

文章编号: 1002-0446(2003)04-0353-06

机器人喷涂过程中的喷炬建模及仿真研究*

冯 川, 孙增圻

(清华大学智能技术与系统国家重点实验室 北京 100084)

摘 要: 本文在研究了喷涂机器人的喷炬特性后, 根据物理模型采用了一种简化的数学模型来描述在喷炬流场中的涂料流量分布函数. 并从上述函数出发, 进一步得到了喷涂的涂料沉积方程. 根据仿真实验与实际喷涂的数据进行比较, 证明了模型的正确性. 这一喷炬模型是喷涂机器人离线编程系统的重要组成部分.

关键词: 喷涂; 离线编程; 仿真; OpenGL

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

MODELS OF SPRAY GUN AND SIMULATION IN ROBOTICS SPRAY PAINTING

FENG Chuan, SUN Zeng-qi

(State Key Laboratory of Intelligent Technology and Systems, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The paper deals with the character of spray gun used by an industrial spray-painting robot. According to the physical model, a simplified mathematical model is proposed for the paint flux distribution function, which describes the flux field within the spray cone. Derived from the function, a formula for spray deposition on a point within the spray cone is obtained. Some simulated experiments have been made, and the results accord with the flux field data of the result from a published experiment, which proves the correctness of the model. With the model of spray deposition, a 3-D simulation program by OpenGL is presented. It will be an important part in the future off-line spray-painting system.

Keywords: spray-painting, off-line programming, simulation, OpenGL

1 引言(Introduction)

在卫生陶瓷生产工艺中, 施釉技术是关键所在. 我国现在陶瓷行业普遍采用人工作业的方式进行施釉, 手工施釉与操作者的熟练程度、操作习惯、甚至情绪因素直接相关, 产品质量难以保证, 工人劳动强度大, 而且对人体健康有损害. 在国外, 机器人施釉已经成为一项较成熟的技术, 同时也是陶瓷生产过程中中较易实现自动化的环节. 截至到 1998 年底, 世界上在役的喷涂机器人有 25122 台, 总体来说, 机器人喷涂在国外有较为广泛的应用, 并具有较好的效果.

使用机器人进行喷涂必需要解决的一个问题就是: 如何对施釉机器人进行示教. 现有的喷涂生产线

上, 机器人一般采用人工示教, 这种方法缺陷很多, 使用不够灵活. 因此, 对示教进行有效的指导, 也就是进行喷涂轨迹规划就显得很必要, 喷涂轨迹规划要解决的重要问题就是, 机器人在其工作空间中以一定的轨迹运动时, 喷涂目标器型表面的釉料堆积情况. 这就需要研究喷炬的空间分布模型, 并根据这一模型确定机器人的施釉动作.

本文通过对喷炬物理特性的研究, 建立数学模型来描述喷枪、釉料的物理特性以及喷涂过程中的各种变化量对喷涂的影响. 研究喷炬上任意一点处的面流量的分布. 此模型的建立, 将使得在数学上对喷涂过程进行描述成为可能. 能够为离线示教系统的开发工作奠定重要的基础.

* 收稿日期: 2002- 11- 17

2 空间分布模型(Model of space distribution)

2.1 喷釉简述

现在大多数卫生陶瓷企业采用空气喷涂法进行施釉。这种方法的工作效率高,相对于其它施釉方法来讲,釉面的均匀性较好。工厂施釉工序容易产生的缺陷一般为釉薄、釉缕、波纹等。抛开釉浆的性能因素,就施釉工序本身来说,造成这些缺陷的原因主要是压力、施釉量、均匀度、喷釉距离、角度、喷枪咀的出釉量、散射面等。应该从这些方面去加以调整。

釉料从喷枪口喷出以后在空气中形成的射流叫做喷炬,它的性能和特点直接关系到釉层的性能。由于喷涂效果受多种因素的影响:如工件表面形状的复杂程度、喷枪的位置、方向及其离工件表面的距离、涂料特性、环境温度、大气压、空气湿度等等,因而如何通过对喷炬特性的研究找出更加精确的涂料空间分布数学模型,以及提出更好的轨迹优化方法都有待进一步探讨。

2.2 喷涂设备影响

喷涂设备的特性对于喷炬特性影响很大,其中最为关键的影响因素就是喷枪和喷咀。喷涂釉料的喷枪不同于喷漆的喷枪,其特点是更加耐磨并且空气和涂料的流量显著加大,使得这种喷枪可以适应施釉的生产条件和要求。

