

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2018.01.009

# 机器人虚拟 TCP 的设置及其在加工中的应用\*

徐开怀<sup>1</sup>, 郭毅伟<sup>1</sup>, 管晓东<sup>1</sup>, 庞 滨<sup>1</sup>, 席文明<sup>1\*</sup>

(厦门大学 航空航天学院 福建 厦门 361005)

**摘要:** 针对机器人末端抓持工件时,无法利用生成在工件上的轮廓点进行去毛边加工的问题,对机器人末端抓持工件在工具固定的情况下去毛边加工的方法进行研究,提出在确定工件加工轮廓与机器人末端 TCP 的固定位姿关系之后,将固定在机器人工作空间中的工具上一点设置为虚拟 TCP,以该虚拟 TCP 为基准,将附着于机器人末端工件上的加工轮廓点映射成机器人工作空间中的虚拟轨迹点的方法。在给出工件上轨迹点与虚拟轨迹点的映射关系,完成虚拟 TCP 以及机器人末端 TCP 设置的基础上,在 Fanuc 机器人仿真软件 RoboGuide 中对该方法进行了运动仿真验证后进行了加工,测量了其刀具进给量。实验结果表明:利用该方法对机器人夹持的工件进行去毛边加工,完全满足生产加工的精度要求。

**关键词:** 工具中心点; 虚拟 TCP; 虚拟轨迹点; 去毛边加工

中图分类号: TH164; TP242

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2018)01-0048-05

## Setting of robot virtual TCP and application in machining

XU Kai-huai<sup>1</sup>, GUO Yi-wei<sup>1</sup>, Guan Xiao-dong<sup>1</sup>, PANG Bang<sup>1</sup>, XI Wen-ming<sup>1\*</sup>

(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the contours generated on the workpiece grasped at end of a robot cannot be used for deburring, having studied the deburring machining of the workpiece grasped at the robot end under the condition of tool fixation, the method was proposed, that after the relationship between the workpiece contour and the fixed position of TCP was confirmed, a point of the tool fixed in the workspace of the robot is set as a virtual TCP, based on which the machining contour points attached to the robot end workpiece were mapped into the virtual locus in the robot workspace. Based on the mapping between locus and the virtual locus on the workpiece and the completion of the virtual TCP and the TCP set at the robot end, RoboGuide, Fanuc robot simulation software, was used to validate the method, its processing, and tool feed measurement. The result indicates that method of deburring the workpiece grasped at the robot end fully meets the precision requirements of production and processing.

**Key words:** tool center point(TCP); virtual TCP; virtual locus; deburring processing

## 0 引 言

机器人加工是一种新的成型技术,广泛应用于压铸件的毛边去除、铸造件的后处理、非金属模具加工、叶片磨削中<sup>[1-3]</sup>。与数控加工不同,机器人利用工具中心点(TCP)坐标系与轨迹点依次重合的方法驱动机器人运动。

在焊接、搬运、制孔中,其机器人的焊枪、夹具和钻铣工具安装在机器人的末端,这样的系统被称为工具在手系统,这时,机器人的 TCP 被设置在机器人末端的焊枪、夹具和钻铣工具上,而机器人的运动轨迹点产生在机器人工作空间中的工件上。当机器人的 TCP 依次与工件上的轨迹点重合时,机器人带着末端的工具、夹具和钻铣刀具与工件接触,完成工件的焊接、抓

收稿日期: 2017-04-13

基金项目: 福建省重大科技专项资助项目(2016HZ0001-6)

