

Robotic Three-Dot Force Feedback to Suppress Surface Contact Slipping in Robot Drilling*

Chenjie Li^{1,2}, Shuqiang Li², Runxing Qu², Sijun Zhu^{2,3}, Jun Yao¹

¹Shenyang Ligong University, Shenyang

²Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang

³Yangzhou Engineering Technology Research Center, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Yangzhou
Email: lichenjie@sia.cn, sqli@sia.cn, qurunxin@sia.cn, sjzhu@sia.cn, yaojunjun@sina.com

Received: May. 13th, 2013; revised: Jun. 10th, 2013; accepted: Jun. 19th, 2013

Copyright © 2013 Chenjie Li et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: Compared with the machine tools, the stiffness of industrial robots is lower. Therefore, in the drilling of industrial robots, vibration occurred easily. The vibration can generate a slipping effect when the drilling tool touches the workpiece, which affects the quality of the drilled holes, the holes' precision can not meet requirement and results in the failure of drilling. This paper presents a method based on three-dot-force feedback, which can suppress the Surface Contact Slipping (SCS). The method makes feedback to the robot kinematics using three force sensors, keeping the drilling tool normal with the workpiece surface to suppress SCS. Through the simulation analysis, the method can effectively improve the quality of the drilled holes and fulfill the aim of drilling.

Keywords: Industrial Robots; Robot Drilling; Force Feedback; Surface Contact Slipping

机器人钻削三位力反馈表面接触滑移抑制*

李晨杰^{1,2}, 李树强², 屈润鑫², 朱思俊^{2,3}, 姚俊¹

¹沈阳理工大学, 沈阳

²中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳

³中国科学院沈阳自动化研究所扬州工程技术研究中心, 扬州

Email: lichenjie@sia.cn, sqli@sia.cn, qurunxin@sia.cn, sjzhu@sia.cn, yaojunjun@sina.com

收稿日期: 2013年5月13日; 修回日期: 2013年6月10日; 录用日期: 2013年6月19日

摘要: 相对与传统机床, 工业机器人的刚度较低。在使用工业机器人进行钻削时, 很容易产生振动。当钻头与工作表面接触时, 这种振动将导致钻头沿工件表面滑移, 影响成孔质量, 孔位置精度达不到要求, 以致钻削失败。本文提出一种基于力反馈的方法来抑制表面滑移。该方法利用力传感器反馈机器人运动学, 使钻头与工件表面保持垂直, 以抑制滑移。仿真分析表明, 该方法可有效改善成孔质量, 满足钻削要求。

关键词: 工业机器人; 机器人钻削; 力反馈; 表面接触滑移

1. 引言

在2001年6月16日第44届巴黎国际航空航天展览会揭示了世界航空发展的三大趋势: 无人驾驶、

超大运力和广泛引进机器人。航展期间, 各大参展商利用一天时间专门对航空工业引进机器人这一发展趋势进行了深入讨论。自此, KUKA、ABB、COMAU等各大工业机器人公司开始调整自己的发展战略, 纷纷将航空制造业作为工业机器人应用的又一主要领

*江苏省青年基金项目(SBK201241514), 沈阳市国际科技合作项目(F10-236-6-00)。

域。时至今日，机器人技术已在飞机大型零部件的激光焊接、表面材料涂覆、复合材料加工、自动化装配中得到较广泛应用，并已开始显现效益^[1]。

大型结构件加工如飞机蒙皮装配、船用夹芯板加工、巨型水轮机转轮修复等主要依赖大型数控机床。由于体积庞大、成本高、灵活性差，大型数控机床逐渐无法满足市场对生产成本及效率的要求^[2]。以飞机蒙皮钻孔为例：飞机装配工艺要求蒙皮钻孔的位置精度 $< 0.2 \text{ mm}$ ，孔径误差 $< 0.025 \text{ mm}$ ^[3]。

