

基于蒙特卡罗方法的除冰机器人作业空间边界提取

印 峰, 王耀南, 余洪山

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 设计了一种输电线路除冰机器人的机械结构, 分析了该机构的作业空间问题. 在计算过程中, 引入Monte Carlo方法得到了机器人操作臂的工作空间. 采用该方法可避免对机器人运动方程的求逆解计算, 极大地简化了计算过程. 分析并指出传统的机器人工作空间边界提取方法精度有限, 且存在理论上的缺陷; 提出了一种新的基于局部点象限分布的边界点提取方法, 文中给出的算例表明, 该方法不仅精度高, 并且非常适合于处理机器人工作空间边界问题.

关键词: 输电线; 除冰机器人; 工作空间; 蒙特卡罗方法

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A

Workspace boundary extraction of de-icing robot based on Monte Carlo method

YIN Feng, WANG Yao-nan, YU Hong-shan

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China)

Abstract: A mechanical configuration is designed for the de-icing robot of high voltage power transmission lines; the workspace of the manipulator is analyzed and generated by using the Monte Carlo method. Since the method involves no inverse calculation of manipulator kinematics, it greatly simplifies the calculation and improves the calculation efficiency. The analysis shows that traditional methods of extracting workspace boundary are inaccurate and with theoretical defects. We advance a new method based on the local point quadrant pattern. The results show that this method is accurate enough for extracting the workspace boundary of the robot.

Key words: over-head line; de-icing robot; workspace; Monte Carlo method

1 引言(Introduction)

和传统的除冰方法相比, 采用机器人除冰具有功耗小、成本低、效率高、人员无伤亡、无需停电和可连续作业等优点. 作为一种可替代人工作业的输电线路在线除冰技术, 其发展前景非常广泛^[1~3]. 图1所示为除冰机器人现场运行模拟图, 为了顺利沿输电线行走和完成线路除冰, 机器人需要跨越输电线路路上出现的各种复杂障碍物.

机器人的工作空间定义为末端执行器在结构限制条件下所能达到的所有位置的集合, 它是衡量除冰机器人越障能力的一个重要指标. 为了便于分析, 首先需要确定机器人的工作空间范围. 目前较为常用的方法是解析法和数值分析法. 解析法是基于Jacobian矩阵计算运动学逆解以确定机器人工作空间的方法. 由于计算的复杂性, 该方法只能处理某些特定结构的机器人工作空间问题^[4,5]. 相比之

下, 采用数值分析法更为灵活、简便, 其中最具代表性的是文献[6,7]提出的基于随机概率的蒙特卡罗计算方法. 由于该方法无需对机器人运动方程进行求逆计算, 因此非常适合于分析机器人工作空间问题. 但是, 采用蒙特卡罗方法只能得到机器人工作空间的近似图形描述. 为了便于计算和分析工作空间大小, 文献[8]采用栅格法提取了机器人工作空间边界点, 并借助最小二乘拟合的方法求得了工作空间边界曲线的解析表达式. 但是, 文献[8]提出的边界点提取方法精度有限, 采用该方法提取的边界点只是实际边界点的一种近似表示. 文献[9]采用分段求极值的方法虽然能够准确的提取出边界点, 但由于算法本身的限制, 无法确定所有边界点的位置分布. 另外, 通过下文的分析可知, 即使成功提取到了所有的工作空间边界点, 采用上述两种方法处理机器人工作空间问题仍存在缺点和不足.

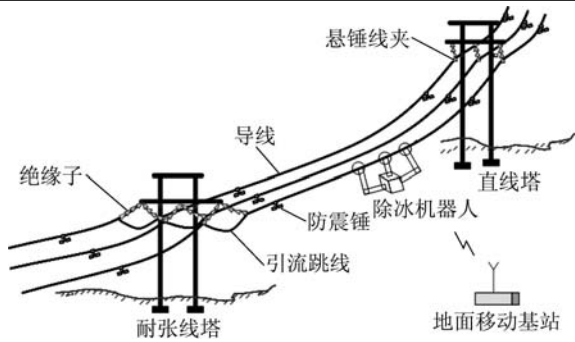


图1 除冰机器人运行模拟

Fig. 1 De-icing robot running simulation

本文将采用蒙特卡罗方法对设计的一种三臂式除冰机器人作业空间问题进行分析,同时对机器人工作空间边界点的提取问题进行详细的讨论。

2 除冰机器人本体机构设计(Structure design of de-icing robot)