作者简介: 徐开怀(1992-),男,江西南昌人,硕士研究生,主要从事机器人技术方面的研究。E-mail: 564914167@qq.com

通信联系人: 席文明,男,教授,硕士生导师。E-mail: 564914167@qq.com

取和钻铣<sup>[4-7]</sup>。

然而,在许多机器人加工作业中,机器人末端夹持工件,而加工工具固定在机器人的工作空间中,这种系统被称为工件在手系统。在压铸件去毛边加工中,为了形成机器人下料与去毛边一体化,机器人末端夹具从压铸机中取出压铸件后,直接移动到处于机器人工作空间中的铣刀上完成去毛边加工。这时,压铸件上的去除毛边的轮廓与机器人末端 TCP 形成固定的位姿关系,无法产生机器人的运动。如果将 TCP 设置在机器人工作空间中的铣刀上,并将该点称为虚拟 TCP,去毛边时,机器人末端压铸件上的轨迹点依次运动到与虚拟 TCP 重合,就可以完成压铸件的毛边加工。

为了将 TCP 与虚拟 TCP 进行区分,可以保留原有的机器人末端 TCP,利用该虚拟 TCP 将压铸件上的加工轮廓映射成机器人工作空间中的虚拟轨迹点,当机器人末端的 TCP 依次与虚拟轨迹点重合时,压铸件上的加工轮廓也对应地与虚拟 TCP 重合。在设置机器人末端 TCP 和虚拟 TCP 的位置后,利用 TCP 与对应虚拟轨迹点重合时,压铸件上的加工轮廓也与虚拟 TCP 重合的关系,可以建立压铸件上的轨迹点与虚拟轨迹点之间的映射关系。

本研究首先建立压铸件上的加工轮廓与虚拟轨迹点的映射模型,在此基础上,利用日本 Fanuc 机器人的仿真软件 RoboGuide 对本研究建立的理论模型进行验证,最后,将产生的虚拟轨迹点下载到 Fanuc 机器人的控制器中,完成压铸件毛边的实际加工实验,验证本研究方法的可行性。

## 1 虚拟轨迹点生成方法

虚拟轨迹生成原理如图 1 所示。

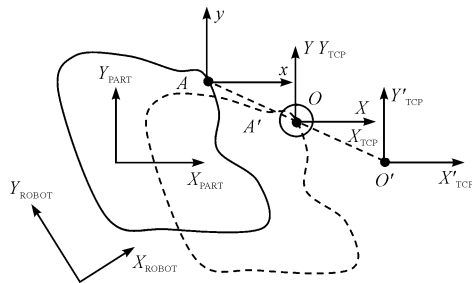


图 1 虚拟轨迹生成原理

在图 1 中,假设曲线是需要加工的工件轮廓,其机器人轨迹点  $A(x_a, y_a)$  处于该轮廓上,坐标系为  $\Sigma xy$ 。刀具的半径为  $R$ ,其圆心是  $O$ ,坐标系为  $\Sigma XY$ ,机器人的基坐标系为  $\Sigma X_{ROBOT} Y_{ROBOT}$ 。选择机器人的 TCP 坐标系  $\Sigma X_{TCP} Y_{TCP}$  与刀具坐标系重合,同时将  $O$  点设置为

虚拟 TCP。

假设轨迹点  $A$  与  $O$  重合,则机器人的 TCP 坐标系应该从  $O$  点移动到  $\Sigma X'_{TCP} Y'_{TCP}$  处, $O'$  为虚拟轨迹的一点,其对应的原有工件轨迹点为  $A$ 。从图中可以看出, $O'$  点是  $A$  点相对  $\Sigma XY$  坐标系的镜像点。这样,就可以依据工件上的加工轮廓产生虚拟轨迹点,其方法是做加工轮廓相对虚拟 TCP 坐标系的镜像点,当机器人的 TCP 依次与虚拟轨迹点重合时,工件的轨迹点与刀具的中心  $O$  接触。

轨迹点  $A$  坐标系  $\Sigma xy$  和刀具坐标系  $\Sigma XY$  都处于机器人基坐标系中,可以将  $A$  坐标系转换到刀具坐标系中,完成工件上的原有轨迹相对于刀具坐标系的镜像:

$${}^O_A T = {}^O_R T \cdot {}^R_A T = ({}^R_O T)^{-1} \cdot {}^R_A T \quad (1)$$

