

砂带磨削机器人磨削曲面工件的工作空间及加工轨迹分析^①

李东京^{②*} 王 伟^{③*} 贡 超* 王琦琰* 郝大贤*

(* 北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100191)

(** 湖北科技学院电子与信息工程学院 咸宁 437100)

摘 要 研究了机器人砂带磨削加工技术,以克服传统磨削加工工作环境恶劣、劳动强度大的缺点。针对曲面工件的磨削加工任务,研究设计了 3P3R 构型的砂带磨削机器人;通过对该机器人运动学和工作空间的分析,应用数值分析方法得到机器人的大致可达工作空间;对待加工工件表面点进行数学建模,应用蒙特卡洛法对曲面工件的磨削加工轨迹进行了仿真分析,得到所有待加工表面点最接近于加工时的机器人姿态。分析结果不仅判断了工件是否具有可加工性,而且仿真分析的加工轨迹为工件加工的示教编程提供引导,同时提供了一种离线编程的途径。

关键词 砂带磨削机器人, 工作空间分析, 蒙特卡洛法, 曲面工件, 加工轨迹

0 引 言

砂带磨削加工具有高加工效率、高加工质量,而且能应用于高强度高硬度的材质如钛合金等工件的加工,因而成为复杂曲面工件的最重要的加工手段^[1-3]。随着对工件精度要求的逐步提高,传统机器加工及人工加工难以满足实际的需求,并且磨削加工工作环境恶劣、劳动强度大,对工人健康有影响,因而机器人砂带磨削技术成为关注的热点技术^[1,2]。机器人手持工件进行磨削加工具有加工精度高、灵活性好、加工一致性好、表面加工质量高等诸多优势,因此机器人砂带磨削加工代替传统机械加工及人工加工已成为一种趋势^[2]。

2010 ~ 2015 年,机器人砂带磨削加工研究较多针对磨削加工机理及机器人砂带磨削加工的控制^[3-7]。这些研究主要是针对通用机器人进行磨削加工。考虑到砂带磨削加工的机器人必须像机床一样定位精度高、结构刚度大,故设计满足这一要求结

构的机器人来进行曲面工件的磨削加工很有必要。对于新设计开发的机器人由于缺少通用机器人所提供的成熟的分析及控制软件,因此首先需要针对设计的机器人能否满足复杂工件加工需求进行分析研究。Sun(2004)利用通用串联工业机器人对发动机叶片等进行磨削加工的研究^[1],理论上分析了工件是否可以由机器人来加工,可加工性的分析一般都需要分析机器人的可达工作空间及灵活工作空间。关于机器人的可达工作空间,有很多学者针对不同的机器人提出了解析法、数值分析法、几何法等多种研究方法^[8,9]。邢宏光(2004)、张立勋(2009)、刘达(2007)对各自研究的机器人进行了灵活工作空间分析及机器人灵活度的研究,主要方法有解析法、几何法等,比较典型的是姿态球方法^[10-13]。同时为了提高机器人的灵活工作空间,Gao(2011)、Zhang(2011)、王伟(2010)等分别从结构设计^[14]、位置分布等参数优化方面^[15-18]及夹具优化设计方面^[19]进行了研究。文献[20]针对工件的几何特征进行了可加工性分析。苏峰(2010)基于零件数据交换标

① 国家自然科学基金(51305008)资助项目。
② 男,1978 年生,博士生,讲师;研究方向:机器人加工技术;E-mail: ltokyo@126.com
③ 通讯作者,E-mail: jwvx@163.com
(收稿日期:2016-03-07)

准对产品是否具有可加工性进行了比较全面的研究^[21]。为提高加工质量和机器人的工作效率许多学者在离线编程方面也开展了大量的研究^[22-28]。

到目前为止,针对机器人的工作空间的分析进行了大量的研究,既有理论定性的分析也有定量的研究。但是大部分成果针对通用情况的理论分析,判断的方法不够直观,而且那些理论分析及定量研究与后续机器人实际工作结合不够紧密,对于加工机器人这些分析则没有直接对后续加工提供帮助。本研究以自行设计的机器人为对象,应用数值分析的方法分析该机器人对于常见的复杂外形的工件是否具有可加工性,同时对机器人磨削加工曲面工件的轨迹进行分析研究,分析结果数据可以为后续实际加工提供决策支持甚至直接应用于控制机器人进行加工。

1 磨削加工机器人结构及运动学分析

1.1 磨削加工机器人结构

砂带磨削加工是一种去除余量的加工方式,在加工过程中需要进行力位控制,这就要求机器人要有较好的刚度。为了满足水龙头等曲面工件的磨削加工需要,将通用六轴串联机器人的前三个关节改为移动关节,这样的设计一方面增加了机器人的结构刚度及定位精度,另一方面降低了机器人的成本。基于此,本研究设计了 PPPRRR(3P3R)构型的砂带磨削加工机器人及砂带磨削机,如图 1、图 2 所示。

