

基于蚁群算法的喷涂机器人喷枪路径规划*

陈伟^{1,2} 赵德安¹ 平向意²

(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)

Tool path planning of robotic spray painting based on ant colony algorithms

CHEN Wei^{1,2} ZHAO De-an¹ PING Xiang-yi²

(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)

【摘要】根据复杂曲面的几何特性,对曲面进行分片处理,并建立喷枪路径的评价函数,在每一片上进行喷涂机器人喷枪路径的规划。为了使喷涂机器人喷涂作业的时间最短,将整个面上的喷枪路径优化组合问题看成乡村邮递员问题(ORPP),并利用改进的蚁群算法求解ORPP问题。算法中通过在进化过程中动态调整蚂蚁的个体信息,激励蚁群搜索可行空间并发现最优解集。最后以一个复杂曲面工件为喷涂对象进行喷涂实验,结果证明了改进的蚁群算法比一般性随机算法效果更佳。

关键词 喷涂机器人 路径规划 蚁群算法 路径组合

【Abstract】A complex curved surface has to be divided into several patches and path planning for each patch is performed. The path integration problem can be modeled as the open rural postman problem (ORPP) and an ant colony algorithm is advanced to solve the ORPP. Initially, each ant initializes individual information and the information will be changed with the evolution. Experiments are carried out on automotive body part which results proves to be better comparing with those of a genetic algorithm and a random path integration algorithm.

Key words Robotic spray painting Path planning Ant colony algorithms Path integration

中图分类号:TH16, TP24 文献标识码:A

1 引言

喷涂机器人喷枪路径规划是喷涂机器人离线编程法中的关键技术。以平面或规则曲面为作业对象的喷涂机器人喷枪路径规划方法已逐渐成熟,并得到了实验论证^[1-4]。近年来,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路径的规划已成为国内外新的研究热点。文献^[5-7]提出将复杂曲面分片处理后在每一片上进行喷枪路径规划的方法,但并未考虑每片上的喷枪路径优化组合问题,无法进一步提高喷涂机器人的工作效率。

前人研究成果的基础上,重点研究了复杂曲面分片后的喷枪路径优化组合问题,采用蚁群算法(ant colony optimization algorithms, ACO)对该问题进行求解,并进行了实验分析,实现了喷涂机器人喷枪路径的优化。

2 喷涂机器人喷枪路径规划方法

2.1 复杂曲面分片

许多复杂曲面有以下两个特点:(1)曲面是一个复连通区域;(2)曲面上某些点的曲率比较大。

这两种情况下使用一般的CAGD中曲面造型方法是很难处理的,但如果采用曲面分片的方法,就可以使问题简化。为了高效率地生成复杂曲面上的喷枪路径,首先对复杂曲面进行三角网格划分,再按照相邻三角片(面)之间的连接规则生成若干较大的

片,并保证每个片为单连通区域且可近似看为一个平面,最后在每个较大的片上使用“bounding box”法生成喷枪路径^[5]。

2.2 每片上的喷枪路径规划

喷涂机器人喷枪路径通常有两种模式:Z字形路径和螺旋形路径^[8]。如图1所示,是同一个平面上不同的路径模式和喷枪走向。其中(a)、(b)、(c)是Z字型路径,(d)是螺旋形路径。复杂曲面分片后,可按照每一片上不同的路径模式和喷枪走向建立喷枪路径的评价函数,并以评价函数值最大为优化目标,选出最佳喷枪路径模式和走向。

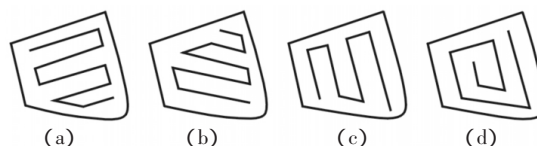


图1 同一片上的不同路径模式和走向

喷涂机器人喷涂作业的优化目标之一是尽可能使工件表面上的涂层厚度 q 均匀,因此,喷到工件表面上的涂料需要部分重叠。采用“bounding box”法设计喷枪路径时,确定两个喷涂行程的涂层重叠区域宽度 d 是生成喷枪路径的关键因素,在完成喷枪路径模式和走向设计后,可选取工件表面上涂层厚度方差最小为优化目标,利用黄金分割法解出 d 的优化值,最终生成每片上的喷枪路径^[6-7]。

* 来稿日期:2010-09-18 * 基金项目:国家自然科学基金(60875052)

3 喷枪路径的优化组合

3.1 喷枪路径组合问题

喷涂机器人喷涂作业的一个优化目标是使喷涂时间最短。复杂曲面分片后,将每一片上的路径看成是一条边。喷枪路径组合问题的实质就是喷枪依照怎样的顺序喷涂每一片,使得喷枪经过的路径最短。因此,可将喷枪路径组合问题看成乡村邮递员问题(Rural Postman Problem,简称RPP)^[9]。假设一个无方向连接图 $G(V, E, R, \rho; E \rightarrow Z^+)$,其中 V 表示顶点集, E 表示边集, R 表示 E 的任意一个子集, ρ 表示边的权(实际喷枪路径的长度)。RPP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。由于喷涂机器人喷枪路径组合不需要形成回路,故可将喷枪路径组合问题定义为ORPP(Open-RPP)问题。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 之间的最短路径所组成的集合,而各个顶点间的最短距离矩阵可使用Floyd算法算出^[10]。

