

DOI:10.11918/201812058

双足爬壁机器人三维壁面环境全局路径规划

卢俊华¹, 朱海飞¹, 梁经伦², 管贻生¹

(1. 广东工业大学 机电工程学院, 广州 510006; 2. 东莞理工学院 机械工程学院, 广东 东莞 523808)

摘 要: 为求解双足爬壁机器人在三维壁面环境中的全局路径, 提出了一种结合壁面可过渡性分析、全局壁面序列搜索和壁面过渡落足点优化的规划方法. 首先, 为得到双足爬壁机器人在壁面间过渡的可行性, 通过机器人可达工作空间与壁面简化处理将其转化成几何图形相交测试问题. 然后, 用图搜索方法找出全局壁面序列, 再以路径最短为目标建立数学模型优化求解壁面序列中相邻壁面间最优过渡落足点, 最终得到最优全局路径. 以双足爬壁机器人 W-Climbot 为对象做仿真验证, 仿真结果表明该方法在 5 至 20 个壁面构成的三维环境中, 机器人在不同壁面间的可过渡性分析与全局壁面序列搜索过程平均耗时只需 2 ms, 求解得到优化全局路径的比例为 95%, 平均耗时均在 4 s 以内. 该方法可以为双足爬壁机器人提供优化的全局路径并为其下一步的运动规划奠定基础.

关键词: 双足爬壁机器人; 三维壁面环境; 全局路径规划; 可过渡性分析; 过渡落足点优化

中图分类号: TP242.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2020)01-0148-08

Global path planning for a biped wall-climbing robot in 3D wall environment

LU Junhua¹, ZHU Haifei¹, LIANG Jinglun², GUAN Yisheng¹

(1. School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;
2. School of Mechanical Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, Guangdong, China)

Abstract: To solve the global path for a biped wall-climbing robot in a 3D wall environment, a planning method combining wall transition analysis, searching of global wall sequences, and optimization of adhesion points when performing wall transitions is proposed. Firstly, to obtain the feasibility for the biped wall-climbing robot to transit between walls, the robot's reachable workspace and the wall are simplified to transform the problem into a geometric intersection test. Then, the global wall sequence is found by using a graph search method. Finally, to obtain the optimal global path, a mathematical model is established to compute the optimal adhesion point for transiting between adjacent walls. A biped wall-climbing robot, named W-Climbot, is used for simulation. The simulation results show that the proposed method takes only 2ms on average to analyze the feasibility of transition between different walls and search the global wall sequence in a three-dimensional environment composed of 5 to 20 walls. The success rate to obtain the optimal global path is 95%, and the average time consumed is less than 4s. This method can provide optimized global paths for biped wall-climbing robots and lay a foundation for motion planning.

Keywords: biped wall-climbing robot; 3D wall environment; global path planning; transition feasibility analysis; optimization of transition adhesion points

随着城市建筑业和交通业的快速发展, 人们希望用爬壁机器人辅助甚至代替工人来完成大型建筑如高楼、桥梁等的壁面清洁、检测和维护等高风险作业, 提高作业的自动化程度和安全性.

路径规划是爬壁机器人自主执行作业任务必不可少的运动决策过程. 当前爬壁路径规划的研究主要围绕轮式和履带式爬壁机器人展开. 文献[1]用

混合整数线性优化方法为爬壁机器人规划房间环境中的无碰路径. 文献[2]研究了爬壁机器人在圆柱形油罐壁面执行焊点检测作业的路径. 文献[3]用改进的神经网络模型求解能耗最小的壁面全覆盖路径. 该类方法适用于单一壁面或者相邻壁面相连的场景. 在多壁面组成的三维壁面环境中, 若壁面之间并非直接相连通, 轮式或履带式爬壁机器人将难以在壁面之间过渡并执行作业.

双足爬壁机器人拥有铰链式的关节主体和足式运动特性, 能够跨越壁面障碍甚至在不同壁面间过渡, 如 ROMA II^[4]、Crawler Robot^[5] 和 CROC^[6], 更适用于三维壁面环境中的各种作业任务. 双足爬壁机器人路径规划方面的研究较少. 文献[7]着眼于每

收稿日期: 2018-12-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51605096, 51705086); 国家国际科技合作专项项目(2015DFA11700); 广东省应用型科技研发专项资金项目(2015B010917003, 2017B050506008); 佛山市科技创新团队项目(2015IT100072)

作者简介: 卢俊华(1993—), 男, 硕士研究生;
管贻生(1966—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 朱海飞, hfzhu@gdut.edu.cn

步运动的姿态安全性,用图搜索求解最优的附着点路径. 其他双足爬壁机器人(例如爬杆)路径规划方面,文献[8]从能耗最优的角度优化攀爬路径,文献[9]借鉴旅行商问题的思路,用图搜索规划节点路径,文献[10]则利用攀爬对象之间的过渡区域做路径规划. 在三维壁面环境的全局路径中,不同壁面间关键的过渡位置决定了全局路径的走向以及长度,而上述方法均未考虑关键过渡位置的求解.

在三维壁面环境中,全局路径必须分析爬壁机器人在不同壁面之间的可过渡性,为其在不同壁面间的过渡运动提供先验信息. 文献[11]研究步态和自由度对壁面可过渡性的影响,但并未考虑环境特征. 文献[12-14]从各种传感信息获取环境特征,再判断机器人能否过渡到下一个攀爬对象,但该方法只适用于实时和局部的过渡性分析,缺少全局观. 文献[15]从全局上根据杆件特征与机器人逆运动学之间的关系分析机器人在不同杆件间的可过渡性,但难以适用于壁面特征中.

