

复杂曲面的喷涂机器人喷枪轨迹优化与试验*

陈伟^{1,2} 赵德安¹ 李发忠¹

(1. 江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013; 2. 江苏科技大学电子信息学院, 镇江 212003)

【摘要】对复杂曲面进行分片后,以实际涂层厚度与理想涂层厚度方差为目标函数,采用黄金分割法求解涂层重叠区域宽度的最优值。为提高喷涂效率,利用无方向的连接图表示表面上的喷枪轨迹优化组合问题,采用改进的蚁群算法进行求解。仿真结果表明,蚁群算法的全局性和收敛速度都能达到满意的效果。喷涂试验中,采用三角网格划分法对复杂曲面工件进行造型,优化后的喷涂轨迹不仅能够满足涂层均匀性要求,而且喷涂时间节约了20%。

关键词: 喷涂机器人 轨迹规划 蚁群算法 轨迹组合

中图分类号: TP242.2; TG174.442 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)01-0204-05

Tool Trajectory Planning of Robotic Spray Painting and Its Experiment for Complex Curved Surfaces

Chen Wei^{1,2} Zhao Dean¹ Li Fazhong¹

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

2. School of Electronics and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract

A complex curved surface was divided into several patches and trajectory planning for each patch was performed. The trajectory integration problem can be modeled as the tool trajectory optimal integration problem (TTOI), and an ant colony algorithm was advanced to solve the TTOI. Simulations were carried out on the automotive body parts and the results validated the proposed algorithm. And a workpiece with a complex curved surface was used to test the scheme. The results of the experiments showed that the trajectory optimization algorithm achieved satisfactory performance, and the time of robotic spray painting saved 20%.

Key words Robotic spray painting, Trajectory planning, Ant colony algorithms, Trajectory integration

引言

近年来,随着喷涂机器人的广泛应用,机器人喷涂已基本上能满足工业生产的需要。但由于汽车、航天、造船等工业领域的要求,有关如何在复杂曲面上进行喷涂机器人喷枪轨迹规划已成为国内外新的研究热点。由于采用一般的 Bezier 曲面和 B 样条曲面造型方法很难对复杂曲面进行处理,因此复杂曲

面上喷枪轨迹优化是机器人轨迹规划问题中的难点之一。实际生产中,喷涂机器人喷涂作业的优化目标主要有:一是工件表面的涂层尽量均匀;二是喷涂时间尽量短。然而,这两个优化目标(效果和效率)通常是相互制约的。陈伟^[1]等提出了一般性自由曲面上喷涂机器人喷枪轨迹优化方法,对涂层厚度均匀性和喷涂时间进行了优化,但该方法不能解决复杂曲面上优化喷涂问题。Sheng 和 Chen^[2-4]等提

收稿日期: 2009-12-29 修回日期: 2010-04-26

* 国家自然科学基金资助项目(60875052)

作者简介: 陈伟,博士生,江苏科技大学讲师,主要从事机器人控制技术研究,E-mail: cwtangya@yahoo.com.cn

出对复杂曲面分片处理,给出了具体的分片原则以及喷涂路径的规划方法,但并未考虑涂层均匀性和喷涂时间的优化问题,无法进一步提高喷涂机器人的工作效率。赵德安^[5]等提出采用遗传算法(GA)对喷涂机器人喷枪轨迹进行优化,但该方法只能在一定程度上提高喷涂效率,而不能提高喷涂效果,且该方法没有经过喷涂试验论证。李发忠^[6]等提出采用改进遗传算法对喷涂机器人轨迹进行分段优化,该方法可以提高具有凹凸结构的复杂表面上的喷涂效果,但不能显著提高喷涂效率。

针对上述问题,本文提出一种复杂曲面上喷涂机器人喷枪轨迹优化方法。在对复杂曲面分片后,对每片上的喷枪轨迹进行优化,而后采用改进的蚁群算法(ACO)对喷枪轨迹优化组合问题进行求解,并进行仿真和试验研究。

1 复杂曲面分片及每片上的喷枪轨迹优化

研究喷涂机器人喷枪轨迹优化的第一步就是要建立喷涂模型。喷涂模型的函数表达式可使用数学解析法进行推导,也可利用试验数据推出。一般前者建立的数学模型中的函数要比后者光滑,但表达式相对较为复杂;而后者通过一些离散数据建立的数学模型函数表达式虽然只是对实际情况的一种逼近,但表达式比较简单,在工件表面比较复杂的情况下,使用后一种方法建立数学模型效果更佳。喷涂模型建立和复杂曲面分片步骤可参考文献^[7]。

