

8-5-2020

## Motion Planning Algorithm Based on Overall Trajectory for Locomotion of 6-legged Robot

Zuhua Guo

*School of Aeronautics, Beihang University, Beijing 100191, China;*

Shenjiang Wang

*School of Aeronautics, Beihang University, Beijing 100191, China;*

Shijie Zhao

*School of Aeronautics, Beihang University, Beijing 100191, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Motion Planning Algorithm Based on Overall Trajectory for Locomotion of 6-legged Robot

## Abstract

**Abstract:** A traditional motion planning method based on gaits is difficult to adopt to complicate nature terrain. In order to solve the problem, a *planning algorithm based on overall trajectory* was proposed. The basic unit of robot maneuver was a walking step. The proposed method was to estimate position of robot in the next moment along a given overall trajectory, and then to plan the joints' trajectory of robot. In this algorithm, the motion of a single step was decomposed into two parts, the motion of moving robot body with support of legs and the motion of swinging legs forward, which performed in same time. A *parametric parabola* was used to describe the trajectory of the motions to avoid the problem that trajectories depended on a reference coordinate system in traditional method. It is convenient to realize online trajectory planning. A detail motion planning algorithm was discussed and proved by a simulation.

## Keywords

6-legged robot, motion planning, kinematics, simulation

## Recommended Citation

Guo Zuhua, Wang Shenjiang, Zhao Shijie. Motion Planning Algorithm Based on Overall Trajectory for Locomotion of 6-legged Robot[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(11): 2682-2688.

# 基于全局轨迹的六足机器人运动规划算法

郭祖华, 王申江, 赵士杰

(北京航空航天大学宇航学院, 北京 100191)

**摘要:** 为解决基于步态的规划方法难以适应复杂自然地形的问题, 一种基于全局轨迹的规划算法被提出。机器人实现机动的的基本运动单元是一次迈步, 算法沿着运动轨迹估计下一步所能到达的位置, 规划在当前位置和目的位置间机器人各关节的轨迹。在算法中机器人的一次迈步动作被分解成支撑腿移动身体和迈步腿向前摆动 2 个部分, 采用抛物线参数曲线来描述迈步过程中机器人质心和摆动足的运动轨迹, 从而避免了传统方法中迈步轨迹与参考坐标系相关的问题, 便于实现在线规划。最后在文中给出了具体运动规划算法, 并通过了仿真验证。

**关键词:** 六足机器人; 运动规划; 运动学; 仿真

中图分类号: TP242.6

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 11-2682-07

## Motion Planning Algorithm Based on Overall Trajectory for Locomotion of 6-legged Robot

Guo Zuhua, Wang Shenjiang, Zhao Shijie

(School of Aeronautics, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** A traditional motion planning method based on gaits is difficult to adopt to complicate nature terrain. In order to solve the problem, a planning algorithm based on overall trajectory was proposed. The basic unit of robot maneuver was a walking step. The proposed method was to estimate position of robot in the next moment along a given overall trajectory, and then to plan the joints' trajectory of robot. In this algorithm, the motion of a single step was decomposed into two parts, the motion of moving robot body with support of legs and the motion of swinging legs forward, which performed in same time. A parametric parabola was used to describe the trajectory of the motions to avoid the problem that trajectories depended on a reference coordinate system in traditional method. It is convenient to realize online trajectory planning. A detail motion planning algorithm was discussed and proved by a simulation.

**Keywords:** 6-legged robot; motion planning; kinematics; simulation

## 引言

从仿生的观点看, 足式行走机器人在不规则的自然地形环境中具备更好的适应能力, 这一点是传

统的轮式或履带式机器人无法比拟的。几十年来足式机器人一直是一个研究热点, 其中六足机器人是一种以静态步态实现行走的理想平台, 容易实现行走, 具有很强的应用价值。针对六足机器人各国学者展开了多方面的研究, 但真正成功的应用实例还未见报道, 由此可见其中的挑战性。移动机器人的运动规划是一个关键任务, 常规的移动机器人只需要选择移动路径避开障碍物就可以了, 但足式机器



收稿日期: 2014-05-03 修回日期: 2015-03-30;  
作者简介: 郭祖华(1971-), 男, 湖北当阳, 博士, 副教授, 研究方向为动力学系统的仿真与控制、飞行器设计、足式移动机器人控制; 王申江(1989-), 男, 江苏, 硕士生, 研究方向为仿人机器人; 赵士杰(1988-), 河北, 硕士生, 研究方向为足式行走机器人。