喷枪实际上是空气雾化器,它是利用压缩空气高速喷出时把釉浆撕裂雾化的,所产生的喷炬的截面一般是圆形的,喷炬在各方面覆盖范围相同。工厂里使用的喷涂用喷枪的喷射角度通常小于 60° 。其外部混合式空气喷咀可以防止涂料进入空气管道,而且效率高,作业性能好,能喷涂粘性和快干型涂料(如我们要喷涂的釉料),能得到均匀美观的釉层,这一点对于机器人自动化生产线是至关重要的。其喷炬一般是各向同性的,也就是说喷炬在截面的任意方向都是性质相同的,因此这里以各向同性的喷炬为研究对象。

2.3 喷涂雾化

整个喷涂过程是很复杂的,为了对其有清楚的认识,应该首先对喷涂雾化的基本过程和基本原理进行了解,然后在一定假设的基础上从数学上建立描述喷涂过程的方程。

空气喷涂是由空气和釉料混合使釉料雾化。在釉料一定的情况下,雾化程度取决于喷枪的中心空气孔和辅助空气孔喷射出来的空气流速和空气量。经验上,在釉料喷出量恒定时,空气量越大雾化越细。

从理论上讲,雾化过程本质上是大批的液体转化成小液滴的过程。可以认为这是液滴表面张力在内部和外部扰动作用下的结果。如果没有扰动力,表面张力会使得液滴形成一个球体,因为这种形态有最小的表面能。但是,另一方面,空气动力等扰动力作用在液滴的表面可以造成分解过程。在扰动力超过表面张力的聚集力时,液滴就会破碎雾化。

2.4 射流连续性假设

据测算,大多喷雾发生器产生的液滴直径在500微米到几个微米之间,也就是说液滴的体积是非常小的。实验和理论数据表明,喷枪产生的雾化液滴直径平均在100微米以下。对于这样细小而又众多的液滴,宏观上可以认为它们是连续分布的。因此,在计算中喷炬内的釉料是连续分布的。釉料的浓度取决于它的空间分布函数。提出这样的假设是符合实际情况的,而且能够大大帮助简化模型建立过程。

2.5 釉料空间分布模型

确定釉料的空间分布是建模的重点问题。由于喷雾的射流造成了低压和湍流,并因此造成雾化。形成以上结果的主要原因是由空气阻力,内部的波动以及微粒扩散共同作用造成的。正是这些气体和液体的相互作用使得这个问题变得十分复杂,釉料的空间分布问题很难从数学上进行准确地描述。一些理论和实验已经对这一问题进行了探讨,认为对于喷雾空间分布的影响因素主要是:喷枪、空气、喷咀和喷咀针。改变泵的压力、空气压力和流速以及喷咀针阀的位置都可能影响釉料的空间分布。

已经有一些文章对于釉料的空间分布进行过研究,也提出了使用 β 曲线或者是高斯曲线来模拟釉料空间分布函数,但效果并不是很令人满意,因此,可以从喷枪的喷射图样出发进行研究。

根据实验测量的结果,在涂料雾化良好的情况下,喷枪的喷射图样主要为如图1所示的涂料分布曲线,形成这种喷射图样的喷枪通常是压力适中,喷射开口角比较小,而且雾化良好的喷枪。下面就针对这样的喷射图样进行研究。

对于喷射图样比较不均匀的外围过渡段,其情况比较复杂。根据喷射过程中的物理特性,可以认为,粒子的速度方向是一条直线,在没有热交换的情况下,喷射锥体的扩大是由于粒子的扩散作用造成的。那么就可以推断出,釉料分布并不均匀的部分,是粒子自由运动的结果。对于大量粒子的无规则运动,其分布是按照指数曲线变化的,因此可以认为喷炬的锥体是没有边界的,只有在无限远处才可能没

有釉料粒子,这就给计算带来了困难.事实上,很少量的釉料粒子对喷涂效果是没有影响的,为了使计算得到简化,可以使用三角函数曲线对于喷炬过渡部分的函数进行近似.