2002 年美国 EI 公司与波音公司提出了 ONCE (One-sided Cell End effector) 机器人钻削系统^[4]，并在 2011 年介绍了该系统的控制系统并把该系统应用到波音 737 的加工中^[5]，该系统以 KUKA KR350 机器人为运动平台，联合设计了一个多功能终端执行器 (MFEE)，主要由加紧轴、进给轴、压脚和刀具等组成，控制系统由 Fanuc 的 CNC 与工业 PC 机实现，主要用于波音 F/A-18E/F 超级大黄蜂后沿襟翼的钻孔和铤窝，在 25.4 mm 厚的钛合金上加工直径 9.5 mm 的孔时，将铤窝深度误差控制在 0.064 mm 以内。

2007 年瑞典兰德大学的 Tomas Olsson 等^[6]以 ABB IRB2400 机器人为基础，设计了一个非常简单的终端执行器，在执行器的末端安装了三个均匀分布的底脚，在制孔过程中，通过一个六维力传感器来实时地将终端执行器作用在工件上的力矩和扭矩反馈给 ABB 机器人的控制器，通过机器人动作抑制制孔过程中执行器相对于工件的切向滑动和法向振动，保证加工孔的质量。2009 年 Tomas Olsson 对制孔执行器进行改进，结构简单，成本较低^[3]。现行的商业机器人采用封闭的控制策略，无法对底层控制环节进行操作，而 laud 大学提出了一种的开放机器人控制器接口^[7]，通过该接口可以对机器人进行底层控制。

在国内，2010 年北京航空航天大学^[8]设计了一个终端执行器，由压紧单元、主轴单元、进给单元、压脚单元、传感器单元等组成，主要采用 PLC 控制，用于铝合金和钛合金的制孔。通过切削力反馈优化主轴转速和进给速度等加工工艺参数，在 7075-T6 铝合金上加工直径为 6 mm 的孔时，可将孔径误差控制在 0.04 mm 以内，表面粗糙度在 0.5~2.0 μm 之间。2012 年浙江大学^[9]也在飞机数字化装配研究中设计了相应的制孔执行器。

采用力传感器可有效的降低制孔执行器的复杂

度，这对降低系统制造成本和运维成本具有实质性的优势。本文在兰德大学实验系统研究的基础上进行改进，选用 3 个独立的一维力传感器而非一个 6 维力传感器，来实现对机器人的运动学反馈。6 维力传感价格昂贵，然而在反馈中并不需要测量所有的力，6 维的力都参与计算无疑会使模型复杂，计算量更大，对实时反馈也有较大影响。

由于三点决定一个平面，故只需要三个力传感器即可保持垂直对正，因此没有使用 4 个一维力传感器而仅使用 3 个一维力传感器。

2. 系统原理

2.1. 钻削振动模型

如图 1 所示，当刀具钻削工件时会发生振动，其振动模型为：

$$M_r \ddot{X}_{rx} + C_r \dot{X}_{rx} + K_r X_{rx} = F_{rx} \quad (1)$$

$$M_r \ddot{X}_{ry} + C_r \dot{X}_{ry} + K_r X_{ry} = F_{ry} \quad (2)$$

$$M_a \ddot{X}_{ax} + C_a \dot{X}_{ax} + K_a X_{ax} = F_{ax} \quad (3)$$

$$M_a \ddot{X}_{ay} + C_a \dot{X}_{ay} + K_a X_{ay} = F_{ay} \quad (4)$$

其中 M_r , C_r , K_r 分别为机器人的质量、摩擦阻尼(x, y 方向)、刚度系数(x, y 方向)， M_a , C_a , K_a 分别为制孔执行器的质量、摩擦阻尼(x, y 方向)、刚度系数(x, y 方向)。当刀具和工件表面接触时会发生激振，在 x 方向上刀尖会受到力 F_{ax} ，机器人会受到力 F_{rx} ；同理在 y 方向上，刀尖会受到力 F_{ay} ，机器人受到力 F_{ry} 。这四个力会使制孔执行器相对于电主轴轴线产生一个 α 角，如图 2 所示。