<http://www.china-simulation.com>

• 2682 •

人在规划全局运动轨迹的同时需要规划其各条腿的关节轨迹。为了实现六足机器人的运动控制, 以前的研究一般采用基于步态的方法<sup>[1-3]</sup>, 即将机器人的基本运动单元归结为特定的步态, 将这些基本步态进行组合就可以实现复杂路径的行走, 所以路径规划的问题就被转化成了步态组合问题。但是步态研究的成果都是基于平面地形假设的, 按组合步态行进使机器人显得呆板。另一个方面, 这些基于步态的方法总是以机器人的身体为观察点定义机器人足端的运动形式, 比如文献[4]中采用了抛物线或三角形曲线作为机器人足端轨迹, 文献[1]中用分断光滑曲线定义了足端轨迹曲线模版, 文献[5]中采用样条曲线表示足端的轨迹, 文献[6]中则采用了 6 次多项式来描述摆动足的轨迹, 采用 5 次多项式来描述支撑足的轨迹。这类方法存在 2 个问题: (1) 相对于机器人身体的足端运动轨迹描述方法不能包含机器人全局轨迹的信息和当前地形的信息, 行进过程中机器人难以适应自然地形, 机器人的全局运动轨迹也难以和足端运动相协调; (2) 这种规划方法无法考虑机器人行走过程中身体姿态的变化。针对这些问题, 本文提出了一种基于全局轨迹信息的方法来规划机器人各个关节的运动轨迹, 使得机器人行进过程中每一步的关节轨迹只与当前位置点和未来目的点的位置信息有关, 同时机器人质心轨迹能和全局运动轨迹指令很好的吻合。本文提出的方法将足式机器人的顶层轨迹规划和关节运动规划有机结合, 并能实现轨迹的在线更新。为了验证前面提出的想法, 本文选用了中心对称构形的六足机器人为研究对象, 实现了机器人沿任意轨迹行走时的运动规划。

## 1 机器人结构及坐标定义

本文的六足机器人采用中心对称结构, 这样机器人可以向任意方向行走, 机器人的一条腿采用 RRR 机构, 如图 1 所示。将机器人的一次迈步动作分解成摆腿运动和支撑移动 2 个动作, 前者通过机器人腿部机构的运动学反解来实现; 后者通过 3

支链并联机构的运动学反解来实现。机器人的腿部连杆从上到下依次编号为 1, 2, 3, 机构及坐标系定义如图 1 所示。图中  $o-xyz$  为机器人身体坐标系;  $o_0-x_0y_0z_0$  为中间坐标系; 坐标系  $o_1-x_1y_1z_1$ ,  $o_2-x_2y_2z_2$  和  $o_3-x_3y_3z_3$  分别固定在腿的各个构件上; 足端与地面接触, 相当于一个球形铰链, 包含有 3 个转动自由度, 为分析方便, 建立 3 个中间坐标系  $o_4-x_4y_4z_4$ ,  $o_5-x_5y_5z_5$  和  $o_6-x_6y_6z_6$ ; 地面参考坐标系为  $o_e-x_ey_ez_e$ 。