式中: ${}^O_A T$ —刀具坐标系到轨迹点坐标系的变换,也即轨迹点坐标系相对刀具坐标系的位姿; ${}^R_O T$ —刀具坐标系相对机器人基坐标系的位姿; ${}^R_A T$ —轨迹点坐标系相对机器人基坐标系的位姿。

它们是  $4 \times 4$  的齐次坐标矩阵,其中  ${}^R_O T$  和  ${}^R_A T$  是已知矩阵:

$$({}^R_O T)^{-1} = \begin{bmatrix} {}^R_O R^T & -{}^R_O R^T \cdot {}^R_O p_{00} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: ${}^R_O p_{00}$ —刀具坐标系的原点在机器人基坐标系中的坐标,为  $3 \times 1$  向量。

假设  $A$  点坐标系是通过旋转刀具坐标系而形成,则:

$$Rot(Z, \alpha) Rot(Y, \beta) Rot(X, \gamma) = {}^O_A R \quad (3)$$

式中: ${}^O_A R$ — ${}^O_A T$  中的  $3 \times 3$  旋转矩阵,这样  $A$  点可以写成  $({}^O x_a, {}^O y_a, {}^O z_a, \alpha, \beta, \gamma)$ 。

如果保持镜像后点的姿态和镜像前的姿态一致,则  $A$  点的镜像  $O'$  点位置坐标为:

$$\begin{bmatrix} {}^{O'} x_a \\ {}^{O'} y_a \\ {}^{O'} z_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^O x_a \\ {}^O y_a \\ {}^O z_a \end{bmatrix} \quad (4)$$

可以将  $O'$  点写为  $({}^{O'} x_a, {}^{O'} y_a, {}^{O'} z_a, \alpha, \beta, \gamma)$ 。此时  $O'$  点是相对于刀具坐标系的,需要将其转换到机器人基坐标系中,根据式 (1) 可以得到:

$${}^O_{O'} T = {}^O_R T \cdot {}^R_{O'} T = ({}^R_O T)^{-1} \cdot {}^R_{O'} T \quad (5)$$

$${}^R_{O'} T = {}^R_O T \cdot {}^O_{O'} T \quad (6)$$

当 TCP 沿着虚拟轨迹点运动时,工件的轮廓将沿刀具的圆心  $O$  点做平动。在加工时,希望工件的轮廓和刀具的外径相切,这需要将虚拟轨迹点向外偏移一个刀具的半径。而当加工内孔时,需要将虚拟轨迹点

向孔内偏移一个刀具的半径。所以,虚拟轨迹产生的方法为:

(1) 如果是加工工件的外轮廓,则将待加工工件的轮廓向外偏移一个刀具半径  $R$ 。如果是加工工件的内轮廓,则将待加工工件的轮廓向内偏移一个刀具半径  $R$ ;

(2) 利用 ArtCAM 软件(英国,Delcam 公司)产生偏移后工件轮廓的刀轨迹;

(3) 在刀具的中心处设置虚拟 TCP,同时,将机器人的 TCP 设置在虚拟 TCP 处,以虚拟 TCP 为基准,做刀轨迹的镜像,这些镜像点为虚拟刀轨迹;

(4) 以相邻 3 个刀轨迹点为平面,计算该平面的法矢量,该法矢量为一个刀轨迹点的姿态,结合刀轨迹点的位置和姿态并做刀轨迹后处理,将刀轨迹转换成机器人的虚拟轨迹<sup>[8]</sup>;

(5) 运行虚拟轨迹后,工件的轮廓将与刀具外切或者内切。

工件沿虚拟轨迹平动适用于较小半径的加工刀具,如利用铣刀铣削压铸件的毛边。当工件平动时,机器人末端不会产生旋转,从而避免夹具上的电气线路缠绕到机器人轴上。对于机器人砂带磨削作业,由于砂带支撑在多个轮子上,加工的工件无法绕砂带平动,这时需要采用工件上的加工轮廓与虚拟 TCP 位置重合的同时,绕虚拟 TCP 旋转,使其与虚拟 TCP 的坐标系重合(姿态一致)。

