

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.05.043

基于CAD的喷涂机器人轨迹优化*

李发忠 赵德安 张超 姬伟

(江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013)

【摘要】 针对复杂自由曲面匀速和等行程间距喷涂方法,因曲面上曲率的变化会造成涂层厚度差较大的问题,提出一种基于CAD的轨迹优化算法以提高曲面的漆膜厚度一致性。该方法首先根据平面上的喷涂试验和微分几何的面积放大定理推导出曲面上的漆膜生长模型;然后通过扫描直接获得工件表面点云模型,采用点云切片技术获取喷枪路径和姿态;最后采用沿路径方向的速率优化算法和垂直路径方向的间距优化算法对曲面上的喷枪轨迹进行优化。仿真和试验结果验证了优化算法的有效性和轨迹生成算法的可行性。

关键词: 喷涂机器人 轨迹优化 点云切片 试验

中图分类号: TP242.2; TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)05-0213-05

Trajectory Optimization of Spray Painting Robot Based on CAD

Li Fazhong Zhao Dean Zhang Chao Ji Wei

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

Due to the complex geometry of free-form surfaces, the generating optimization trajectories of spray gun satisfy the requirement of uniformity paint became a challenge. A quadratic function of the paint deposition rate on a plane was proposed according to the experimental data, and a model of paint deposition rate on a free-form surface was established. The point cloud model was obtained directly by scanning the surface of workpiece, and the position and pose of spray gun was obtained by point cloud slicing technique. The change of the surface curvature caused non-uniform paint deposition on freeform surface. An algorithm of variable spray speed optimization was established to compensate for the curvature change and improve the uniformity of paint deposition along passes. An algorithm for selecting the spacing between the passes was established to improve the deposition uniformity vertical to passes, and to reduce cycle time and paint waste. Finally, the simulation and experimental results illustrated the feasibility and availability of these optimization algorithms.

Key words Spray painting robot, Trajectory optimization, Point cloud slicing, Experiment

引言

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。例如,由于缺少自动轨迹生成工具,喷涂专家有时需要3~5个月的时间才能完成一辆新型车身的覆盖轨迹,这严重影响了新型产品的上市速度。轨迹规划过程的自动化将显著缩短喷涂专家的编程时间。针对这个问

题,Sheng^[1]等在复杂曲面分片的基础上开发了一种复杂曲面的覆盖算法,该算法可以保证曲面全部被漆膜覆盖,但是没有考虑生成漆膜厚度的一致性问题。Chen^[2]等利用平面上的喷涂模型对涂层重叠区域宽度进行优化后,生成喷枪空间路径,并在曲率变化较小的曲面上实现了沿指定空间路径的喷涂机器人喷枪轨迹的优化。Prasad^[3]等提出了一种新颖的分层次曲面分割方法,该方法能将复杂曲面分割

收稿日期:2009-03-18 修回日期:2009-04-28

* 国家自然科学基金资助项目(60875052)和江苏大学高级人才科研基金资助项目(06JDC033)

作者简介:李发忠,博士生,主要从事机器人控制和机器人轨迹优化研究,E-mail:andy007@ujs.edu.cn

成能用简单喷涂程序覆盖的几何和拓扑结构简单的子块,该方法实现了复杂曲面的全覆盖喷涂,但是该方法是在假设分层次分割后的子片均可以独立喷涂的前提下实现的,显然这个假设不现实,必须考虑片与片之间的影响。赵和陈等^[4-6]提出了自由曲面上的分片轨迹优化和基于遗传算法的轨迹优化方法,但是该方法没有提及间距优化、工件建模以及机器人的关节运动。

针对上述问题,本文提出一种基于速度和间距的轨迹优化算法以提高漆膜厚度一致性。

1 喷枪数学模型

喷枪位姿在笛卡儿坐标系中可定义为

$$\mathbf{a}(t) = [\mathbf{P}(t), \mathbf{O}(t)]^T$$

式中 $\mathbf{P}(t) = [p_x(t), p_y(t), p_z(t)]^T$ 喷枪位置; $\mathbf{O}(t) = [o_\varphi(t), o_\theta(t), o_\psi(t)]^T$ 喷枪姿态。