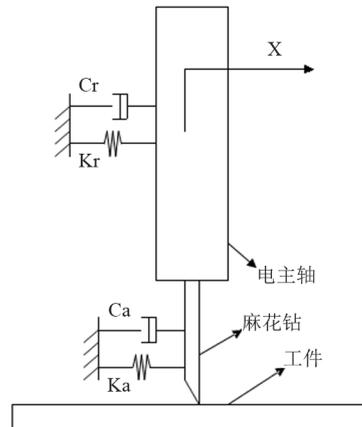


Figure 1. The model for the horizontal direction vibration
图 1. 水平方向振动模型示意图

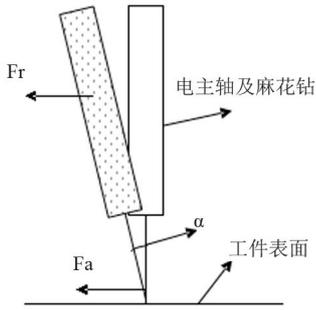


Figure 2. The offset α on point contact with the workpiece surface
图 2. 刀尖接触工件表面偏移 α 角度示意图

由于制孔执行器偏移轴线 α 角，机器人末端受到的水平力 F_{rx} , F_{ry} 和刀尖接触工件受到的水平力 F_{ax} , F_{ay} 会使机器人法兰轴线受到力 F_1 , F_2 , F_3 (见图 3) 不相等。

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \Delta_3 \end{bmatrix} \Lambda (M_r + M_a) (F_r + F_a) \cos \alpha \quad (5)$$

其中 F_1 , F_2 , F_3 为机器人法兰不同位置所受到的力， $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ 为分散力系数， Λ 为激振系数， α 为轴线偏移角， F_r 为机器人 x 方向和 y 方向上受力 F_{rx} , F_{ry} 的合力， F_a 为刀尖 x 方向和 y 方向上受力 F_{ax} , F_{ay} 的合力。

当刀尖接触工件表面时，其所所受的力如图 4 所示，发生偏移时，刀尖的受力如下：

$$F_a = \sigma (F_{a1} - F_{a2}) \quad (6)$$

其中 F_a 为刀尖在 x 方向或 y 方向上受到的力， F_{a1} 为左壁的反弹力， F_{a2} 为右壁的反弹力， σ 为剪力系数。当刀尖旋转 θ 角度后，

$$F_a = \sigma (F_{a1} - F_{a2}) \cos \theta \quad (7)$$

其中 $-\pi/2 < \theta < \pi/2$ ，其变化周期 $t = 60/n$ ，(n 为电主轴转速)。本仿真中取 $n = 4000$ r，则 $t = 15$ ms。

2.2. 控制方法及过程

本文的控制方法是首先通过三个不同位置的力传感器测出机器人法兰末端受到的轴向力，然后实时地反馈机器人运动学，使机器人不断的调整末端位姿，始终保持末端工具和工件表面对正以抑制滑移，如图 3 所示，其调整步骤如下：

1) 如果 F_2 不是给定值(如 75 N)，则调整机器人

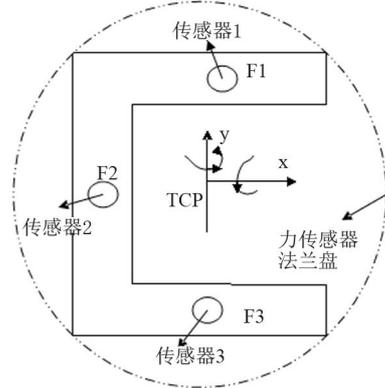


Figure 3. Distribution of three-point force sensors on flange
图 3. 力传感器法兰盘三位力传感器分布图