3P3R 磨削加工机器人及砂带磨削机的三维模型见图 3。

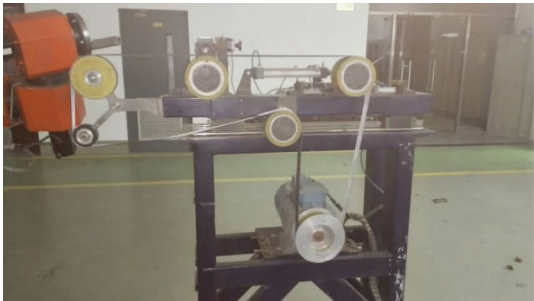


图 2 砂带磨削机

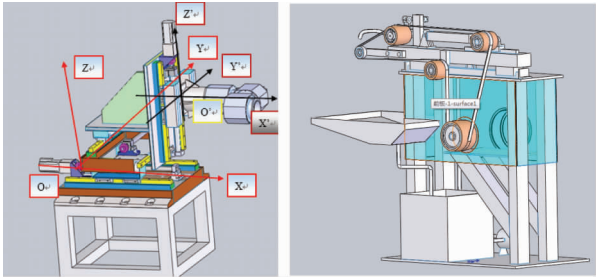


图 3 3P3R 磨削加工机器人和砂带磨削机三维模型

1.2 运动学建模

根据图 3 所示的磨削机器人模型建立坐标系,见图 4。

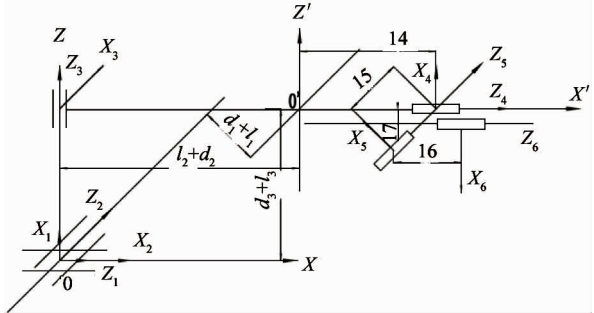


图 4 3P3R 机器人坐标系图

本机器人的结构为 PPPRRR 结构,前 3 个关节为典型的移动关节,后 3 个为转动关节,按照图 4 建立坐标系该的机器人 D-H 参数如表 1 所示。

机器人实际参数如下: $l_1 = 220$, $l_2 = 230$, $l_3 = 120$, $l_4 = 200$, $l_5 = 250$, $l_6 = 120$, $l_7 = 120$ 。根据 DH 参数法对该机器人进行运动学分析。则该 PPPRRR 机器人的运动学坐标转换关系如下式所示:

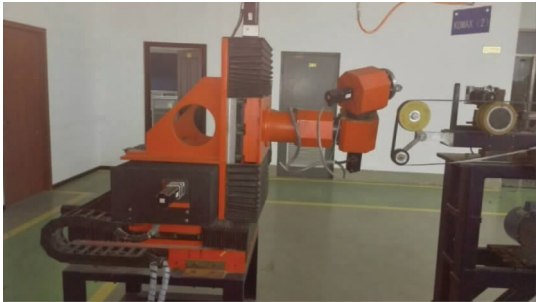


图 1 3P3R 磨削加工机器人

表 1 3P3R 机器人 DH 参数表

自由度	a_{i-1} (mm)	α_{i-1} (°)	d_i (mm)	θ_i (°)
0	0	0	0	0
1	0	90°	$d_1 + l_1$	0
2	0	90°	$d_2 + l_2$	90°
3	0	0	$d_3 + l_3$	90°
0'	0	0	0	0
4	0	-90°	l_4	$90^\circ + \theta_4$
5	l_7	90°	l_5	θ_5
6	0	-90°	l_6	θ_6

$${}^0_6T = {}^0_{0'}T_4 {}^{0'}_5T_5^S T_6^S T$$
$$= \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:

$$\begin{cases} n_x = c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6 \\ n_y = c_6 s_5 \\ n_z = -c_4 s_6 - c_5 c_6 s_4 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} o_x = -c_6 s_4 - c_4 c_5 s_6 \\ o_y = -s_5 s_6 \\ o_z = c_5 s_4 s_6 - c_4 c_6 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} a_x = -c_4 s_5 \\ a_y = c_5 \\ a_z = s_4 s_5 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} p_x = d_1 + 120c_4 + 250s_4 - 120c_4s_5 + 230 \\ p_y = d_2 + 120c_5 + 420 \\ p_z = d_3 + 250c_4 - 120s_4 + 120s_4s_5 + 120 \end{cases} \quad (5)$$

式中的 s_i, c_i 为 $\sin\theta_i$ 和 $\cos\theta_i$ 的缩写。

1.3 逆运动学分析

从式(2)~(5)可以得到该机器人的运动学逆解,如下式所示:

$$\begin{cases} \theta_4 = \text{atan}(-a_z/a_x) \\ \theta_5 = \arcsin(a_z/s_4) \\ \theta_6 = \arccos(n_y/s_5) \\ d_1 = p_x - 120c_4 - 250s_4 + 120c_4s_5 - 230 \\ d_2 = p_y - 120c_5 - 420 \\ d_3 = p_z - 250c_4 + 120s_4 - 120s_4s_5 - 120 \end{cases} \quad (6)$$

1.4 磨削机器人工作空间分析

由于本机器人要夹持待加工工件进行磨削加工,所以首先要分析机器人的工作空间,判断工件能否通过本机器人夹持来完成加工。从公式(5)可以看出,机器人末端位置与 $d_1、d_2、d_3、\theta_4、\theta_5、\theta_6$ 6 个参数相关。这 6 个自由度的运动范围如表 2 所示。