综上,现有的方法均未能有效求解双足爬壁机器人在三维壁面环境的全局路径. 为此,本文提出了一种同时考虑壁面可过渡性和最优过渡落足点的规划方法,分析壁面和机器人在壁面间过渡的可达工作空间的关系并对两者作简化,借此用几何图形的相交测试解决壁面可过渡性问题,降低工作空间的计算复杂度,并为全局壁面序列搜索提供过渡性拓扑地图. 另外本文还建立了优化数学模型求解机器人最优无碰壁面过渡落足点,获取最优全局路径. 该方法适用于双足爬壁机器人在复杂三维壁面环境的全局路径优化求解.

1 问题描述

1.1 双足爬壁机器人及其运动

双足爬壁机器人拥有自由度的串联式关节主体与两个足式吸附末端,能够采用多种步态完成全向移动、避障、跨障和不同壁面间过渡等攀爬动作,一端吸附时另一端可自由运动,适合在多壁面组成的建筑环境中执行日常作业任务.

本文以自主研发的模块化双足爬壁机器人 W-Climbot 作为研究对象. W-Climbot 及其构型示意图如图 1 所示. 其中间为 3 个摆转关节、两端再分别依次串接旋转关节和吸附末端,为 5 自由度对称式构型,便于运动规划与控制. 更多关于 W-Climbot 运动性能和运动步态等内容可参考文献[16].

1.2 壁面环境及其表达

在桥梁、展馆和歌剧院等大型建筑中,存在大量多幅壁面组成的“壁面环境”,如图 2(a)的桥梁钢

梁外表面、图 2(b)的玻璃幕墙等. 该类三维壁面环境有以下特点:1)壁面之间无法保证直接相连;2)壁面之间的相对位姿关系多样. 从图 2 中标注的实线多边形可见,壁面环境基本元素主要为有明确边界的空间平面.

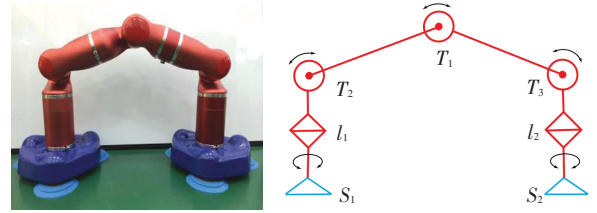


图 1 W-Climbot 及其构型示意图

Fig.1 W-Climbot and its structure diagram



(a) 桥梁钢梁外表面

(b) 玻璃幕墙

图 2 建筑中的三维壁面环境

Fig.2 3D wall environment in buildings

不失一般性,本文使用凸多边形来表示壁面 w (边界轮廓为凹多边形的,可以分割成有限个凸多边形^[17]),有

$$w = \{p_i \mid i = 1, 2, \dots, N, N \geq 3\}, \quad (1)$$

式中 p_i 为凸多边形按顺序排列的顶点, N 为顶点数量. 相邻两顶点构成壁面的物理边界 $e_i = p_i p_{i+1}$ (当 $i=N$ 时, $i+1=1$). $\vec{n}$ 为壁面法向量,可根据 Newell 公式求解,即

$$\vec{n} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (p_i - K) \times (p_{i+1} - K), \quad (2)$$

式中 $p_{n+1} = p_1$, K 表示空间中的任意一点. 进一步,用多个独立壁面 w_i 的集合表示壁面环境,即

$$E_w = \{w_i \mid i = 1, 2, \dots, N_w\}. \quad (3)$$

式中, N_w 表示壁面环境中的壁面数量. 为了研究方便,对壁面环境作出以下简化和约定:

1)壁面(凸多边形)之间可以在边界处交接,即有公共边,但不允许在壁面内部出现相互穿插的情况(该情况将处理成 4 个相互独立的壁面);

2)用壁面的法向量表示允许机器人攀爬的一侧;

3)全局路径不考虑机器人每一步的具体落足点和攀爬运动,因此不考虑壁面上的障碍物.

1.3 双足爬壁机器人全局路径描述

在三维壁面的攀爬环境中,双足爬壁机器人全局路径必须为机器人攀爬前进方向提供足够信息,发挥高效导向作用,包括:1)从起点到终点所经过的壁面及其次序,即全局壁面序列;2)全局壁面序列中每个壁面的第一个和最后一个落足点. N_s 个壁面组成的全局壁面序列可表示如下:

$$\mathbf{w}^s = (w_1^s, w_2^s, \dots, w_{N_s}^s). \quad (4)$$

可知 $\mathbf{w}^s \in \mathbf{E}_w$, 分别用 P_i^f 和 P_i^l 表示机器人在壁面 w_i^s 中的第一个和最后一个落足点. 考虑到机器人在相邻壁面间过渡时的运动学约束, P_i^f 和 P_{i+1}^l 分别为机器人在壁面 w_i^s 和 w_{i+1}^s 间过渡的起始落足点 P^B (基座)和目标落足点 P^E (末端). 假设起始落足点表示在世界坐标系 $\{W\}$ 下的转换矩阵为 ${}^W_B T$, 目标落足点为 ${}^W_E T$, 则过渡时落足点的运动学约束可表示为