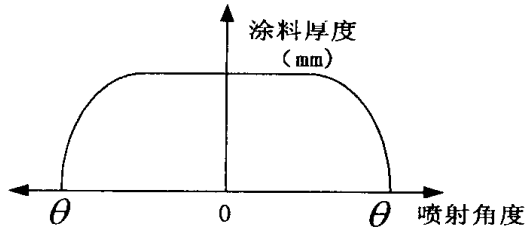


图 1 涂料分布

Fig. 1 Dope distribution

因此,可以得到以下方程为

$$q(R) = \begin{cases} 0 & R > R_0 \\ 0.5 \{ 1 + \cos \left[\frac{\pi(R - R_1)}{(R_0 - R_1)} \right] \} & R_0 \geq R \geq R_1 \\ 1 & R_1 > R \end{cases} \quad (1)$$

其中 $q(R)$ 表示喷炬内距离轴线距离为 R 的点的釉料厚度与 1 的比值; R_1 为釉料保持均匀的范围; R_0 为釉料覆盖范围. (见图 2)

设定 $R_1 = X \tan \theta_1$, θ_1 需要经过实验测定,其意义就是,在喷射锥内部的一点与喷枪连线和喷枪方向矢量夹角在 θ_1 以内时,釉料的分布均匀.

设定 $R_0 = X \tan \theta_0$, θ_0 就是喷射锥的半锥角,也就是说空间上一点与喷枪的连线和喷枪方向矢量的夹角大于 θ_0 时,粒子浓度为 0.

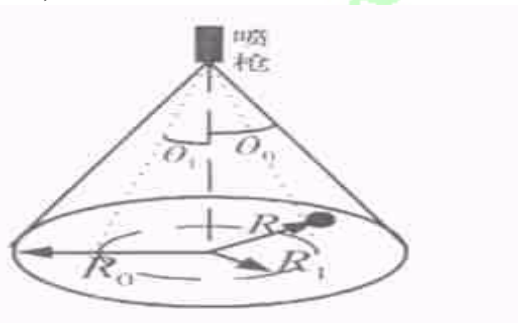


图 2 喷射锥定义

Fig. 2 Spray cone definition

3 釉料厚度模型 (Model of glair thickness)

3.1 喷炬物理量定义

为了对任意时间器型上釉料的厚度进行描述,定义如下物理量:

3.1.1 喷枪空间坐标 $P_s(t)$

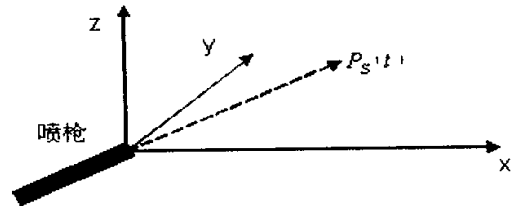


图 3 喷枪坐标

Fig. 3 Spray coordinates

如图 3 所示,为了对喷枪姿态进行描述,定义喷枪空间坐标 $P_s(t)$, 这为一个 6 维时间矢量, $P_s(t) = [p_x(t), p_y(t), p_z(t), p_\alpha(t), p_\theta(t), p_\psi(t)]$, 描述了喷枪在时刻 t 的状态. 其中前三个分量是喷枪的空间坐标,用 $P_p(t)$ 表示,代表喷枪在世界坐标系中的空间位置;后三个分量是欧拉角,用 $P_r(t)$ 表示. $p_\alpha(t)$ 代表了喷枪以 x 轴为旋转轴,按右手方向旋转的角度; $p_\theta(t)$ 是以 y 轴为旋转轴,按右手方向旋转的角度; $p_\psi(t)$ 则是以 z 轴为旋转轴,按右手方向旋转的角度. 六维时间矢量 $P_s(t)$ 可以唯一确定在时刻 t 喷枪的空间方位以及空间姿态,这种对于喷枪位置的定义方法与一般机器人使用的坐标定义是一致的.

3.1.2 喷涂目标点坐标 S

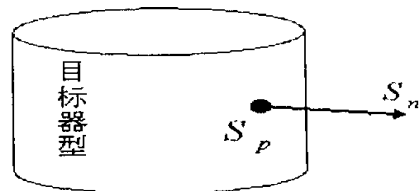


图 4 目标点坐标

Fig. 4 Object coordinates

为了描述喷涂目标器型,定义喷涂目标点坐标 S , 如图 4 所示,这是一个 6 维矢量, $S = [x, y, z, n_a, n_b, n_c]$, 描述了器型上的任意一点. 其中前三个分量是器型上任一点的空间坐标,用 S_p 表示;后三个分量是器型上点 S_p 的法向量,用 S_n 表示.

