

基于离散化的六足机器人自由步态规划

李满宏, 张明路[†], 张小俊, 王 琰

(河北工业大学 机械工程学院, 天津 300130)

摘要: 为精细模仿生物步态, 充分发挥六足机器人运动潜能, 本文在离散化机器人足端轨迹的基础上, 融合中枢模式发生器(central pattern generator, CPG)模型与反射模型的核心思想, 建立了离散化步态模型, 结合稳定性分析, 构建了机器人稳定的位置状态空间, 将复杂的步态规划问题转化为稳定的位置状态空间中位置状态间的排序问题, 在此基础上, 提出了一种新的自由步态生成算法, 并基于平均稳定裕量对该算法进行了优化. 样机步态实验结果表明, 自由步态生成算法与自由步态优化算法均可生成在一定程度上符合生物运动特点的稳定步态, 实现机器人运动过程中速度的动态调整, 跨越宽度为步距的障碍, 且基于平均稳定裕量的自由步态优化算法生成步态的稳定性要远大于自由步态生成算法.

关键词: 机器人; 步态; 规划; 稳定性; 离散化

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A

Free gait planning for a hexapod robot based on discretization

LI Man-hong, ZHANG Ming-lu[†], ZHANG Xiao-jun, WANG Yan

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: In order to precisely imitate biological gait and give full play to the potential of hexapod robots, we build a discrete model of stepping based on the discretization of foot trajectories and the fusion of central-pattern-generation (CPG) model and the reflect model. Based on the stability analysis, a stable state-space is constructed and the issue of gait planning is transformed into the sequencing problem of states in the stable state-space. Then, a new free gait generation algorithm is proposed and it is optimized based on the average stability margin. The gait experiment results of the prototype show that both the free gait generation algorithm and the optimized algorithm can generate stable gaits which accord with movement characteristics of creatures in adjusting the speed dynamically during the moving process and in bypassing the obstacle with width up to the stroke length. By comparing the results, we find that the gait generated by the optimized free gait generation algorithm is more stable than that generated by the free gait generation algorithm.

Key words: robot; gait; planning; stability; discretization

1 引言(Introduction)

六足机器人具有丰富的步态和冗余的肢体结构, 能适应复杂的地理环境且具有较高的可靠性, 在排险、军事、服务、农业等领域有着广泛的应用前景^[1]. 自上世纪80年代以来, 国内外多所大学和研究机构相继研制成功了Genghis, Ariel, Asterisk, Roboturk和Noros等多种性能卓越的六足机器人, 并对相关基础理论进行了深入探索^[2-6]. 步态规划作为六足机器人基础理论研究中的核心内容, 为足端轨迹规划和机体运动规划提供理论立足点, 决定各足运动时序, 直接影响机器人的整体运动性能, 是六足机器人高效通过复杂非结构环境, 充分发挥其机构潜能的关键.

目前, 应用于六足机器人的步态主要为三角步态、四足步态、波形步态等规则周期步态, 在一定程度上限制了机器人运动的灵活性. 为此, 学者分别提出了基于局部规则和基于中枢模式发生器(central pattern generator, CPG)原理的自由步态规划方法^[7-10]. 基于局部规则的步态规划方法从步态形态角度出发, 依据足端与环境的交互及各足间的约束关系, 通过设定简单规则来模仿生物步态. Porta等利用符号表示各足位置状态, 基于六足机器人足间约束关系, 通过制定相应的规则, 基于反射模型实现了沿给定轨迹的自由步态规划^[11]. 国内赵杰教授等针对六足机器人, 基于分布式局部规则网络, 提出了一种新的步态规划算

收稿日期: 2014-08-06; 录用日期: 2014-12-26.

[†]通信作者. E-mail: zhangml@hebut.edu.cn; Tel.: +86 22-60438379.

国家高新技术研究发展计划项目(2012AA041508), 河北省自然科学基金项目(E2014202154), 机器人技术与系统国家重点实验室开放研究课题(SKLRs-2013-ZD-04)资助.

Supported by National High-Tech R&D Program (2012AA041508), Natural Science Foundation of Hebei Province (E2014202154) and External-Planned Task of State Key Laboratory of Robotics and System (SKLRs-2013-ZD-04).

法^[12]. 事实上, 步态通常表现为生物的一种节律行为, 主要由位于脊髓(脊椎动物)或胸腹神经节(无脊椎动物)的CPG控制^[13]. 受生物步态控制机理启发, 国内外学者提出了基于CPG原理的步态规划方法. 该方法将机器人各足视为神经元, 通过近似周期性的触发各足运动实现机器人的行走. Cristina等利用足端反馈信号对CPG模型的参数进行动态调整, 实现了机器人的全方位运动^[14-15]. 国内汪劲松教授等较早便对CPG开展了深入研究, 将其成功应用于四足机器人Biosbot的步态规划^[16-17]. 孙立宁教授等基于振荡器模型组建了机器人髋关节CPG网络, 并通过调整CPG模型阈值实现了不同占空比的步态^[18].

