

DOI: 10.3901/JME.2017.21.001

# 轮腿式机器人步态生成的拓扑矩阵方法\*

郭为忠 汤耘 高峰

(上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室 上海 200240)

**摘要:** 为实现机器人在核电救灾等非结构化环境中的步态规划和自适应行走,以六足轮腿式机器人为研究对象提出基于当前地形的机器人自适应在线生成步态的规划策略,通过全局地形环境中机器人对前进方向局部地形的实时识别,确定其基本地形类型,产生相应的基本步态,动态生成机器人的步态序列。定义机器人触地状态及其列矢量表达,给出机器人步态因子的分类及其拓扑矩阵;定义基本地形及相应的基本步态,给出基本步态的拓扑矩阵;在此基础上,提出基于地形识别的步态拓扑规划策略和步态拓扑矩阵生成流程,通过矩阵递推算法实现机器人步态拓扑的动态生成。

**关键词:** 轮腿式机器人;步态拓扑;步态因子;基本地形;基本步态

**中图分类号:** TP242

## Topology Matrix Method for Gait Generation of Wheel-legged Robots

GUO Weizhong TANG Yun GAO Feng

(State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

**Abstract:** To perform adaptive gait planning and automatic walking in unstructured environment such as the nuclear power plant rescue, a six wheel-legged robot is applied in order to put forward a planning strategy of adaptive robot gait generation based on current terrain. The local terrain ahead of the robot walking in a global environment is identified on-line that determines the type of the elemental terrain and then the corresponding elemental gait forming the gait sequence dynamically. The definition of robot touchdown state is given following its vector expression, and the gait unit is defined using touchdown state and classified with topology matrix expressions. The elemental terrains and the corresponding elemental gaits are proposed with matrix expressions. The gait topology matrix generation procedure is put forward based on terrain recognition that realizes dynamic generation of the robot's gait topology matrix via a recursive algorithm.

**Key words:** wheel-legged robot; gait topology; gait unit; elemental terrain; elemental gait

## 0 前言

在核电站事故复杂环境、野外复杂地形、自然灾害环境等特殊地理条件下,轮腿式步行机器人<sup>[1]</sup>是一种具有较强适应性的载运与作业装备。不同于一般的腿式<sup>[2]</sup>或轮式<sup>[3]</sup>机器人,轮腿式机器人兼有轮与腿二者优势,具有作业模式切换灵活、适应性强等特点,比腿式机器人具有更多的步态形式。

机器人步态<sup>[4]</sup>是指机器人腿足按一定顺序和轨迹实现机器人移动的运动过程。医学上步态是指走路时所表现的姿态,有步行、爬行、奔跑、跳跃<sup>[5]</sup>

等形式。本文仅讨论步行情况,指机器人移动过程中腿足触地状态的变化过程。对机器人步态生成的研究可以追溯到 1968 年 Mc GHEE 等<sup>[6]</sup>对四足步行机器人的直线爬行波动步态研究,定义了“步行稳定性”等概念,得出波浪形步态稳定性最高。

机器人步态生成即步态规划或设计首先需要解决步态的表达问题。利用图形化进行描述的方法主要有示意图法(仿真图)<sup>[7]</sup>、相位图法(时序图)<sup>[8]</sup>等。示意图法通过仿真图形式反映机器人腿部的运动姿态,形象直观但精确性不够;相位图法通过建立时间-位移二维图像来用直线、方波或者曲线描述腿的运动。韦素媛等<sup>[9]</sup>提出步态序列时空能量图,通过步态序列样本每一帧的轮廓线图来获得图像,得出能量值,即在某一点上轮廓线出现的次数。杨军等<sup>[10]</sup>研究了人的步态问题,提出基于多区域分割的步

\* 国家自然科学基金(51275284, 51323005)和国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2013CB035501)资助项目。20170130 收到初稿, 20170724 收到修改稿