3.2 坐标变换

为了便于机器人喷涂系统的计算,须将绝对坐标系中定义的坐标进行变换,变换到以机器人工具为原点定义的坐标系中. 其中新的坐标原点为喷枪空间坐标点 $P_p(t)$; 三个坐标轴则是原来的 x, y, z 轴在 $P_p(t)$ 点绕着喷枪的方向矢量 $P_r(t)$ 进行旋转所得到的如图 5 所示方向的笛卡儿坐标系.

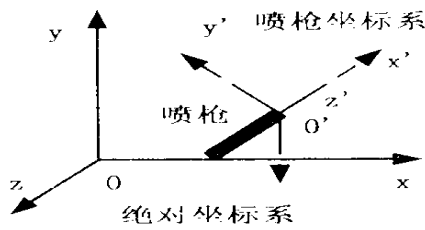


图5 坐标变换

Fig.5 Coordinate transforms

根据此定义, 在新坐标系下器型上一点 S 的坐标为 $S'(t)$, 可以有

$$S = [p_x(t), p_y(t), p_z(t)] + RS'(t) \quad (2)$$

$[p_x(t), p_y(t), p_z(t)]$ 就是喷枪在时刻 t 的空间位置, R 是变换矩阵. 进一步, 进行齐次变换得出下式

$$S^o = R(\varphi)R(\theta)R(\psi)T_r S'(t)^o \quad (3)$$

其中

$$S^o = [x, y, z, 1]^T \quad (4)$$

$$S'(t)^o = [x'(t), y'(t), z'(t), 1]^T \quad (5)$$

$$R(\varphi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$T_r(p_x(t), p_y(t), p_z(t)) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x(t) \\ 0 & 1 & 0 & p_y(t) \\ 0 & 0 & 1 & p_z(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

经过坐标变换, 就可以把世界坐标系中定义的喷枪姿态 $P_s(t)$ 和目标器型上坐标点 S 联系在一起, 用一个随喷枪运动的坐标系表示. 则目标点 $S'(t)$ 上的釉料厚度可以求出.

3.3 釉料厚度计算公式

$$C(r) = Dq(r) = \begin{cases} \frac{2\pi Q}{\pi^2(R_0^2 + R_1^2) - 4(R_0 - R_1)^2} & R_1 > r \\ \frac{2\pi Q}{\pi^2(R_0^2 + R_1^2) - 4(R_0 - R_1)^2} \cdot \left| 1 + \cos\left|\frac{(r - R_1)}{(R_0 - R_1)}\right| \times \pi \right| & R_0 > r > R_1 \end{cases} \quad (14)$$

考虑到喷涂时关心问题的主要是一定时间内喷涂到陶坯上的釉料量, 可以采用一种简化的建模方式, 主要由 R_0 和 C 两个量来描述喷炬, 其中 R_0 是距喷枪出口 X 时的截面半径, 即 $R_0 = R_0(X) = X \tan(\theta_0)$, C 是截面上任意一点处的流量面密度, 即单位面积上的流量, 考虑到喷炬各向同性, 有 $C = C(R_0, r)$, 其中 r 是截面上任意点到截面圆心的半径, 如图6所示.

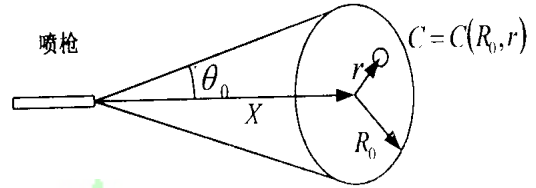


图6 计算示意图

Fig.6 Sketch map of calculation

根据上一章得到的喷炬空间分布函数, 我们就能够获得 R_0 和 $C(R_0, r)$ 的变化关系. 因此就可以确定喷炬在出喷枪口以后的各点性质, 这也是厚度模型的重点所在. 考虑到喷炬各向同性, 整个截面上的流量 Q 为

$$Q = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_0} C r dr d\theta \quad (10)$$

上一章我们得到了喷炬的空间分布函数公式如式(3)所示, 因为 $C = q^* D$ (D 就是截面中心的釉料厚度).

