

DOI: 10.7652/xjtuxb201506014

四足机器人自由步态规划建模与算法实现

刘冠初, 熊静琪, 乔林, 杜丽

(电子科技大学机械电子工程学院, 611731, 成都)

摘要: 针对四足机器人的越障自由步态规划问题, 提出了一种改进的离散化四足机器人步态规划模型, 该模型可通过设置相关参数准确模拟实际物理模型, 并且可以根据障碍物的分布密集程度改变候选落足点数以提高机器人对地形的适应能力; 根据此模型建立了基于 A* 算法的步态规划算法, 对步态序列进行稳定性检测和碰撞检测, 并设计了以步数最少为目标的评价函数, 以使规划的步态稳定、与障碍无碰撞且总步数最少。实验结果表明: 该算法计算量小、规划时间短, 规划一个 20 步的越障步态仅拓展了 78 个节点, 用时 0.019 s; 机器人以最少的步数安全地通过了给定的含障碍物的地形, 从而验证了所提模型的有效性, 算法的优越性, ADAMS 和 Simulink 联合仿真进一步验证了所规划的自由步态是可行的。

关键词: 四足机器人; 自由步态; 步态规划; A* 算法; 越障步态

中图分类号: TP24 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)06-0084-06

Modelling and Algorithm Realization of Free Gait Regulation for Quadruped Robots

LIU Guanchu, XIONG Jingqi, QIAO Lin, DU Li

(School of Mechatronics Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: A modified discrete gait planning model for quadruped robots is proposed to solve the free gait planning problem for quadruped robots walking beyond barriers. The model accurately simulates the actual physical model through setting related parameters; and the number of candidate footholds can be changed to improve the robot's adaptability according to the distribution density of obstacles. A gait planning algorithm based on the A* method is proposed. In this algorithm, the stability detection and collision detection are executed on every gait sequence, and an evaluation function aiming at minimum steps is designed to achieve collision-free and stable gait with minimum total steps. Experimental results show that the proposed algorithm is computationally efficient, and the planning time is short. When a twenty-step collision-free gait is planned, only 78 nodes are expanded and the planning time is 0.019 s. The robot safely traverses through the obstacles of a given terrain with a minimum steps. These results verify the validity of the proposed model and the superiority of the algorithm. Moreover, a joint simulation with ADAMS and Simulink verifies the feasibility of the planned free gait.

Keywords: quadruped robot; free gait; gait planning; A* algorithm; collision-free gait

四足机器人的步态规划问题在近几十年已被广泛研究。这些研究多集中在具有周期运动规律的规

收稿日期: 2014-08-09。 作者简介: 刘冠初(1989—),男,硕士生;熊静琪(通信作者),女,教授。 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2011AA040701)。

网络出版时间: 2015-04-29

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150429.1437.003.html>

则步态上,例如爬行步态、对角小跑步态等。规则步态难以适应不规则的地形^[1],例如凹凸不平的地形、有障碍物的地形以及崎岖地形等,因此研究非周期的自由步态的规划方法对于提高四足机器人在各种复杂地形上的行走能力具有重要意义。

自由步态规划的任务是在一定地形条件下规划机器人的步态运动,包括机体的运动、腿的摆动顺序和落足点等^[2],使机器人安全稳定地通过给定的地形。McGhee 等针对含有不适合支撑区域(称为“禁区”)的平坦地形,设计了一种自由步态的规划方法,该方法可能会使机器人陷入“死锁”状态,即由于运动学约束、稳定性约束或地形条件的限制等,机器人无法继续前进的状态^[3]。Pal 等针对“死锁”的问题,引入图搜索方法^[4],规划了跨越禁区的优化自由步态,但是其简化的模型不符合实际。斯坦福大学的“运动学习”项目对 LittleDog 机器人在崎岖地形上行走的运动规划与控制进行了研究^[5-8],其中 Kolter 等采用分层规划的方法^[7],首先规划通过崎岖地形的全局最小代价路径,然后在路径周围搜索局部代价最小的落足点,这种方法降低了搜索空间的维度,提高了运动控制的实时性,但是其步态为局部最优。Kalakrishnan 等采用了类似的分级规划方法^[8]。首先在预处理阶段,机器人使用排序函数计算了地形上候选落足点的“奖励”,得到地形奖励图,然后依据地形奖励图,采用 Dijkstra 算法规划出大概的机体路径,最后采用贪心搜索算法和 ARA* (anytime repairing A*) 算法在机体路径周围搜索出下几步的落足点。