平面上的喷涂过程如图 1 所示, d 表示两个喷涂行程的涂层重叠区域宽度, x 表示喷涂半径内某一点 s 到第一条路径的距离, R 为喷涂半径, s' 为 s 点在路径上的投影, O 点为喷枪中心投影点, v 表示喷枪速度。点 s 的涂层厚度可表示为^[7]

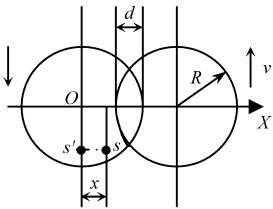


图 1 平面上喷涂示意图

Fig. 1 Paint accumulation on a plane

$$q_s(x,d,v) = \frac{1}{v}J(x,d) \tag{1}$$

假设 q_d 为理想涂层厚度,为了使工件表面涂层厚度尽可能均匀,取 s 点的实际涂层厚度与理想涂层厚度之间的方差为优化目标函数^[7]

$$\min_{d \in [0,R], v} E_1(d,v) = \int_0^{2R-d} (q_d - q_s(x,d,v))^2 dx \tag{2}$$

显然,式(2)中有两个优化变量 d 和 v ,在优化过程中会影响计算速度。由于最大涂层厚度 $q_{\max}$ 和

最小涂层厚度 $q_{\min}$ 决定了工件表面上涂层厚度的均匀性,因此, $q_{\max}$ 和 $q_{\min}$ 也需要进行优化

$$\min_{d \in [0,R], v} E_2(d,v) = (q_{\max} - q_d)^2 + (q_d - q_{\min})^2 \tag{3}$$

由式(1)~(3)可得

$$\min_{d \in [0,R], v} E(d,v) = \frac{1}{2R-d}E_1(d,v) + E_2(d,v) \tag{4}$$

又由式(1),最大涂层厚度和最小涂层厚度表达式可写为

$$\begin{cases} q_{\max} = \frac{1}{v}J_{\max}(d) \\ q_{\min} = \frac{1}{v}J_{\min}(d) \end{cases} \tag{5}$$

令 $\frac{\partial E(d,v)}{\partial v} = 0$,由式(1)、(4)、(5)可得

$$v = \frac{\frac{1}{2R-d} \int_0^{2R-d} J^2(x,d) dx - J_{\max}^2(d) - J_{\min}^2(d)}{q_d \left[\frac{1}{2R-d} \int_0^{2R-d} J(x,d) dx + J_{\max}(d) + J_{\min}(d) \right]}$$

由此看出,喷枪速率 v 可表示成 d 的函数,因此, $E(d,v)$ 的最小值只和 d 有关。可采用黄金分割法^[8]求出 d 优化值,从而可得到每一片上的优化轨迹。曲面分片后,每片上优化后的 d 和 v 都应保持不变,但为了保证两片交界处涂层厚度的均匀性,接近交界线处的喷枪速率 v 也需要优化。

2 喷枪轨迹优化组合

为简化喷枪轨迹组合问题,可将每一片上的轨迹看成是一条边,并用一个无方向的连接图 $G(V, E, B, \omega; E \rightarrow Z^+)$ 表示喷枪轨迹优化组合(tool trajectory optimal integration,简称 TTOI)问题。其中 V 表示顶点集, E 表示边集, B 表示 E 的任意一个子集, ω 表示边的权(实际喷枪轨迹的长度)。TTOI 问题就是在图 G 中求出一条经过所有边且只经过一次的具有最短距离的回路。设 $D = \{d_{ij}\} (i,j = 1,2, \dots, n)$ 是由图 G 中不在同一条边上的顶点 i 和顶点 j 之间的最短轨迹所组成的集合,且各顶点间的最短距离矩阵可使用 Floyd 算法算出。图 2 所示的是一个有 5 条边的连接图 G ,图中实线表示边,虚线表示从一个顶点到其他任意一个不在同一条边上的顶点的轨迹(图中没有画出所有可能的轨迹)。

采用改进的蚁群算法(ACO)求解 TTOI 问题。算法初始,建立以下个体信息:未访问的顶点列表(not visited vertices,简称 NVV),已访问的顶点列表(visited vertices,简称 VV),未访问的边列表(not visited edges,简称 NVE),已访问的边列表(visited edges,简称 VE),蚂蚁走过的轨迹长度(tour length,简称 TL)。借助种群的记忆功能,这些个体信息在