基于局部规则的步态规划方法具有较好的柔性和鲁棒性, 在个别步态周期内与生物步态形态高度相似, 但因其步幅大小易受环境影响, 步态很难收敛, 导致整体上与生物步态仍有一定差距. 而基于CPG原理的步态规划方法可在没有传感器反馈的情形下生成稳定步态, 结构简单, 响应速度快, 但因其足端轨迹通常相对固化, 环境适应能力较差, 且难以实现步态模式的平滑转化. 如前所述, 基于局部规则和基于CPG原理的步态规划方法均可规划出适用于复杂地形的自由步态, 但其性能与实际生物步态仍存在较大差距. 究其原因, 现有步态规划方法多受步态规划策略或足端轨迹规划方法所限, 落足点只能被动选取, 不能像生物一样可在其单足工作空间内灵活选取有效落足点, 但本质上讲, 目前仍缺乏对生物行走过程中各足位置状态及步态生成机理的精确描述. 因此, 有必要基于现有研究成果, 探索新的步态规划方法, 以期精细模仿生物步态, 充分发挥六足机器人运动潜能.

步态的离散化处理是实现生物步态精细模仿的基础, 而步态生成机理的数学描述是实现仿生步态的核心. 虽然各足在每个步态周期中的足端轨迹均连续, 但机器人在整个行走过程中的落足点却是离散的, 而步态规划的核心恰为在复杂环境中或基于某些约束条件规划离散化的落足点序列. 针对现有步态规划方法存在问题, 以落足点的灵活选取为出发点, 基于离散化思想, 将六足机器人足端轨迹进行离散化处理, 则机器人在运动过程中的位置状态即可用各足所处的离散点精确描述, 在此基础上, 通过制定各位置状态间的转换规则与步态周期的等分处理, 可对步态生成机理进行恰当描述, 同时, 结合足端反射和特定优化准则, 可在大量离散点中灵活选取有效落足点, 为精细模仿生物步态, 提高复杂环境中机器人运动性能奠定基础.

本文从机器人足端轨迹的离散化入手, 融合CPG模型与反射模型的核心思想, 建立了离散化步态模型, 结合稳定性分析, 构建了机器人稳定的位置状态空间, 将复杂的步态规划问题转化为数学中简单的顺序决

策问题, 即稳定的位置状态空间中位置状态间的排序问题, 以便通过制定相应的排序规则模拟生物步态生成机理, 规划丰富高效的仿生步态. 受此启发, 提出了一种新的自由步态生成算法, 并基于平均稳定裕量对该算法进行了优化, 最后结合实验研究对步态规划方法的可行性进行了验证.

2 离散化步态模型(Discrete model of stepping)

实验观测发现, 生物在较平坦的地形上收敛于周期步态, 而在崎岖地形上则表现为自由步态^[19]. 自由步态能够对每个步态周期中的占地系数、相对相位等步态参数实时调整以达到调速、转弯、避障、越障的目的, 因而其步态参数具有不确定性. 为便于描述、规划符合生物运动特点的自由步态, 本文在离散化机器人足端轨迹的基础上, 融合CPG模型与反射模型的核心思想, 建立了离散化步态模型.

如图1所示, 在机器人单足步距之间插入 $n(n \geq 2, n \in \mathbb{Z})$ 个离散点, 编号分别为 $1, 2, 3, \dots, n$, 其中1号点为单足步距的前极限点(AEP), n 号点为单足步距的后极限点(PEP), 其余各点均布于两极限点之间, 使相邻两点间的距离相等. 定义足端由支撑相到摆动相的转换点为0号位置, 则0号位置可能为1至 n 号位置中的任意一点. 六足机器人单足步距的离散化处理实现了支撑相足端轨迹的离散化, 而0号位置结合各离散化位置点, 则实现了摆动相足端轨迹的离散化. 鉴于离散单足步距的离散点数目可根据离散精度要求动态调整, 离散点数越多, 轨迹和位置状态越精细, 步态越丰富, 但步态规划中运算量越大, 故上述方法可在特定精度下离散足端轨迹, 描述各足位置状态, 为自由步态规划奠定基础.