由于除冰作业的环境非常恶劣,对机器人本体机构可靠性和运行的稳定性要求很高。本文在综合考虑了国内外现有较为成熟的巡线机器人方案的基础上^[1~3],设计了一种三臂式除冰机器人结构,如图2所示,机器人本体部分由3个灵巧机械臂和中间箱体组成:前、后臂结构相同,分别由大、小臂和末端夹持器组成,大臂与箱体连接处为肩关节,根据越障需要可实现左右和上下灵活转动;小臂为升缩手臂,其长度可调,大臂和小臂连接处为肘关节,根据需要可上下转动;中间手臂为升缩臂。各手臂末端为复合夹持机构,同时具备驱动、夹持和除冰等功能,其内部结构如图3所示。夹持机构设计成可左右开合的结构,输电线从夹持器中间穿过,其前后水平横梁装有挂线滚轮,以便于机器人挂线行走,同时可降低夹持器对导线的磨损。水平横梁随夹持器开合,在闭合时利用楔子牢固连接两端,可起到防摔落作用。夹持器内部设计有4个竖直的滚筒机构。后端的一对为驱动滚筒,其表面选用具有一定弹性、摩擦系数大的耐磨材料制成,通过紧压电线,可实现制动、行走等功能。前端的一对为除冰滚筒,其横截面做成突齿结构,可实现碾压式除冰的功能,为防止除冰时损伤电线,除冰滚筒外部间距略大于电线外径。两组滚筒中间装有扫冰刷,用来扫除电线上的残余碎冰。另外,在夹持器前端装有除冰锤,通过一个电子凸轮机构拉动弹簧带动除冰锤反复快速敲击覆冰,在一定程度上把覆冰击碎或击松,提高整个机构的除冰效率。夹持器与手臂的连接处为腕关节,用于机器人夹持机构的姿态调整。中间箱体用于安放电源箱和控制箱。

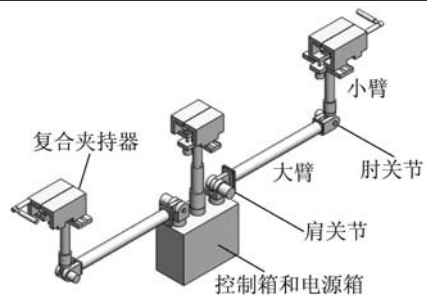


图2 除冰机器人3维结构示意图

Fig. 2 3D Structure of de-icing robot

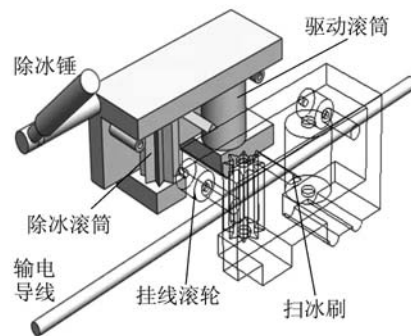


图3 复合夹持器内部结构

Fig. 3 Internal structure of compound gripper

机器人采用悬挂抓线的运动方式。为了保证运行的稳定性,在越障时应确保始终有两个手臂悬挂在线路上。为此,本文设计了三手臂依次脱线越障的方式,其中,中间手臂主要起稳定重心的作用,前、后手臂为越障臂,其末端夹持器所能到达的所有位置的集合即代表了机器人的工作空间。为了便于分析,以肩关节为原点,机器人本体和输电线所在竖直平面为 $X-Z$ 轴,建立如图4所示空间参考坐标系。

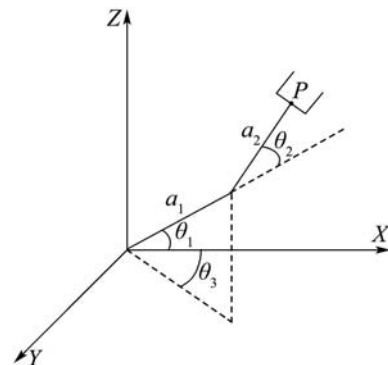


图4 除冰机器人3维操作臂

Fig. 4 3D manipulator of de-icing robot

对于图4所示空间二连杆机构,根据D-H参数法^[10]求得在参考坐标系下用关节变量 θ 表示的工作点 P 的位置向量:

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 (a_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)) \\ \sin \theta_3 (a_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)) \\ a_1 \sin \theta_1 + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (1)$$

由于实际结构的限制, 关节变量 θ_1, θ_2 是在一定范围内变化的; 另外, 为避免除冰机器人作业时损坏输电线路金具器件, 在设计过程中通常对关节量活动范围加以限制以确保一定的安全作业空间。

本文所取的具体参数是: 大臂连杆长度: $a_1 = 50 \text{ cm}$; 伸缩连杆变化范围: $25 \text{ cm} \leq a_2 \leq 70 \text{ cm}$; 肩关节的活动范围: $-\pi/4 \leq \theta_1 \leq \pi/4, -\pi/3 \leq \theta_3 \leq \pi/3$; 肘关节的活动范围: $-\pi/2 \leq \theta_2 \leq \pi/2$ 。

3 基于 Monte Carlo 方法的工作空间求解 (Solving the workspace based on Monte Carlo method)

Monte Carlo方法是一种借助于随机抽样来解决数学问题的数值方法。对于图4的模型, 在变量允许变化范围内, 通过随机抽取的一组变量值 $\{(\theta_1)_i, (\theta_2)_i, (a_2)_i\}$, 可以确定一个工作空间位置坐标值 P_i , 当抽取的样本容量 N 足够大时, 由点集合 $\{P_i\} (i = 1, 2, \dots, N)$ 即可近似的描绘出机器人的工作空间, 并且所取的随机点数目越多, 得到的工作空间就越精确, 形状也越清晰。具体求解步骤为:

Step 1 求机器人的运动学正解, 确定机器人末端执行器在参考坐标系中的位置方程, 如本文式(1)所示;

Step 2 在关节变量的变化范围内, 依次生成 N 个均匀分布的随机值, 从而可得到 N 组变量值的组合;

Step 3 将随机生成的 N 组变量值代入所求得的位置方程, 得到 N 个末端执行器的坐标值, 将其对应的坐标值分别存入指定的矩阵中;

Step 4 将所求得的位置点显示出来, 即形成了机器人手臂工作空间点集的“云图”。图5和图6分别为本文采用Monte Carlo方法求得的除冰机器人前臂在 X - Z 平面和空间平面内的工作空间图形($N = 6000$)。

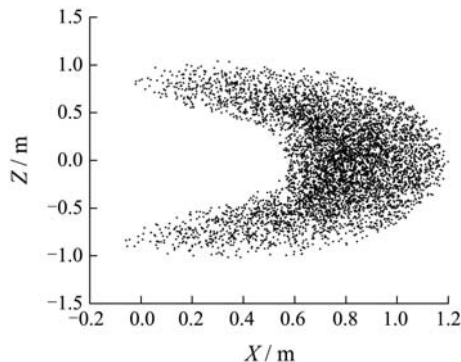


图5 X - Z 平面内工作空间点云

Fig. 5 Point cloud of workspace in X - Z plane

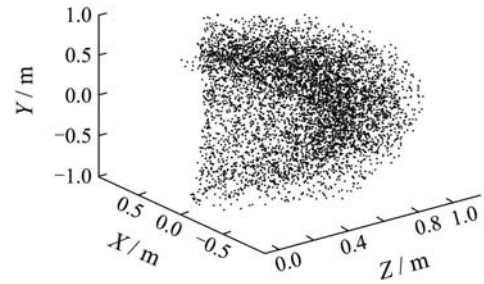


图6 3维空间内工作空间点云

Fig. 6 Point cloud of workspace in 3D plane

4 工作空间边界的提取 (Extracting boundary of workspace)

基于Monte Carlo方法只能得到机器人工作空间的近似图形描述。为了便于计算和分析工作空间的大小, 准确地提取出工作空间的边界点是非常关键的步骤, 目前较为常用的方法是栅格法和极值法^[8,9]。