$$\begin{cases} {}^W_E T(Q) = {}^W_B T \cdot \prod_{i=1}^{N_d-1} {}^{W_{i-1}}_{W_i} T(q_i) \cdot {}^{W_{N_d-1}}_{W_{N_d}} T, \\ \mathbf{Q}_{\min} \leq \mathbf{Q} \leq \mathbf{Q}_{\max}. \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{Q} = (q_1, q_2, \dots, q_{N_d})$ 表示自由度为 N_d 的机器人各关节的关节变量, $\mathbf{Q}_{\max}$ 和 $\mathbf{Q}_{\min}$ 分别表示关节变量的最大值和最小值. 相应地,双足爬壁机器人在三维壁面环境中的全局路径可表示如下:

$$P_{\text{route}}(\mathbf{w}^s) = P_{\text{route}}(w_1^s, w_2^s, \dots, w_{N_s}^s) = (P_s, P_1^B, P_1^E, P_2^B, P_2^E, \dots, P_{N_s-1}^B, P_{N_s-1}^E, P_D). \quad (6)$$

式中: P_i^B 和 P_i^E 分别表示机器人在全局路径中执行第 i 次过渡运动的起始落足点和目标落足点, P_s 和 P_D 分别表示路径起点和终点. 图 3 给出了全局路径的一个示例.

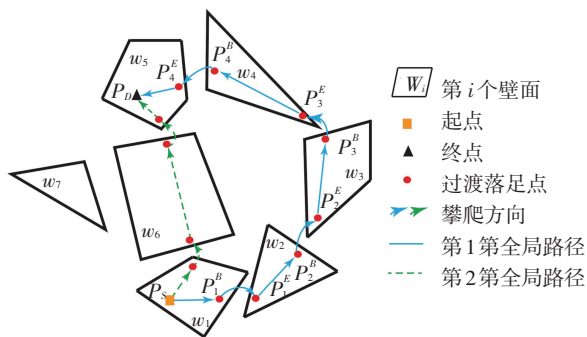


图 3 双足爬壁机器人的全局路径示意图

Fig.3 Illustration of global paths for biped wall-climbing robots

由图 3 可见,机器人有两条可行全局路径,分别对应全局壁面序列 $\mathbf{w}^{s1} = (w_1, w_2, w_3, w_4, w_5)$ 和 $\mathbf{w}^{s2} = (w_1, w_6, w_5)$. 其中第一条全局路径为

$$P_{\text{route}}(\mathbf{w}^{s1}) = (P_s, P_1^B, P_1^E, P_2^B, P_2^E, P_3^B, P_3^E, P_4^B, P_4^E, P_D).$$

2 基于图形学的全局壁面序列规划

本文将机器人从一个壁面转移到另一个壁面的可行性定义为壁面可过渡性. 满足壁面可过渡性是全局壁面序列的硬性约束条件,直接关乎路径规划解的存在性.

2.1 壁面可过渡性分析流程

在满足机器人运动性能的前提下,双足爬壁机器人在两壁面之间的可过渡性和可达工作空间直接关联,即受机器人杆长、关节类型和关节运动范围影响. 当以其中一个壁面上的一点作为机器人的基座生成可达工作空间时,如果另一壁面处于可达工作空间内(满足位置和姿态可达),即表示机器人能在这两个壁面间执行过渡运动.

图 4 给出了壁面可过渡性分析的整个流程. 首先根据双足爬壁机器人过渡运动特点对两壁面作预处理:收缩和平移,以此简化机器人的可达工作空间. 分析机器人构型参数,用结构化的几何图形表示简化的可达工作空间. 然后取两多边形壁面边界的最近点对分别作为基座构建可达工作空间,并与非基座所在的壁面作相交测试. 一旦找到一个可达工作空间满足相交测试的点,则机器人可在该两壁面间过渡,否则不可过渡.

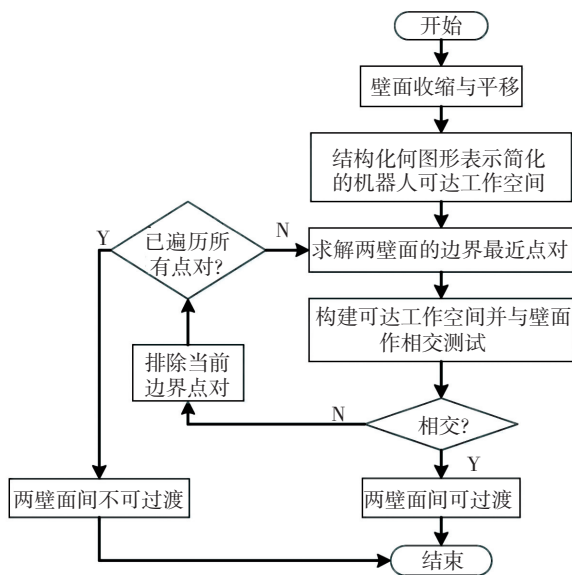


图 4 壁面可过渡性分析流程图

Fig.4 Flowchart of transition feasibility analysis

2.2 壁面与可达工作空间简化处理

由于双足爬壁机器人多自由度和多关节类型的构型特点,求解其可达工作空间以及后续使用均过于繁琐. 结合机器人在壁面环境中的附着与过渡运动要求,可分别从姿态可达约束和位置可达约束考虑,先对壁面作预处理,消除姿态可达约束,从而简