3.2 蚁群算法求解ORPP问题

算法初始,每只蚂蚁都需建立个体信息。借助于种群的记忆功能,这些个体信息在进化过程中将会不断动态调整。每只蚂蚁在从顶点 i 到顶点 j 的运动过程中,都会在路径 (i, j) 上释放信息素。经过时间 Δt 后,各条路径上的信息素按下式调整:

$$\tau_{ij}(t+\Delta t) = \rho \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij} \quad (1)$$

式中 ρ —信息素挥发率; $\tau_{ij}(t)$ — t 时刻路径 (i, j) 上信息素存积量;

$\Delta \tau_{ij}$ —经过时间 Δt 路径 (i, j) 上信息素的增量,可按下式

$$\text{计算: } \Delta \tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k \quad (2)$$

式中 $\Delta \tau_{ij}^k$ —第 k 只蚂蚁在搜索过程中在路径 (i, j) 上的信息素,可表示为:

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{TL[K]}, & \text{ant } k \text{ pass path}(i, j) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

式中 Q —体现蚂蚁所留轨迹数量的一个常数。初始化时各个路径上的信息素为 $\Delta \tau_{ij}=0$ 。在 t 时刻,蚂蚁 k 从顶点 x 向其它可行的顶点转移,对应的转移概率可定义为:

$$P_{ij}^k = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij}(t))^\alpha (\eta_{ij}(t))^\beta}{\sum_{s \in allowed_k} (\tau_{is}(t))^\alpha (\eta_{is}(t))^\beta}, & j \in allowed_k \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (4)$$

式中 η_{ij} —路径 (i, j) 上的能见度,反映由顶点 i 到顶点 j 的启发程

度,这里令 $\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}$, d_{ij} —顶点 i 与顶点 j 之间的距离,参数 α

和 β 分别表示 $\tau_{ij}(t)$ 和 $\eta_{ij}(t)$ 对整个转移概率的影响权值; $allowed_k$ —蚂蚁 k 在顶点 i 处的可行邻域(即列表NVE中边的端点)。

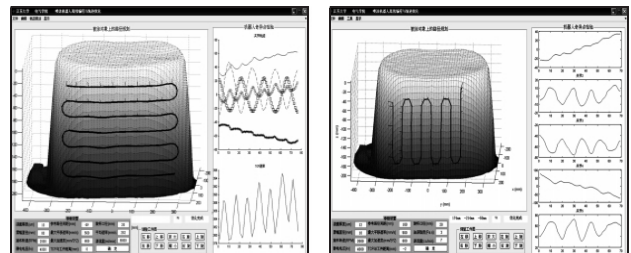
ORPP问题的蚁群算法过程为:(1)初始化。令时间 $t=0$,循环次数 $N=0$,设置最大循环次数 N_{\max} , $\tau_{ij}(t)$ 、 $\Delta \tau_{ij}$ 初始化,设定参数 α, β, ρ, Q ,顶点数为 m ,每个顶点放置一只蚂蚁,同时为每只蚂蚁建立个体信息。(2)循环次数 $N \leftarrow N+1$ 。(3)蚂蚁数目 $k \leftarrow k+1$ 。(3),蚂蚁个体根据转移概率式(4)计算的概率选择顶点 j 并前进, $j \in$

$allowed_k$ 。(4)若 $k < m$,则跳转至(3),否则转至(5)。(5)根据式(1)和式(2)更新每条路径上的信息量。(6)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(2)。

4 实验研究

设理想涂层厚度为 $q_d=50\mu\text{m}$,涂层厚度最大允许偏差为 $q_w=10\mu\text{m}$,喷枪喷出的圆锥形涂料底面半径 $R=50\text{mm}$ 。通过平板上的喷涂实验数据得到涂层累积速率为 $f(r)=\frac{1}{15}(R^2-r^2)\mu\text{m/s}$ 。生成并优化平板上的喷枪路径后,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 $v=236.3\text{mm/s}$, $d=45.2\text{mm}$ 。

实验中选取复杂曲面工件作为喷涂对象。优化算法中各喷涂参数设置如下:理想涂层厚度 $q_d=50 \times 10^{-6}\text{mm}$,最大允许偏差厚度 $q_w=10 \times 10^{-6}\text{mm}$,喷涂半径 $R=50\text{mm}$,喷涂距离 $H=100\text{mm}$,匀速喷涂 $v=236.3\text{mm/s}$,优化喷涂以 $v=236.3\text{mm/s}$ 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 $m=10$, $\alpha=1$, $\beta=5$, $\rho=0.5$, $Q=100$, $N_{\max}=100$ 。采用自主研发的喷涂机器人离线编程系统分别以优化路径喷涂和非优化路径如图2(a)所示,其对应部分的优化喷涂路径如图2(b)所示。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。实验结果数据如表1所示。由此可看出,采用了ACO算法的优化路径喷涂不仅涂层的均匀性更佳,而且更节约时间,与非优化路径喷涂相比,对此复杂曲面工件的喷涂时间节约了20%。