态表示方法, 结合人体结构特点划分多个子区域, 各子区域通过连接人体重心的椭圆进行拟和, 获得多连接椭圆的人体结构模型, 各椭圆参数可从区域特征中提取, 模型参数的变化能够较好地反映步行的动态特征。WANG 等<sup>[11]</sup>提出将步态轮廓图转换为轮廓到质心距离矢量的方法, 以质心为原点, 按逆时针顺序依次将步态轮廓图展开, 将每一点到质心的距离矢量作为特征。EKINCI<sup>[12]</sup>提出基于步态轮廓图投影的算法, 对步态视频的每一帧图像均计算出上下左右四个方向的投影矢量, 一个方向的所有投影矢量组成该方向的投影模板, 从而生成四个投影模板作为特征。柳洪义等<sup>[13]</sup>针对  $n$  足行走机器人提出“事件矩阵法”进行步态描述和分类。

在前期轮腿式机器人步态表达研究基础上<sup>[14-15]</sup>, 本文针对非结构化环境中实现机器人自主行走的目标开展研究, 提出基于当前地形的机器人自适应动态生成步态的规划策略, 基本思想是在全局地形环境中对机器人前进方向的局部地形进行实时识别, 确定其基本地形的类别, 产生相应的基本步态, 动态生成机器人的步态序列和优化步态参数, 实现机器人的自适应步态规划和行走。与之对应, 将机器人的步态规划划分为步态拓扑规划、步态参数优化、步态轨迹设计三个相对独立的阶段(图 1), 其中步态拓扑规划确定实际地形环境下的步态序列, 实际地形由机器人利用雷达、相机等手段实时获得; 步态参数规划解决步态序列的步幅、步高、步频等参数实时确定问题; 步态轨迹规划确定机器人身体或足端迈步时的运动轨迹。本文讨论机器人的步态拓扑规划问题。

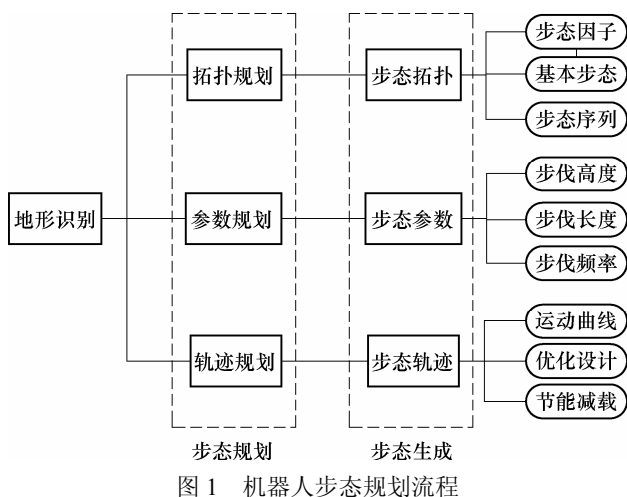


图 1 机器人步态规划流程

## 1 机器人触地状态表达与步态因子

### 1.1 机器人触地状态的拓扑矩阵表达

对  $m$  足机器人来说, 可以用 0 和 1 描述任意时

刻各足端触地状态, 形成该时刻机器人触地状态的拓扑矩阵  $\mathbf{F}_{m \times 1}$  (列矢量)。其中, 矩阵元素 1 表示机器人足端离地面有一定高度, 即该腿处于摆动相; 0 表示机器人足端与地面接触、距离地面高度为零, 即该腿处于支撑相。

以图 2 所示六足轮腿式机器人为例, 可得到某时刻其足端触地状态描述的  $6 \times 1$  拓扑列矢量  $\mathbf{F}_{6 \times 1}$ 。此处约定列矢量元素依次表示 LB、LM、LF、RF、RM 和 RB 足的触地状态。如机器人六足均触地, 则状态拓扑矩阵为:  $\mathbf{F}_{6 \times 1} = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)^T$ ; 若某时刻机器人 LF、LB、RM 足触地支撑, LM、RF、RB 足离地摆动, 则状态拓扑矩阵为:  $\mathbf{F}_{6 \times 1} = (0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1)^T$ 。

