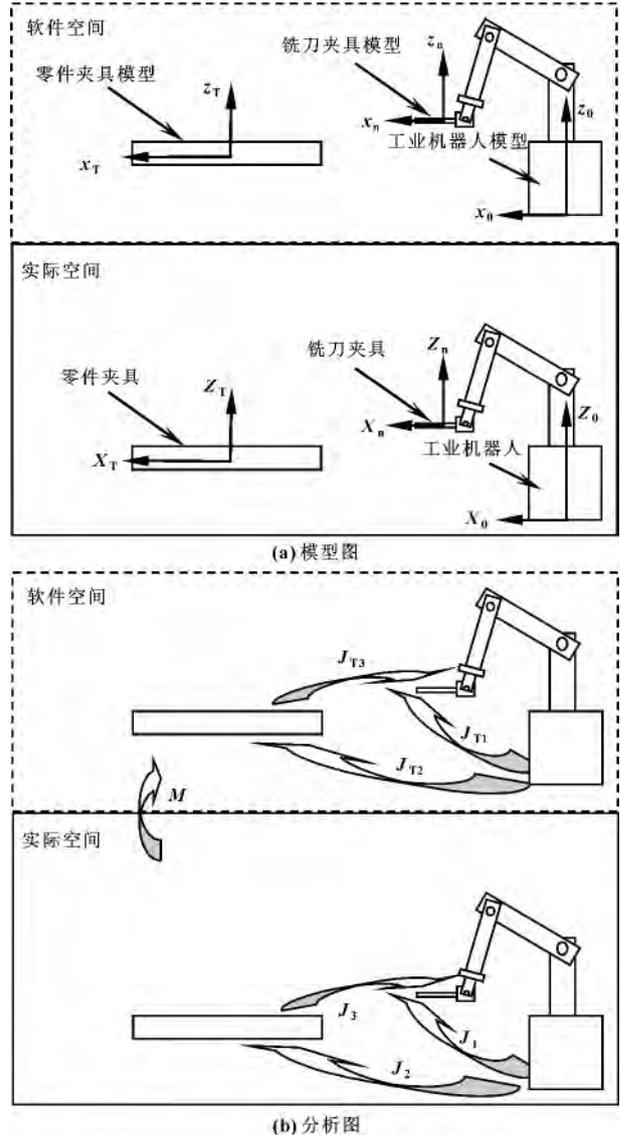


图 1 铣削加工中的空间一致性示意图

### 2 实际空间与软件空间一致性的建立

利用标定工具求取转换矩阵  $J_2$ 、 $J_3$ ，标定工具有两种，一种是尖顶标定工具，用于标定位置，一种是方形标定工具，用于标定姿态，标定工具的具体结构如图 2 所示。

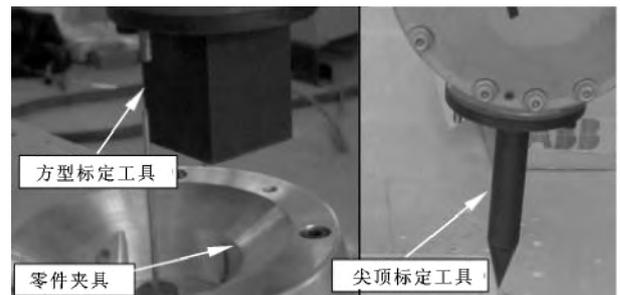


图 2 尖顶标定工具和方型标定工具

首先，标定工业机器人与零件夹具之间的转换矩阵，标定时，利用尖顶标定工具、尖顶标定工具模型和方型标定工具、方型标定工具模型，接触实际空间中零件夹具和软件空间中零件夹具模型上相同的点和面。

假设开始标定前，实际空间与软件空间的位置、姿态是一致的，则

$$J_0 = J_{T_0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = T_0 \quad (2)$$

式中： $J_{T_0}$ 是开始标定时，软件空间中工业机器人模型到零件夹具模型的初始转换矩阵； $J_0$ 是开始标定时，实际空间中与 $J_{T_0}$ 对应的工业机器人到零件夹具的初始转换矩阵。

由于存在工业机器人、零件夹具的制造和安装误差， $J_0$ 和 $J_2$ 不相等。假设 $J_0$ 和 $J_2$ 之间的姿态误差为 $ROT(x, \alpha)$ 、 $ROT(y, \beta)$ 、 $ROT(z, \gamma)$ ； $J_0$ 和 $J_2$ 之间的位置误差为 $Tran(x, p_x)$ 、 $Tran(y, p_y)$ 、 $Tran(z, p_z)$ ，由式(2)得

$$J_2 = J_0 \cdot ROT(x, \alpha) \cdot ROT(y, \beta) \cdot ROT(z, \gamma) \cdot Tran(x, p_x) \cdot Tran(y, p_y) \cdot Tran(z, p_z) = J_{T_0} \cdot ROT(x, \alpha) \cdot ROT(y, \beta) \cdot ROT(z, \gamma) \cdot Tran(x, p_x) \cdot Tran(y, p_y) \cdot Tran(z, p_z) \quad (3)$$