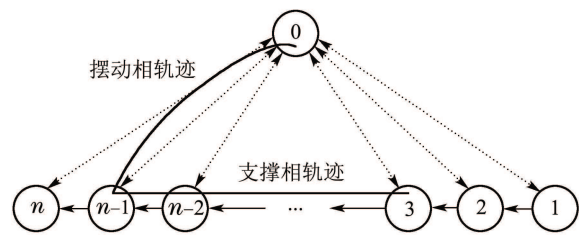


图1 离散化步态模型

Fig. 1 Discrete model of stepping

步态通常表现为生物的一种节律行为, 主要由位于脊髓或胸腹神经节的中枢模式发生器控制. 对生物而言, 一般单足在一个步态周期 T 内的摆动时间要短于其支撑时间^[19], 即 $t_{\text{swing}} < t_{\text{support}}$. 为实现从控制角度模仿生物步态的节律行为, 基于CPG模型, 选取六足机器人节律运动的振荡周期 T_{os} 为 t_{swing} , 则机器人的一个步态周期可认为由若干个振荡周期组成, 其中存在一个振荡周期处于摆动相, 即将步态周期以振荡周期为基本单位进行了等分处理.

为尽量减少机器人运动过程中的抬腿次数, 降低

能耗, 基于反射模型, 规定位置状态间的转换规则为: 处于支撑相的足端只能向编号较大的位置移动直至到达0号位置, 而0号位置足端可随机到达支撑相的任意位置, 且任意两位置间的转换需在一个振荡周期内完成。

定义1至 n 中每相邻两点间的距离为一个单位, 用单位 u 表示. 基于运动的相对性, 机器人机体的运动速度直接取决于支撑相足端的移动速度, 而与摆动相足端的运动无关^[20]. 因此, 0号位置与其他位置间距离均记为 $0u$. 于是机器人机体的移动速度可表示为 $v(u/T_{os})(v = 1, 2, 3, \dots, n - 1)$. 假设六足机器人运动速度为 $n - 2(u/T_{os})$, 则机器人足端可能存在的位置状态变换为 $0 \rightarrow 1 \rightarrow n - 1 \rightarrow 0$ 或 $0 \rightarrow 2 \rightarrow n \rightarrow 0$.

步态的离散化处理是实现生物步态精细模仿的基础, 而步态生成机理的数学描述是实现仿生步态的核心. 离散化步态模型基于机器人足端轨迹的离散化处理, 利用各足所处离散点精细描述机器人运动过程中各足位置状态, 同时, 基于反射模型, 制定位置状态间的转化规则, 结合CPG模型的核心思想, 将步态周期进行等分处理, 并将二者相互融合, 实现步态生成机理的恰当描述, 为精细模仿生物步态奠定了基础.

3 稳定的位置状态空间(Stable state space)

六足机器人的六足均基于离散化步态模型进行离散化处理时, 如图2所示, 机器人六足可能存在 $(n + 1)^6$ 种位置状态, 构成一个6维的位置状态空间, 其中任一位置状态均可用位置状态向量 $\mathbf{P} = (p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6)$ 描述, p_i 为第 i 足所处位置. 然而, 这些位置状态中会存在一些不稳定位置状态和必然导致不稳定位置状态. 例如当机器人处于不稳定位置状态 $(0, 0, 0, 0, 0, 0)$ 时, 六足同时处于摆动相, 机器人必不稳定. 又如当机器人位于必然导致不稳定位置状态 $(1, 1, 1, 1, 1, 1)$ 时, 虽然机器人当前稳定, 但由于机器人直行时各足端运动速度与机体运动速度大小相同且0号位置是单足位置变换中必经位置, 因此, 该位置状态必会转换为不稳定位置状态 $(0, 0, 0, 0, 0, 0)$. 鉴于不稳定位置状态与必然导致不稳定位置状态均将导致机器人不稳定现象的发生, 所以步态规划过程中二者均应予以避免. 在机器人位置状态空间中, 根据机器人当前位置状态、运动速度以及相应的稳定性判据剔除不稳定位置状态与必然导致不稳定位置状态, 可得到六足机器人稳定的位置状态空间. 当机器人在整个运动过程中, 所处的位置状态均位于稳定的位置状态空间时, 机器人必静态稳定.

3.1 不稳定位置状态(Unstable state)

机器人在整个步态周期中, 如果其重心在水平面的投影始终位于支撑足落足点构成的稳定多边形(如

图2中虚线三角形)之内, 则称机器人静态稳定^[21-22]. 对于采用对称布置形式的常规六足机器人, 如果机器人两侧足中, 一侧存在前足和后足同时支撑的情况, 另一侧存在前足和后足同时支撑或中足支撑的情况, 那么机器人一定静态稳定^[7]. 定义机器人的稳定状态向量为 $\mathbf{S} = (s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6)$, 其中 s_i 为第 i 足的状态, 处于支撑相时取1, 摆动相时取0, 不能确定时取 x , 则六足机器人定性的静态稳定性判据为

$$S_s(\mathbf{S}) = s_1 s_3 s_5 + s_2 s_4 s_6 + 2s_1 s_3 s_4 s_6 \geq 1. \quad (1)$$