当通过在平面上的喷漆试验推导漆膜累积速率函数表达式时,为了简化模型,假设喷漆时的工况参数和喷枪参数都恒定。喷枪喷出的漆流形状为圆锥体,其油漆空间分布模型如图 1a 所示。图中 ϕ 为圆锥的张角, h 为喷枪离平面的距离, R 为平面上的喷涂半径, r 是平面上一点 Q 离喷枪中心投影点的距离, β 是 Q 点和喷枪的连线与喷枪中轴线的夹角。平面上的漆膜累积速率为: $G = f(r, h)$ 。喷枪离工件表面的距离一般不变,则有

$$\begin{cases} G = f(r) & (-R \leq r \leq R) \\ G = 0 & (|r| > R) \end{cases} \quad (1)$$

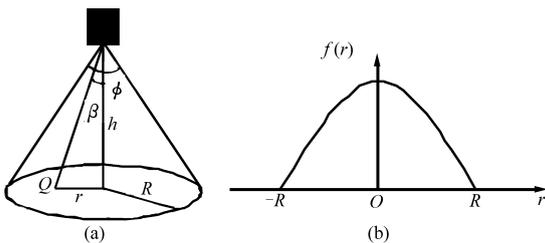


图 1 涂料空间分布与涂层剖面

Fig. 1 A tool model and tool profile

(a) 涂料空间分布 (b) 涂层剖面

如图 1b 所示,此时 G 近似为二次曲线^[7]。已知漆膜累积速率 G 后,对时间 t 积分,可得平面上某点的涂层厚度

$$q = \int_{-R}^R \int_0^t G(r) dr d\tau \quad (2)$$

曲面 P_1 上一点 s_1 的漆膜生长模型如图 2 所示,在保持油漆总量不变的前提下,采用微分几何的面积放大定理,平面上某一点 s 的漆膜累积速率乘以面积放大系数得到曲面上点 s_1 的漆膜累积速

率^[8]。

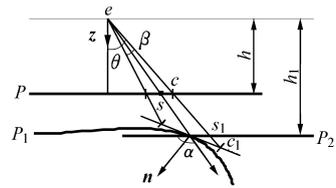


图 2 曲面上的漆膜生长模型

Fig. 2 Model determines the deposition on an arbitrary surface

率。平面 P 为参考平面, P_2 为过点 s_1 且与 P 平行的平面, c 为 P 上以 s 为圆心的圆, c_1 为 c 映射到过点 s_1 的切平面上的圆, h 为喷射点 e 到参考平面 P 之间的距离, h_1 为 e 到平面 P_2 的距离, θ 为直线 es_1 与喷枪中轴线 z 之间的夹角, β 为 e 到圆 c 的最大张角 ($\beta \rightarrow 0$), α 为 s_1 的法向量 n 与 es_1 的夹角。 c_1 和 c 的面积 S_{c_1} 与 S_c 的关系

$$\frac{S_{c_1}}{S_c} = \left(\frac{h_1 \cos \theta}{h \cos \alpha} \right)^2 \quad (3)$$

已知平面上某点 s 的涂层厚度 q , 则曲面上点 s_1 涂层厚度数学表达式为

$$q_1 = \begin{cases} q \left(\frac{h \cos \alpha}{h_1 \cos \theta} \right)^2 & (|\alpha| < 90^\circ) \\ 0 & (|\alpha| \geq 90^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

2 喷枪位姿获取方法

2.1 工件表面 CAD 数据的获取

实物测量是逆向工程技术中的常用手段^[9], 通过特定的测量设备和方法获取工件表面的几何坐标数据。方法如下: 通过扫描直接获得工件表面形状数据, 该数据一般是由一系列点构成的, 称为点云数据; 再对点云数据进行三维重构, 进而得到工件的 CAD 模型。经过造型后, 系统 CAD 数据库中存放了工件的 CAD 模型, 为喷枪轨迹生成提供工件的数据信息。