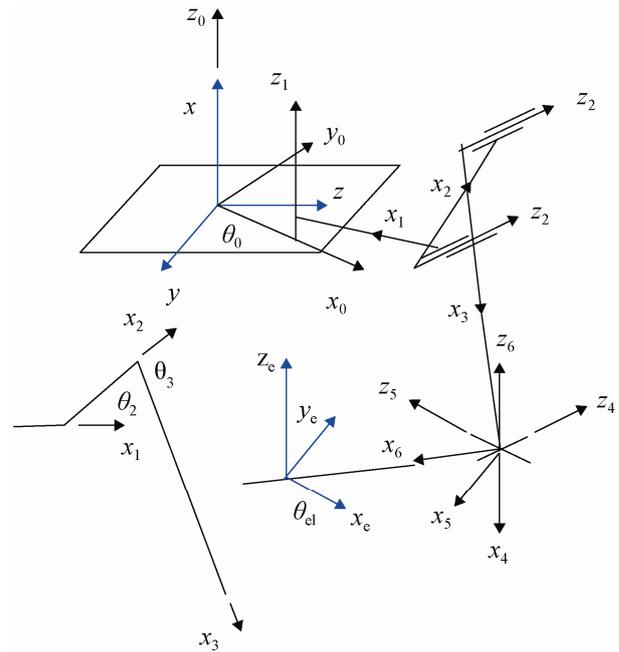


图 1 六足机器人身体及腿部坐标系定义

各个坐标系之间的相对关系用 D-H 方法表示, 机器人具体参数见表 1。定义  ${}^B T_0$  为坐标系 0 到身体坐标系的变换矩阵, 同理定义其余变换矩阵依次为  ${}^0 T_1$ ,  ${}^1 T_2$ ,  ${}^2 T_3$ ,  ${}^3 T_4$ ,  ${}^4 T_5$ ,  ${}^5 T_6$ ,  ${}^6 T_e$ 。

表 1 六足机器人的结构参数表

坐标序号	$a_{i-1}$	$\alpha_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
0	0	0	0	$\theta_0$
1	$a_0$	0	$d_1$	$\theta_1$
2	$l_1$	$3\pi/2$	$d_2$	$\theta_2$
3	$l_2$	0	$d_3$	$\theta_3$
4	$l_3$	0	0	$\theta_4$
5	0	$\pi/2$	0	$\theta_5$
6	0	$-\pi/2$	0	$\theta_6$
e	$e_1$	0	0	$\theta_{e1}$

## 2 机器人运动学模型

### 2.1 单腿运动学模型

设  ${}^B T_3$  为坐标系 3 到机器人身体坐标系的变换矩阵, 对于单腿列写如下方程:

$${}^B T_3 = {}^B T_0 {}^0 T_1 {}^1 T_2 {}^2 T_3$$

于是得到机器人足的位置正解

$$x = -l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) - l_2 \sin \theta_2 + d_1 \quad (1)$$

$$y = a_0 \cos \theta_0 - (d_2 + d_3) \sin(\theta_0 + \theta_1) + [l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_2 \cos \theta_2 + l_1] \cos(\theta_0 + \theta_1) \quad (2)$$

$$z = a_0 \sin \theta_0 + (d_2 + d_3) \cos(\theta_0 + \theta_1) + [l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_2 \cos \theta_2 + l_1] \sin(\theta_0 + \theta_1) \quad (3)$$

其中:  $x, y, z$  表示在身体坐标系中机器人某足的位置坐标。

求解方程(1) (2) (3)得到腿的运动学逆解为:

$$\theta_1 = \arctan \frac{-q_2 \pm \arctan \frac{d_2 + d_3}{\sqrt{q_1^2 + q_2^2 - (d_2 + d_3)^2}}}{q_1} \quad (4)$$

$$\theta_2 = \pm \arctan \frac{q_4}{q_5} + \arctan \frac{q_3}{x - d_1} \quad (5)$$

$$\theta_3 = \arctan \frac{-x + d_1 - l_2 \sin \theta_2}{q_3 - l_2 \cos \theta_2} - \theta_2 \quad (6)$$

其中  $q_1 = a_0 - z \sin \theta_0 - y \cos \theta_0$

$$q_2 = z \cos \theta_0 - y \sin \theta_0$$

$$q_3 = \frac{[y + (d_2 + d_3) \sin(\theta_0 + \theta_1) - a_0 \cos \theta_0] - l_1}{\cos(\theta_0 + \theta_1)}$$

$$q_4 = \frac{[l_3^2 - q_3^2 - (x - d_1)^2 - l_2^2]}{2l_2 \sqrt{q_3^2 + (x - d_1)^2}}$$

$$q_5 = \sqrt{1 - \frac{(l_3^2 - q_3^2 - (x - d_1)^2 - l_2^2)^2}{4l_2^2 (q_3^2 + (x - d_1)^2)}}$$

通过公式(4)(5)(6)可以实现在身体坐标系下摆动腿的关节轨迹规划。

### 2.2 三腿支撑时的运动学模型

机器人三腿支撑时, 构成一个多支链的并联机构, 以任一支链作为研究对象, 采用绕  $xyz$  (RPY) 顺序旋转的欧拉角描述机器人身体的姿态, 设 3 个姿态角分别为  $\alpha, \beta, \gamma$ , 身体的位置为  $X, Y, Z$ , 得到机器人身体相对于地面坐标系变化矩阵为  ${}^e T_B$ 。该矩阵的逆矩阵记为  ${}^B T_e$ , 于是列出支链的运动学方程如下

$${}^B T_0 {}^0 T_1 {}^1 T_2 {}^2 T_3 {}^3 T_4 {}^4 T_5 {}^5 T_6 {}^6 T_e = {}^B T_e \quad (7)$$

$$\text{令 } L = {}^0 T_1 {}^1 T_2 {}^2 T_3 {}^3 T_4 {}^4 T_5 {}^5 T_6 \quad R = {}^0 T_B {}^B T_e {}^e T_6$$