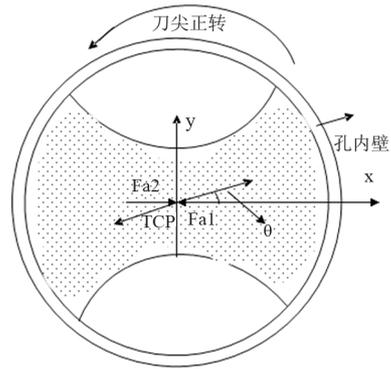


Figure 4. Main forces to point contact with the workpiece surface
图 3. 刀尖接触工件表面主要受力图

末端位姿 z 轴上的位移，直至为给定。

2) 当 F_2 调整完成后，则使机器人绕 x 轴翻转，使 $F_1 = F_3$ 。

3) 当 $F_1 = F_3$ 后，则绕 y 轴翻转，使 $F_1 = F_2 = F_3$ 。此为一轮调整，如果三个不能保持相等，则再调整一遍，使三力一直趋近相等。

本文的控制过程：机器人钻削过程中，对刀尖滑移抑制的流程图如图 5 所示。

机器人力反馈分为两个部分，首次接触微调 and 钻削过程中的持续微调。

流程图中虚线框内为机器人力反馈过程，在持续的钻削过程中，如果三力不相等，则进行力反馈微调。

首先启动机器人，机器人末端 TCP 点移动到试教的点，机器人进行首次接触微调，调整过程如上调整步骤所示；然后启动电主轴，当电主轴加速到钻削转速后，启动进给电机，进行钻削。在钻削过程中，机器人不断检测传感器所测的三力是否相等，如不相等就进行微调，直至钻孔结束。

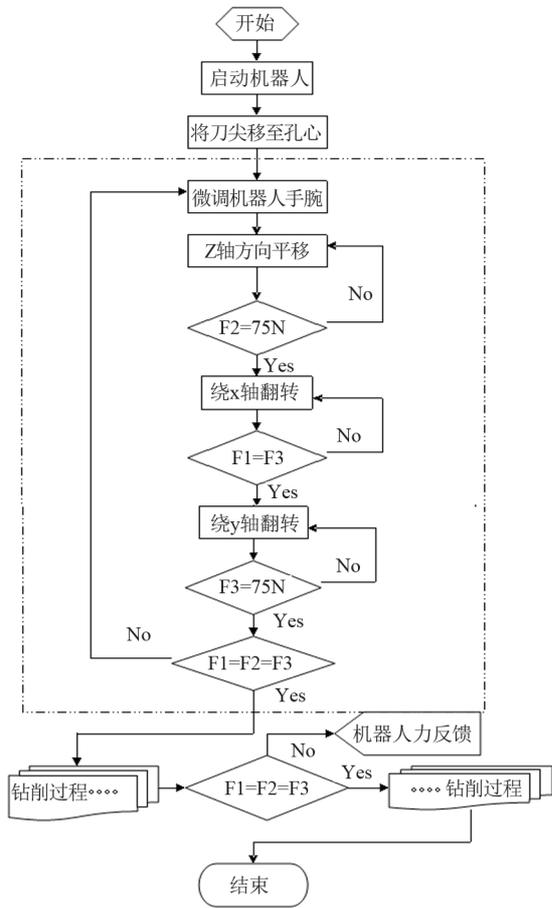


Figure 5. Drilling robot control flow chart
图 5. 机器人钻削控制流程图

钻孔结束后，首先停止电主轴，然后进给电机反转，快速退刀。当返回零位时，退刀完成，机器人移动到下一点进行制孔。在制孔过程中，使用激光测量仪来测量机器人末端法兰在 x, y 方向上的偏移，z 轴方向上振动。

3. 系统构成

本文系统通过三位力传感器反馈工业机器人运动学使末端制孔执行器和工件表面保持垂直对正来增强机器人刚度，使用三个力传感器来测量机器人末端法兰在 z 轴方向上的不同部位的力是否相等，使用激光测量仪来测量末端法兰在 x, y 方向上的偏移和 z 轴上的振动。