4.1 栅格法 (Grid method)

如图7所示, 栅格法的主要思想是: 将工作空间划分为 N 个离散的正方形网格, 将每个单元赋0或1; 如果单元包含有工作点, 单元值赋1, 否则赋0。通过分析边界单元的特点, 可得如下判别条件: 如果与目标单元相邻的8个单元至少有1个为0, 同时目标单元为1时, 该单元为边界单元, 此时可以用单元内点集的平均坐标近似的表示边界单元点坐标。

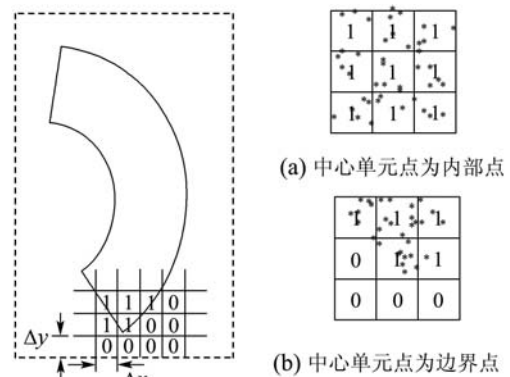


图7 工作空间数字化及边界点判别示例

Fig. 7 Digitization of workspace and boundary point discrimination

显然, 采用栅格法提取到的边界点只是实际边界点的一种近似表示。图8所示为提取的边界点在实际工作空间中可能的3种位置分布(阴影区域为实际工作空间)。

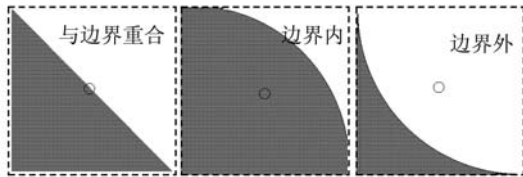


图8 栅格法提取的边界点的3种位置分布
Fig. 8 Distribution of boundary points extracted by grid method

4.2 极值法(Extremum method)

如图9所示,将工作空间按列划分,线段 AB, CD 之间区域为一系列,宽度为 ΔL .找出该区域内 Z 坐标方向上的极大值点 a 和极小值点 d ,这两点即为该区域的上、下两个外边界点.如果该区域存在内边界,通过搜索极值的方法则无法找到内边界点,这时可采用的方法是:将该区域内点 Z 坐标方向按从大到小顺序排列,然后逐点判断两个相邻点沿 Z 方向的差值是否大于预先设定的一个判别值.如果存在大于该判别值的两点,则说明该区域内存在内边界,并且该相邻两点即为内边界点(如图9所示 b, c 两点).

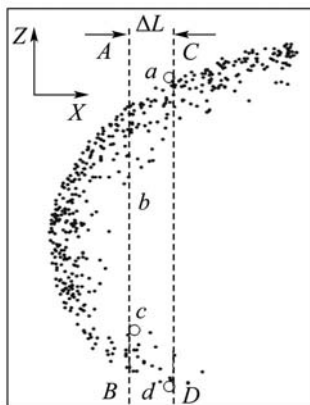


图9 分段取极值提取边界点
Fig. 9 Extracting boundary points by getting extreme value by segmenting

显然,采用分段求极值的方法只能提取部分边界点.如果提高搜索精度(缩小 ΔL),提取到的边界点集就越接近实际边界.但是,即使成功地提取出了所有边界点,仍然难以准确地拟合出机器人工作空间,这主要是由于随机产生的边界点不可能完全拟合实际边界造成的.对于同一段离散边界点,其可拟合成的曲线形式往往是不确定的.分析如下:

图10所示为截取的一段工作空间,点 a, b, c, d 和 e 是该区域内连续相邻的边界点.则描绘机器人工作空间的真实边界曲线形状有可能是如图11所示两种情形之一:1) 真实边界未包含 b, d 两点;2) 真实边界包含 b, d 两点.