其中  ${}^0 T_B$  和  ${}^e T_6$  是  ${}^B T_0$  和  ${}^6 T_e$  的逆矩阵。

于是, 方程(7)可以简单表示成

$$L = R \quad (8)$$

$R$  是已知的, 求解方程(8)可以得到

$$\theta_1 = -\arctan \frac{r_{14} - a_0}{r_{24}} \pm \arctan \frac{\sqrt{r_{24}^2 + (r_{14} + a_0)^2 - (d_2 + d_3)^2}}{d_2 + d_3} \quad (9)$$

$$\theta_2 = -\arctan \frac{k_2}{k_1} \pm \frac{\sqrt{4(k_1^2 + k_2^2)l_2^2 - (k_1^2 + k_2^2 + l_2^2 - l_3^2)^2}}{k_1^2 + k_2^2 + l_2^2 - l_3^2} \quad (10)$$

$$\theta_3 = \arctan \frac{-k_2 - l_2 \sin \theta_2}{k_1 - l_2 \cos \theta_2} - \theta_2 \quad (11)$$

其中:  $k_1 = \frac{[r_{24} - (d_2 + d_3) \cos \theta_1]}{\sin \theta_1} - l_1$ ;  $k_2 = r_{34} - d_1$ ;

$r_{ij}$  是矩阵  $R$  第  $i$  行第  $j$  列的元素。

通过公式(9) (10) (11), 可以根据机器人身体姿态和位置求解支撑腿的各个关节角, 实现支撑腿关节角的轨迹规划。

## 3 机器人质心轨迹

机器人行走时, 期望质心轨迹和机器人移动一步时机器人质心的真实轨迹之间的关系如图 2 所示。关于机器人期望的移动轨迹, 可以用各种方式来表示, 本文采用了 3 次 B 样条曲线, 在这里不

作详细叙述。当机器人行走时, 迈步运动是一种准周期运动。参看图 2, 实现一次迈步时机器人质心可以沿直线轨迹运动, 也可以沿某一条曲线运动。本文采用曲线定义单步移动时机器人质心的运动轨迹。参数化抛物曲线被用来描述机器人单步移动时的质心运动, 选定机器人行走过程中的某一时刻进行研究, 过机器人质心作一个平面, 使重力矢量和机器人的期望运动方向都被包含在这个平面内, 在紧接着的一步运动中, 质心在该平面内的运动轨迹为抛物线。

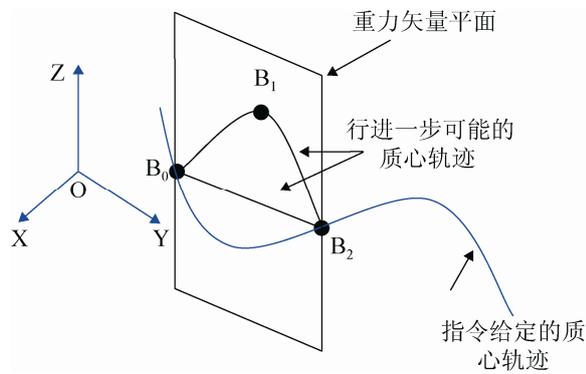


图 2 六足机器人移动轨迹示意图

抛物线按如下方法来确定

$$B_2 = B_0 + \kappa_2 S_1 V \quad (12)$$

其中:  $B_0$  为机器人质心初始位置;  $S_1$  为步长;  $V$  为机器人前进方向;  $\kappa_2$  为质心步距调整因子; 当机器人从静止状态起步时和从运动状态到停止时,  $\kappa_2 < 1$ , 具体取值与行走方向有关, 其他时候取  $\kappa_2 = 1$ , 当在其它复杂地面环境中行进时, 机器人前进的方向取在机器人所在支撑面的切面内即可。