表 2 各自由度运动范围表

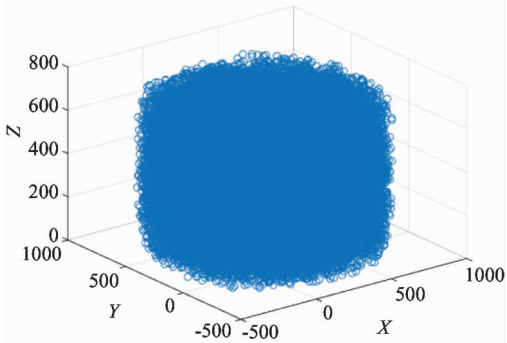
自由度	最小值	最大值
d_1	-225mm	225mm
d_2	-225mm	225mm
d_3	0	500mm
θ_4	0°	360°
θ_5	-180°	180°
θ_6	90°	450°

上面运动学分析虽然给出了机器人末端位姿的表达式,但很难直观地应用解析法及几何法得到该机器人的工作空间,因此本研究采用数值分析的方法来分析本机器人的工作空间。

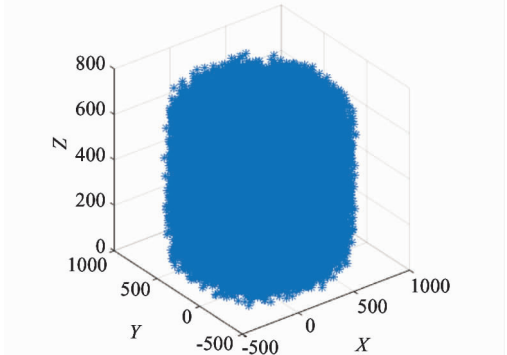
从表 2 中各自由度的运动范围可以看出,要计算机器人的工作空间,对各自由度在取值范围内进行遍历的话计算量过大,故采用蒙特卡洛法即对每个自由度随机取值,若计算的样本足够大,就可以估计该机器人的工作空间。应用 Matlab 通过取 100000 个数据计算出机器人末端 $X、Y、Z$ 坐标,工作空间点分布如图 5、图 6 所示。图 5、图 6 中坐标位置单位均为 mm。

经过计算 100000 个数据,得到工作空间的范围如表 3 所示。

从图 1 至图 3 可以看出,本机器人在结构上没能做到最后 3 个转动关节的轴线交于一点,从理论上分析本机器人的工作空间不是一个球形,也不是规则的其他图形。由于 4 自由度与 6 自由度的转动轴平行,故工作空间中可能存在有不可到达的空洞存在。这一结论也可以从图 6 看出。因此该机器人进行加工时不能简单通过观察工件是否被工作空间包围来判断机器人的可达性。下面针对具体待加工曲面工件进行分析工件可加工性及分析机器人的加工轨迹。

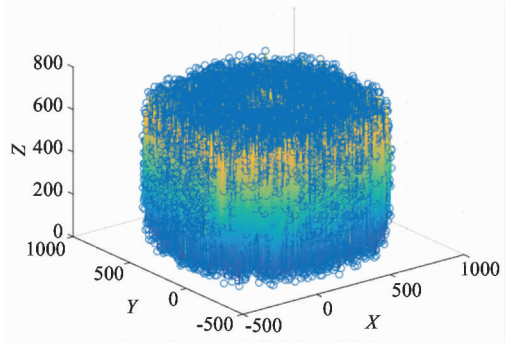


(a) 工作空间点散布图

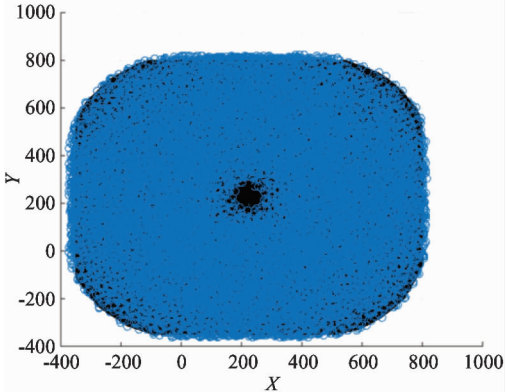


(b) 工作空间点图

图 5 工作空间点散布图



(a) 工作空间点插值线框网格图



(b) 工作空间点插值三维曲面图

图 6 随机工作空间点插补与拟合三维图

表 3 机器人可达工作空间范围表

工作空间末端位置	最小值(mm)	最大值(mm)
X 坐标	-373.20944	813.70904
Y 坐标	-363.34743	824.23927
Z 坐标	0.22506	739.52038

2 曲面工件分析建模

待加工工件以常见的水龙头为例进行分析,待加工水龙头如图 7 所示。



图 7 待加工工件图

为判断本磨削机器人是否能完成对待加工水龙头的表面进行加工,对工件的加工表面进行分析。设水龙头截面外圆半径为 r , 则对于装夹位置到弯管之前的高度为 h 的圆柱表面,其表面上点 $P(x, y, z)$ 可表示为

$$\begin{cases} x = rc\beta \\ y = rs\beta \\ l \leq z \leq h + l \end{cases} \quad (0 \leq \beta \leq 2\pi) \quad (7)$$

式中: $h = 95, l = 95, r = 20$ 。

式中 $c\alpha$ 为 $\cos\alpha, s\alpha$ 为 $\sin\alpha, c\beta$ 为 $\cos\beta, s\beta$ 为 $\sin\beta$ 。下同。