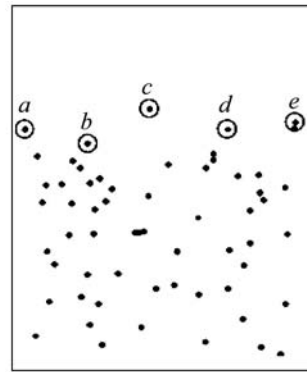


图10 工作空间边界局部放大示意图
Fig. 10 Workspace boundary local amplification

一般来说,机器人末端执行器的工作轨迹在小范围内应是光滑的,比较图11两种情况,左图更真实的反应了机器人实际的工作空间形态,随机产生的边界点 b, d 并未拟合实际边界.因此,在提取和分析机器人工作空间边界问题时,对于类似于 b, d 类型的边界点最好能当成内部点来处理,显然,采用传统的边界点提取方法无法处理这种情况.

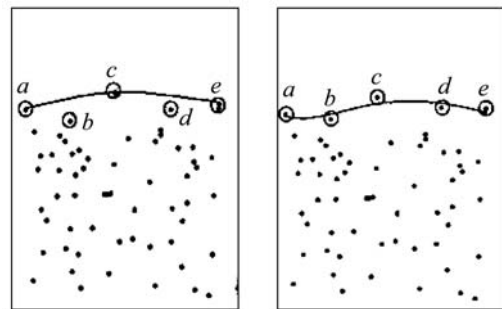


图11 基于相同边界点分布的不同边界曲线解释
Fig. 11 Different explanations of curve based on the same distribution of boundary points

4.3 本文算法(Algorithm developed in this paper)

受到栅格法的启示,本文提出了一种基于局部点象限分布的边界点提取方法.其判别原则为:以待判别的点为原点,建立局部坐标系,通过分析边界点和内部点邻域点分布特点,发现如果该点为边界点,则4个象限至少有1个象限的点分布为空集.具体判别步骤如下:

Step 1 搜索目标点 $i(x_i, y_i)$ 邻域点集: $\{j(x_j, y_j) \mid |i(x_i, y_i) - j(x_j, y_j)| < r\}$, r 为搜索半径;

Step 2 以目标点 $i(x_i, y_i)$ 为原点建立局部坐标系,将邻域点坐标 $\{j(x_j, y_j)\}$ 转化到以目标点为原心的局部坐标系中,并用 $\{j'(x'_j, y'_j)\}$ 表示;

Step 3 根据 $\{j'(x'_j, y'_j)\}$ 坐标符号判别邻域点在局部坐标系中象限分布,如果存在一个及以上象

限点分布为空, 则目标点为边界点; 否则, 目标点为内点。

按照上述步骤逐点判断, 即可找出所有的边界点。由于对每一个实际边界点均进行了处理, 因此, 相对于前述基于区域面的近似提取方法, 本文算法的提取精度更高, 并且非常善于处理图11出现的 b, d 类型的“虚假边界点”。

仍以图11为例分析, 以点 b 为目标点建立如图12所示的局部坐标系, 当把点 b 邻域点范围限定在半径为 r 的圆内时, 其第一、二象限点分布为空, 根据判别条件该点为边界点。由前面的分析可知, 考虑到边界曲线的光顺性, 在进行机器人作业空间分析时, 对于边界点 b 应当作为内部点处理; 为了剔除掉点 b , 可以适当的放宽邻域的搜索范围至 R , 由图12可知, 原来为空集的第一、二象限此时包含了邻近的边界点 a, c , 此时点 b 被定义为内部点处理。另外, 对于边界点 c , 扩大邻域搜索范围并不会影响其判别结果。

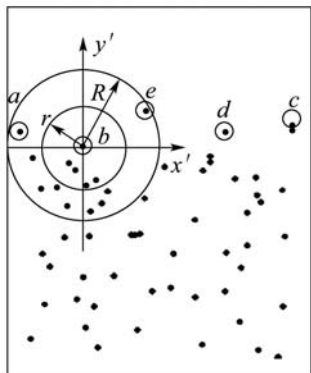


图12 边界邻域点搜索过程

Fig. 12 Searching for neighborhood points

另外, 考虑到原算法在搜索当前点的邻域点时, 其搜索域为整个点集 N , 当 N 较大时, 计算量势必十分可观, 为此, 对算法Step 1进行改进以降低计算量, 改进步骤如下:

Step 1 搜索 x 坐标方向的极值点 $x_{\max}, x_{\min}$, 计算: $X_L = x_{\max} - x_{\min}$ 及区间的宽度: $L = X_L/d$, d 为划分区间的数量;

Step 2 根据 x 坐标值大小, 将作业空间点分配到相应的区间, 并重新编号;

Step 3 为了避免提出错误的边界, 在处理子空间 i 内的点时, 将其搜索域扩展到子空间 $i-1, i, i+1$; 对于最左端的和最右端点区间, 其邻域搜索域相应缩小为子空间 $i, i+1$ 和 $i-1, i$;

按照以上步骤, 将原算法邻域搜索域由整个工作空间降低至子空间内, 大大的降低了计算量。

5 算例(Examples)

对同一机器人工作空间, 分别采用栅格法、极值

法及本文方法提取其边界, 并根据提取的边界计算工作空间面积, 通过比较计算值与理论值之间的偏差大小可近似的反应边界的提取精度。

本文采用矩阵近似法计算工作空间面积。首先将工作空间划分为 m 个封闭子空间, 每个区间的宽为 L 。设第 i 个子空间包含 k 条边界, 当 L 充分小时, 找出每段边界的一个边界点 (x_{ij}, y_{ij}) , 其中: $i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, k$ 。由此, 第 i 个子空间的面积可用如下 k 个窄矩形面积之和近似表示:

$$S_i = Lh_i = L \sum_{j=1}^{k/2} (y_{i,2j-1} - y_{i,2j}), \quad (2)$$

将机器人工作面积划分为 m 个子空间分别予以计算, 有

$$S = S_1 + S_2 + \dots + S_m, \quad (3)$$

由此, 可得到工作空间面积的近似计算公式:

$$S = \sum_{i=1}^m S_i = L \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k/2} (y_{i,2j-1} - y_{i,2j}). \quad (4)$$

本文以一个圆形工作空间的边界提取和面积计算为例, 对3种不同的边界提取方法的提取精度进行了比较, 为简便起见, 圆半径取单位长度, 相应工作空间面积的理论值为 π 。

首先, 以本文边界提取方法为例, 对随机点数目和提取精度的关系进行分析, 并对算法改进前后的计算时间进行了对比, 计算结果见表1。

表1 样本数和提取精度的关系

Table 1 The relationship between sample number and extraction accuracy

随机点数	计算耗时/s	面积/ m^2	计算误差/%
5000	11.578 0.8590	3.0335	3.4407
10000	46.360 1.5913	3.1064	1.1202
50000	1123.2 9.0780	3.1670	0.8086
100000	4657.7 21.984	3.1596	0.5732
200000	— 37.609	3.1437	0.0671

由表1可知, 算法改进后的计算时间(每行时间栏的下行)要远远低于改进前算法的计算时间(每行时间栏的上行)。另外, 随着随机点数量的增加, 由此产生的边界点对于实际边界的拟合度提高, 从而改善了边界的提取精度。

表2为采用栅格法和极值法的计算结果. 当随机点数量较少时, 采用栅格法和极值法的提取精度要明显低于本文算法的提取精度; 随着随机点数的增加, 两种方法的提取精度有所改善, 但总体来说, 二者精度要低于本文的提取方法. 另外, 根据图8所示栅格法提取到的边界点位置分布特点, 对于本算例圆形边界的工作空间, 基于栅格法计算得到的空间面积应略小于理论值, 表2中计算结果与理论分析的结果是一致的.

表2 栅格法和极值法的提取精度

Table 2 The extraction accuracy about grid method and extremum method

随机点数	提取算法	面积/ m^2	计算误差/%
5000	栅格法	2.9236	6.9387
	极值法	3.3291	5.9685
10000	栅格法	3.0274	3.6349
	极值法	3.2482	3.3934
50000	栅格法	3.1030	1.2284
	极值法	3.1843	1.3594
100000	栅格法	3.1195	0.7032
	极值法	3.1700	0.9042

图13为采用本文方法提取到的图5所示工作空间的边界, 计算样本数 N 取10万个点, 可见, 采用本文方法提取到的边界具有较好的拟合度和光顺性.