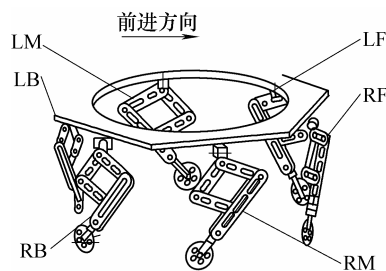


图 2 轮腿式机器人腿部编号

### 1.2 步态因子

在定义机器人足端触地状态拓扑矩阵的基础上, 可以利用机器人行走过程中前后两个时刻变化的腿部触地状态列矢量形成的矩阵来描述机器人的基本步伐, 本文将其定义为机器人的步态因子, 记作矩阵  $\mathbf{C}_{6 \times a_i}$ 。其中,  $a_i$  取值 1 或 2。若  $a_i=1$ ,  $\mathbf{C}_{6 \times 1} = \mathbf{F}_{6 \times 1}$ , 表示机器人待在原地没有迈步; 若  $a_i=2$ ,  $\mathbf{C}_{6 \times 2} = (\mathbf{F}_{1_{6 \times 1}} \ \mathbf{F}_{2_{6 \times 1}})$ , 此时若两列相同, 表示机器人处于轮式移动状态, 不同则表示机器人处在足式行走状态, 步态类型由  $(\mathbf{F}_{1_{6 \times 1}} \ \mathbf{F}_{2_{6 \times 1}})$  描述的机器人前后触地状态的切换来获得。

### 1.3 步态因子分类及表达

轮腿式机器人可以采用轮式滚动或腿式移动, 因此根据单腿的运动形式机器人的步态因子可以有多种类型, 如: 六足行走; 四足两轮混合步态, 即 2 个末端轮子自由滚动支撑机体, 另 4 个末端当足部使用; 两足四轮混合步态等。对单腿而言有 3 种功能状态: ① 腿, 轮子锁死, 实现迈步功能, 用  $L$  表示; ② 轮, 末端轮子松开, 触地滚动, 用  $W$  表示; ③ 抬空, 足端抬起不参与行走过程, 用  $S$  表示。为实现机器人的静态行走, 任意时刻至少需要 3 腿触地支撑, 因此不同功能状态腿数需要满足以下条件

$$\begin{aligned} L + W + S &= 6 \\ \begin{cases} L + W \geq 4 & W \leq 2 \\ L + W \geq 3 & W = 3 \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

根据该条件可以获得机器人腿部功能状态的全部组合形式(表 1), 每一种组合形式都可以定义相应的步态因子。

表 1 轮腿式机器人的步态因子分类

腿	轮	抬空	步态因子型式
6	0	0	三角步态、波动步态
5	0	1	5 足行走
4	0	2	踱步、行走、慢跑、奔跑、跳跃
5	1	0	5 腿 1 轮
4	1	1	4 腿 1 轮
3	1	2	3 腿 1 轮
4	2	0	2 足 4 轮
3	2	1	3 腿 2 轮
2	2	2	2 轮 2 腿
3	3	0	3 腿 3 轮
2	3	1	2 腿 3 轮
1	3	2	1 腿 3 轮
0	3	3	三轮式
2	4	0	推滚、拉滚
1	4	1	推滚、拉滚
0	4	2	四轮式
1	5	0	推滚、拉滚
0	5	1	五轮式
0	6	0	六轮式

### 1.3.1 步态因子 1: 六足三三步行模式

该步态适用于较复杂的地表状况, 采用 3-3 步态(或称三角步态), LF、LB、RM 为 A 组, LM、RF、RB 为 B 组, 所有轮子均锁死。一个步态周期包含 4 个阶段。

(1) 机器人处于初始零位, 6 条腿触地支撑且各腿平面与前进方向平行。

(2) A 组摆动腿抬起向前摆动, 同时 B 组支撑腿反向摆动, 带动机体前移  $s/2$  ( $s$  为一个周期的机器人步长)。

(3) B 组抬起作摆动腿向前摆动, 同时 A 组作支撑腿并反向摆动, 带动机体前移  $s/2$ 。

(4) B 组触地, 同时 A 组也收腿触地至初始状态, 完成一个步态周期。

表 2 六足机器人 3-3 步态各腿相位表

腿序号	相位 1	相位 2
LB	0	1
LM	1	0
LF	0	1
RF	1	0
RM	0	1
RB	1	0

注: 表中, “1”表示摆动相, “0”表示支撑相。

该行走模式时机器人触地状态变化为

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \rightarrow \dots$$

此变化表示在一个步态周期内, 机器人各腿经历从 1、3、5 支撑和 2、4、6 摆动到 1、3、5 摆动和 2、4、6 支撑的循环过程。该步态因子用拓扑矩阵表示为