3.1. 系统整体结构

该钻孔系统主要由以下三个部分组成，分别是工业机器人 IRB4400，制孔执行器 RDt (Robot-Drilling-

test)，力传感器安装盘以及激光测量仪，激光测量仪的镜组安装在力传感器安装盘的外围圆柱上，见图 6。

工业机器人使用 ABB 公司的 IRB4400，重复定位精度为 0.19 mm，有效载荷 60 kg，最大工作半径 1.96 m。防护等级 IP54，该机器人为 6 轴机器人，1 轴是 C 旋转，2 轴是 B 手臂，3 轴是 A 手臂，4 轴是 D 手腕，5 轴是 E 弯曲，6 轴是 P 回旋，如图 7 所示。

制孔执行器 RDt 主要由三部分组成：一是钻削单元，二是直线单元，三是力测量安装盘。钻削单元使用山东博特电主轴 JSZD100-24/3X，其变频器使用 5.5 kw 的金田 JTE200-B，电主轴固定件使用铸件。进给单元中进给电机使用安川伺服电机 SGMAH-04AAA4，滑台使用上银 SBS005-0000，如图 8 所示。

机器人连接部分使用自制连接件，在机器人法兰与连接件处安装三位力传感器安装盘(见图 6)，力传感器使用 3 个塞维斯的一维力传感器 ELAF-B0，直径为 $\Phi 12.70$ 。在三位力传感器圆柱面上制有 7 个螺纹安装孔，首先将镜组的定位圆柱棒拧入螺纹安装孔中，然后将镜组安装在定位圆柱棒上。调整激光测量仪，使之与镜组对准，用来测量偏移和振动。

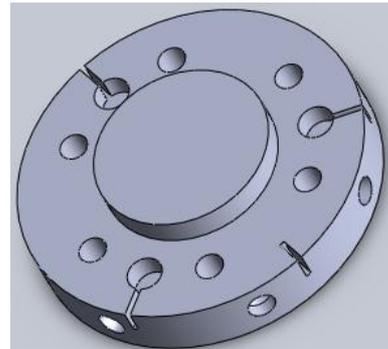


Figure 6. Three-dot force sensors installation disk model
图 6. 三位力传感器安装盘模型图

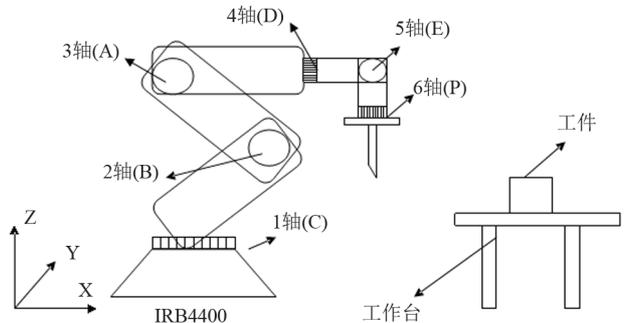


Figure 7. Drilling robot schematics
图 7. 机器人钻削示意图

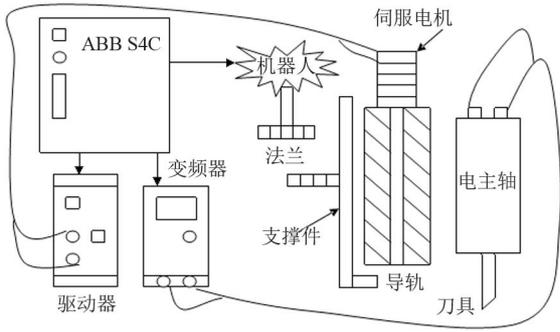


Figure 8. Drilling system control structure diagram
图 8. 钻削系统控制结构示意图

3.2. 反馈控制系统

电主轴和进给电机使用工控机加运动控制卡的方式进行控制，运动控制卡使用 PMAC Mini 2。力传感器使用 PCI 采集卡，激光测量仪使用 Agilent5530，通过 USB 接口连接到工控机上。工控机和机器人通过 EtherNet/IP Fieldbus Adapter 通信。