对于竖直管上面的那部分弯管,可以看成是一个半径为 R 的圆环。圆环切面圆半径为 r , 则该部分表面点可以表示为

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (R + rc\beta)c\alpha - R \\ rs\beta \\ (R + rc\beta)s\alpha + l + h \end{pmatrix} \quad (0 \leq \alpha \leq 1.2\pi; 0 \leq \beta \leq 2\pi) \quad (8)$$

根据式(7)和式(8)描述的工件表面点,应用 Matlab 得到如图 8 所示的仿真图。从图 8 可以看出由表达式(7)和(8)描述的待加工水龙头表面完全正确。

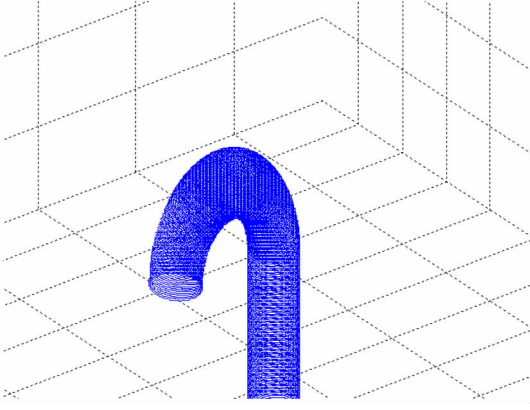


图 8 工件表面点仿真图

将工件坐标系下式(8)的上部弯管表面坐标转换到机器人基坐标系下坐标,式为

$$\begin{cases} P_x = d_1 + 120 c_4 + 250 s_4 - 120 c_4 s_5 \\ \quad + (R - c\alpha(R - r c\beta)) \\ \quad (s_4 s_6 - c_4 c_5 c_6) \\ \quad - r s\beta(c_6 s_4 + c_4 c_5 s_6) + 230 \\ \quad - c_4 s_5(h + l + s\alpha(R - r c\beta)) \\ P_y = d_2 + 120 c_5 - r s_5 s_6 s\beta + 420 \\ \quad + c_5(h + l + s\alpha(R + r c\beta)) \\ \quad - c_6 s_5(R - c\alpha(R + r c\beta)) \\ P_z = d_3 - r s\beta(c_4 c_6 - c_5 s_4 s_6) \\ \quad + (R - c\alpha(R + r c\beta))(c_4 s_6 + c_5 c_6 s_4) \\ \quad - 120 s_4 + 120 + 250 c_4 + 120 s_4 s_5 \\ \quad + s_4 s_5(h + l + s\alpha(R + r c\beta)) \\ (0 \leq \alpha \leq 1.2\pi; 0 \leq \beta \leq 2\pi) \end{cases} \quad (9)$$

同理,式(7)描述的直圆柱也可以变换到机器人基坐标系下的坐标,式为

$$\begin{cases} P_x = d_1 + 120 c_4 + 250 s_4 \\ \quad - 120 c_4 s_5 - z c_4 s_5 + 230 \\ \quad - r c\beta(s_4 s_6 - c_4 c_5 c_6) \\ \quad - r s\beta(c_6 s_4 + c_4 c_5 s_6) \\ P_y = d_2 + 120 c_5 + z c_5 \\ \quad + r c_6 c\beta s_5 + 420 \\ \quad - r s_5 s_6 s\beta \\ P_z = 250 c_4 - 120 s_4 + 120 s_4 s_5 \\ \quad - r c\beta(c_4 s_6 + c_5 c_6 s_4) + d_3 \\ \quad - r s\beta(c_4 c_6 - c_5 s_4 s_6) \\ \quad + z s_5 s_4 + 120 \end{cases} \quad (10)$$

若要对上述表面上的点 P 进行磨削加工,根据文献[11]分析,磨削加工轮心相对机器人基坐标系最优化的位置为(525, -25, 615)。

3 工件加工轨迹分析

3.1 加工轨迹获取方法

工件表面点加工的条件是装夹在机器人末端的待加工工件表面点能接触到砂带磨削轮。由于直接应用机器人逆解公式需要知道位置之外的几个姿态值。这些姿态值不容易提前确定,故应用解析方法来获取机器人的加工轨迹实现较困难,本文采用数值计算的方法来获得机器人的加工轨迹,具体思路如下:

由于工件待加工表面上的点为无穷多个,不可能对每一个待加工点进行验证。对于图 7 所示工件的 h 段直圆柱体,也就是表达式(10)描述的部分。式(10)表示了圆柱体外表面上的点,该点可由参数 $Z(95 < z < 190)$ 和转角 $\beta(0 \sim 2\pi)$ 来确定。对于该部分加工点 Z 步长取 1, β 步长取 $\pi/36$,应用蒙特卡洛法计算判断是否能加工。并获取最接近于加工的机器人的姿态,对于图(7)所示三部分的弯管,该部分外表面点由式(9)所描述。参数 $\alpha(0 \sim 1.2\pi)$ 、 $\beta(0 \sim 2\pi)$ 决定。该部分加工点 α 步长取 $\pi/36$, β 步长取 $\pi/36$,磨削轮的宽度为 $\text{blet_wide} = 30$,磨削轮的半径 $\text{belt_r} = 50$ 。应用蒙特卡罗法计算判断该工件是否能被加工同时获取加工时机器人的姿