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### 1.3.2 步态因子 2: 四足两轮模式

此时 LM 与 RM 腿关节锁死而末端轮子松开滚动, 另外四腿轮子锁死作步行足。行走过程中, 两只轮子触地滚动并支撑机体, 4 足可采用 2-2 步态, 分成 A、B 两组(LF、RB 为 A 组, RF、LB 为 B 组)行走。一个步态周期仍由 4 个阶段构成。

(1) 机器人处于初始零位, 各腿平面调整至与前进方向平行, 轮 1、4 与腿平面平行, 其余四轮与腿平面垂直。

(2) A 组摆动腿抬起向前摆动, 同时 B 组作支撑腿向相反方向摆动, 带动机体前移  $s/2$ 。

(3) B 组抬起作摆动腿向前摆动, 同时 A 组作支撑腿并反向摆动, 带动机体前移  $s/2$ 。

(4) B 组足端触地, 同时 A 组也收腿至初始状态, 完成一个步态周期。

该步态因子用拓扑矩阵表示为

$$C_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

### 1.3.3 步态因子 3: 两足四轮模式

此时 LF、RF、LB、RB 腿末端轮子均松开滚动并支撑机体, LM、RM 腿末端轮子锁死行走带动机器人前进。该模式适用于较狭窄区域。该步态因子用拓扑矩阵表示为

$$C_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

### 1.3.4 步态因子 4: 六轮滚动模式

此时六腿关节全部锁死而末端轮子松开, 实现机器人滚动前进。该步态因子用拓扑矩阵表示为

$$C_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

### 1.3.5 步态因子 5、6、7: 四轮滚动模式

两腿抬起, 四轮松开滚动前进。此种步态可根据实际地形选择任意两足抬起悬空, 有多种组合方式, 故  $C_5$  是一个集合。该步态因子的拓扑矩阵为

$$C_5 \supset \{C_{51} \quad C_{52} \quad C_{53}\} = \left\{ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \dots \right\}$$

### 1.3.6 步态因子 8: 调整模式

当地形要求机器人同时抬起两条前腿或两条后腿时, 考虑到机器人的自身平衡, 有可能需要对中腿的方向进行  $180^\circ$  的调整。该矩阵可表示为

$$C_6 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

由于该模式机器人待在原地作调整, 所以只用一列矢量来表示, 与其他行走模式区分。

## 1.4 机器人步态表达的拓扑矩阵

机器人的步态是由彼此衔接的步态因子构成的, 因此可以由步态因子对应矩阵的组合来形成描述机器人步态的拓扑矩阵。对于轮腿式机器人来说, 步态拓扑矩阵中各列矢量描述了对应时刻机器人各腿的触地状态, 而各腿的功能状态(轮、腿或抬空)则通过步态矩阵的行矢量来判定。当相邻两列的矩阵元素不同时, 该腿处于足式行走方式; 当相邻两列的矩阵元素相同时, 0 表示该腿为轮式滚动前进方式, 1 表示该腿处于抬空状态。

## 2 基本地形与机器人的基本步态

为方便讨论, 本文将具有一定简单特征的区域

地形定义为基本地形, 将该地形条件下的机器人步态定义为基本步态。基本步态由若干步态因子构成, 据此可生成基本步态的拓扑描述矩阵

$$e = (C_{6 \times a_1}, C_{6 \times a_2}, \dots, C_{6 \times a_i}, \dots, C_{6 \times a_n})$$