本文采用德国 GOM 公司的 ATOSII 三维光学扫描仪对待喷涂工件(图 3)进行实物测量。测量得到的数据如图 4 所示, 包含 460087 个数据点。点云模型可以由 STL、TXT 等多种格式输出。

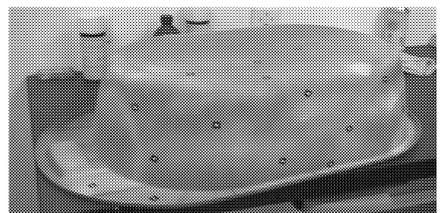


图 3 待喷涂工件

Fig. 3 Workpiece will be sprayed

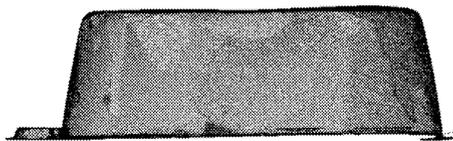


图4 点云模型

Fig. 4 Point cloud model

2.2 基于点云切片技术的喷枪位姿获取方法

通过扫描获取待喷涂工件的点云数据后,需要经过三维重建得到CAD模型。此过程十分繁琐、费时,且操作人员使用CAD软件系统的熟练程度和相关知识技能直接影响着模型的精度。工件表面的喷涂路径是由一系列“等距”路径线构成,若对点云数据进行均匀切片处理,可以获得等距的切片轮廓,也就确定了喷枪在工件表面的喷涂路径。因此,引入点云切片技术^[10],直接对工件的点云数据进行研究,由计算机程序自动生成喷涂机器人的喷枪位姿路径。

具体来说步骤如下:通过设定切片方向和切片层数,对点云模型进行切片处理,得到切片多义线后对其平均采样,确定喷枪在工件表面的喷涂路径,然后估算所有采样点的法向量,最后利用偏置算法获取喷漆机器人的喷枪运行位姿,如图5所示。

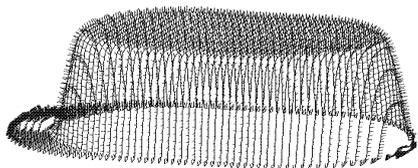


图5 基于点云切片的喷枪路径

Fig. 5 Spray gun pass based on point cloud slicing

3 喷枪轨迹优化

3.1 起始曲线的选择

在曲面工件的轨迹优化中,起始曲线的选择对整个曲面的涂层一致性和喷涂周期影响很大,从CAD模型中搜索最优起始曲线计算量非常巨大。文献[11]提出起始曲线必须是测地线,从位置和方向两个方面给出了起始曲线的选择原则,用 Gauss-Bonnet 定理证明了其正确性,首先起始曲线的位置要尽可能平分被涂工件表面,这样起始曲线两侧路径的高斯曲率和相等,可以最大限度避免路径曲线的自相交,使得涂层厚度方差最小;以曲面上路径数最少的原则确定起始曲线的方向,这样可以实现喷枪转弯次数最少,喷涂周期最小。