化机器人可达工作空间。

为了保证附着安全, 双足爬壁机器人的末端吸附模块必须整体位于多边形壁面内部。本文采用圆来表示末端吸附模块在壁面上的占位。对壁面 w 采用收缩处理 $\text{Sh}(w, r_m)$, 收缩距离 r_m 为圆的半径, 末端吸附模块可简化成点, 而有效可吸附壁面依然为凸多边形。为了研究方便, 下文中的壁面均已作收缩处理。

当双足爬壁机器人的两端在壁面附着时, 一端作为基座, 另一端作为吸附末端, 两者坐标系的 XOY 平面必须与壁面平行, 如图 5 (以 W-Climbot 构型为例) 所示。

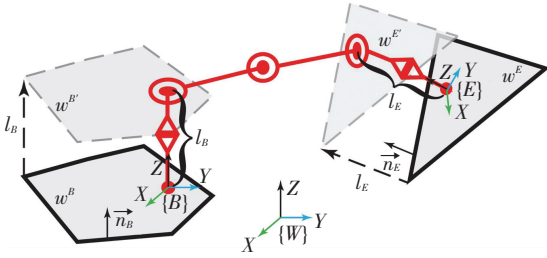


图 5 壁面预处理示意图

Fig.5 Schematic diagram of preprocessing for walls

用 ${}^W\mathbf{R}(\mathbf{Z})$ 和 ${}^E\mathbf{R}(\mathbf{Z})$ 分别表示机器人的基座和吸附末端的姿态变换矩阵在 Z 方向的分量, $\vec{n}_B$ 和 $\vec{n}_E$ 分别表示基座和吸附末端所在壁面的法向量, 则在过渡运动中有

$$\begin{cases} {}^W\mathbf{R}(\mathbf{Z}) = \vec{n}_B, \\ {}^E\mathbf{R}(\mathbf{Z}) = \vec{n}_E. \end{cases} \quad (7)$$

式(7)表示姿态可达约束。又由于将末端简化成点, 于是吸附末端姿态变换矩阵的 ${}^W\mathbf{R}(\mathbf{X})$ 和 ${}^E\mathbf{R}(\mathbf{Y})$ 对可达工作空间的形状无影响。设机器人基座在起始壁面 w^B , 要执行过渡运动使吸附末端在目标壁面 w^E 。为了消除姿态可达约束, 对起始壁面和目标壁面执行平移操作:

$$\text{Tr}(w^B, w^E, l_B, l_E). \quad (8)$$

式中 l_B 和 l_E 分别为沿着起始壁面和目标壁面法向, 末端坐标系原点到距离最近的摆转关节的坐标系原点的距离 (见图 5)。由于旋转关节的旋转轴与连杆方向平行, 所以该类关节的变化不改变连杆的长度。该操作使双足爬壁机器人可达工作空间得到简化, 不再与两末端连杆相关。且简化后的可达工作空间与平移后的两个壁面 $w^{B'}$ 和 $w^{E'}$, 只需满足位置可达的约束 (相交) 即表示机器人能在这两个壁面之间过渡。

2.3 机器人可达工作空间结构化表达

简化后的机器人可达工作空间可表示为

$$W_s(O, \mathbf{F}), \quad (9)$$

式中 O 表示机器人基座, $\mathbf{F}$ 表示机器人构型向量。向量的参数与机器人构型相关, 按构型的不同可分为两类:

$$\mathbf{F} = (r_e, \vec{n}_C) \text{ 或 } \mathbf{F} = (r_e). \quad (10)$$

式中 r_e 表示可达工作空间的最大有效长度, $\vec{n}_C$ 表示可达工作空间属于平面图形时 (机器人所有连杆均处于同一平面), 其所在平面的法向量。

以 W-Climbot 为对象, 当起始壁面和目标壁面已知, 化简后的可达工作空间为平面图形, 其法向量 $\vec{n}_C$ 为

$$\vec{n}_C = {}^W\mathbf{R}(\mathbf{Z}) \times {}^E\mathbf{R}(\mathbf{Z}) = \vec{n}_B \times \vec{n}_E. \quad (11)$$

于是机器人构型向量为 $\mathbf{F} = (r_e, \vec{n}_C)$, 可达工作空间范围为 $W_s(O, r_e, \vec{n}_C)$ 。此时该可达工作空间为一个圆。特别地, 当执行过渡运动的两壁面平行时, $\vec{n}_C = \vec{0}$, 机器人可达工作空间所在平面欠约束, $\mathbf{F} = (r_e)$, 可达工作空间范围为 $W_s(O, r_e)$, 此时可达工作空间是一个球。W-Climbot 在两个壁面之间作过渡运动的简化的可达工作空间如图 6 所示

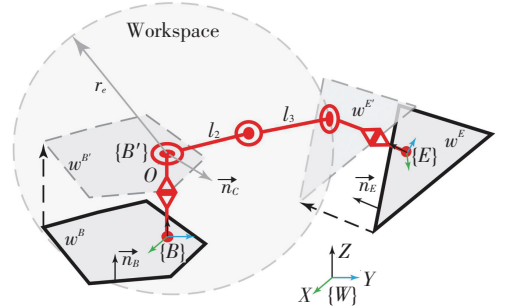


图 6 过渡运动时 W-Climbot 可达工作空间示意图

Fig.6 Schematic diagram of workspace for W-Climbot during transition

图 6 中: $\{B\}$ 和 $\{E\}$ 表示过渡运动时的基座和末端目标点; $\{B'\}$ 表示平移后的基点, 也是机器人可达工作空间的基座 O ; r_e 是机器人中间两连杆的长度之和, 即 $l_2 + l_3$ 。