态。计算过程如图 9 所示。

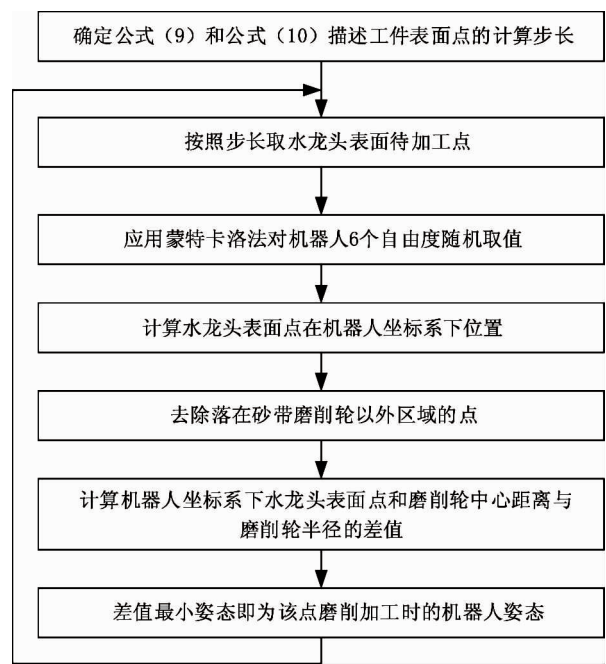


图 9 工件可加工性计算流程图

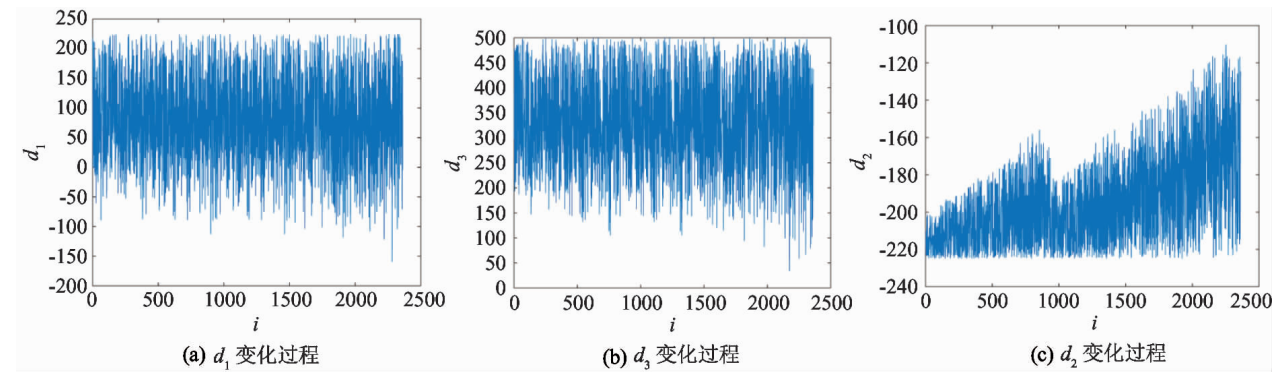


图 10 d_1 、 d_2 、 d_3 运动轨迹图

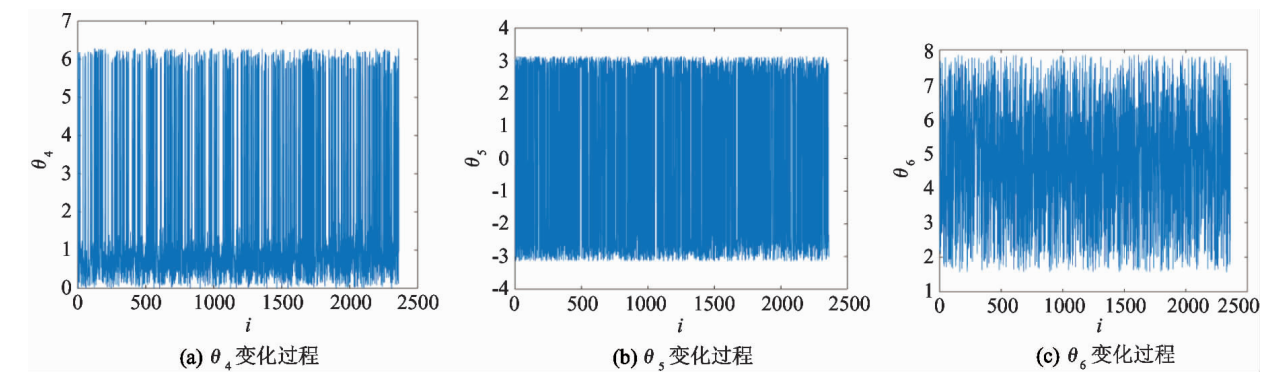


图 11 θ_4 、 θ_5 、 θ_6 运动轨迹图

3.2 获取的机器人加工轨迹

3.2.1 直管加工机器人运动轨迹

(1) 直管加工过程中各自由度的运动轨迹
对于直管所有加工点各自由度轨迹变化过程如图 10 和图 11 所示。

图 10、图 11 横坐标为数据点无量纲,纵坐标为相应自由度取值,单位分别为 mm 和弧度。后面图 13、14 与此相同。

(2) 直管加工中机器人末端加工点轨迹及加工误差

对于直圆柱部分,所有表面点机器人末端加工点轨迹分布及与理想加工点的误差如图 12 所示,所有加工点的范围如表 4 所示。

图 12 中上图为直管加工过程中机器人末端实际加工点分布图,为 XYZ 轴,单位为 mm。下图横坐标为分析的数据点,无量纲,纵坐标为偏差值,单位为 mm。后面图 15 与此相同。