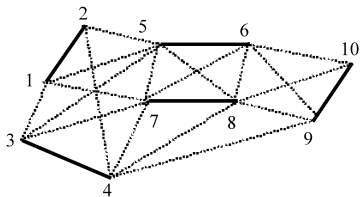


图2 具有5条边的连接图 *G*
Fig.2 Graph *G* with 5 edges

进化过程中不断动态调整。以图2所示的连接图 *G* 为例,若蚂蚁1在顶点1处时算法开始,则初始化信息为

$$\begin{aligned} \text{NVV}[1] &= \{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10\} & \text{VV}[1] &= \{\} \\ \text{NVE}[1] &= \{(1,2),(3,4),(5,6),(7,8),(9,10)\} \\ \text{VE}[1] &= \{\} & \text{TL}[1] &= 0.0 \end{aligned}$$

算法中,蚂蚁 *k* 从顶点 *x* 向其他可行顶点转移的转移概率保持不变,而经过时间 Δt 后,轨迹(*i,j*)上的信息素 $\tau_{ij}(t)$ 、信息素增量 $\Delta\tau_{ij}$ 、第 *k* 只蚂蚁在搜索过程中在轨迹(*i,j*)上的信息素 $\Delta\tau_{ij}^k$ 均需要进行调整^[9-10]。由此,TTOI问题的蚁群算法步骤为:

Step1 初始化。令时间 $t=0$,循环次数 $N=0$,设置最大循环次数 $N_{\max}$; $\tau_{ij}(t)$ 、 $\Delta\tau_{ij}$ 初始化;设定转移概率中影响权值 α 、 β 、常数 *Q* 以及信息素挥发率 ρ ;顶点数为 *m*,每个顶点放置一只蚂蚁,同时为每只蚂蚁建立个体信息。

Step2 循环次数 $N \leftarrow N+1$ 。

Step3 蚂蚁数目 $k \leftarrow k+1$ 。蚂蚁个体根据转移概率式计算的概率选择顶点 *j* 并前进, $j \in \text{allowed}_k$ 。

Step4 若 $k < m$,则跳转至 Step3,否则转至 Step5。

Step5 根据轨迹(*i,j*)上的信息素和轨迹(*i,j*)上信息素的增量更新每条轨迹上的信息量。

Step6 若 $N \geq N_{\max}$,循环停止,输出计算结果,否则更新蚂蚁个体信息并跳转至 Step2。

3 仿真

运用 Matlab 语言编制了喷涂机器人喷枪轨迹优化组合问题的蚁群算法程序。假设一个复杂曲面工件被分为5片,则连接图 *G* 中的边数为5,顶点数 $m=10$ 。算法中各个参数选择如下: $\alpha=1$, $\beta=5$, $\rho=0.5$, $Q=100$,最大循环 $N_{\max}=100$ 。图3所示的是算法中得出的最优解的进化曲线,从图中可看出喷涂轨迹长度随进化过程呈单调下降趋势,最后趋于定值;在进化大约70代后,轨迹长度基本不再变化,算法收敛。

4 试验

设理想涂层厚度为 $q_d=50\text{ }\mu\text{m}$,涂层厚度最大

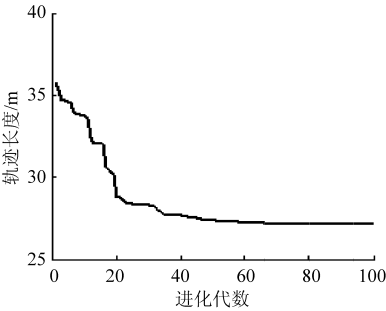


图3 仿真结果图形
Fig.3 Simulation results

允许偏差为 $q_w=10\text{ }\mu\text{m}$,喷枪喷出的圆锥形涂料底面半径 $R=60\text{ mm}$ 。通过平板上的喷涂试验数据得到涂层累积速率($\mu\text{m/s}$)为

$$f(r)=\frac{1}{15}(R^2-r^2) \tag{6}$$

生成并优化平板上的喷枪轨迹后,得到喷涂机器人喷枪速率(匀速)和每两个喷涂行程的涂层重叠区域宽度分别为: $v=256.3\text{ mm/s}$, $d=50.2\text{ mm}$ 。

试验工件如图4所示。在获取工件 CAD 数据后,将工件进行三角网格划分。按照图5所示构建采样点的网格,则对于任一采样点,以其为顶点的三角面片有1、2、3或6个,可由下式计算出每个采样点的单位法矢量 $\boldsymbol{n}$: $\boldsymbol{n}=\sum_0^5\sigma_i\boldsymbol{n}_i$ 。其中, *i* 为三角网格中三角面片编号, σ_i 为权重, $\boldsymbol{n}$ 为该三角面片单位法矢量。图6即为划分完成的工件三角网格图形(允许误差2 mm)。