虽然在国内已有研究将图搜索算法应用于双足机器人的足迹规划^[9],但是还未见相关研究将其应用于四足机器人的自由步态规划中,因此本文针对分布有障碍物的平坦地形,基于 Pal 等建立的模型^[4]提出了一种改进的离散化四足机器人步态规划模型,建立了基于 A* 算法的自由步态规划算法,规划了通过给定地形环境的四足机器人越障自由步态,仿真结果验证了规划步态的合理性及可行性。此外,本文还通过仿真实验分析了候选落足点数对机器人跨越障碍能力的影响。

1 四足机器人步态规划模型

四足机器人步态可以看作是腿与机体相对位置的变化过程,本文定义一组腿和机体的位置组合为机器人的一个构型,那么四足机器人的步态可以离散为一个构型序列。采用搜索算法进行四足机器人

自由步态规划的核心思想是:用节点描述机器人的构型,依据一定的构型转换规则,构造以初始构型为根节点的搜索图,然后采用搜索算法搜索出到达目标节点的路径,这条路径即为四足机器人的一个构型转换序列,即离散的运动序列,最后规划机体和关节的运动轨迹来实现离散序列的连续运动,在低层实现轨迹的跟踪控制。采用搜索策略的步态规划与控制的总体结构如图 1 所示。

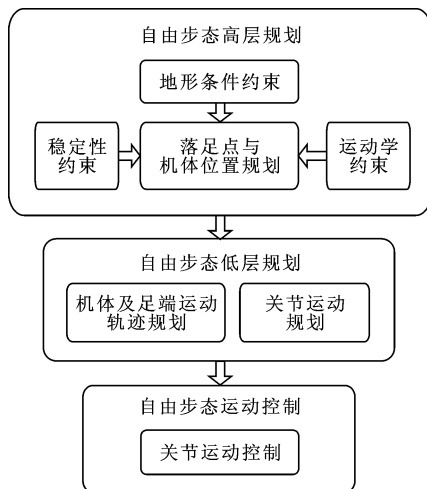


图 1 基于搜索的四足机器人分层步态规划与控制结构

1.1 四足机器人及地形模型

四足机器人三维模型如图 2 所示,其平面简化模型如图 3 所示,其中 xoy 为世界坐标系, xcy 为机器人质心坐标系, $l_1 \sim l_4$ 分别代表机器人 4 条腿, x 轴正向为机器人的行走方向。设 λ 为腿在 x 方向的最大工作空间,点 $0 \sim n$ 为离散的候选落足点, d_x 为同侧足端候选落足点的最小间距, d_y 为足端在 y 方向的间距。与 Pal 的模型相比,本文模型可以通过设置参数 λ 、 d_x 、 d_y 与实际模型保持一致,并且可以通过设置 n 值改变候选落足点数,从而使得机器人能够根据障碍物的分布情况改变候选落足点数,提高算法的适应性。