所以推出

$$Q = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_1} 1 D r dr d\theta + \int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_0} \left(0.5 \left(1 + \cos\left|\frac{r - R_1}{R_0 - R_1} \pi\right| \right) \right) D \cdot r dr d\theta \quad (11)$$

解此积分式, 得到

$$Q = D \frac{\pi^2(R_0^2 + R_1^2) - 4(R_0 - R_1)^2}{2\pi} \quad (12)$$

因此得到

$$D = \frac{2\pi Q}{\pi^2(R_0^2 + R_1^2) - 4(R_0 - R_1)^2} \quad (13)$$

可以推出

因为喷枪的运动速度通常情况下在 0.5m/s 以下, 与喷射出来的喷雾相比很慢, 所以可以假设在一个小时段 Δt 内喷枪保持不动. 则在此时间段内垂直入射到点 $S'(t)$ 上的涂料总量是 $D(\Delta t) = C(S'(\Delta t)) \times \Delta t$. 但应该注意到, 雾化射流垂直喷射到器型表面和倾斜喷射的效果完全不同. 所以, 实际上在 Δt 时间内喷射到点 $S'(t)$ 上的涂料量如下式表示:

$$D_s(t) = \begin{cases} -C(S'(t))nd(t)n \leq 0 \\ 0 & d(t)n > 0 \end{cases} \quad (15)$$

其中 $d(t)$ 就是喷口方向矢量, 而 n 就是器型表面点的法向矢量 s_n . 两者的点积代表了这两个矢量的方向关系. 上式的意义就是, 当喷涂目标点位于喷枪可喷到的一面时, 喷涂的厚度与喷枪方向和目标点法线有关, 而喷涂目标点位于喷枪不可喷到的一面时, 喷涂厚度为 0.

因此, 在时间段 0 到 T_f 中, 喷涂在器型上此点的涂料总厚度就是

$$T_s(0, T_f) = \int_0^{T_f} D_s(t) dt \quad (16)$$

3.4 模型修正

在前面已经论述过, 因为气体喷枪的特性, 喷雾粒子并不能够全部粘附在喷涂目标的表面, 而是会有反射发生. 因此, 我们设置一个参数 K_p , 表示喷雾的利用系数, 这里的 K_p 不但包含了反射造成的涂料损失, 还包含了其它原因造成的涂料损失, 需要通过实验验证. 则涂料厚度公式就变为

$$T_s(0, T_f) = K \int_0^{T_f} D_s(t) dt \quad (17)$$

4 仿真研究 (Simulation research)

4.1 模型验证

首先, 对静止喷枪在一定时间内对平面的喷涂进行仿真, 以得到喷枪的喷射图样. 根据仿真得到的喷射图样与实际喷枪喷射图样的比较来判断喷矩模型的正确性.

基于以上函数, 编制程序计算静止喷枪喷射图样. 喷枪参数设置如表 1.

表 1 喷枪参数设置

Table 1 Configuration of spray gun

喷射半锥角 θ_0	涂料流量 V	涂料利用系数 K	每点喷涂时间 Δt
45°	200m L/s	1.0	0.1s

喷枪和目标点的关系如图 7 所示.

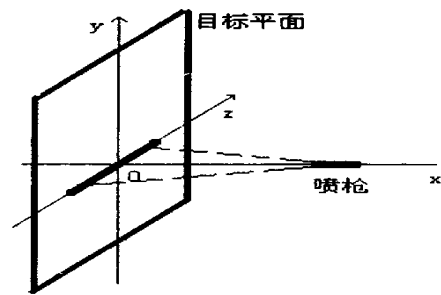


图 7 仿真示意图

Fig. 7 Sketch map of simulation

目标点为从 $x = 0; y = 0; z = -15$; 到 $x = 0; y = 0; z = 15$ 一条线段;

目标点法向方向均为 $(1, 0, 0)$ 指向 x 轴正向.

喷枪位置: $x = 15; y = 0; z = 0$ 不变;

喷枪方向: $R_x = 0^\circ; R_y = 0^\circ; R_z = 180^\circ$, 指向 x 轴反向.

喷涂完毕后得到的仿真实验结果如图 8 所示.