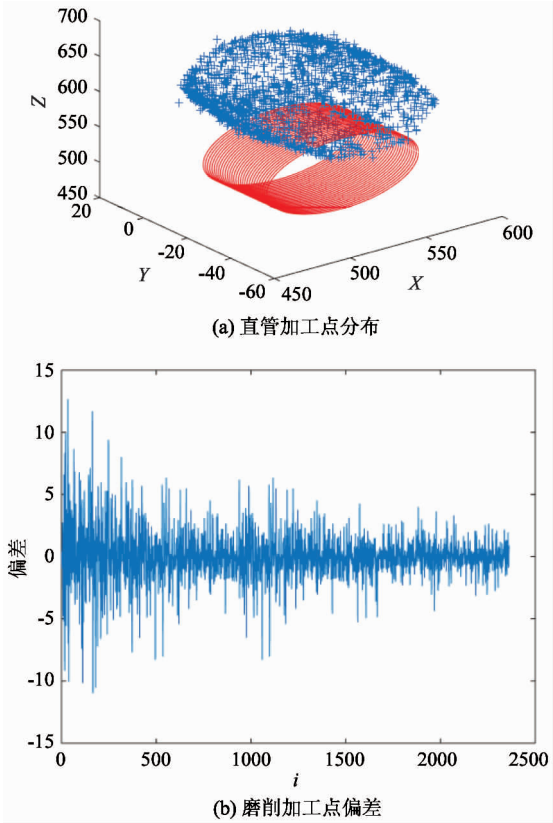


图 12 直管加工中机器人末端点轨迹及偏差图

表 4 直管表面点加工机器人末端轨迹分布范围表

	$X(\text{mm})$	$Y(\text{mm})$	$Z(\text{mm})$	加工位置 偏差 (mm)
最小值	471.2061	-54.938	561.136	-11.002779
最大值	576.5796	4.99129	671.870	12.676190