机器人行走过程中, 步态矩阵的列数是动态递增的, 即步态矩阵由基本步态拓扑矩阵递增而成。

### 2.1 基本地形

如图 3 所示, 基本地形有平地、斜坡、上下平台、障碍、沟壑、上下楼梯等情况。

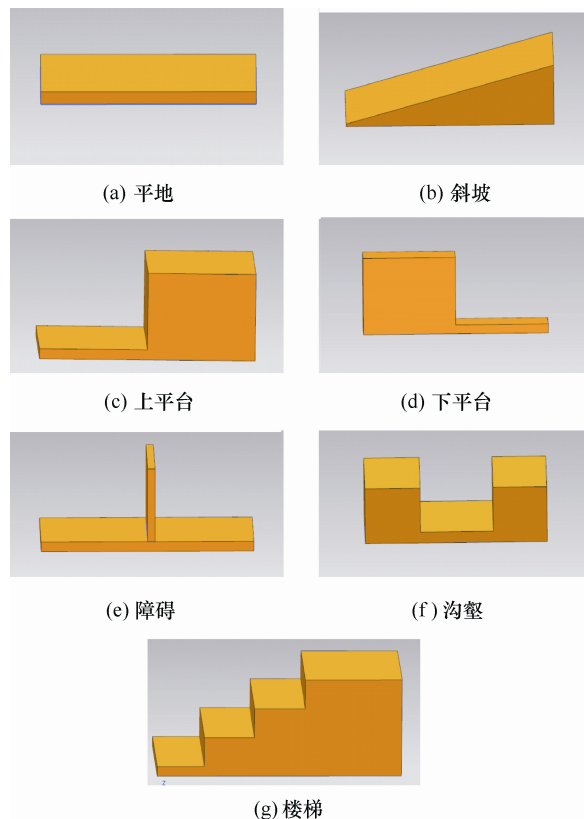


图 3 基本地形示意图

### 2.2 机器人的基本步态

对于每种基本地形, 机器人需要有相应的步态去适应。

#### 2.2.1 平地

对于平地来说, 机器人可以采用任何步态, 其中采用轮式滚动前进是最节能和快速移动方式。对应的基本步态拓扑矩阵为:  $e_1 = [C_4]$ 。

#### 2.2.2 斜坡

斜坡是与水平面有一定夹角的平整路面。如图 4 所示, 可以采用三角步态行走。对应的基本步态拓扑矩阵为:  $e_2 = [C_1]$ 。

#### 2.2.3 上平台

当上平台时, 机器人需要抬腿迈上较高平面, 允许的台阶高度  $h$  不能超过机器人的最大抬腿高度  $h_m$ , 即  $h \leq h_m$ 。机器人的基本步态包括以下几点。

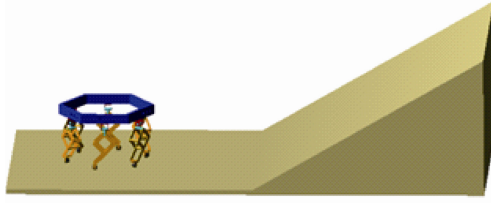


图4 爬坡步态

- (1) 靠近平台，抬起 LF、RF 腿，按四轮方式前进。
- (2) LF、RF 两腿落在平台上，再按六轮方式前进。
- (3) 抬起 LM、RM 腿，再按四轮方式前进。
- (4) LM、RM 腿落在平台上，再按六轮方式前进。
- (5) 抬起 LB、RB 腿，再按四轮方式前进。
- (6) LB、RB 两腿落在平台上。

该步态对应的基本步态拓扑矩阵为

$$e_3 = (C_{51} \quad C_4 \quad C_{52} \quad C_4 \quad C_{53})$$

#### 2.2.4 下平台

与上平台类似，当下平台时，机器人从当前平面降低高度  $h (h \leq h_m)$  到较低平面。机器人的基本步态包括以下几点。

- (1) 靠近平台边缘，抬起 LF、RF 腿，按四轮方式前进。
- (2) LF、RF 两腿落在平台下，按六轮方式前进。
- (3) 抬起 LM、RM 腿，再按四轮方式前进。
- (4) LM、RM 腿落在平台下，再按六轮方式前进。
- (5) 抬起 LB、RB 腿，再按四轮方式前进。
- (6) LB、RB 两腿落在平台下。

该步态对应的基本步态拓扑矩阵为

$$e_4 = (C_{51} \quad C_4 \quad C_{52} \quad C_4 \quad C_{53})$$

#### 2.2.5 越障

机器人可以越过一定高度(不超过  $h_m$ )的障碍，障碍宽度不超过一个步幅。如图 5 所示，机器人越障的基本步态包括以下几点。

- (1) 靠近障碍，抬起 LF、RF 腿，按四轮方式前进。
- (2) LF、RF 腿越过障碍后放下，按六轮方式前进。
- (3) 抬起 LM、RM 腿让过障碍，按四轮方式前进。
- (4) LM、RM 腿越过障碍后放下并换向 180°(保证机器人静态稳定性)，按六轮方式前进。
- (5) 抬起 LB、RB 腿，按四轮方式前进。