机器人质心轨迹的最高点取在起点  $B_0$  和终点  $B_2$  之间, 用公式表示如下

$$B_1 = B_0 + (1 - \kappa_1) \kappa_2 S_1 V + H V_{up} \quad (13)$$

其中:  $\kappa_1$  为质心轨迹最高点位置因子, 一般取  $\kappa_1 = 0.5$ , 此时, 若将最高点投影到起点  $B_0$  和终点  $B_2$  的连线上, 则该投影点将落在  $B_0$  和  $B_2$  连线的中点;  $V_{up}$  为竖直向上的方向矢量;  $H$  为迈步过程中机器人质心的起伏高度。在已知 3 个点的情况

下, 可以采用以下抛物曲线计算出一次迈步过程中任意时刻的质心位置。

$$B_i = [t^2 \quad t \quad 1] \begin{bmatrix} 2 & -4 & 2 \\ -3 & 4 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{0i} \\ B_{1i} \\ B_{2i} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中:  $t$  是曲线的驱动参数, 在 0~1 取值; 计算时  $i$  分别取为  $x$ ,  $y$  或  $z$ , 表示坐标点的 3 个分量。当给定运动方向  $V$ , 迈步的步长  $S_1$  和步伐起伏高度  $H$  时机器人单步迈步的质心轨迹就确定了。轨迹模型中的参数  $\kappa_1$  能控制单步迈步时质心运动轨迹的形状。以上质心运动轨迹模型表明机器人的质心轨迹只与其起点、中点和终点有关, 是全局轨迹信息的函数。移动一步的平均速度可以表示为

$$\bar{v} = \frac{S_1}{\Delta T} \quad (15)$$

其中:  $\Delta T$  为移动一步所花费的时间。

## 4 机器人迈步足的轨迹

当机器人支撑腿支撑身体移动质心时, 抬起的那一组足将沿着某个方向移动一个迈步的距离, 这个距离可以根据质心的目的位置和支撑稳定条件来确定, 然后按如下公式确定足的落点,

$$Z_2 = Z_0 + \kappa_4 S_2 V_b \quad (16)$$

其中:  $Z_0$  为摆动足的起始位置;  $\kappa_4$  为足端步距调整因子, 在行走过程的起步点和停止点, 取  $\kappa_4 < 1.0$ , 在正常行走时可以取  $\kappa_4 = 1.0$ ;  $V_b$  为机器人摆动足前移的方向矢量, 该矢量可以与机器人前进方向  $V$  同, 也可以不同。同理可以定义足轨迹中点为

$$Z_1 = Z_0 + (1 - \kappa_3) \kappa_4 S_2 V_b + h V_{up} \quad (17)$$

其中  $\kappa_3$  为摆动足轨迹最高点位置因子, 一般取  $\kappa_3 = 0.5$ ;  $h$  为抬足高度。这样, 根据 3 个坐标点, 采用参数化的抛物线方程(14)来描述摆动足的轨迹。

下面具体讨论机器人迈步时, 其质心移动的步长  $S_1$  和摆动足落点的位置  $Z_2$  确定条件。假设行走过程中机器人始终保持静态稳定, 约定按照三角步

态行走且 2 组腿在行进过程中互不交叉, 支撑的一组足在地面组成第 1 个支撑三角形, 摆动足未来的落点形成第 2 个支撑三角形, 则机器人的质心必须从原来的支撑三角形内按特定的方向移动到未来的支撑三角形内, 这要求前后两组支撑足所形成的三角形必须有一部分公共区域以满足稳定性。图 3 中展示了各种迈步情况下质心与支撑三角形之间的关系。