(a)非优化路径

(b)优化路径

图2 非优化路径、优化路径简图

表1 试验结果比较

	采用 ACO 的优化路径	非优化路径
平均厚度(μm)	49.5	49.1
最大厚度(μm)	53.6	58.7
最小厚度(μm)	46.6	41.8
轨迹总长度(m)	27.4	29.7
喷涂时间(s)	88	113

5 结论

针对复杂曲面上的喷涂机器人喷枪路径优化组合问题的特点,使用改进的蚁群算法进行求解。仿真实验表明基于蚁群算法的喷涂机器人喷枪路径优化组合方案具有明显的优越性,提高了喷涂机器人的喷涂效率,为建立新型喷涂机器人离线编程系统奠定了基础。

提出的算法还可以用于其他类型机器人路径规划,例如机器人研磨复杂曲面的路径规划、复杂曲面上的清洁机器人路径规划等等。

长环形驻波直线超声电机振子有限元分析*

王宏祥 马园园 何 勃

(辽宁工业大学 振动工程研究所,锦州 121001)

Finite element analysis of vibrator for long ring standing wave linear ultrasonic motor

WANG Hong-xiang MA Yuan-yuan HE Qing

(Institute of Vibration Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

【摘 要】提出了一种长环形直线驻波超声电机振子,并对该超声电机振子进行了研究。利用有限元分析软件对振子的工作模态进行了分析,阐述了振子的工作原理。对支撑结构、影响振子振动模态固有频率的主要结构参数,进行了数值分析,确定了振子的结构形式。振子与支撑结构采用柔性铰链连接,利用第18阶正交的两个面内弯曲模态工作,实现了电机振子双接触面驱动、正反两个方向运动。证明了该类振子利用面内弯曲振动模态可以实现双面驱动、正反双向直线运动。为环型驻波直线超声电机的设计提供了理论参考。

关键词 超声电机 驻波 直线电机 压电驱动 环梁 双接触面

【Abstract】 A long ring vibrator of standing wave ultrasonic motor is presented and is studied. With FEM software the working mode of the vibrator is analyzed which reveals the working principle of the vibrator. Numerical analysis for supporting structure and the structure parameters which affect the intrinsic frequency of vibrator's vibrating mode is conducted hence the structure of the vibrator is determined. There are two contact surfaces of the vibrator which are connected to the support parts by flexure hinges and works by utilizing a pair of incurved modes of the eighteenth orthogonal to realize bi-contact surfaces driving of the vibrator with forward and backward movement. It is proved that with in-plane bending mode of vibration ring type vibrator may accomplish bi-contact surfaces driving and forward-backward linear movement. Therefore theoretical reference for the designing of linear movement standing wave ultrasonic motor with ring type vibrator is provided.

Key words Ultrasonic motor Standing wave Linear motor Piezoelectric driving Ring beam Bi-contact surface

中图分类号:TH16 TM359.4 文献标识码:A

1 引言

直线超声波电机是一种利用逆压电效应将电能转化为机械能的新型电机,能直接产生直线运动和直接输出推力。

具有控制性能好,可步进、伺服工作,容易同计算机接口相

连,实现智能化和机电一体化,无需运动转换机构可以直接驱动等优点。

驱动振子为超声电机的关键部件,通过工作模态、结构形式变换组合,出现了各种样式的直线超声电机,已在精密仪器仪表、

* 来稿日期:2010-09-11 * 基金项目:辽宁省教育厅基金项目(20060408)

参考文献

- [1] Antonio J K. Optimal Trajectory Planning Problems for spray coating [C]// Proceedings of the 1994 IEEE Int'l Conference on Robotics and Automation, USA, 1994: 2570-2577.
- [2] 王振滨, 赵德安, 王熹, 等. 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): 78-82.
- [3] 刁训娣, 赵德安, 李惠民, 等. 喷漆机器人喷枪轨迹设计及影响因素研究[J]. 机械科学与技术, 2004(4): 396-398.
- [4] Antonio J K, Ramabhadran R, Ling T L. A framework for trajectory planning for automated spray coating [J]. International Journal of Robotics and Automation, 1997, 12(4): 124-134.
- [5] Sheng W H, Xi N, Song M. Automated cad-guided robot path planning for spray painting of compound surfaces [C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Japan: Tankamutsa, 2000: 1918-1923.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Kao J H, Prinz F B. Optimal motion planning for deposition in layered manufacturing [C]. Proceedings of 1998 ASME Design Engineering Technical Conferences, USA: Atlanta, 1998: 1-10.
- [9] Cook C, Schoenefeld D A, Wainwright R L. Finding rural postman tours [C]. Proceedings of the 1998 ACM symposium on applied computing, USA: Atlanta, 1998: 318-326.
- [10] 黄红选, 韩继业. 数学规划[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 150-155.