机器人配置一块 I/O 扩展板，使用 ABB 通用 I/O 扩展板 DSQC 651，分布式 I/O 模块，di8/do8 ao2，8 通道数字输入输出，2 通道模拟量输出。由于对进给电机和电主轴的控制主要使用速度控制，故采用模拟量输出控制。I/O 点有直线单元限位开关三个，分别是上限位和下限位以及零位；伺服电机有 3 个输入，正反转编码器 1 个，急停 1 个；电主轴有 2 个输入，正反转一个，急停一个，共 8 个输入。输出使用两个模拟量输出，分别控制伺服电机和电主轴的转速(表 1)。

4. 仿真及结果分析

本文仿真是使用 solidworks 的“motion 分析”来进行的。首先生成两个机器人虚拟墙面，建立 x 和 y 方向上的阻尼，然后设置刀尖的 x 和 y 方向的阻尼，其中参数设置如下表 2：

由于振动模型本身就存在较大误差，过于精密的定量分析是没有实际意义的，故本文的仿真目的是定性分析一下三位力反馈对抑制机器人滑移是否有效，经过仿真结果发现，三位力反馈对滑移有良好的抑制效果。

4.1. 仿真过程

按一下步骤进行仿真：

- 1) 设置 solidworks，使 solidworks motion 插件使用。
- 2) 配置如图 9 的模型，设置 TCP 点和刀尖坐标系，以及平行于工件 x, y 方向的虚拟墙面(参考面)。

Table 1. Main I/O table
表 1. 主要 I/O 使用表

序号	名称	说明
1	aoFeed	进给速度
2	aoSpindle	电主轴速度
3	aiForce1	力传感器 1
4	aiForce2	力传感器 2
5	aiForce3	力传感器 3
6	doFeedOn	进给启停
7	doFeedPlus	进给正反转
8	doSpindleOn	电主轴启停
9	doSpindlePlus	电主轴正反转
10	diUp	进给上限位
11	diOo	进给零位
12	diDown	进给下限位
13	diEncode	进给编码器

Table 2. The settings of simulation parameters
表 2. 仿真参数设置表

机器人		刀尖	
Krx (n/mm)	1463	Kax (n/mm)	6
Kry (n/mm)	1650	Kay (n/mm)	8
Crx (n/mm)	56	Cax (n/mm)	1
Cry (n/mm)	73	Cay (n/mm)	2