绕固定点旋转的虚拟轨迹生成原理如图 2 所示。

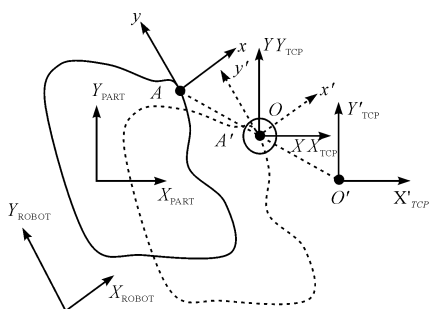


图 2 绕固定点旋转的虚拟轨迹生成原理

与图 1 不同,在图 2 中,轨迹点  $A$  的法矢量( $x$  坐标轴)垂直工件轮廓。按照前面虚拟轨迹产生的方法,当机器人的 TCP 与虚拟轨迹点  $O'$  重合时,工件原有轨迹  $A$  点与刀具  $O$  重合。此时  $A'$  点坐标系  $\Sigma x'y'$  并不与虚拟 TCP 的坐标系重合。需要在此基础上绕  $A'$  点的  $z'$  坐标轴反向旋转一个  $-\alpha$  角,即:

$$\begin{bmatrix} {}^{0'}x_a \\ {}^{0'}y_a \\ {}^{0'}z_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c(-\alpha) & -s(-\alpha) & 0 \\ s(-\alpha) & c(-\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{0'}x_a \\ {}^{0'}y_a \\ {}^{0'}z_a \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $({}^{0'}x_a, {}^{0'}y_a, {}^{0'}z_a)$  一绕  $A'$  点的  $z'$  坐标轴旋转后的虚拟轨迹点。

旋转完成的虚拟轨迹点如图 3 所示。

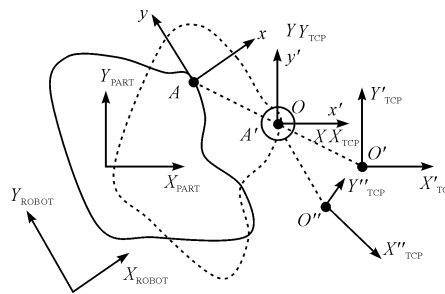


图 3 旋转完成的虚拟轨迹点

这样,可以获得旋转完成后的虚拟轨迹  $O''$  坐标为  $({}^{0'}x_a, {}^{0'}y_a, {}^{0'}z_a, -\alpha, -\beta, -\gamma)$ 。

根据式(6),可以将  $O''$  点转换到机器人基坐标系中,即:

$${}^{R}_{0'}T = {}^R_0T \cdot {}^O_{0'}T \quad (8)$$

在实际作业时,可以将刀具圆心上的坐标系取在刀具或者砂带的表面上。

利用 ArtCAM 产生加工轨迹时,加工轨迹点产生在工件坐标系中,见图 3 中的  $\Sigma XPARTYPART$ 。为了简化虚拟轨迹的生成过程,可以将虚拟 TCP、刀具坐标系选择与工件坐标系重合,然后利用公式(4)对加工轮廓进行镜像,通过对镜像点的后处理,将加工轮廓转换成机器人工作空间中的平动虚拟轨迹点。在平动虚拟轨迹点基础上,利用公式(7),对平动虚拟轨迹点进行旋转,并对旋转点进行后处理,就可以形成机器人工作空间中的旋转虚拟轨迹点。

采用 TCP、刀具坐标系与工件坐标系重合的方法,可以避免加工轮廓、虚拟轨迹点在不同坐标系中的反复转换。

## 2 实验及结果分析

为了验证本文方法的正确性,笔者将生成的虚拟轨迹点导入 Fanuc 机器人仿真软件 RoboGuide 中,进行轨迹仿真验证。机器人加工中的平动虚拟轨迹仿真如图 4 所示。