2.4 基于几何相交测试的壁面可过渡性分析

对于给定的机器人构型参数以及壁面环境, 式 (10) 中的 $\mathbf{F}$ 不变, 所以可达工作空间和等效目标壁面的相交测试结果主要取决于机器人基座的位置。双足爬壁机器人在两个壁面之间可过渡的条件可表示为

$$\exists O \in w^{B'}, W_s(O, \mathbf{F}) \cap w^{E'} \neq \emptyset. \quad (12)$$

壁面上具有无限个点, 显然不可能遍历所有点作为基座来测试, 本文选取两壁面的最近点作为关键点。由计算几何知, 存在两凸多边形距离最小的一对点, 其中一个点在所属壁面的边界上。因此, 在壁面平移后的基础上求解两壁面的边界最近点对,

分别取点对中的一点作为基座构建可达工作空间,并与另一壁面作相交测试.一旦找到一个可达工作空间满足相交测试的点,则两壁面可过渡.设两壁面分别有 N_1 和 N_2 条边界,则边界最近点对有 $N_1 \times N_2$ 对.分析过程可表示为

$$\begin{cases} \exists (D_i^{B'}, D_j^{E'}) = \min(e_i, e_j), e_i \in w^{B'}, e_j \in w^{E'}, \\ W_s(D_i^{B'}, F) \cap w^{E'} \neq \phi, \\ \text{或} \\ W_s(D_i^{E'}, F) \cap w^{B'} \neq \phi. \end{cases} \quad (13)$$

式中 $\min(e_i, e_j)$ 表示边界 e_i 和 e_j 的最近点对.由于两壁面都可能为起始壁面,且两壁面的可过渡性是相互的,所以必须考虑两个壁面的边界点.

需要注意的是:本文所提出的壁面可过渡性分析方法只从机器人可达工作空间考虑,尚未严格计算关节运动范围约束与无碰约束,所以该方法属于必要不充分条件,适用于快速筛选.关节运动范围约束和无碰约束将在第 3 节中考虑和分析.

2.5 基于图搜索的全局壁面序列搜索

壁面可过渡性分析完成后,通过拓扑地图来表示不同壁面之间的过渡性:一个节点表示一个单独的壁面,节点之间用边连接来表示壁面之间可过渡.然后,采用深度优先的图搜索方法来搜索从起点所在壁面到终点所在壁面的全局壁面序列.由于图搜索的对象为壁面环境的过渡性拓扑地图,最大程度上消去了其他无影响因素,于是该方法能快速求解环境中所有全局壁面序列,具体实现可参考文献[15].

3 过渡落足点序列全局规划与优化

对壁面环境中全局壁面序列的路径走向添加约束和优化目标,赋予其量化的评价指标,进一步对全局壁面序列作筛选与优化,将全局路径求解结果最优化.

于是,对图搜索得到的全局壁面序列分别求解相邻壁面间的最优过渡落足点,获得可行的全局路径规划结果并选择最优者.以全局路径长度最短为优化目标,以过渡落足点的位置、运动学和对应的位形无碰为约束,建立非线性优化数学模型求解壁面过渡落足点.以下是落足点序列最优化问题的数学描述:

1) 过渡落足点位置约束.过渡落足点必须位于凸多边形壁面内部,可得:1) 过渡落足点必须在多边形所在的平面上;2) 当按同一旋转方向遍历多边形所有边时,过渡吸附点应在所有边的同一侧.约束表达式如下:

$$\begin{cases} \overrightarrow{P^B C^B} \cdot \vec{n}_B = 0, \\ \overrightarrow{P^E C^E} \cdot \vec{n}_E = 0. \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} (\overrightarrow{P_i^B P_{i+1}^B} \times \overrightarrow{P_i^B P_{i+1}^B}) \cdot (\overrightarrow{P_i^B C^B} \times \overrightarrow{P_i^B P_{i+1}^B}) \geq 0, i = 1, \dots, N_B, \\ (\overrightarrow{P_i^E P_{i+1}^E} \times \overrightarrow{P_i^E P_{i+1}^E}) \cdot (\overrightarrow{P_i^E C^E} \times \overrightarrow{P_i^E P_{i+1}^E}) \geq 0, i = 1, \dots, N_E. \end{cases} \quad (15)$$

对于起始壁面和目标壁面, P_i^B 和 P_i^E 分别表示它们的第 i 个顶点, C^B 和 C^E 是它们所有顶点的平均值, N_B 和 N_E 表示它们的顶点数量.当 i 等于 N_B 或者 N_E 时,令 $i+1=1$,表多边形的封闭性.

2) 壁面过渡运动学约束.双足爬壁机器人在两个壁面间执行过渡运动时需满足机器人运动学约束,包括位置可达、姿态可达约束和关节运动范围约束,即式(5)和式(7).

3) 壁面过渡无碰约束.执行壁面过渡运动时,还要求机器人与三维壁面环境无碰撞.该无碰约束可表达为

$$L_i \cap w^B = \phi, i = 2 \sim N_l, \quad (16)$$

$$L_i \cap w^E = \phi, i = 1 \sim N_l - 1. \quad (17)$$

其中 L_i 表示机器人从基座到吸附末端顺序的第 i 根连杆, N_l 表示连杆数目.式(16)表示第 2 根连杆到最后根连杆与起始壁面无碰,式(17)表示第 1 根连杆到倒数第 2 根连杆与目标壁面无碰.双足爬壁机器人与壁面的碰撞分析可以通过将机器人连杆简化成空间线段,再求出空间线段与凸多边形壁面的距离,然后与安全距离作比较^[18].