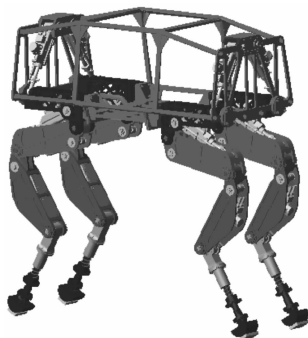


图 2 四足机器人三维模型

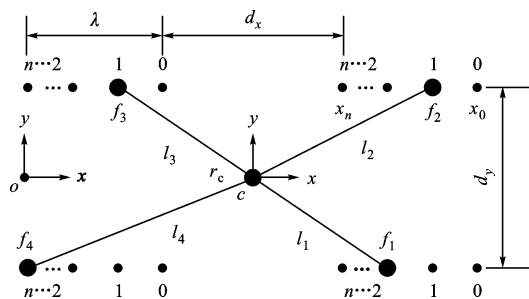


图3 四足机器人简化模型

针对含有障碍物的平坦地形,本文用栅格化地图模型来表示,每个栅格点定义为 $G=(x, y, u)^T$, 其中 x 和 y 分别为栅格点在世界坐标系 xoy 中的位置, $u=1$ 表示栅格点没有障碍物,机器人可落足; $u=0$ 表示有障碍物,机器人不可落足,假设所有障碍是可跨越的。地面障碍物的大小和位置信息由机器人的视觉系统检测和识别,然后自动划分地图栅格,获取栅格中障碍物的分布位置,此内容不是本文研究的重点,因此假设地图和障碍物信息为已知。需要说明的是,按照本文的建模方法,需以栅格尺寸为单位对机器人的最大越障空间进行归一化处理,即设定机器人单腿最大跨距为地图栅格尺寸的整数倍,这可以通过适当舍弃机器人的单腿越障空间来实现。

1.2 四足机器人构型描述

四足机器人的构型是机器人运动状态的描述,由于一组重心与足端位置可以完全确定机器人在世界坐标系中的位置,因此本文机器人构型由机体重心位置和4个足端的位置组成,可以用数组 $S(r_c, f_1, f_2, f_3, f_4)$ 描述,如图3所示,其中 r_c 为机体重心在世界坐标系 xoy 中的位置, $f_1 \sim f_4$ 为足端在机体坐标系 xcy 中的位置。

1.3 四足机器人构型转换

根据四足机器人步态运动特点,构型之间的转换须满足步态稳定性约束和运动学约束。①稳定性约束。四足机器人步态稳定的必要条件是机体重心在支撑平面的投影必须落在由支撑足构成的支撑多边形内。本文不考虑机器人的横向移动,故只需考虑机器人在前进方向的稳定性约束,因此本文以纵向稳定裕度 $s_m^{[10]}$ 作为衡量稳定性的标准,其定义是机体重心在支撑平面的投影在其前进方向上与支撑多边形的最短直线距离,在进行构型时转换应满足 $s_m \geq \xi$, 其中 ξ 为期望的最小纵向稳定裕度值。②运动学约束。各条腿的运动必须限制在其工作空间内。将足端的工作空间 λ 均匀地离散为 $n+1$ 个

候选落足点,如图3所示,设候选落足点集为 F , 则 $F=\{x_i\} (i=0, 1, \dots, n)$ 。例如 l_2 所处位置 x_1 的前向可选落足点为 x_0 , 后向可选落足点为 $x_2 \sim x_n$ 。

1.4 构型转换规则

构型转换规则是依据实际的四足机器人的步态运动规律设计的简化模型的构型之间的转换规则,其物理意义是四足机器人在运动中机体重心和4条腿的相对位置变化的规律。

1.4.1 腿的状态转换规则 用 $i(i=0, 1, \dots, n)$ 代表腿在 x_i 点的状态,这里不允许腿有相对地面向后的摆动,设计腿的可行的始状态到末状态转换如表1所示。①静态转换(s):腿的状态不变,即腿没有相对于机体和地面的移动;②动态转换(d):腿的状态值增加(如 $0 \rightarrow 1, 1 \rightarrow 2$),此时机器人通过腿的伸展和收缩来推动机体重心向前移动一个栅格单元;③摆动转换(w):腿的状态值减小(如 $1 \rightarrow 0, 3 \rightarrow 1$),此时腿进行摆动,发生相对于地面的前移;④腿向后摆动是不允许的,即表中的空位置。

表1 腿的状态转换表

始状态	末状态					
	0	1	2	...	$n-1$	n
0	s	d				
1	w	s	d			
2	w	w	s	$\ddots$		
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\ddots$	$\ddots$	
$n-1$	w	w	w	$\ddots$	s	d
n	w	w	w	...	w	s