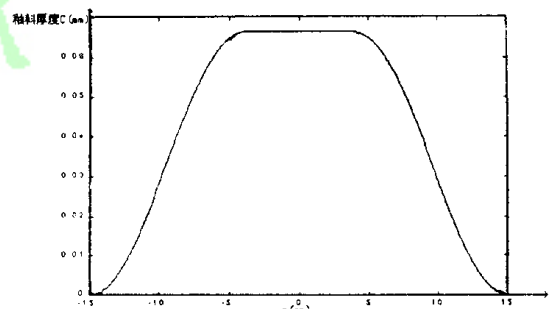


图 8 仿真结果

Fig. 8 Result of simulation

为了对此结果进行检验, 采用参考文献(9)中的一组实验数据进行对照. 此实验中, 喷枪的喷射锥角是 45°, 喷枪距离目标平面的距离为 15cm, 喷枪的数据与仿真实验相同. 实验结果如图 9 所示, 从仿真实验及喷涂实验的对照中可以看出, 两者具有很好的一致性. 因此可以得出结论, 喷矩空间分布模型和涂料厚度模型都能较好的吻合实际情况.

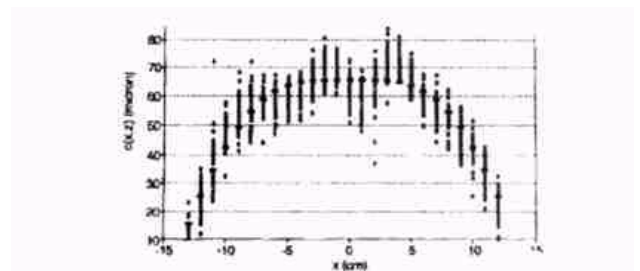


图 9 实验结果

Fig. 9 Result of experiment

在实际的使用中,必须根据所使用的喷枪调整喷涂的参数,才能获得正确的喷射图样.进而得到正确的仿真结果.

4.2 喷涂三维仿真实验

本文研究的三维仿真程序采用 Visual C++ 利用 OpenGL 图形库在 Windows 平台上开发.主要可以实现对于任意曲面和喷枪轨迹进行仿真,模拟其喷涂过程,并动态表现出喷涂结果.仿真程序的数据输入输出采用文件的方式.使用文本文件描述喷涂目标器型以及喷枪轨迹等信息.喷涂仿真程序界面如图 10 所示.



图 10 三维仿真程序

Fig.10 3-D simulation program

从喷涂厚度曲线可以看出,程序运算结果与前面建立的釉料厚度模型有很好的一致性,符合实际情况.

5 结论(Conclusion)

本文主要对喷炬釉料的空间分布模型进行了研究.研究工作主要包括以下几个方面:喷炬空间分布模型的研究,根据喷枪和喷炬特性提出了喷炬的空间分布模型.根据以上模型确立了工件表面釉料涂

层厚度的计算方法.使用 Matlab 对以上模型进行仿真实验,并对模型进行验证.利用 OpenGL 建立了喷涂三维仿真环境,并进行了仿真实验.为机器人喷涂离线示教系统的最终建立提供了基础.

参考文献 (References)

- [1] 孙增圻主编. 机器人智能控制[M]. 山西教育出版社: 1995.
- [2] 王锡春, 姜英涛主编. 涂装技术(第一册总论)[M]. 化学工业出版社: 1986.
- [3] Jackie Neider, Tom Davis, Mason Woo. OpenGL Programming Guide[M]. Silicon Graphics. Addison-Wesley Publishing Company. 1993.
- [4] 王振滨, 赵德安, 王焱, 钱琳. 喷漆机器人离线编程系统探讨[J]. 江苏理工大学学报(自然科学版). 2000, 21(5).
- [5] Lefebvre H. Atomization and Sprays[M]. Hemisphere Publishing Corporation. 1989.
- [6] Klein A. CAD-based off-line programming of painting robots [J]. Robotica. 1987, 5(4): 267- 271.
- [7] Tuna Balkan. Modeling of paint flow rate flux for circular paint sprays by using experimental paint thickness distribution[J]. Mechanics Research Communication. 1999, 26(5): 609- 617.
- [8] Bellan. Supercritical (and subcritical) fluid behavior and modeling: drops, streams, shear and mixing layers, jets and sprays [J]. Progress in Energy and Combustion Science. 2000, 26(4-6): 329- 366.
- [9] Peter Hertling, Lars Hog, Rune Larsen, John W. Perram, Henrik Gordon Petersen. Task Curve Planning for Painting Robots— Part I: Process Modeling and Calibration[J]. IEEE Transaction on Robotics and Automation, 1996, 12(2)

作者简介:

冯 川 (1980-), 男, 硕士研究生. 研究领域: 智能控制, 机器人.

孙增圻 (1943-), 男, 教授. 研究领域: 智能控制、机器人、模糊系统和神经网络、计算机控制理论及应用、控制系统 CAD.