3.2 速度优化

由式(3)、(4)知,当匀速轨迹经过曲面时,曲率的变化会导致沿轨迹方向的涂层一致性没法保证。在路径已定的前提下,采用“变速率”喷涂可以补偿

表面曲率的影响,提高沿轨迹方向的涂层一致性。

如图6所示,在给定喷枪路径的两侧构建若干条子偏移(sub-offset)路径,沿子偏移路径计算涂层厚度的标准方差,优化目标为所有标准方差之和最小。

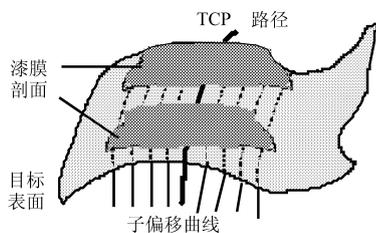


图6 速度优化

Fig. 6 Speed optimization

优化方法为:将给定路径分为 n 段长为 s_i 的线段。设在第 i 段路径上的喷枪速度为恒速 v_i , $\mathbf{V} = \{v_i; i \in [1, n]\}$ 为速度向量。则每段路径上的喷涂时间 $t_i = s_i/v_i$, 由此可以把 \mathbf{V} 的优化问题转化为 $\mathbf{T} = \{t_i; i \in [1, n]\}$ 的优化问题。子偏移路径 j 分为 m_j 个长度分别为 S_{m_j} 的线段,定义矩阵 $\mathbf{D}_j = \{d_{ef}; e, f \in [1, m_j]\}$, 其中 d_{ef} 为喷枪在第 f 段的中间时,第 e 段沉积流量。则涂层厚度标准方差为 $\|(\mathbf{D}_j \mathbf{T} - \mathbf{K}_j)/k_j\|$ 。其中 $\mathbf{D}_j \mathbf{T}$ 代表子偏移路径 j 上的涂层厚度, \mathbf{S}_j 表示向量 $\mathbf{D}_j \mathbf{T}$ 所有元素之和, $k_j = S_j/m_j$ 为涂层平均厚度, \mathbf{K}_j 为元素恒等于 k_j 的 m_j 维向量。

速度与加速度约束条件为

$$s_i/v_{\max} < t_i < s_i/v_{\min} \quad (5)$$

$$-a_{\max} \frac{s_{i+1} s_i^2}{v_{\max}^3} \leq s_{i+1} t_i - s_i t_{i+1} \leq a_{\max} \frac{s_{i+1} s_i^2}{v_{\max}^3} \quad (6)$$

定义第 j 条子偏移路径的标准方差在目标函数中的加权系数 $w_j = k_j / \sum_i k_i$, 则优化问题表示为

$$\min_r \sum_j \frac{w_j}{k_j} \|\mathbf{D}_j \mathbf{T} - \mathbf{K}_j\| \quad (7)$$

3.3 间距优化

在自由曲面上,表面曲率在 u 向和 v 向上均变化,所以,在路径的不同点上应有不同的行程间距。间距优化是通过临近路径的涂料沉积剖面的适当重叠来优化垂直路径方向的涂层一致性,同时,为了提高喷涂效率和涂料利用率,间距应该尽可能的宽。

如图7所示,为了确定当前路径的偏移,按照路径曲率的变化在路径上取若干个标记点。在每个标记点上作与该点的路径直交的平面上的索引曲线。沿着索引曲线确定最优的偏移量,根据最优偏移量到当前标记点的距离确定索引曲线上的下一个标记点,新的一组标记点即可拟合得到新的偏移曲线。

为了得到标记点间的最优索引距离,首先在各个标记点沿索引曲线切线方向用一个零高斯曲率近

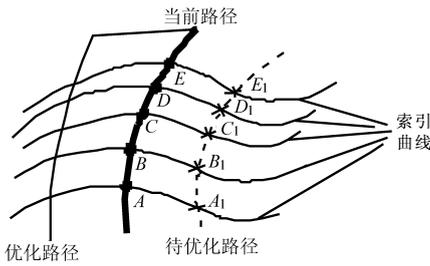


图7 间距优化

Fig. 7 Index width optimization

似曲面替代该点的工件曲面。利用式(1)~(4)最大漆膜厚度方差 u_{\max} 、喷涂周期和当前轨迹,可计算出间距宽度搜索范围 $S_R = [w_{\min}, w_{\max}]$,采样间隔取 w_{res} , w_{\min} 由喷涂周期决定, w_{\max} 由漆膜厚度的方差决定。为减少计算量, w_{res} 越大越好,但也要能准确反映间距和漆膜一致性的关系。由此可在近似曲面上建立各标记点 i 上的产生低于客户要求的漆膜厚度方差的可行索引宽度 F^i ,对于 l 个标记点,一次从 F^i 中选择一个值,组合成一个间距集 $I = \{w^1, w^2, \dots, w^l\}$,其中 $w^i \in F^i$,显然,每一个间距集代表一个不同的偏置曲线。