由图 4(a) 可见,机器人的夹具夹持工件,形成工件在手状态,而安装在刀架上的刀具固定在机器人工作空间中。当导入机器人加工轨迹后,这些轨迹附着在工件的边缘,如果在机器人末端设置 TCP,则 TCP 相对于工件上轨迹点的位置和姿态固定不变, TCP 无法和工件上的轨迹点重合而产生机器人的加工运动。利用图 4(a) 中的工件加工轮廓,可以产生机器人工作

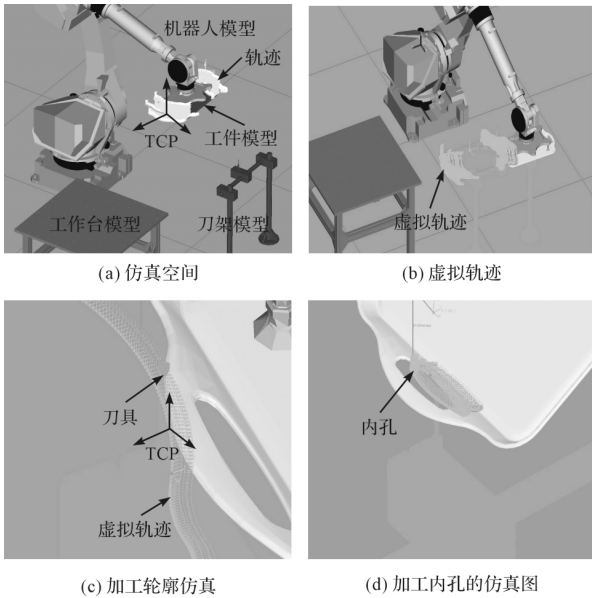


图 4 机器人加工中的平动虚拟轨迹仿真

空间中的虚拟轨迹点,如图 4(b,c)所示。因为虚拟轨迹点相对于刀具(虚拟 TCP)产生在机器人的工作空间中,可以使得 TCP 和虚拟轨迹点间产生相对运动。当机器人末端的 TCP 沿虚拟轨迹运动时,工件上的原有轨迹点和刀具的外径相切。内孔加工时的虚拟轨迹如图 4(d)所示,当 TCP 沿虚拟轨迹运动时,刀具和工件上的轮廓产生内切。

工件加工轮廓与虚拟 TCP 重合并绕虚拟 TCP 旋转的虚拟轨迹点仿真如图 5 所示。

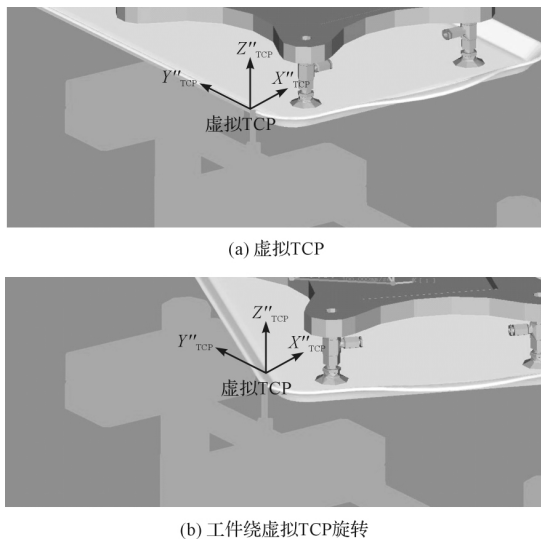
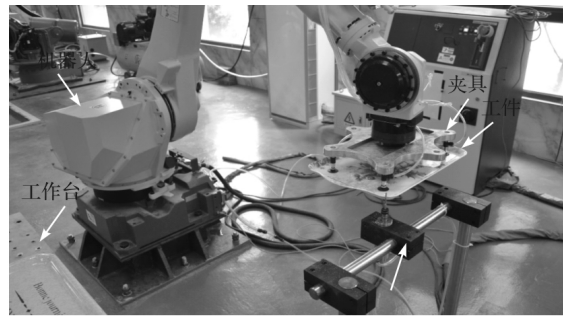