图4 试验工件
Fig.4 A workpiece

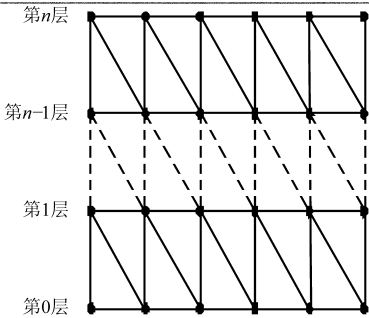


图5 采样点网络构造

Fig.5 Construction of sampling point network

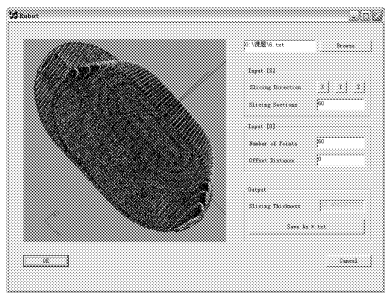


图 6 工件三角网格

Fig. 6 Triangular approximation of a workpiece

试验中,设喷枪到工件表面垂直距离为 H ,喷枪轨迹参数采用偏置算法获取^[11]。对任一点 Q_i 沿法矢量 $\boldsymbol{n}_i$ 方向偏置距离 H ,即可得到点 Q_i 的偏置点 $\bar{Q}_i$,其表达式为: $\bar{Q}_i = Q_i + H\boldsymbol{n}_i$ 。点 $\bar{Q}_i$ 包含坐标值和单位法矢量 $\boldsymbol{n}_i$ 两种信息,即得到了喷枪在点 $\bar{Q}_i$ 的运行位置(坐标值)和方向(与 $\boldsymbol{n}_i$ 方向相反)。用同样的方法遍历采样点集 Q_i 中所有的点就可得到偏置点系 $\bar{Q}$,从而整个点系 $\bar{Q}$ 包含的信息就代表了喷枪在喷涂过程中所在运行曲面上的轨迹参数(位置和方向)。喷枪轨迹优化算法中各个喷涂参数设置如下:理想涂层厚度 $q_d = 50 \times 10^{-6}$ mm,最大允许偏差厚度 $q_w = 10 \times 10^{-6}$ mm,喷涂半径 $R = 60$ mm,喷涂

距离 $H = 100$ mm,匀速喷涂时 $v = 256.3$ mm/s,优化喷涂时以 $v = 256.3$ mm/s 作为算法迭代的初始值,该复杂曲面工件被分为 5 片,蚁群算法中参数设置为: $m = 10, \alpha = 1, \beta = 5, \rho = 0.5, Q = 100, N_{\max} = 100$ 。采用江苏大学自主研发的喷涂机器人离线编程系统分别以优化轨迹喷涂和非优化轨迹喷涂两种情况进行喷涂试验。离线编程系统中复杂曲面工件上部分非优化喷涂轨迹如图 7a 所示,其对应部分的优化喷涂轨迹如图 7b 所示。图 8a 为喷涂试验过程。喷涂后采用涂层测厚仪在工件上均匀测取 200 个离散点的涂层厚度。以优化轨迹喷涂后的采样点的涂层厚度如图 8b 所示。试验中,作者又分别采用文献[5~6]中的遗传算法(GA)和改进遗传算法对喷涂机器人轨迹优化组合问题进行求解,并进行了喷涂试验,其试验结果数据如表 1 所示。由此可看出,采用了 ACO 算法的优化轨迹喷涂不仅涂层的均匀性更佳,而且节约时间,与非优化轨迹喷涂相比,对此复杂曲面工件的喷涂时间节约了 20%。采用了 GA 算法的优化轨迹喷涂虽然能提高喷涂效率,但喷涂质量却不能显著提高;而采用改进 GA 算法的优化轨迹喷涂虽然能提高涂层均匀性,但不能显著提高喷涂效率。