对于每一个间距集,设定一个惩罚集中小间距和沿当前路径的间距宽度变化的罚函数。从某种意义上说,后一个惩罚因子是用于最小化偏置曲线的测地曲率的。

产生满意喷涂结果的惩罚因子罚值的选择,由一致性、喷涂周期和计算量等的代价关系决定。由于之字路径不仅机器人末端难以跟踪,而且可能导致后续偏置曲线的自相交,所以本文主要考虑避免之字路径的出现,给沿当前路径的间距宽度变化的惩罚因子设置一个大的罚值可以实现这个目的。当然,为了简化处理,给每个标记点的索引宽度一个严格的约束即可,即只考虑所有标记点中与当前路径间距恒定的那些偏置路径。

4 机器人喷涂试验

设理想漆膜厚度 $q_d = 40 \mu\text{m}$,漆膜厚度最大允许偏差 $q_w = 10 \mu\text{m}$,喷枪喷出的圆锥形漆流底面半径 $R = 40 \text{mm}$ 。通过平板上的喷漆试验数据得到漆膜生长速率为

$$f(r) = (R^2 - r^2)/8$$

生成并优化平板上的喷枪轨迹后,得到喷漆机器人喷枪移动速率(匀速)和 TCP 两行程间距分别为: $v = 231.3 \text{mm/s}$, $d = 51.2 \text{mm}$ 。

在自主开发的喷涂机器人离线编程软件中应用本文的算法对图3所示工件的侧面进行轨迹优化,优化的路径如图8所示(黑色粗线为 TCP 在工件表

面的投影路径);优化后的机器人关节轨迹如图9所示,纵坐标为5个关节的转动角度,横坐标路径间距表示 TCP 运行距离;图10为与图9对应的 TCP 速率;将图9和10中关节角度和速率数据通过离线编程软件下载到喷涂机器人控制器中,然后启动机器人实现对工件表面的自动喷涂。试验结果显示:机器人的运行轨迹符合喷涂要求,验证了本文方法的可行性。仿真结果如表1所示,由表1可以看出优化后的喷涂质量更佳。