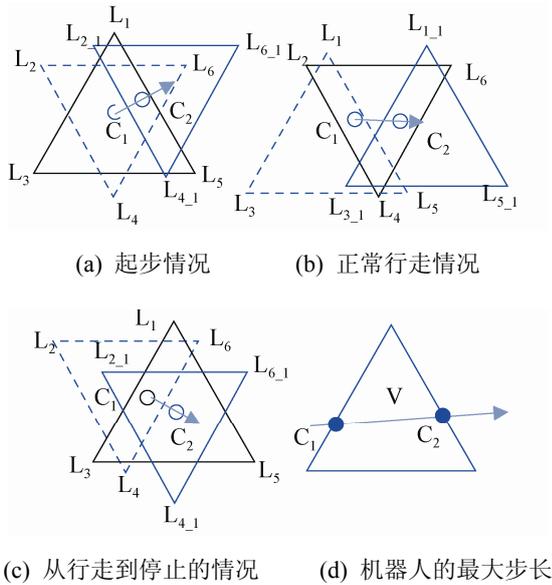


图 3 不同的迈步情况分析及其最大可能步长

图 3(a)是机器人从静止状态起步时机器人的迈步情况, 起初机器人站立时质心在  $C_1$  点, 6 个脚分别在  $L_1-L_6$  点, 迈步后质心由  $C_1$  沿箭头所示的方向移动到  $C_2$  点, 足点  $L_1, L_3, L_5$  不动构成支撑三角形, 足点  $L_2, L_4, L_6$  移到了  $L_{2.1}, L_{4.1}, L_{6.1}$  各点, 构成下一步移动的支撑三角形。机器人迈步过程中保证质心在三角形  $L_1L_3L_5$  内, 当迈步足着地后, 质心同时保证在新支撑三角形  $L_{2.1}L_{4.1}L_{6.1}$  内。图 3(b)显示了机器人正常行走时机器人的质心移动步长和落足点情况, 此时机器人采用正常步距, 而机器人从静止到行走和从行走到静止时, 机器人的步距为正常步距的一半左右; 图 3(c)显示了机器人从行走到停止时机器人的质心移动距离; 图 3(d)显示  $C_1C_2$  之间的距离是机器人沿特定方向所能实现的最大质心移动距离, 显然机器人最大步长

与机器人质心相对于支撑三角形的位置、支撑三角形大小以及移动方向有关, 行走过程中保证机器人的移动方向矢量  $V$  始终通过支撑三角形的中心是一个好的策略。

### 5 机器人行走运动规划算法

六足机器人行走过程的基本单元是一次迈步, 包括支撑腿移动机器人身体, 同时摆动腿离地并迈向预期的着地点的全过程。规划算法从接收到新的轨迹指令任务开始, 根据期望的轨迹信息首先确定机器人下一步的前进方向, 和一个合理的迈步步长; 然后根据公式(12), (16)计算出质心和摆动足的目的点, 根据公式(13), (17)计算出轨迹的中间点; 然后根据公式(14)对迈步过程中质心轨迹和摆动足轨迹进行插值, 并根据每一个时刻的轨迹点运用第 3 节中的反解公式(4) (5) (6)和(9) (10) (11)规划出肢体的关节角。循环上述过程就可以实现全条指令的机器人运动规划。具体的规划算法如图 4 所示。为了验证模型和算法的正确性, 笔者编制了规划仿真软件, 实现了任意轨迹指令下机器人运动的规划。