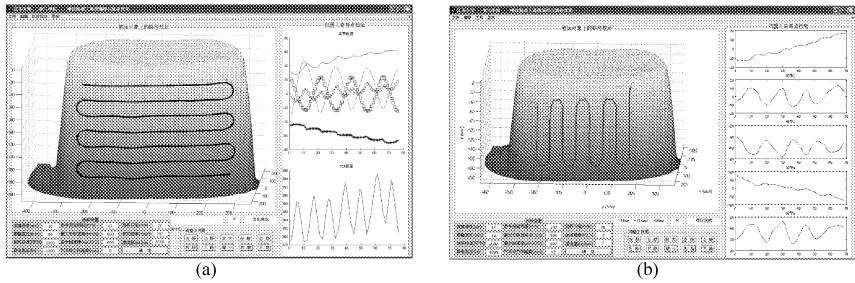


图 7 喷涂轨迹

Fig. 7 Spray trajectory

(a) 非优化轨迹 (b) 优化轨迹

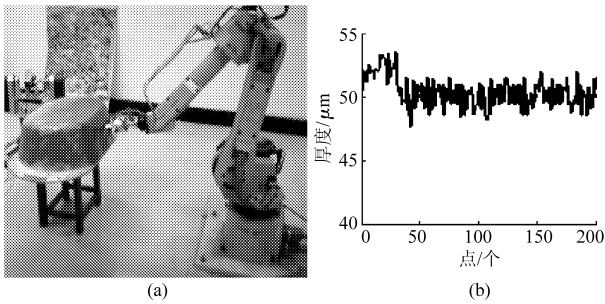


图 8 喷涂试验过程

Fig. 8 Spray painting

(a) 机器人喷涂试验 (b) 优化轨迹涂层厚度

5 结论

(1)复杂曲面分片后,每片上的喷枪轨迹进行优化时,两个喷涂行程的涂层重叠区域的宽度是涂

层厚度均匀性优化的决定因素。

(2)使用改进蚁群算法对复杂曲面上喷涂机器人喷枪轨迹优化组合问题进行求解,仿真结果表明,该算法的全局性和收敛速度都能达到满意的效果。

表 1 试验结果比较

Tab. 1 Comparison of the experimental results of robotic spray painting

测试数据	采用 ACO	非优化	采用 GA	采用改进
	的优化 轨迹	轨迹	的优化 轨迹	GA 的优化 轨迹
平均厚度/ μm	49.4	49.2	49.3	49.4
最大厚度/ μm	53.6	58.7	58.5	53.8
最小厚度/ μm	47.3	42.5	42.7	47.2
轨迹总长度/m	27.6	29.8	28.4	29.2
喷涂时间/s	89	112	94	103

(3)喷涂试验表明本文提出的采用了蚁群算法的复杂曲面上喷涂机器人喷枪轨迹优化具有明显的优越性。在满足涂层厚度均匀性要求的同时,又提

高了喷涂机器人的喷涂效率,从而为改进喷涂机器人离线编程系统打下基础。

参 考 文 献

1 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 for robotic spray painting of free-form surfaces[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1):147~150. (in Chinese)

2 Sheng W H, Xi N, Song M, et al. Automated CAD-guided robot path planning for spray painting of compound surfaces [C] //Proceedings 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Tankamutsa, Japan; 2000,3: 1 918~1 923.

3 Chen H P, Xi N, Chen Y. Cad-guided spray gun trajectory planning of free-form surfaces in manufacturing [J]. Journal of Advanced Manufacturing Systems, 2003, 2(6): 47~69.

4 Sheng W H, Chen H P, Xi N. Tool path planning for compound surfaces in spray forming processes [J]. Automation Science and Engineering, 2005, 2(6): 240~249.

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 李发忠,赵德安,张超,等.基于CAD的喷涂机器人轨迹优化[J].农业机械学报,2010,41(5):213~217.
Li Fazhong,Zhao Dean,Zhang Chao, et al. Trajectory optimization of spray painting robot based on CAD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(5):213~217. (in Chinese)

7 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)

8 黄红选,韩继业.数学规划[M].北京:清华大学出版社,2006:150~155.

9 刘砚菊,杨青川,辜吟吟.蚁群算法在机器人路径规划中的应用研究[J].计算机科学,2008,35(5):263~265.
Liu Yanju, Yang Qingchuan, Gu Yinyin. Research of ant colony algorithm for mobile robot path planning [J]. Computer Science, 2008, 35(5):263~265. (in Chinese)

10 张美玉,黄翰,郝志峰,等.基于蚁群算法的机器人路径规划[J].计算机工程与应用,2005,41(25):34~37.
Zhang Meiyu, Huang Han, Hao Zhifeng, et al. Motion planning of autonomous mobile robot based on ant colony algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2005, 41(25):34~37. (in Chinese)

11 李发忠,赵德安,姬伟,等.喷涂机器人空间轨迹到关节轨迹的转换方法[J].农业机械学报,2010,41(11):198~201.
Li Fazhong, Zhao Dean, Ji Wei, et al. Conversion method from cartesian space trajectory to joint trajectory of spray painting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(11):198~201. (in Chinese)