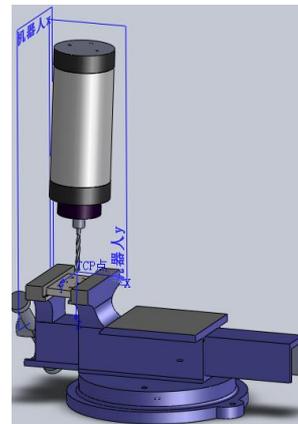


Figure 9. Curve: Slip simulation model
图 9. 滑移仿真模型图

3) 添加重力, 电主轴旋转电机, 由于本仿真是测试表面滑移, 故没有进给运动。仿真中电主轴的旋转速度为 4000 r/min。

4) 增加弹簧和阻尼, 按表 2 进行设置。

5) 计算仿真, 并增加六个测量图解, 其结果见图 10~15。

在两个仿真算例中, 其中一个带传感器, 另外一个不传感器。在带传感器的算例仿真中, 增加电主轴后端面与工件表面平行的配合, 来仿真带传感器的效果。

该配合为三位力传感器严格相等的理想情况, 具体情况有待实验验证。

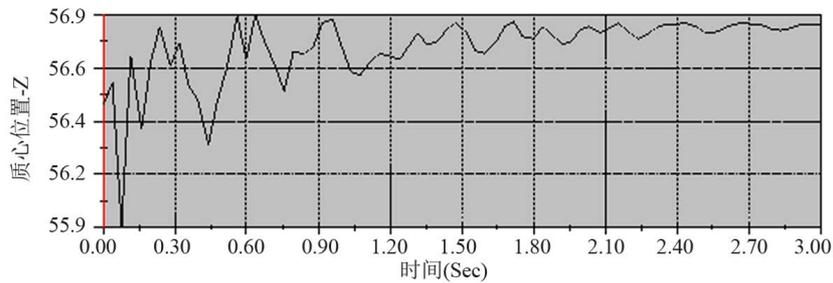


Figure 10. Without force sensors robot vibration graph of z axis
图 10. 不带力传感器机器人 z 轴振动曲线图

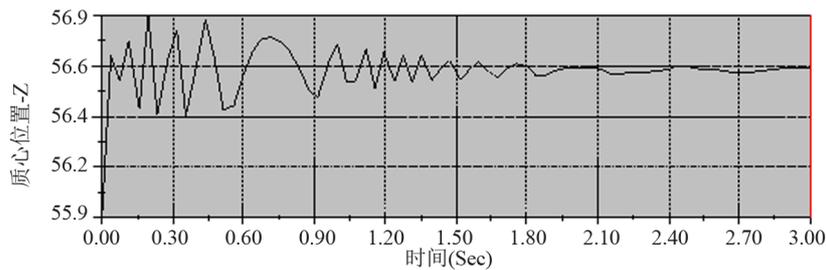


Figure 11. With force sensors robot vibration graph of z axis
图 11. 带力传感器机器人 z 轴振动曲线图

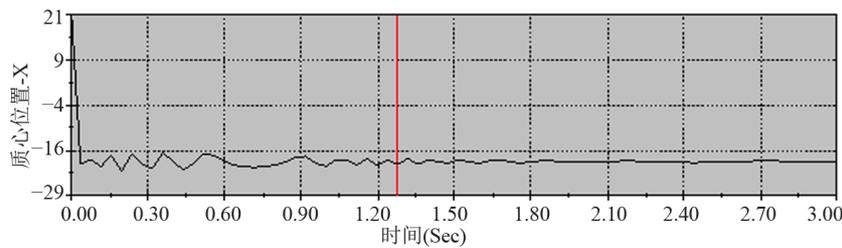


Figure 12. Without force sensors robot slip graph of x axis
图 12. 不带力传感器机器人 x 轴偏移曲线图

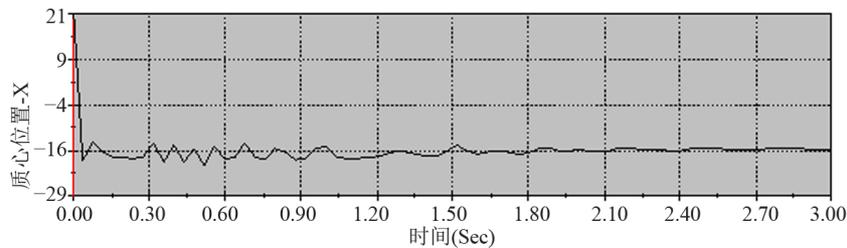


Figure 13. With force sensors robot slip graph of x axis
图 13. 带力传感器机器人 x 轴偏移曲线图

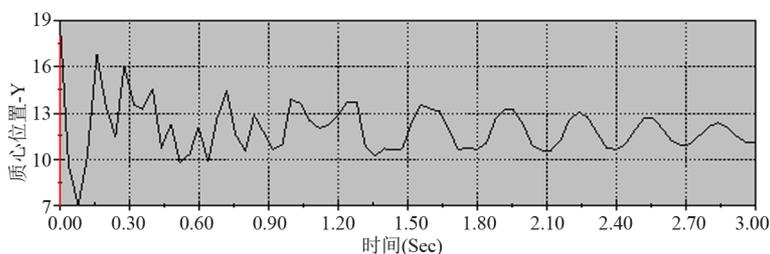


Figure 14. Without force sensors robot slip graph of y axis
图 14. 不带力传感器机器人 y 轴偏移曲线图