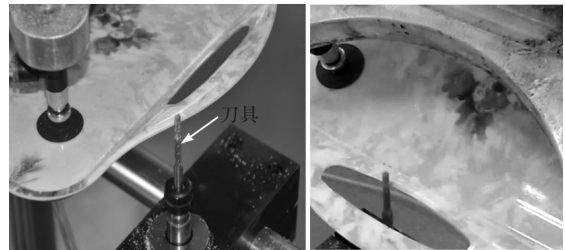
图 5 工件虚拟 TCP 产生旋转

此时,工件上轨迹点的法向量和工件轮廓垂直。图 5(a)中,工件上与刀具接触的轨迹点法向量垂直于工件的直线边并指向工件内部,当该轨迹点与虚拟 TCP 重合时,导致虚拟 TCP 的  $X''_{TCP}$  轴垂直于工件的轮廓。图 5(b)中,刀具与工件圆弧处的轨迹点接触,此时,工件上轨迹点的法向量指向圆弧的圆心,当工件上的该轨迹点与虚拟 TCP 重合时,虚拟 TCP 的  $X''_{TCP}$  轴指向圆弧的圆心,从而带来工件沿虚拟 TCP 运动并绕虚拟 TCP 旋转。

虚拟轨迹加工实验实物图如图 6 所示。

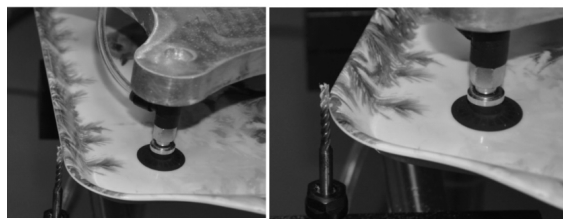


(a) 实际机器人工作空间架



(b) 加工外轮廓

(c) 加工内孔



(d) 虚拟 TCP

(e) 工件绕虚拟

图 6 虚拟轨迹加工实验实物图

加工压铸件毛边的机器人系统如图 6(a)所示,与仿真软件中的模型对应,机器人系统包括 Fanuc 的 M-710iC/50 机器人、工作台以及刀架。实际上,仿真软件中的工作台模型、刀架模型就是工作台、刀架的设计模型。图 6(b)是将虚拟轨迹下载到 Fanuc 机器人的 (下转第 78 页)

本文引用格式:

徐开怀, 郭毅伟, 管晓东, 等. 机器人虚拟 TCP 的设置及其在加工中的应用[J]. 机电工程 2017, 35(1): 48-51, 78.

XU Kai-huai, GUO Yi-wei, Guan Xiao-dong, et al. Setting of robot virtual TCP and application in machining[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 35(1): 48-51, 78.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

- [2] 李琦,徐弘毅,金锐,等. 封装键合点对 IGBT UIS 失效的影响研究[J]. 机电工程, 2015, 32(5): 707-711.
- [3] HUNG T Y, LIAO L L, WANG C C, et al. Life prediction of high-cycle fatigue in aluminum bonding wires under power cycling test[J]. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability* 2014, 14(1): 484-492.
- [4] 谢鑫鹏. 功率器件封装的可靠性研究[D]. 广州: 华南理工大学电气与信息学院, 2010.
- [5] COFFIN L F. Fatigue at high temperature[M]. San Francisco: American Society for Testing and Materials, 1973.
- [6] DUGDALE D S. Yielding of steel sheets containing slits[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1960, 8(2): 100-104.
- [7] BARENBLATT G I. The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture[J]. *Advanced in Applied Mechanics*, 1962, 7(C): 55-129.
- [8] HALLETT S. 13-Predicting progressive delamination via interface elements[J]. *Journal of Composite Materials*, 1998, 32(14): 1246-1272.
- [9] XU X P, NEEDLEMAN A. Analysis of ductile crack growth by means of a cohesive damage model[J]. *International Journal of Fracture*, 1996, 81(2): 99-112.
- [10] TVERGAARD V, HUTCHINSON J W. The relation between crack growth resistance and fracture process parameters in elastic-plastic solids[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1992, 40(6): 1377-1397.
- [11] ROE K L, SIEGMUND T. An irreversible cohesive zone model for interface fatigue crack growth simulation[J]. *Engineering fracture mechanics* 2003, 70(2): 209-232.