1.4.2 可行构型转换 机器人的构型转换的实质是腿和机体的相对位置发生变化的过程。对于四足机器人的自由步态,每个时刻至少有3条腿着地,其运动形式有4条腿保持足的位置不变并同时推动机体向前移动,机体及3条腿不动,另一条腿向前摆动,对应的构型转换如下:①4条腿同时进行动态转换,即4条腿一起推进机体向前移动,例如 $S(1, 1, 1, 2, 2) \rightarrow S(2, 2, 2, 3, 3)$;②3条腿进行静态转换,另一条腿进行摆动转换,即3条腿及机体重心保持不动,另一条腿向前摆动,例如 $S(2, 2, 2, 2, 0) \rightarrow S(2, 0, 2, 2, 0)$ 。

2 步态规划搜索算法实现

2.1 搜索算法

在搜索图中,用节点代表机器人构型 S , 用边代

表构型转换。搜索算法以四足机器人的初始构型 S_0 为根节点,依据构型转换规则拓展子节点来构建搜索图。为了保证步态的稳定性以及实现对障碍物的跨越,对每一步拓展的子节点要进行稳定性检测和障碍碰撞检测,删除不满足稳定裕度的子节点以及与障碍物发生碰撞(落足点占据 $u=0$ 的栅格点)的子节点,并把剩余节点放入后继节点表中,然后定义路径的代价以及评价函数 $f(n)$,优先拓展评价最小的节点进行下一步搜索,如此循环直到到达设定的目标节点,这样规划得到的路径即为满足运动约束并且跨越障碍的最优运动序列。

2.2 评价函数的构建

A^* 算法是一种启发式搜索算法,其核心在于评价函数的设计。本文定义路径的构型转换次数为路径的代价,路径的构型转换次数越少,即规划的步态从起点到达目标所用的步数最少,则机器人能更快地到达目标点。评价函数的一般形式为 $f(n) = g(n) + h(n)$,其中 $g(n)$ 为从起始节点到当前节点路径已消耗的代价, $h(n)$ 为从当前节点到目标节点的最小路径代价的估计值。设 $h^*(n)$ 为从当前节点到目标节点的实际最小代价,那么当 $h(n) \leq h^*(n)$ 时, A^* 算法具有可采纳性,即当问题有解时一定能够找到一条从起始节点到目标节点的最小代价路径^[11]。此处定义当前节点已消耗的代价为从起始节点到当前节点经过的构型转换次数,其值为当前节点在搜索图中的深度 d ,即 $g(n) = d$ 。 $h(n)$ 是对机器人从当前构型到达目标构型需要的构型转换次数的估计,设 $h(n) = kD_e$,其中 D_e 为机器人从当前节点构型 S_c 到目标节点构型 S_g 还需要移动的距离的评价值, k 为移动单位距离需要的构型转换次数的估计值,机器人到达目标构型需要机体重心以及4条腿同时到达目标构型,因此需要分别计算重心和腿到达目标构型需要移动的距离,分别记为 D_g 和 D_{l_p} ($p=1,2,3,4$),如图4所示。设起点到目标点的重心的距离为 D ,从当前点到目标点重心需要移动的距离为 D_g ,已知当前点重心移动了距离 D_c ,则 $D_g = D - D_c$ 。设足端在任意构型中处于状态 i 时 x 方向与