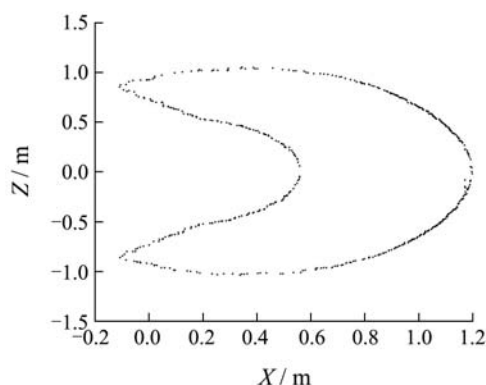


图13 除冰机器人在X-Z平面内工作空间轮廓线

Fig. 13 Workspace contour of de-icing robot in X-Z plane

6 结论(Conclusions)

1) 设计了一种三臂式除冰机器人结构, 研究了该机构的作业空间问题. 在计算过程中, 引入Monte Carlo方法计算机器人的工作空间, 避免了直接对机器人运动学方程的求逆解过程, 简化了计算.

2) 针对原有边界点提取方法的不足, 提出了一种基于邻域点象限分布的边界点提取方法, 和原有

的方法相比, 本文的方法不仅精度高, 并且可以较好的处理机器人工作空间点云中的“虚假边界点”.

3) 以目标点为原点建立空间坐标系, 将搜索域改为球形域. 基于邻域点象限分布的边界点提取方法可推广到3维空间边界点的判定.

参考文献(References):

- [1] 李恩, 梁自泽, 谭民. 约束条件下的巡线机器人逆运动学求解[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(1): 44–48.
(LI En, LIANG Zize, TAN Min. Analysis of solution to the inverse kinematics of inspection robot for power transmission lines with constraints[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(1): 44–48.)
- [2] POULIOT N, MONTAMBAULT S. Geometric design of the Linescout, a teleoperated robot for power line inspection and maintenance[C] //2008 IEEE International Conference on Robotics & Automation. Pasadena: IEEE, 2008: 3970–3977.
- [3] 周风余, 李贻斌, 吴爱国, 等. 高压巡线机器人的设计与实现[J]. 机械科学与技术, 2006, 25(5): 624–626.
(ZHOU Fengyu, LI Yibin, WU Aiguo, et al. Design and implementation of inspection robots for high voltage power transmission lines[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2006, 25(5): 624–626.)
- [4] WANG Y F, CHIRIKJIAN G S. A diffusion-based algorithm for workspace generation of highly articulated manipulators[C] //Proceedings of IEEE International Conference on Robotics & Automation. Washington: IEEE, 2002: 1525–1530.
- [5] CHEN X, GUPTA K C. Geometric modeling and visualization of manipulator workplace[J]. *ASME Computers in Engineering*, 1991, 1(5): 469–474.
- [6] RASTEGAR J, PEREL D. Generation of manipulator workspace boundary geometry using the Monte Carlo method and interactive computer graphics[J]. *ASME Journal of Mechanical Design*, 1990, 112(3): 452–454.
- [7] RASTEGAR J, FARDANESH B. Manipulator workspace analysis using the Monte Carlo method[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 1990, 25(2): 233–239.
- [8] ALCIATORE D, NG C. Determining manipulator workspace boundaries using the Monte Carlo method and least squares segmentation[C] //23rd ASME Mechanisms Conference. Minneapolis: ASME Press, 1994: 141–146.
- [9] 曹毅, 李秀娟, 宁祎, 等. 3维机器人工作空间及几何误差分析[J]. 机械科学与技术, 2006, 25(12): 1459–1502.
(CAO Yi, LI Xiujuan, NING Yi, et al. Computation and geometrical error analysis of a 3D robot's workspace[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2006, 25(12): 1459–1502.)
- [10] 熊有伦. 机器人技术基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2008.

作者简介:

印峰 (1983—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为智能机器人系统、智能控制理论, E-mail: yinfeng83@126.com;

王耀南 (1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能机器人、智能信息处理和智能控制, E-mail: yaonan@hnu.com;

余洪山 (1980—), 男, 副教授, 主要研究方向为智能机器人系统、机器视觉, E-mail: yuhongshancn@163.com.