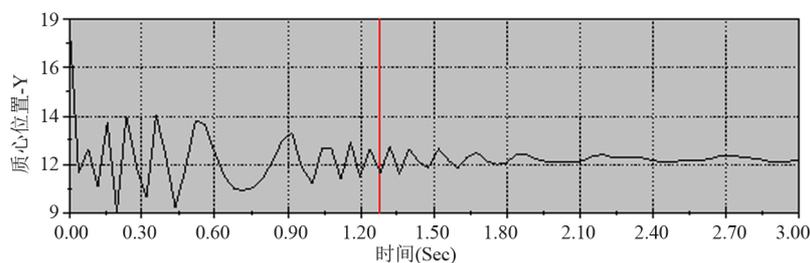


Figure 15. With force sensors robot slip graph of y axis
图 15. 带力传感器机器人 y 轴偏移曲线图

4.2. 仿真结果

1) **振动分析(z 轴):** 从图 10 和图 11 可知, 当通过三位力传感器进行反馈后, z 轴的振动并未完全消失, 而是得到一定抑制并逐渐减少为零。

2) **偏移抑制分析(x 方向):** 从图 12 和图 13 可知, 当通过三位力传感器进行反馈后, x 方向的滑移抑制并不明显, 说明在滑移本身就小的情况下, 滑移抑制并不明显, 但滑移并没有增大的趋势。

3) **偏移抑制分析(y 方向):** 从图 12 和图 13 可知, 当通过三位力传感器进行反馈后, y 方向的滑移受到明显的抑制, 说明力反馈对较大的滑移有良好的抑制效果。

5. 总结

在机器人钻削过程中, 刀具与工件接触时会发生振动。由于串联机器人相对于机床刚度较低, 刀具的刀尖在接触工件表面时将发生滑移, 影响成孔的位置精度。这种表面接触滑移最大可达 5 mm, 而航空装配标准要求孔位置误差应小于 0.2 mm, 为了防止这种滑移, 本文提出一种基于力反馈的表面接触滑移抑制方法。

该方法使用三个力传感器对机器人运动进行反馈, 使刀具始终与工件表面保持垂直来增强机器人刚

度。经仿真证明, 该方法可以增强机器人刚度, 对钻削过程中刀尖的滑移有明显的抑制效果, 所以三位力反馈控制方法可以做进一步的试验论证。

参考文献 (References)

- [1] 毕树生, 宗光华, 梁杰. 机器人技术于航空制造业[J]. 机器人技术与应用, 2009, 3: 25-31.
- [2] E. Whinnem, M. Nystrom. Integrated metrology & robotics systems for agile automation. SAE Technical Paper, 2000, 1: 4271-4279.
- [3] T. Olsson, M. Haage, H. Kihlman, et al. Cost-efficient drilling using industrial robots with high-bandwidth force feedback. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2010, 26(1): 24-38.
- [4] D. Russell, S. Kevin and I. John. ONCE (one sided cell end effector) robotic drilling system. SAE Automated Fastening Conference & Exhibition, New Applications for Automation Technologies, 2002.
- [5] R. Devlieg. High-accuracy robotic drilling/milling of 737-inboard flaps. SAE International Journal of Aerospace, 2011, 4(2): 1373-1379.
- [6] T. Olsson, A. Robertsson and R. Johansson. Flexible force control for accurate low-cost robot drilling. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma, 10-14 April 2007, 4770-4775.
- [7] A. Blomdell, G. Bolmsjö, T. Brogårdh, et al. Extending an industrial robot controller. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2005, 12(3): 85-94.
- [8] J. Liang, S. S. Bi. Design and experimental study of an end effector for robotic drilling. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 50(1-4): 399-407.
- [9] 费少华. 机器人制孔终端执行器控制系统设计研究[D]. 浙江大学, 2012.