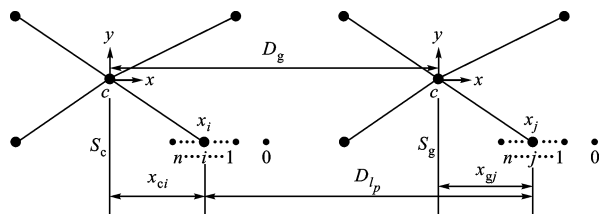


图4 当前构型与目标构型的距离

重心的距离为 x_{ci} ,则根据图4有

$$D_{l_p} = D_g + x_{gj} - x_{ci} \quad (1)$$

$$i, j = 0, \dots, n; p = 1, 2, 3, 4$$

设 $D_e = qD_g + r_1D_{l_1} + r_2D_{l_2} + r_3D_{l_3} + r_4D_{l_4}$, 其中 q 和 $r_1 \sim r_4$ 分别为重心及4条腿在与目标距离的评价中的权重系数。由于在四足机器人的步态中,移动重心相对于摆动腿会使机器人更加靠近目标,从而使步态的构型转换次数更少,即代价更小,因此在评价函数中要鼓励重心的移动,即在对某个节点与目标节点的距离评价中,须保证在单腿和重心移动相同的距离(D_{l_p} 与 D_g 减少相同值)的情况下,移动了重心的节点具有更小的代价,从而保证该节点在 OPEN 表中优先选取并拓展,那么须有 D_g 的权重系数大于 D_{l_p} 的权重系数,即 $q > r_i$ ($i=1,2,3,4$)。其物理意义是,在满足步态运动约束的情况下,机器人优先移动重心可以更快地到达目标点。由于四足机器人结构的对称性,腿移动相同距离的不同节点可以具有相等的代价,因此有

$$r_1 = r_2 = r_3 = r_4 \quad (2)$$

$$\text{又} \quad q + \sum r_i = 1 \quad i = 1, 2, 3, 4$$

$$\text{不妨取} \quad q = 0.5; \sum r_i = 0.5$$

$$r_i = 0.125 \quad (3)$$

最终构建的评价函数为

$$f(n) = d + kD_e \quad (4)$$

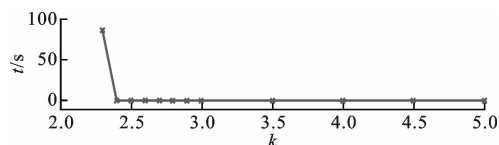
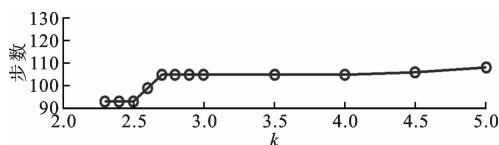
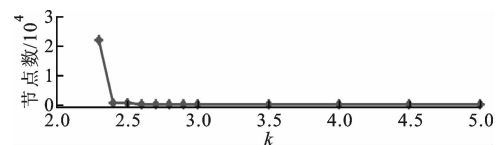
3 仿真实验及结果分析

为了验证模型和算法的有效性,本文在计算机上进行了仿真,仿真环境为 Visual C++, 主机 CPU 频率为 1.8 GHz, 运行内存为 6.0 GB。

3.1 k 值的选取

本文采用实验法选取 k 值。由 2.2 节所述, k 为移动单位距离需要的构型转换次数的估计值,其值越接近实际最小值,则算法效率越高^[11]。首先给 k 限定一个合理的范围,对于本文的四足机器人模型,移动 1 次重心平均至少需要 2 次构型转换,而最多需要 5 次构型转换(重心移动 1 次,4 条腿分别移动 1 次),因此取 $k \in [2, 5]$ 。在此范围内,对机器人在无障碍的地形上移动一定距离的规划算法进行了仿真,算法搜索时间、规划步态步数及总的拓展节点数与 k 的关系曲线如图 5 所示。由图可以看出,随着 k 值的增大,算法拓展的总节点数减少,搜索时间减少,所规划的步态的总步数增加。这是由于在 A^* 算法中,当估计值 $h(n)$ 越接近 $h^*(n)$ 时,越能更

快地找到最优解,而增强评价函数的启发性可以增加搜索速度,但不能保证解是最优的。由图5中 k 值与规划算法参数值的关系曲线得出,本算法在无障碍地形上取 $k=2.5$,保证了结果的优化性,同时搜索时间较短。由于在有障碍的地形下一般需要更多的构型转换次数, $h(n) \leq h^*(n)$ 仍然成立,因此在有障碍的情况下 $k=2.5$ 仍然满足可采纳性条件。

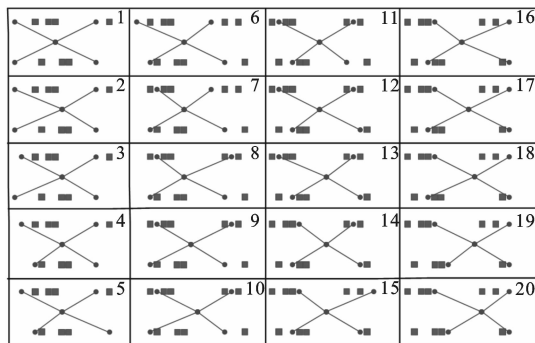
(a) k - t 关系(b) k -步数关系(c) k -节点数关系图5 k 值与规划算法参数值的关系