- (6) LB、RB 腿越过障碍后放下。

该步态对应的基本步态拓扑矩阵为

$$e_5 = (C_{51} \quad C_4 \quad C_{52} \quad C_6 \quad C_4 \quad C_{53})$$

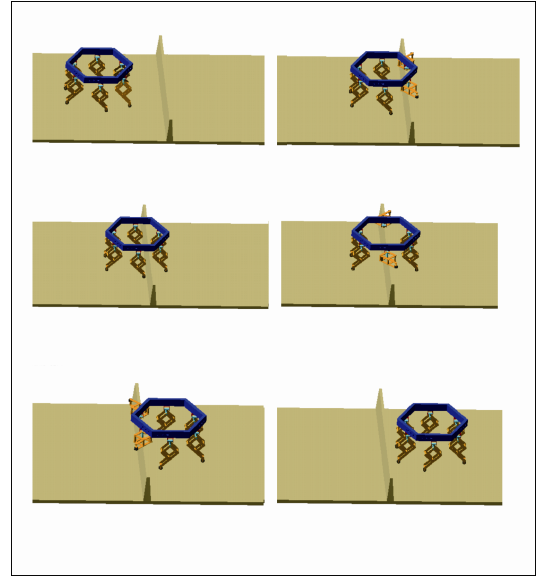


图5 越障步态

#### 2.2.6 沟壑

机器人可以越过一定宽度(介于步幅和机器人身长之间)和深度(不超过  $h_m$ )的沟壑。如图 6 所示，机器人越过沟壑的基本步态包括以下几点。

- (1) 靠近沟壑，抬起 LF、RF 腿，按四轮方式前进。
- (2) LF、RF 腿落在沟壑底部，再按六轮方式前进。
- (3) 抬起 LM、RM 腿，再按四轮方式前进。
- (4) LM、RM 腿落在沟壑底部，按六轮方式前进。
- (5) LF、RF 腿靠近沟壑右壁抬起，LM、RM 腿调姿保持身体平衡，按四轮方式前进。
- (6) LF、RF 腿触地后按六轮方式前进。
- (7) LB、RB 腿进入沟壑后，按四轮方式前进。
- (8) LB、RB 腿下放触底后，按六轮方式前进。
- (9) LM、RM 腿靠近右壁抬起，按四轮方式前进。
- (10) LM、RM 腿触地后，按六轮方式前进。
- (11) LB、RB 腿靠近右壁抬起，按四轮方式前进。
- (12) LB、RB 腿触地后跨沟结束。

该步态对应的基本步态拓扑矩阵为

$$e_6 = [C_{51} \quad C_4 \quad C_{52} \quad C_4 \quad C_6 \quad C_{51} \quad C_4 \quad C_{53} \quad C_4 \quad C_{52} \quad C_4 \quad C_{53}]$$

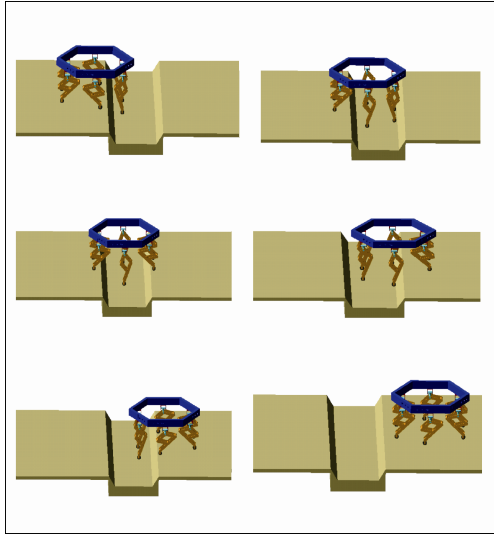


图 6 跨沟步态

### 3 轮腿式机器人的步态拓扑规划

#### 3.1 基于地形识别的步态拓扑规划策略

在基本地形和基本步态概念基础上,可以构建基于地形识别的步态拓扑规划流程(图 7)。

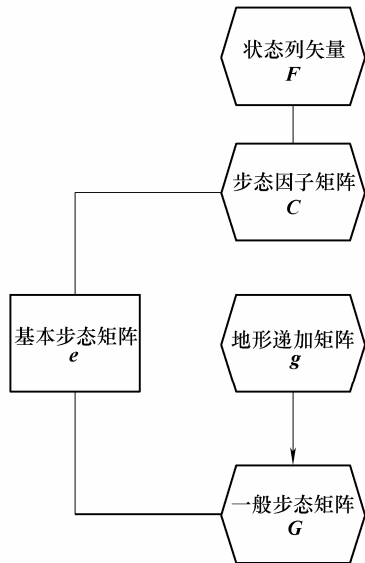


图 7 机器人步态拓扑矩阵的生成流程

在图 7 所示流程中,状态列矢量  $F_{m \times 1}$  描述了机器人腿足端的触地状态( $m=6$  为机器人腿数);步态因子矩阵  $C_{m \times a_i}$  由状态列矢量组合而成,有 8 种情况