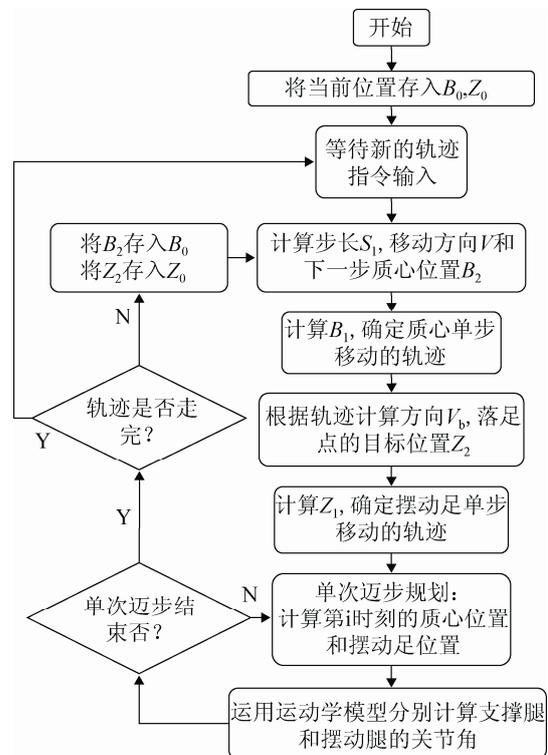


图 4 六足机器人行走运动规划算法

图 5 显示了六足机器人行走运动仿真的视频快照, 图中球形和柱体表示地形中的 2 个障碍物, 机器人从 2 个障碍物中间起步, 绕到球形物的背后, 然后再从 2 个障碍物之间穿过, 最后绕到柱形障碍物的前方, 该仿真实验验证 2 个内容: (1) 规划算法以一组期望的质心位置点作为轨迹输入指令, 机器人采用 3 次样条曲线构造平滑自然的质心移动轨迹; (2) 行走某时刻规划算法根据当前的质心位选择下一个时刻落脚点的位置, 并规划摆动腿的各个关节角, 这样每一步的运动和质心的全局轨迹紧密相关, 使得机器人的运动轨迹和行走运动更加自然, 而常规基于步态组合的方法则使机器人的行走呆板。显然采用样条曲线描述质心轨迹具有坐标无关性, 根据前面的论述, 采用抛物参数曲线描述迈步运动, 也具有坐标无关性, 所以地形信息已知时, 该算法很容易推广到任意复杂地形中的机器人轨迹规划。

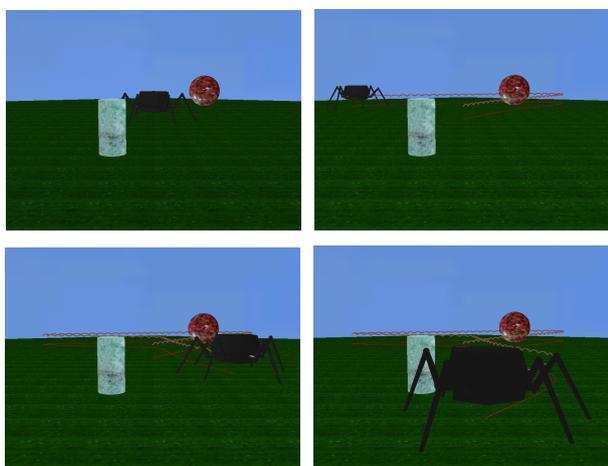


图 5 六足机器人行走动画的视频快照

由于机器人的轨迹指令只是一组点坐标, 所以机器人在行走过程中, 只要适时更改指令序列中的点就可以随时改变机器人的行走轨迹, 文章通过仿真实验验证了这一点。设机器人在行走时, 突然发现原定的轨迹上有障碍物, 机器人离障碍物足够近时, 自动在线更新后面的轨迹数据, 绕开障碍物继续行走, 图 6 是验证该情况的仿真图形。

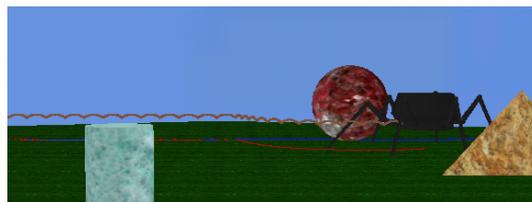


图 6 六足机器人在线更新行走轨迹

图中蓝色轨迹为起初规划的轨迹, 当行走到球形障碍物附近时, 机器人自动调整行走轨迹, 绕开了障碍物, 橙色轨迹为机器人的实际行走轨迹。两个仿真的完整动画视频可以在 [dynamics.buaa.edu.cn](http://dynamics.buaa.edu.cn) 上看到。

## 6 结论

本文根据六足机器人的运动模型, 提出了一种六足机器人行走规划算法。该算法将机器人沿某条轨迹的运动分解成一系列的单步运动, 并用参数化抛物线描述迈步过程中机器人质心和迈步足端点运动轨迹, 对机器人的各个关节角进行了规划。支撑腿移动身体的运动采用多支链并联机构的模型进行规划, 机器人摆腿的运动则采用单腿运动学模型进行规划。论文通过两个计算机仿真实验证实了采用本文算法规划的轨迹更加自然流畅, 而且机器人可以在运动过程适时调整轨迹数据以躲避障碍物, 并以动画的形式进行显示。该方法的特色是机器人每一步的运动轨迹由机器人当前位置点和期望到达的位置点确定, 机器人腿部关节的规划包含了充分的全局轨迹信息, 使得机器人行走更自然; 本文算法具有与特定的坐标系无关的特点, 使得该方法容易推广到任意复杂的地形环境; 采用少量的离散的质心坐标表达机器人的行走指令, 可以方便的实现在线轨迹规划和更新。

## 参考文献:

- [1] Kan Yoneda, Kenji Suzuki, Yutaka Kanayama, *et al.* Gait and Foot Trajectory Planning for Versatile Motions of a Six-legged Robot [J]. *Journal of Robotic Systems* (S0741-2223), 1997, 14(2): 121-133.
- [2] J Estremera, J A Cobano, P Gonzalez de Santos.