4) 优化目标及数学模型表达.过渡落足点优化求解的目标是所有落足点构成的全局路径最短,目标函数为

$$y = |P_S P_1^B| + \sum_{i=1}^{N_s-1} |P_i^B P_i^E| + \sum_{i=1}^{N_s-2} |P_i^E P_{i+1}^B| + |P_{N_s-1}^E P_D|. \quad (18)$$

式中 N_s 表示全局壁面序列中的壁面数量,需要执行 $N_s - 1$ 次过渡运动,对应的壁面过渡落足点数量是 $2N_s - 2$,每次过渡运动都必须符合上述三种约束.最终过渡落足点优化求解的数学模型表示如下:

$$\begin{aligned} \min & |P_S P_1^B| + \sum_{i=1}^{N_s-1} |P_i^B P_i^E| + \sum_{i=1}^{N_s-2} |P_i^E P_{i+1}^B| + |P_{N_s-1}^E P_D| \\ \text{s.t.} & \begin{cases} P_i^B \in w_i^B, P_i^E \in w_i^E, \\ {}^W T({}^E Q_i) = {}^W T \cdot \prod_{k=1}^{N_d} {}^k T(q_k) \cdot {}^E T, \\ Q_{\min} \leq Q_i \leq Q_{\max}, \\ {}^W R_i(Z) = \vec{n}_B, \\ {}^W R_i(Z) = \vec{n}_E, \\ L_k^i \cap w_i^B = \phi, k = 2 \sim N_l, \\ L_k^i \cap w_i^E = \phi, k = 1 \sim N_l - 1, \\ i = 1, 2, \dots, N_s - 1. \end{cases} \end{aligned} \quad (19)$$

4 仿真与分析

以 W-Climbt 为研究对象, 在 Visual Studio 和 MATLAB 平台搭建仿真环境并进行仿真验证. 仿真程序在台式计算机上运行, 硬件配置为 Intel i7-7700, 3.6 Ghz, 内存 8 G.

4.1 全局壁面序列规划仿真结果

随机生成多个壁面组成三维壁面环境, 给各个壁面编号并用箭头表示可攀爬的一侧, 且随机设置路径起点和终点. 取其中 3 个壁面环境作为测试案例: 案例 1 由 5 个壁面组成, 壁面 3 和壁面 2 分别为起点和终点所在壁面; 案例 2 由 5 个壁面组成, 壁面 1 和壁面 2 分别为起点和终点所在壁面; 案例 3 由 10 个壁面组成, 壁面 7 和壁面 2 分别为起点和终点所在壁面.

首先对壁面环境中每两个壁面做可过渡性分析, 然后搜索全局壁面序列. 仿真运行后, 在测试案例 1、2 和 3 中分别得到 1 条、2 条和 2 条全局壁面序列. 3 个测试案例的计算时间均只需要 1 ms. 为了进一步分析该过程的算法计算效率, 分别在 5 至 20 个壁面组成的多个壁面环境中求解壁面可过渡性和全局壁面序列, 算法的平均运行时间仅为 2 ms.

4.2 过渡落足点优化求解仿真结果及比较

将过渡落足点优化求解的数学模型解析成通用的优化算法, 只需输入全局壁面序列与机器人构型参数即可求解出优化结果. 结合 MATLAB 优化工具箱中的非线性优化求解工具 fmincon, 对上述 3 个测试案例的全局壁面序列求解最优过渡落足点.

图 7~9 展示了壁面环境和机器人全局攀爬路径. 起点、过渡落足点和终点依次连接组成全局路径, 路径中的箭头表示前进方向. 全局壁面序列中的壁面用直线边界显示, 其他壁面用虚线边界显示. 根据相邻壁面间的过渡落足点生成 W-Climbot 过渡运动位形, 验证求解的过渡落足点是否有效. 图 7 所示为案例 1 中全局壁面序列 3→1→4→2 的全局路径, 路径长度为 6.740 m, 耗时 1.87 s. 图 8 为案例 2 中全局壁面序列 1→3→4→2 的全局路径, 路径长度为 6.018 m, 耗时 2.07 s; 另一全局壁面序列 1→2 由于不能满足机器人与壁面的无碰约束没有得到优化解. 图 9(a) 为案例 3 中全局壁面序列 7→6→5→3→2 的全局路径, 路径长度为 16.106 m, 耗时 3.52 s; 图 9(b) 为案例 3 中全局壁面序列 7→6→5→9→10→2 的全局路径, 路径长度为 25.582 m, 耗时 4.73 s, 可知案例 3 中第一条全局路径是最优结果.