$$C_{m \times a_i} \supset$$

$$[C_{1_{6 \times 2}} \quad C_{2_{6 \times 2}} \quad C_{3_{6 \times 2}} \quad C_{4_{6 \times 2}} \quad C_{5_{1_{6 \times 2}}} \quad C_{5_{2_{6 \times 2}}} \quad C_{5_{3_{6 \times 2}}} \quad C_{6_{6 \times 1}}]$$

基本步态矩阵  $e_{1 \times p}$  由局部地形的实时辨识来确定,与基本地形相对应,表示机器人采用的步态因子序列( $p$  为该基本步态包含的步态因子数);由所有可能的基本步态矩阵可以组合成总基本步态矩阵  $E_{n \times 1}$  ( $n=6$  为基本地形类型数)

$$E = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ e_5 \\ e_6 \end{bmatrix}$$

地形递加矩阵  $g_{q \times n}$  描述了机器人所走过的基本地形序列,由机器人内嵌地形识别系统对基本地形的在线辨识而诱导产生( $q$  为基本地形数)。在此基础上,通过地形递加矩阵  $g$  与总基本步态矩阵  $E$  相乘后取转置,可以动态生成机器人在非结构环境中行走的一般步态拓扑矩阵  $G_{q \times 1}$

$$G_{q \times 1} = [g_{q \times n} * E_{n \times 1}]^T$$

该拓扑矩阵准确描述了机器人在特定地形环境中的行走步态。

#### 3.2 案例分析

以图 8 所示为例,某复杂地形由多种基本地形构成。机器人在行走过程中,其自身携带的地形辨识系统将会不断识别出前进方向的局部地形类别,在当前步态基础上动态递增生成后续的行走步态,即得出第  $k$  个基本地形在地形递加矩阵  $g$  中对应的第  $k$  个行元素  $g_k$ 。

$t$  矩阵维数为  $6 \times 6$

$$g_k = \text{diag}(t_{ij})$$

$$t_{ij} = \begin{cases} 1 & i = k = \text{第} k \text{个地形的对应} E \text{中的序号} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

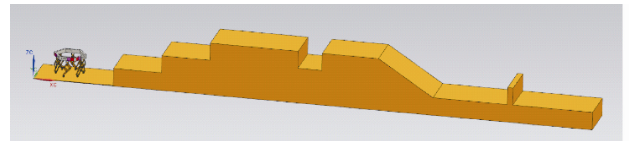


图 8 复杂地形示意图

从而最终生成了地形递加矩阵  $g$

$$g = [g_1 \quad g_2 \quad \cdots \quad g_k \quad \cdots \quad g_q]^T$$

该复杂地形包含了  $q$  段基本地形,机器人在完成整个行走过程中先后调用了  $q$  个相应基本步态。因此,该地形递加矩阵可推得

$$g = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$



机器人行走过程中动态生成的步态拓扑矩阵为

$$G = [e_1 \ e_3 \ e_1 \ e_3 \ e_1 \ e_3 \ e_1 \ e_6 \ e_1 \ e_2 \ e_1 \ e_5 \ e_1]$$

## 4 结论

本文将机器人步态规划划分为步态拓扑规划、步态参数优化、步态轨迹设计三个阶段, 提出基于当前地形的机器人自适应动态生成步态的规划策略。通过定义触地状态、步态因子、基本地形和基本步态并引入矩阵表达形式, 将步态元素和地形因素建立映射关系, 通过将非结构化地形分解为若干基本地形的加和, 将机器人步态动态生成转化为机器人步态拓扑矩阵的递加产生过程, 通过矩阵递推算法实现了非结构化环境下机器人步态拓扑的动态生成。本文研究了机器人的步态拓扑规划问题, 下一步工作将研究机器人步态拓扑规划、步态参数优化和步态轨迹设计的模型融合问题, 实现机器人在非结构化环境中的自适应步态生成和行走。