式中： $ROT(x, \alpha)$ 、 $ROT(y, \beta)$ 、 $ROT(z, \gamma)$ 是绕零件夹具上坐标系 $\Sigma_{X_T Y_T Z_T}$ 的 $X_T$ 、 $Y_T$ 、 $Z_T$ 轴旋转 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 角形成的 $4 \times 4$ 齐次坐标矩阵。 $Tran(x, p_x)$ 、 $Tran(y, p_y)$ 、 $Tran(z, p_z)$ 是沿零件夹具上坐标系 $\Sigma_{X_T Y_T Z_T}$ 的 $X_T$ 、 $Y_T$ 、 $Z_T$ 轴平移 $p_x$ 、 $p_y$ 、 $p_z$ 距离形成的 $4 \times 4$ 齐次坐标矩阵。

将式(3)代入到式(1)得

$$J_{T_2} = mI \cdot T_0 \cdot ROT(x, \alpha) \cdot ROT(y, \beta) \cdot ROT(z, \gamma) \cdot Tran(x, p_x) \cdot Tran(y, p_y) \cdot Tran(z, p_z) \quad (4)$$

式中： $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 和 $p_x$ 、 $p_y$ 、 $p_z$ 是可通过标定工具测量得到，都是已知量，则可以利用公式(4)对软件空间的零件夹具模型进行调整，使其与实际空间中的零件夹具的位置、姿态一致。

利用同样方法可以对 $J_2$ 方进行标定。

图3是安装在工业机器人末端的铣刀夹具以及安装在铣刀夹具上的铣刀，利用同样的方法可以对 $J_3$ 方进行标定，从而可以对软件空间中的铣刀夹具模型进行调整，使其与实际空间中的铣刀夹具位置、姿态一致。

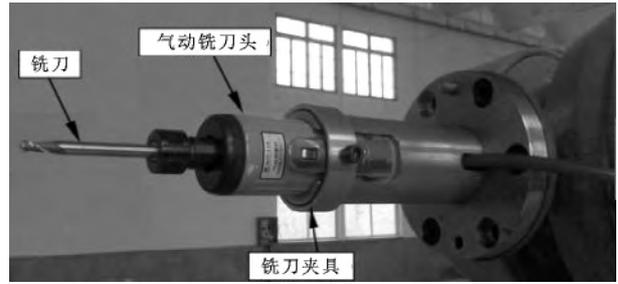


图3 铣刀与铣刀夹具

### 3 实验结果

工业机器人铣削系统加工的是铸塑零件，其形状类似于碗，在开口处有两个对称的耳朵，零件表面上分布有88个小孔。零件压铸完成后，会在小孔、耳朵闭合孔、耳朵外圈、碗口处产生毛边，这些毛边由人工拿着零件，在固定的铣刀上加工去除，工人平均每4 min完成一个零件的加工。图4是工业机器人铣削加工实验系统，由ABB工业机器人（IRB4400，60 kg）、零件夹具（自行研制）、铣刀夹具（自行研制）、气动铣刀头（外购）和铣刀（外购）组成，当气动铣刀头接入压缩空气时，安装在上面的铣刀产生旋转运动（4 000 r/min），从而对零件进行加工。

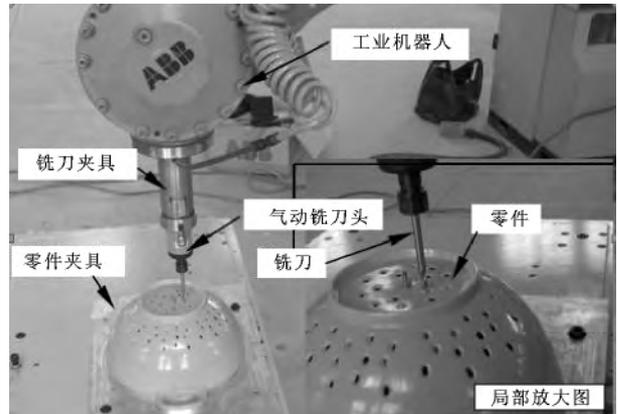


图4 工业机器人铣削加工实验系统

工业机器人安装在工厂车间的水泥地面上，零件夹具和铣刀夹具完成加工后也直接安装在工厂车间水泥地面和工业机器人末端。在软件编程前，利用标定工具和文中方法对工业机器人、零件夹具、铣刀夹具进行标定，利用标定的转换矩阵调整软件空间中的零件夹具模型、铣刀夹具模型，使其位置、姿态与实际空间的零件夹具、铣刀夹具位置、姿态一致，从而建立软件空间与实际空间的一致性，其标定精度即为加工精度，所以在加工完成后需要测量其加工误差，从而获得标定精度。完成标定后，在软件空间编制加工程序，对于88个小孔，采用上下垂直加工的形式，

由于 88 个小孔不是分布在同一水平面上,所以铣刀的姿态误差将影响 88 个小孔的加工精度,对于耳朵的闭合孔、耳朵外圈和碗口处的加工,直接在零件 Pro/E 模型上取点编制程序。在误差分析中,将利用耳朵外圈、碗口处的加工切削量获得铣削加工系统的位置精度,而利用不同水平面上小孔加工的位置误差计算铣削加工系统的姿态精度。