3.2 跨越障碍自由步态仿真及分析

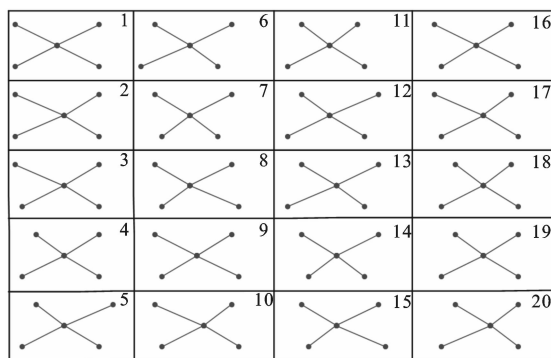
为了验证所规划自由步态的越障能力,设置目标点为前进方向9个栅格的距离;在机器人前后腿前进路线上随机设置了9个障碍,取 $n=3$,仿真结果如图6a所示。算法拓展节点数目为78,所用步数为20,搜索算法执行时间为0.019 s;为了与无障碍的规划结果进行对比分析,以相同的起点和目标点进行了仿真,算法拓展节点数目为191,所用步数为20,搜索算法执行时间为0.046 s,仿真结果如图6b所示。可以看出,规划算法得到了可行结果,规划时间很短,这体现了规划模型的有效性评价函数的优越性。

由图6a可见,由于障碍物的存在,其运动序列与图6b发生了明显的变化。序列在第3步开始不同,机器人由迈 l_4 改为迈 l_3 。在第5步中,由于稳定性约束不能选择迈 l_3 ,在经过第6步机体重心向前调整后, l_3 满足了稳定性约束,然后选择了障碍物间的候选落足点。同理,在经过第9和10步的动态转换后, l_4 在第11步跨越了障碍物。第12步中 l_1 向前迈步使得机器人在第13步实现了动态转换,从

而使得 l_3 和 l_2 分别第14和15步跨越了障碍。由此可以看出,搜索算法得到的步态序列调整了步序和落足点位置,从而使机器人顺利地跨越了障碍而没有陷入死锁状态。



(a) 有障碍地形自由步态



(b) 无障碍地形自由步态

■:障碍物

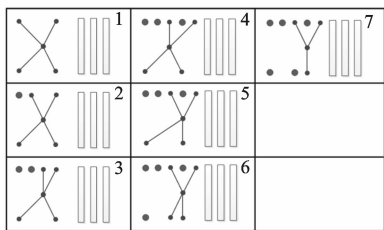
图6 自由步态规划仿真结果

3.3 候选落足点数对机器人越障能力的影响分析

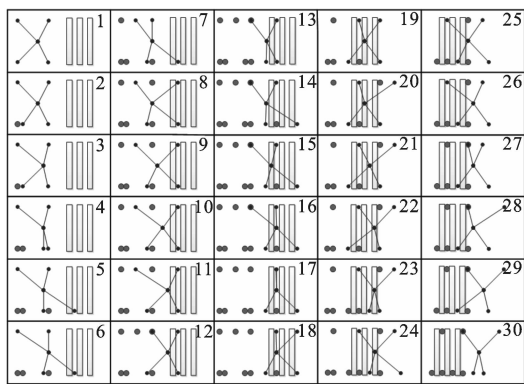
候选落足点数对规划算法有显著影响,理论上更多的候选落足点数使机器人有更多的落足位置选择,从而更容易通过复杂多障碍的地形,但是算法每一步拓展的子节点数增加,造成总的拓展节点数呈指数阶增长,算法复杂度增加。图7a中足端工作空间内有候选落足点0~3,但连续障碍物恰好占据了足端的3个候选落足点,仿真结果为未找到路径;保持障碍物位置不变,在工作空间内均匀离散为候选落足点0~6的仿真结果如图7b所示;算法拓展节点总数为733,搜索时间为0.186 s,假设障碍物间距大于足的宽度。