## 参 考 文 献

- [1] 刘青松, 张一心, 向文元, 等. 核电站机器人技术应用现状及发展趋势[J]. 机器人技术与应用, 2011(3): 12-16.  
LIU Qingsong, ZHANG Yixin, XIANG Wenyan, et al. Technology status and development trend of nuclear power plant robots[J]. Robot Technique and Application, 2011(3): 12-16.
- [2] 刘静, 赵晓光, 谭民. 腿式机器人的研究综述[J]. 机器人, 2006, 28(1): 81-88.  
LIU Jing, ZHAO Xiaoguang, TAN Min. Legged robots: A review[J]. Robot, 2006, 28(1): 81-88.
- [3] 井超超. 轮式机器人运动系统设计与研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.  
JING Chaochao. The design and research of motion control system of wheeled robots[D]. Xi'an: Xidian University, 2012.
- [4] 陈学东, 孙栩, 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.  
CHEN Xuedong, SUN Xu, JIA Wenchuan. Motion planning and control of multilegged walking robots[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2006.
- [5] 李珺. 多足机器人步态规划及自适应控制研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [6] LI Jun. Research on gait planning and adaptive control for multi-legged robot[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.
- [7] Mc GHEE R B, FRANK A A. On the stability properties of quadruped creeping gaits[J]. Mathematical Biosciences, 1968, 3: 331-351.
- [8] 尹晓琳. 六足仿生机器人步态规划及其控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.  
YIN Xiaolin. Research on gait planning and control strategy for biomimetic hexapod robot[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [9] 李文正. 六足仿生机器人步态规划与控制系统研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.  
LI Wenzheng. Research on gait planning and control system of hexapod biomimetic robot[D]. Jinan: Shandong University, 2011.
- [10] 韦素媛, 宁超, 高有行. 步态特征中非线性相关信息的表示方法研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(18): 147-150.  
WEI Suyuan, NING Chao, GAO Youxing. Gait representation with the non-linearity correlation information[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(18): 147-150.
- [11] 杨军, 吴晓娟, 彭彰, 等. 基于多区域分割的步态表示与识别算法研究[J]. 计算机学报, 2006, 29(10): 1878-1881.  
YANG jun, WU Xiaojuan, PENG Zhang, et al. Gait representation and classification algorithm based on multi area segmentation[J]. Chinese Journal of Computers, 2006, 29(10): 1878-1881.
- [12] WANG L, TAN T N, NING H Z, et al. Silhouette analysis-based gait recognition for human identification[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(12): 1505-1518.
- [13] EKINCI M. Gait recognition using multiple projections[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition, 10-12 April, 2006, University of Southampton, Southampton, UK. UK: IEEE, 2006: 517-522.
- [14] SONG S M, WALDRON K J. Machines that walk: The adaptive suspension vehicle[M]. Cambridge: MIT Press, 1989.
- [15] 柳洪义, 闻邦椿, 斯欧特 H. 研究步态分类的一种新方法[J]. 东北工学院学报, 1993, 86: 445-448.  
LIU Hongyi, WEN Bangchun, SCOTT H. A new method for gait classification[J]. Journal of Northeast University of Technology, 1993, 86: 445-448.
- [16] 马泽润, 郭为忠, 高峰. 一种新型轮腿式移动机器人的

越障能力分析[J]. 机械设计与研究, 2015(4): 6-10.

MA Zerun, GUO Weizhong, GAO Feng. Analysis on obstacle negotiation of a new wheel-legged robot[J]. Machine Design and Research, 2015(4): 6-10.

- [16] 马泽润. 轮腿式外星探测机器人的机构设计与步态规划研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.

MA Zerun. On mechanism design and gait planning of wheel-legged alien exploration robot[D]. Shanghai :

Shanghai Jiao Tong university, 2014.

---

作者简介: 郭为忠(通信作者), 男, 1970 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为现代机构学与并联机构学。

E-mail: wzguo@sjtu.edu.cn

汤耘, 男, 1990 年出生, 硕士。主要研究方向为步行机器人运动规划。

E-mail: 1007905072@qq.com

高峰, 男, 1956 年生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为并联机器人及应用。

E-mail: fengg@sjtu.edu.cn