3.2.2 弯管加工机器人运动轨迹

(1) 弯管加工过程中各自由度的运动轨迹

弯管加工过程中机器人各自由度轨迹变化图如图 13、图 14 所示。

(2) 弯管加工中机器人末端加工点轨迹及加工误差

对于弯管部分表面加工点机器人末端实际加工点轨迹分布及与理想加工点偏差如图 15 所示,对于弯管部分加工时机器人末端轨迹分布范围如表 5 所示。

3.3 机器人磨削加工水龙头运动轨迹精度分析

上述分析仿真结果直管部分应用蒙特卡洛法的样本取点为 50000 个,弯管部分样本点数为 80000 个。从上面的偏差可以看出样本点越多偏差越小,

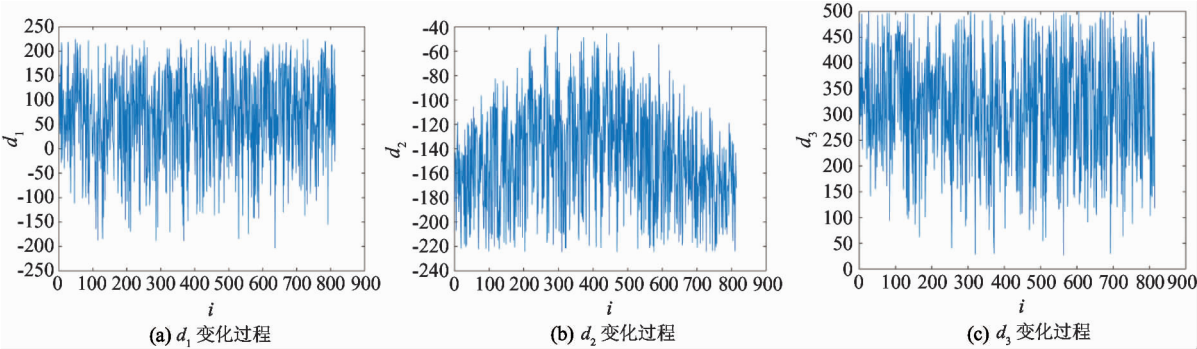


图 13 d_1 、 d_2 、 d_3 轨迹变化图

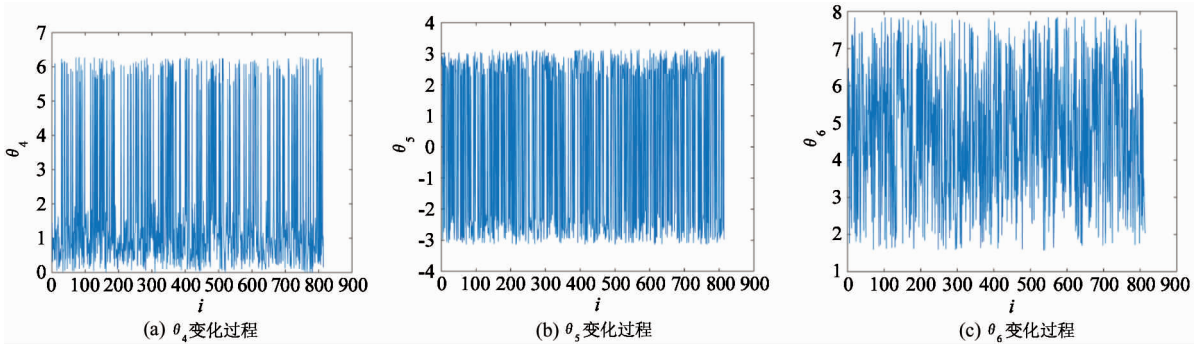


图 14 θ_4 、 θ_5 、 θ_6 轨迹变化图

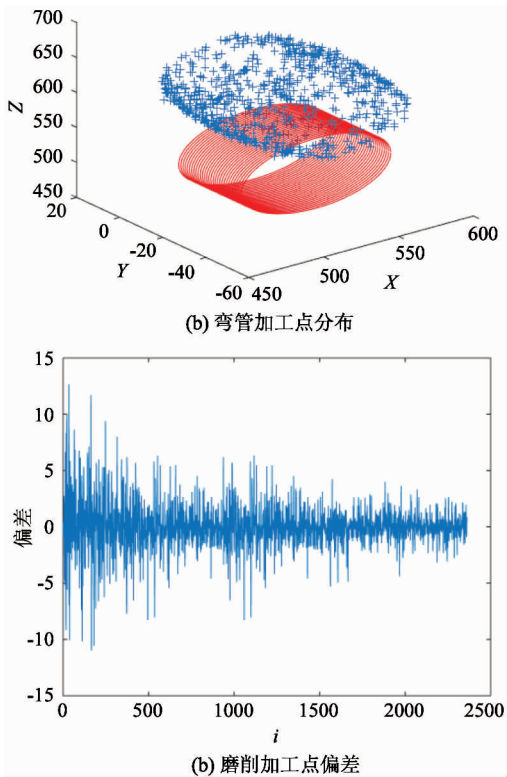


图 15 弯管加工中机器人末端点轨迹分布及偏差图

表 5 弯管表面点加工机器人末端轨迹分布范围表

	$X(\text{mm})$	$Y(\text{mm})$	$Z(\text{mm})$	加工位置 偏差 (mm)
最小值	473.3997	-54.799	564.719	-3.940302
最大值	576.6006	4.97439	666.617	4.652452

如果样本点足够多偏差就会趋近 0。但样本点越多花费的计算时间越长,故实际工作时需综合考虑选取能满足加工精度要求的最小样本数来获取机器人的加工运动轨迹。

4 实验

4.1 实验方案

本实验方案如表 6 所示。

4.2 实验效果

根据前述分析该工件能应用本机器人进行加工。机器人装卡水龙头进行加工如图 16 所示。加工效果如图 17 所示。

表 6 实验方案表		
项目	内容	备注
控制系统	采用 PMAC 的 PC104 作为主控制器	将仿真分析的机器人各自由度运动参数写入 PMAC 卡的运动控制程序
砂带机转速	1500r/m	采用西门子的变频电机
砂带	采用 100 目的 XA167 型砂带	
机器人各自动度运动速度	100	PMAC 里面的运动速度
多轴插补方式	Liner	线性插补



图 16 机器人装卡工件加工图



图 17 工件加工效果图

4.3 加工精度

经过试验,加工后形位公差均能达到 IT9 级别,与磨削加工需要达到的 IT7 级别相差 1-2 个级别,由于在仿真计算中样本数不够大,故位置精度不是特别高。如果加大样本数可以获得 IT7 的加工效

果,同时从上图加工效果图可以看出加工表面不是很光滑,表面粗糙度为 $Ra12.5$ 。

如果要满足加工需要,可以通过以下途径来提高加工精度及提高表面加工质量:

- (1) 增大采用蒙特卡洛法分析的样本数到 10000,这时的数据误差将在 1mm 以内;
- (2) 提高砂带目数;
- (3) 增大砂带运行速度;
- (4) 减少机器人进给量。

5 讨论

本研究可能的创新有以下两点:(1)针对自行设计的机器人将工件数学模型表面上所有点代入机器人运动学模型,应用蒙特卡洛法比较精确地验证了工件所有表面点的可加工性;(2)不仅应用数值计算的方法判断了机器人对指定工件的可加工性,而且在仿真分析可加工性的过程中得到了该工件加工时的机器人加工轨迹,这些机器人加工轨迹数据可以用于机器人加工时示教的导引,同时可以在此分析基础上用于离线编程,从而提供了一个离线编程的思路。

本文只研究了自行设计的机器人对于加工本文中的工件的加工轨迹问题,没有充分考虑磨削加工的工艺要求及机器人的姿态可能发生干涉问题。下一步需要针对仿真分析的数据进行机器人灵活工作空间的分析及加工过程中姿态的防干涉分析处理,处理后的分析结果即可以直接应用于离线编程加工,工件的加工精度及表面加工质量会有较大的提升。

6 结论

从前述分析可以得出以下结论:

- (1) 通过对机器人的结构分析及运动学建模,并用蒙特卡洛法得到该机器人的大致可达工作空间。本文分析的 3P3R 机器人的可达工作空间不是一个规范形状,中间存在空心,可达工作空间大概范围为 $1000\text{mm} \times 1000\text{mm} \times 700\text{mm}$ 的空间。

(2) 建立起了复杂外形水龙头的表面数学模型,并仿真验证了模型的正确性。

(3) 应用蒙特卡洛法对指定工件进行了分析判断,在不考虑加工工艺的情况下本机器人能够对分析的工件进行磨削加工。得到了对该工件加工时的机器人加工轨迹,并进行了实验验证。