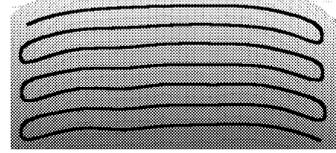


图8 盆的侧面喷涂路径

Fig. 8 Gun pass for the side of the basin

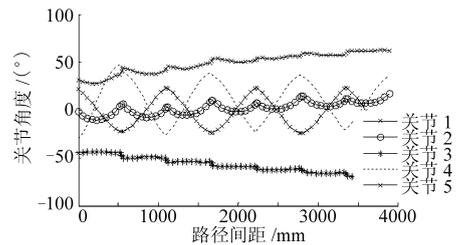


图9 关节轨迹

Fig. 9 Trajectory of joints

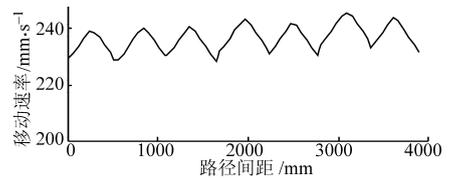


图10 沿路径的速率

Fig. 10 Speed along pass

表1 优化结果

Tab. 1 Optimization experimental results μm

	q_{\min}	q_{\max}
优化前	21.88	57.34
优化后	33.41	46.68

5 结论

(1) 通过平面上的喷涂试验和理论推导的方法获取了表面上的漆膜生长模型。

(2) 通过扫描直接获得工件表面点云模型,采用切片技术对点云模型进行处理获取喷枪位姿。

(3) 对喷枪路径进行速度优化和喷枪行程间距优化,获取漆膜一致性最好的喷枪轨迹。

(4) 在自主研发的喷涂机器人离线编程试验平台上验证了轨迹生成算法的可靠性,仿真结果验证了轨迹优化算法的有效性。

参 考 文 献

- 1 Sheng W H, Ning Xi, Song M, et al. Automated cad-guided robot path planning for spray painting of compound surfaces[C] //IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2000: 1 918 ~ 1 923.
- 2 Chen H P, Sheng W H, Ning Xi, et al. Automated robot trajectory planning for spray painting of free form surfaces in automotive manufacturing[C] //Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2002: 450 ~ 455.
- 3 Prasad N Atkar, Aaron Greenfield, David C Conner, et al. Hierarchical segmentation of surfaces embedded in R^3 for auto-body painting[C] //Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005:574 ~ 579.
- 4 赵德安, 陈伟, 汤养. 面向复杂曲面的喷涂机器人喷枪轨迹优化[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2007,28(5): 425 ~ 429.
Zhao Dean, Chen Wei, Tang Yang. Trajectory optimization of robotic spray painting for complex curved surfaces[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2007, 28(5): 425 ~ 429. (in Chinese)
- 5 赵德安, 陈伟, 汤养. 基于遗传算法的喷涂机器人喷枪路径规划[J]. 中国机械工程, 2008,19(7):777 ~ 779.
Zhao Dean, Chen Wei, Tang Yang. Tool path planning of spray painting robot based on genetic algorithms[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(7): 777 ~ 779. (in Chinese)
- 6 陈伟, 赵德安, 汤养. 自由曲面喷漆机器人喷枪轨迹优化[J]. 农业机械学报,2008,39(1):147 ~ 150.
Chen Wei, Zhao Dean, Tang Yang. Trajectory optimization on robotic spray painting of free-form surfaces[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1): 147 ~ 150. (in Chinese)
- 7 Hertling P, Høg L, Larsen R, et al. Task curve planning for painting robots——part I: process modeling and calibration [J]. IEEE Trans. Robot. Autom., 1996,12(2):324 ~ 330.
- 8 Ellwood K R J, Braslaw J. A finite-element model for an electrostatic bell sprayer[J]. Electrostat, 1998, 45(1): 1 ~ 23.
- 9 李世武, 佟金, 张书军, 等. 逆向工程技术与工程仿生[J]. 农业机械学报,2004,35(3):109 ~ 112.
Li Shiwu, Tong Jin, Zhang Shujun, et al. Reverse engineering and engineering bionics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004,35(3):109 ~ 112. (in Chinese)
- 10 柯映林,王青. 反求工程中的点云切片算法研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2005,17(8):1 798 ~ 1 802.
Ke Yinglin, Wang Qing. Research on point cloud slicing technique in reverse engineering[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2005,17(8):1 798 ~ 1 802. (in Chinese)
- 11 Prasad N Atkar, Howie Choset, Alfred A Rizzi. Towards optimal coverage of 2-dimensional surfaces embedded R^3 : choice of start curve[C] // Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2003: 3 581 ~ 3 587.

~~~~~

(上接第 221 页)

- 5 Kenji Kawashima, Tomonori Kato, Koichi Sawamoto, et al. Realization of virtual sub-chamber on active controlled pneumatic isolation table with pressure differentiator[J]. Precision Engineering, 2007,31(2):139 ~ 145.
- 6 Al-Ali A R, Jarrah M A, Dhaouadin R. Microcontroller-operated anthropomorphic manipulator with haptic feedback[J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 2007,23(1):63 ~ 70.
- 7 Sonam Yun, Kyungwoo Lee, Honghee Kim, et al. Development of the pneumatic valve with bimorph type PZT actuator[J]. Materials Chemistry and Physics, 2006, 97(1):1 ~ 4.
- 8 Takeshi Naganuma, Masanori Kyo, Tatsuhiko Ueki, et al. A new, automatic hydrothermal fluid sampler using a shape-memory alloy[J]. Journal of Oceanography, 1998,54(3): 241 ~ 246.