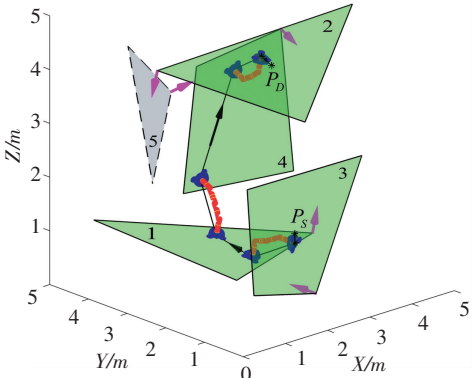


图 7 测试案例 1 中优化的全局路径
Fig.7 Optimized global path in Case 1

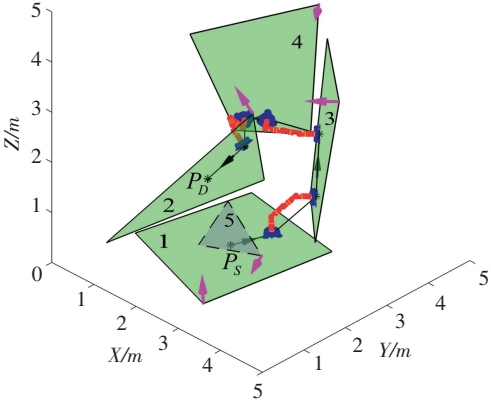
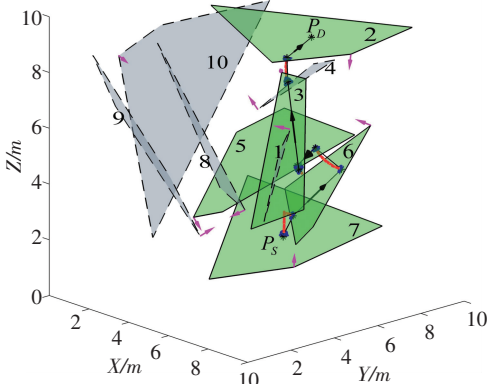
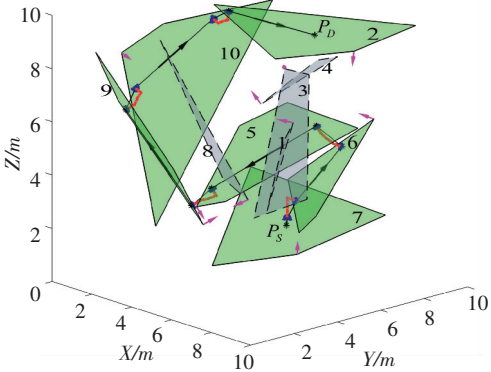


图 8 测试案例 2 中优化的全局路径
Fig.8 Optimized global path in Case 2



(a) 全局壁面序列 7→6→5→3→2 的最优全局路径



(b) 全局壁面序列 7→6→5→9→10→2 的最优全局路径

图 9 测试案例 3 中优化的全局路径
Fig.9 Optimized global path in Case 3

对不同全局壁面序列求解最优过渡落足点,分析该数学模型的有效性和求解时间. 运行 120 次案例求解, 成功获得优化结果的次数为 114, 占比 95%. 正如 2.4 节中所述, 壁面可过渡性分析时由于基座未定因而无法考虑关节运动范围和无碰约束, 而在过渡落足点优化求解时加入了上述约束. 当过渡运动不能满足上述约束时, 求解器无法找到可行解, 可进一步排除不可行的壁面序列.

通过案例分析发现求解耗时主要和全局壁面序列中的壁面数量有关. 表 1 给出了案例求解耗时的统计结果, 可见全局壁面序列中的壁面数量越多, 则求解耗时越长, 并且增长的比例越大.

表 1 不同攀爬壁面数量下的过渡落足点求解时间比较
Tab.1 Comparison of time consumption for solving transition adhering points with different numbers of climbing walls

全局壁面序列的 壁面数量	最大求解 时间/s	最小求解 时间/s	平均求解 时间/s
2	0.38	0.08	0.18
3	1.03	0.21	0.57
4	2.23	0.52	1.30
5	4.71	0.70	2.36
6	4.74	1.36	3.34

为进一步验证该优化求解算法的性能, 将其求解结果与智能优化算法中的粒子群算法求解结果作比较. 在经过的壁面数量不同的情况下, 两种算法求解的平均路径长度和平均耗时结果如表 2 所示. 为保证优化性能, 粒子群算法中取粒子样本数目为 50, 迭代次数为 200. 比较求解结果可知本文采用的优化数学模型求解方法平均耗时更少, 且求得的路径平均长度更短, 因此该方法具有更优的求解性能.

表 2 优化数学模型和粒子群算法求解结果比较
Tab.2 Comparison of solving results between mathematical model and particle swarm algorithm

全局壁面 序列的壁 面数量	粒子群算法		优化数学模型	
	平均路径 长度/m	平均求解 时间/s	平均路径 长度/m	平均求解 时间/s
2	2.89	1.09	2.86	0.18
3	6.44	2.03	6.40	0.57
4	10.71	2.86	10.33	1.30
5	16.48	3.50	15.51	2.36
6	22.13	4.30	20.98	3.34

5 结 论

为求解双足爬壁机器人在三维壁面环境中的全局路径, 本文从全局壁面序列和过渡落足点出发, 提出了一种通用的最优全局路径规划方法. 运用图形

学的思想分析机器人过渡运动中可达工作空间和壁面的关系, 对两者建立结构化的数学模型, 以此通过几何相交测试求解壁面可过渡性. 根据求解结果建立可过渡性拓扑地图, 并应用图搜索快速获取机器人路径全局性的壁面序列. 该方法避免了对机器人复杂工作空间的直接求解, 大大提高计算效率, 仿真结果表明在 5 至 20 个壁面构成的环境中, 平均求解时间只需 2 ms. 本文还建立了过渡落足点优化求解的数学模型, 该模型能有效求解路径最短的无碰过渡落足点, 并对全局壁面序列作筛选和最优化, 获得最优全局路径. 仿真结果表明获得优化结果的比例为 95%, 平均耗时均在 4 s 内. 该方法能为双足爬壁机器人在壁面上的局部运动路径求解提供最优输入, 解决机器人自主作业路径的全局最优问题.