[编辑: 周昱晨]

本文引用格式:

郭源齐,高涛,许杨剑,等. 功率模块引线键合界面温度循环下的寿命预测[J]. 机电工程, 2017, 35(1): 73-78.

GUO Yuan-qi, GAO Tao, XU Yang-jian, et al. Life prediction of bonding interface in power module under thermal cycling loading[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 35(1): 73-78. [《机电工程》杂志: http://www.meem.com.cn](http://www.meem.com.cn)

(上接第 51 页)

控制器中,对工件外轮廓上的毛边进行铣削加工,工件由密胺脂粉热压成型,为一餐具盘。采用同样的方法可以对压铸件上的孔进行加工,见图 6(c)。图 6(d)和图 6(e)是工件沿虚拟 TCP 运动并绕虚拟 TCP 旋转的加工,与仿真过程一样,在加工时,工件上的加工轮廓不仅与虚拟 TCP 接触,而且绕虚拟 TCP 产生旋转,使两者的坐标系重合。两次加工后测量其刀具进给量,利用机器人去除压铸机毛边满足生产要求。

### 3 结束语

为了适应机器人加工的不同应用,本研究给出了两种虚拟轨迹的生成方法,一种是绕刀具外径平动的虚拟轨迹生成方法,该方法适用于铣刀加工工件的应用,如本研究的压铸件毛边铣削。另一种是原有工件的轨迹点具有姿态的变化,其与虚拟 TCP 坐标系重合时,工件产生旋转,从而形成工件沿 TCP 移动的同时,也绕 TCP 旋转。该方法适用于机器人夹持工件在砂带表面磨削作业,如利用机器人抓持叶片在砂带机上磨削。

后期研究中,将把本研究的轨迹生成方法以及机器人系统应用到工业生产中,利用机器人系统与压铸机配合,形成压铸件的热压、下料以及去毛边自动化单元,建立数字化的压铸件加工系统。

参考文献(References):

- [1] YONGHUA C, FENGHUA D. Robot machining: recent de-

velopment and future research issues[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol* 2013, 66(9-12): 1489-1497.

- [2] ZAEH M F, ROESCH O. Improvement of the machining accuracy of milling robots[J]. *Pord. Eng. Res Devel* 2014, 8(6): 737-744.
- [3] FENGJIE T, ZHENGUO L, CHONG L. Polishing pressure investigations of robot automatic polishing on curved surfaces[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2016, 87(1-4): 1-8.
- [4] CORDES M, HINTZE W. Offline simulation of path deviation due to joint compliance and hysteresis for robot machining[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2017, 90(1-4): 1075-1083.
- [5] ABELE E, SCHUTZER K, BAUER J, et al. Tool path adaptation based on optical measurement data for milling with industrial robots[J]. *Production Engineering* 2012, 6(4-5): 459-465.
- [6] 唐少琴. 基于 PLC 的气动机械手控制系统设计[J]. 机械设计与制造, 2016, 45(5): 51.
- [7] 李文,冯毅,张金武. 基于 PLC 控制的吸盘式气动机械手设计[J]. 液压气动与密封, 2016(12): 35-38.
- [8] 黄奇伟,章明,曲巍葳,等. 机器人制孔姿态优化与光顺[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2015, 49(12): 2261-2275.
- [9] XI Wen-ming, WANG Ai-min, WU Qi, et al. An integrated CAD/CAM/robotic milling method for custom cementless femoral prostheses[J]. *Medical Engineering and Physics*, 2015, 37(9): 911-915.

[编辑: 张 豪]