- Continuous Free-crab Gaits for Hexapod Robots on a Natural Terrain with Forbidden Zones: an Application to Humanitarian Demining [J]. *Robotics and Autonomous Systems* (S0921-8890), 2010, 58(5): 700-711.
- [3] Dilip Kumar Pratihari, Kalyanmoy Deb, Amitabha Ghosh. Optimal Path and Gait Generations Simultaneously of a Six-legged Robot Using a GA-fuzzy Approach [J]. *Robotics and Autonomous Systems* (S0921-8890), 2002, 41(1): 1-20.
- [4] M C García-López, E Gorrostieta-Hurtado, E Vargas-Soto, *et al.* Kinematic Analysis for Trajectory Generation in One leg of a Hexapod Robot [C]// The 2012 Iberoamerican Conference on Electronic Engineering and Computer Science (S2212-0173). *Procedia Technology*, Elsevier Ltd, 2012: 342-350.
- [5] Luo Qingsheng, Zhang Hui, Han Baoling, *et al.* Research on Biologically Inspired Hexapod Robot's Gait and Path Planning [C]// International Conference on Information and Automation (S978-1-4244-3608-8), Proceedings of the 2009 IEEE, Zhuhai/Macau, China. USA: IEEE, 2009: 1546-1550.
- [6] 袁鹏. 仿生机器蟹步行机理分析及控制系统研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2003. (Yuan P. Research on Walking Mechanism Analysis and Control System of a Crab-liked Biologically Inspired robot [D]. Harbin, China: Harbin Engineering University, 2003)
- [7] 王刚. 仿蟹机器人步态规划及复杂地貌行走方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010. (Wang G. Research on Gait Planning and Uneven Terrain's Walking Method of Crab-like Robot [D]. Harbin, China: Harbin Engineering University, 2010.)
- [8] J A Cobano, J Estremera, P Gonzalez de Santos. Location of legged robots in outdoor environments [J]. *Robotics and Autonomous Systems* (S0921-8890), 2008, 56(9): 751-761.
- [9] Shibendu Shekhar Roy, Dilip Kumar Pratihari. Effects of turning gait parameters on energy consumption and stability of a six-legged walking robot [J]. *Robotics and Autonomous Systems* (S0921-8890) 2012, 60(1): 72-82.
- [10] S T Venkataraman. A simple legged locomotion gait model [J]. *Robotics and Autonomous Systems* (S0921-8890), 1997, 22(1): 75-85.
- [11] Donghoon Son, Dongsu Jeon, Woo Chul Nam, *et al.* Gait planning based on kinematics for a quadruped gecko model with redundancy [J]. *Robotics and Autonomous Systems* (S0921-8890) 2010, 58(5): 648-656.

(上接第 2681 页)

### 3 结论

DRS 在事件调度的精确时刻执行线性规划问题的求解算法, 相比于连续流建模, DRS 避免了按照固定时间步长进行计算导致的精度缺失, 同时, 也最大限度的减少了仿真计算的次数; 相比于离散事件建模, DRS 避免了使用离散项代表流体而造成大量冗余数据的现象。因此, DRS 能够准确反映出铁路散装油料收发作业的动态行为, 通过仿真结果的分析, 可以为决策者及时合理的调度提供数据支撑, 也可以对作业中安全事故造成的损失提供量化评估。尽管如此, 仿真模型对于未来事件的预知, 尤其是事故的预防, 仍然缺乏足够的预

判能力, 这将是进一步需要探讨的工作。

### 参考文献:

- [1] 蔺子军, 朱建成, 王丰. 油库作业安全管理 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2008.
- [2] 薛乐, 魏晨, 陈宗基. 混合系统的建模设计与仿真综述 [J]. *计算机仿真*, 2006, 23(6): 1-5.
- [3] Cecile Damiron, Anthony Nastasi. Discrete Rate Simulation Using Linear Programming [C]// Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference. USA: WSC, 2008: 740-749.
- [4] 李明. 炼油过程生产调度建模方法研究 [D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [5] The Imagine That Inc. ExtendSim User Guide, Eighth release [DB/OL]. 2010. www.extendsim.com.
- [6] 秦天保, 王岩峰. 面向应用的仿真建模与分析-使用 ExtendSim [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.