下一步工作将寻找性能更好的非线性优化求解器, 提高过渡落足点求解的效率; 并着手双足爬壁机器人的局部路径求解, 研究其在壁面上克服障碍物的无碰落足点规划和单步无碰攀爬运动规划, 做机器人实际攀爬实验.

参考文献

[1] YUE Ronggang, XIAO Jizhong, WANG Shaoping, et al. Three-dimensional path planning of a climbing robot using mixed integer linear programming[J]. Advanced Robotics, 2010, 24(15):2087

[2] FU Zhuang, ZHAO Yanzheng, QIAN Zhiyuan, et al. Wall-climbing robot path planning for testing cylindrical oilcan weld based on voronoi diagram[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing: IEEE, 2006:2749-2753

[3] CHEN Ke, LIU Yong. Optimal complete coverage planning of wall-climbing robot using improved biologically inspired neural network [C]// Real-time Computing and Robotics (RCAR). IEEE, 2017: 587

[4] BALAGUER C, GIMENEZ A, ABDERRAHIM C. ROMA robots for inspection of steel based infrastructures[J]. Industrial Robot, 2002, 29(3):246

[5] CHEN Hongjun, SHENG Weihua, XI Ning, et al. Motion control of a micro biped robot for nondestructive structure inspection [C]// IEEE International Conference on Robotics & Automation. IEEE, 2005

[6] QUIN P, PAUL G, ALEMPIJEVICA, et al. Exploring in 3D with a climbing robot: selecting the next best base position on arbitrarily-oriented surfaces[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Daejeon: IEEE, 2016:5770

[7] YANG C, PAUL G, WARD P, et al. A path planning approach via task-objective pose selection with application to an inchworm-inspired climbing robot[C]// IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. London: IEEE, 2016:401

[8] 江励, 管贻生, 王建生, 等. 爬杆机器人能量最优攀爬运动规划[J]. 机器人, 2017, 39(1):16

JIANG Li, GUAN Yisheng, WANG Jiansheng, et al. Energy-optimal motion planning of a biped pole-climbing robot[J]. Journal of Robot, 2017, 39(1):16

[9]YUN S K, HJELLE D A, SCHWEIKARDT E, et al. Planning the reconfiguration of grounded truss structures with truss climbing robots that carry truss elements[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. Montreal: IEEE, 2009:3377

[10]ZHU Haifei, GUAN Yisheng, SU Manjia, et al. Evaluation of graspable region and selection of footholds for biped pole-climbing robots[C]// IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Phuket: IEEE, 2014:1757

[11]KOTAY K D, RUS D L. Navigating 3D steel web structures with an inchworm robot[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems '96, IROS. IEEE, 2002:368

[12]PAUL G, QUIN P, TO A W K, et al. A sliding window approach to exploration for 3D map building using a biologically inspired bridge inspection robot[C]// IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation. Shenyang: IEEE, 2015:1097

[13]TAVAKOLI M, FARIA R, MARQUES L, et al. Autonomous mapping for inspection of 3D structures[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems. IEEE, 2011

[14]LAM T L, XU Yangsheng. Treebot: autonomous tree climbing by tactile sensing[C]// IEEE International Conference on Robotics & Automation. IEEE, 2011

[15]ZHU Haifei, GU Shichao, HE Li, et al. Transition analysis and its application to global path determination for a biped climbing robot[J]. Applied Sciences, 2018, 8(1): 122

[16]GUAN Yisheng, ZHU Haifei, WU Wenqiang, et al. A modular biped wall-climbing robot with high mobility and manipulating function[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(6): 1787

[17]CHAZELLE B, DOBKIN D. Decomposing a polygon into its convex parts[C]// 11h ACM Symposium on Theory of Computing. Atlanta: DBLP, 1979:38

[18]CHEN Shengjun, ZHU Haifei, GUAN Yisheng, et al. Collision-free single-step motion planning of biped pole-climbing robots in spatial trusses[C]// IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. IEEE, 2013:280-285

(编辑 王小唯)

封面图片说明

封面图片来自本期论文“变马赫数下压力面小翼对扩压叶栅气动特性影响的实验”,是上海海事大学钟兢军教授课题组完成的变马赫数下加装不同压力面叶尖小翼的叶栅熵分布结果展示. 该课题组在国内首先开展了叶尖小翼技术在压气机中的应用研究,探究高亚声速下叶尖小翼控制压气机叶栅叶顶间隙流动,为实际工况中最佳叶尖小翼的选择提供参考. 结果表明:不同马赫数下,随着叶尖小翼宽度的增加,小翼对于叶顶间隙泄漏流体的抑制能力加强,流场中熵增逐渐减弱,泄漏涡强度减弱,流动损失减小. 随着马赫数的增加,压力面叶尖小翼的改善效果逐渐增强. 当 $Ma = 0.7$ 时,流场处于向跨声速过渡的临界区域,PW2.0 方案的改善效果最为明显. 与同工况的原型叶栅相比,改善后流场的变马赫数敏感性有效降低,流场更为稳定,流动状况得到明显改善. 高亚声速的来流条件下压力面叶尖小翼是一种有效的泄漏流动控制手段.

(图文提供:吴宛洋,钟兢军. 上海海事大学 商船学院)