图7a中,由于候选落足点完全被障碍物占据,且连续障碍物宽度大于机器人的最大跨距,机器人没有可选落足位置,因此算法无解。图7b中,更多的候选落足点使得机器人在障碍物间隙处有了落足位置,利用障碍物间的候选落足点,机器人顺利通过了障碍物密集的地形。因此,在腿的最大跨距不变

的情况下,通过离散更多的候选落足点可以提高机器人通过障碍地形的能力,但代价是可能消耗更多的规划时间。在实际应用中,可以设计规划算法根据障碍物的分布情况而自主改变候选落足点数,在障碍物较密集的区域离散较多的候选落足点,在障碍物稀疏的区域离散较少的候选落足点,这样可以在缩短规划时间的同时提高机器人通过含有障碍的地形的能力。



(a) 候选落足点为 0~3($n=3$)的仿真结果



(b) 候选落足点为 0~6($n=6$)的仿真结果

●:落足点;□:障碍物

图 7 不同候选落足点数的步态仿真结果

3.4 三维模型仿真验证

为了进一步验证结果的可行性,本文建立了自由步态规划与控制系统,在 ADAMS-Simulink 联合平台中进行了仿真,仿真截图如图 8 所示,截图 1~20 分别与图 6b 中的步态序列 1~20 相对应,从而验证了规划步态的可行性。

4 结 论

本文阐述了一种基于图搜索的四足机器人步态规划方法,建立了一种改进的离散化四足机器人步态规划模型,设计了基于 A* 算法的步态规划算法,实现了跨越障碍的直线自由步态规划,通过仿真验证了规划模型和算法的有效性及其优越性并分析得出通过增加候选落足点个数可以提高机器人对地形的适应能力。需要说明的是,当障碍物的尺寸超过了

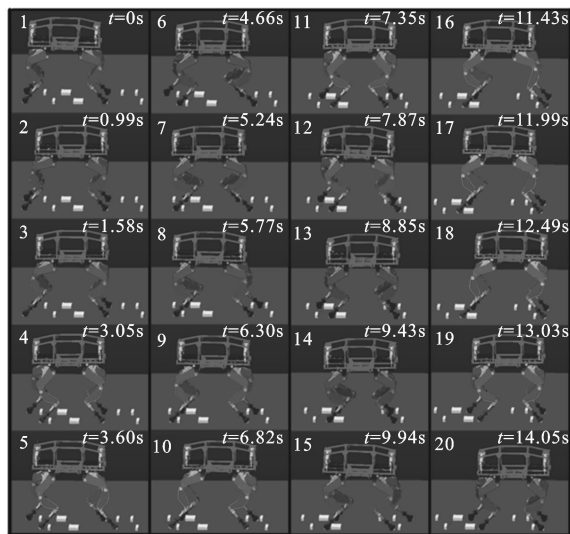


图 8 越障自由步态 ADAMS 与 Simulink 联合仿真

机器人的最大跨距或障碍物分布过于密集时,会造成算法无解。这是因为障碍物已超过机器人越障能力范围,本文算法在有解的情况下均能快速规划出最优越障自由步态。

参考文献:

- [1] 陈学东,孙翊,贾文川. 多足步行机器人运动规划与控制 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006: 114-115.
- [2] ESTREMERA J, DE SANTOS P G. Generating continuous free crab gaits for quadruped robots on irregular terrain [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(6): 1067-1076.
- [3] MCGHEE R B, ISWANDHI G I. Adaptive locomotion of a multilegged robot over rough terrain [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1979, 9(4): 176-182.
- [4] PAL P K, JAYARAJAN K. Generation of free gait: a graph search approach [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1991, 7(3): 299-305.
- [5] VERNAZA P, LIKHACHEV M, BHATTACHARYA S, et al. Search-based planning for a legged robot over rough terrain [C]// Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 2380-2387.
- [6] REBULA J R, NEUHAUS P D, BONNL B V, et al. A controller for the littledog quadruped walking on rough terrain [C]// Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 1467-1473.

(下转第 144 页)