参考文献

- [1] Sun Y. Development of a unified flexible grinding process [Ph. D dissertation], Connecticut, USA: University of Connecticut Press, 2004. 25-45
- [2] 黄云,朱派龙. 砂带磨削原理及其应用. 重庆:重庆大学出版社,1993. 1-3
- [3] Shuihua W, Kazem K, Zhongxue G, et al. A material removal model for robotic belt grinding process. *Machining Science and Technology*, 2014, 18(1):15-30
- [4] Song Y, Liang W, Yang Y. A method for grinding removal control of a robot belt grinding system. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2012, 23(5):1903-1913
- [5] Lv H, Song Y, Jia P, et al. An adaptive modeling approach based on ESN for robotic belt grinding, In: Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), Harbin, China, 2010. 787-792
- [6] Pengbing Z, Shi Y. Composite Adaptive Control of Belt Polishing Force for Aero-engine Blade. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 26(5):988-996
- [7] Hamelin P, Bigras P, Beaudry J, et al. Discrete-time state feedback with velocity estimation using a dual observer: application to an underwater direct-drive grinding robot. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, 17(1):187-191
- [8] 徐卫良. 机器人工作空间分析的蒙特卡洛方法. 东南大学学报, 1990, 20(1): 1-8
- [9] 曹毅,于心俊,杨冠英. 应用数值解析结合法求解机器人工作空间体积. 机械传动, 2007, 31(3): 10-47
- [10] 邢宏光,王利红,张玉茹. 神经外科手术机器人灵活性分析. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(4):312-315
- [11] 曹毅. 显微外科手术机器人工作空间分析与综合:[博士学位论]. 天津:天津大学机械学院,2004. 31-54
- [12] 张立勋,于凌涛,赵继亮等. 基于微创外科手术机器人操作手的夹持灵活度研究,机器人,2009, 31(3): 197-203
- [13] 刘达,王田苗. 微创外科机器人灵活工作空间分析,北京航空航天大学学报, 2007, 33(2):188-191
- [14] Gao Z H, Lan X D, Bian Y S. Structural dimension opti-

- mization of robotic belt grinding system for grinding workpieces with complex shaped surfaces based on dexterity grinding space. *Chinese Journal of Aeronautics* 2011, 24: 346-354
- [15] Zhang D, Yun C, Song D. Dexterous space optimization for robotic belt grinding. *Procedia Engineering*, 2011, 15(1):2762-2766
- [16] 王伟, 负超. 砂带磨削机器人的灵活性分析与优化. 机器人, 2010, 32(1):48-54
- [17] Wang W, Yun C, Zhang L. Designing and Optimization of an Off-line Programming System for Robotic Belt Grinding Process. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 24(4): 647-655
- [18] 朱鸿泰, 负超, 周文明. 3P3R 型磨削机器人的结构参数计算与优化. 机电工程, 2014, 31(12):1559-1563, 1586
- [19] 张令, 负超. 机器人砂带磨削系统的夹具优化. 机械工程师, 2011, 8:1-8
- [20] 田韶鹏, 吴森, 曹正策. 基于特征的工件可加工性几何分析方法. 机械与电子, 2005, 9:3-6
- [21] 苏峰. 网络制造环境下基于 STEP_NC 的零件可加工性评价系统研究:[硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳理工大学机械学院, 2010. 21-37
- [22] Leali F, Pellicciari M, Pini F, et al. An offline programming method for the robotic deburring of aerospace components. *communications in Computer & Information Science*, 2013, 371:1-13
- [23] Deng S H, Cai Z H, Fang D, et al. Application of robot offline programming in thermal spraying. *Surface & Coatings Technology*, 2012, 206(19-20):3875-3882
- [24] Foo Y L, You A H, Chin C W. Development, implementation, and analysis of direct integration offline programming method. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2011, 27(3):636-640
- [25] Krzic P, Pusavec F, Kopac J. Kinematics contains and offline programming in robotics machining applications. *Tehnicki Vjesnik*, 2013, 20(1):117-124
- [26] Pini F, Leali F, Ansaloni M. Offline workpiece calibration method for robotic reconfigurable machining platform, In: Proceedings of the IEEE Emerging Technology and Factory Automation, Barcelona, Spain, 2014. 1-8
- [27] Pan Z, Polden J, Larkin N, et al. Recent progress on programming methods for industrial robots. *Robotics*, 2010, 28:1-8. VDE
- [28] Robert D. Offline programming and simulation help Boeing use giant automated riveter on C-17 aircraft. *Industrial Robot*, 2001, 28(6): 478-482

Workspace and machining trajectory analyses under a belt grinding robot's grinding of curved surface workpieces

Li Dongjing^{***}, Wang Wei^{*}, Yun Chao^{*}, Wang Qilong^{*}, Hao Daxian^{*}

(* School of Mechanical Engineering and Automation, Bei Hang University, Beijing 100191)

(** School of Information and Electrical Engineering, Hubei University of Science and Technology, Xianning 437100)

Abstract

The robot belt grinding was studied to overcome traditional grinding's shortcomings such as creating harsh working environment and increasing labor-intensity. A 3P3R belt grinding robot was designed for curved surface workpiece grinding. The robot kinematics and workspace were analyzed, and then the roughly reachable workspace of this robot was obtained by using the numerical analysis method. By modeling the surface point of the workpiece to be machined, the reachability simulation analysis was carried out on the processing of machining surface points by the Monte Carlo method, and the robot posture and the processing trajectory were obtained while all the surface points to be grinded were closest to the Grinding wheel. The analysis of this approach can be used to judge whether this robot can machine the curved surface workpiece or not, and can provide guidance to specific workpieces' machining teaching programming, while providing a way of off-line programming.

Key words: belt grinding robot, workspace analysis, Monte Carlo method, curved surface workpiece, machining trajectory