图 5 是加工前零件与加工后零件的比较。从图中可以看出,工业机器人铣削加工的孔、边结构完整,只是将飞边完整的去除,没有对零件外型造成破坏,工业机器人加工一个零件花费的时间为 2 min,如果能提高铣刀的转速,则加工效率可以进一步提高。

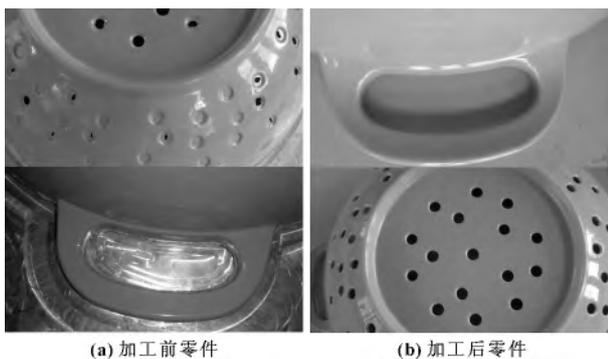


图 5 加工前零件和加工后零件的比较

零件铣削加工完成后,需要对零件的铣削量进行检测,确定加工精度也就是标定精度。检测系统由加工中心、百分表、加工完的零件和零件夹具组成,百分表装夹在加工中心主轴上,零件夹具固定在加工中心工作台上,而加工完的零件固定在零件夹具上。操纵加工中心,利用百分表尖点触碰加工完的零件上耳朵外圈和碗口边缘,共测量 30 个加工点,绘制在图 6 中,可以发现其最大的位置误差为 0.08 mm。利用百分表尖点触碰加工完的零件上不同层小孔,根据不同层小孔的相对高度以及不同层小孔的相对加工偏差,就可以计算出标定时的姿态精度,其姿态精度为  $0.1^\circ$ 。

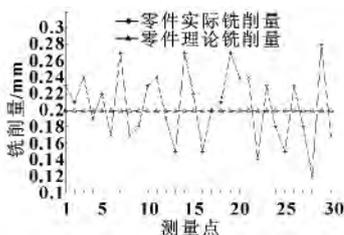


图 6 理论铣削量与实际铣削量比较

#### 4 结论

利用标定工具对工业机器人铣削加工系统进行标定,利用标定时的转换矩阵调整软件空间中的各模型

位置与姿态,建立实际空间与软件空间的一致性,这样,在软件空间编制的加工轨迹映射到实际空间,其加工精度为标定时精度。与示教编程的方法相比较,文中研究的方法可以有效提高工业机器人的铣削加工精度。另外,软件编程不需要对实际工业机器人进行操作,不占用工业机器人的工作时间,操作人员可以远离工业机器人操作现场,避免粉尘和噪声对操作人员的影响。

#### 参考文献:

- [1] SUN Yunquan. Development of a Unified Flexible Grinding Process [D]. University of Connecticut 2004.
- [2] ADEL O ,RICHARD B ,OLIVER G ,et al. Feedrate Planning for Machining with Industrial Six-axis Robots [J]. Control Engineering Practice 2010(18):471-482.
- [3] 齐立哲,汤青,杨书评,等. 基于离线编程的机器人曲轴去毛刺系统[J]. 制造业自动化 2012,34(1):13-15.
- [4] 王通,袁楚明,陈幼平,等. 机器人模具抛光自由曲面刀具轨迹的生成研究[J]. 中国机械工程,2001,12(4):401-404.
- [5] OLOF Sörmmo ,BJÖRN Olofsson ,ULRICH Schneider ,et al. Increasing the Milling Accuracy for Industrial Robots Using a Piezo-Actuated High-Dynamic Micro Manipulator [C]// The 2012 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Kaohsiung ,Taiwan: IEEE , 2012:104-110.
- [6] REINL C ,FRIEDMANN M ,BAUER J ,et al. Model-based Off-line Compensation of Path Deviation for Industrial Robots in Milling Applications [C]// 2011 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2011). Budapest ,Hungary: IEEE ,2011:367-372.
- [7] 张海鸥,陈雷,王桂兰,等. 机器人制造陶瓷原型系统的研究[J]. 中国机械工程 2005,16(23):2112-2115.
- [8] 朴永杰,邱涛,陈善本. 弧焊机器人 TCF 参数的标定[J]. 机器人 2001,23(2):109-112.
- [9] 洪云飞,李成群,袁超. 用于复杂空间曲面加工的机器人磨削系统[J]. 中国机械工程 2006(增刊):150-153.
- [10] 吕鹏,孟正大. 弧焊机器人离线编程的实用化技术[J]. 华中科技大学学报:自然科学版 2008(增刊 I):273-276.
- [11] WAG Yh-Tien ,JAN Yam-Jyi. Grinding Force Models in Finishing Processes [C]//International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Proceedings. Como ,Italy:IEEE 2001:822-827.
- [12] WANG Xuguang ,Edward Red. Robotic TCF and rigid-body calibration methods [J]. Robotica ,1997,15(6):633-644.