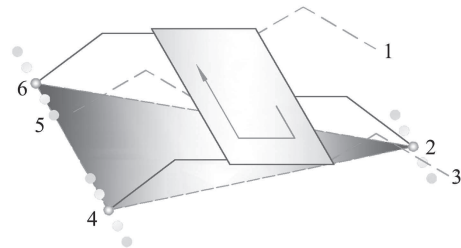


图2 六足机器人的离散化处理

Fig. 2 Discretization of the hexapod robot

六足机器人的静态稳定性与静态稳定指标 S_s 正相关, 一般情况下, S_s 越大, 机器人越稳定. 由式(1)可知, S_s 的计算公式由3项构成, 如果机器人静态稳定, 则3项中至少有1项为1, 即机器人至少满足 $(1, x, 1, x, 1, x)$, $(x, 1, x, 1, x, 1)$, $(1, x, 1, 1, x, 1)$ 3种状态中的1种. 于是, 六足机器人不稳定位置状态必然存在相邻两足同时处于摆动相, 使 $S_s = 0$. 因此, 可利用定性的静态稳定性判据对机器人不稳定位置状态加以判别, 并将位置状态空间中不稳定位置状态予以去除.

3.2 必然导致不稳定位置状态(State resulting in instability inevitably)

必然导致不稳定位置状态可分为直接导致不稳定位置状态和间接导致不稳定位置状态两类. 如果一个稳定位置状态在下一个振荡周期必然转变为不稳定位置状态, 则称该位置状态为直接导致不稳定位置状态. 同理, 如果一个稳定位置状态在若干个振荡周期后必然转变为直接不稳定位置状态, 则称该位置状态为间接导致不稳定位置状态. 如前所述, 不稳定、直接不稳定、间接不稳定位置状态最终均会导致机器人不稳定现象的发生, 因此, 在步态规划过程中均应予以避免, 三者关系如图3所示. 由于六足机器人各足摆动相均为一个振荡周期且机器人在整个运动过程中满足静态稳定条件, 则直接导致不稳定位置状态只能是相邻两足同时处于支撑相, 且 $\{p_i, p_{i+1}\} \geq n + 1 - v$, 即相邻两足会在下一个振荡周期同时由支撑相转变为摆动相. 间接导致不稳定位置状态要保证直接导致不稳定位置状态的产生, 则需确保存在相邻两足同时处于支撑相且满足式(2), 即使两相邻支撑足在同一振荡周期内转变为摆动相.

$$\begin{cases} n+1-(k+1)v \leq \{p_i, p_{i+1}\} < n+1-kv, \\ k = [(n+m - \max\{p_i, p_{i+1}\})/v], 0 < m < 1. \end{cases} \quad (2)$$

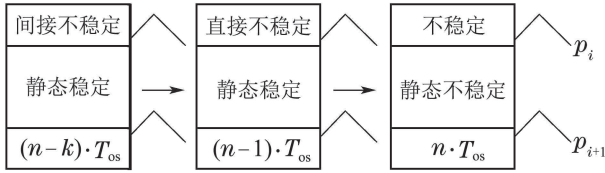


图3 六足机器人的不稳定位置状态
Fig. 3 Unstable states of the hexapod robot

4 自由步态生成算法(Free gait generation algorithm)

步态规划的实质为基于某些约束条件或特定的优化准则为机器人规划满足运动需求的位置状态序列。基于稳定的位置状态空间与位置状态间的转换规则，机器人的步态规划问题可转化为稳定的位置状态空间中各位置状态间的排序问题。如图4所示，连接稳定位置状态间的实线和虚线均实现了各稳定位置状态间的转换，因此，可代表两种不同的稳定步态。基于上述思想，本文提出了一种新的自由步态生成算法。

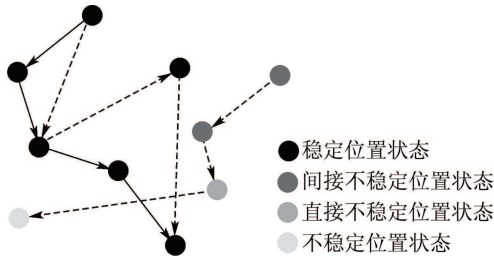


图4 位置状态间的转换
Fig. 4 Transitions of the states

假设六足机器人当前位置状态 \mathbf{P}_n 为 $(p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6)$ ，运动速度为 v 。根据式(3)对当前位置状态 \mathbf{P}_n 进行预处理，以判断当前位置状态中是否存在隐含的0号位置。

$$p'_i = \begin{cases} 0, & p_i = 0, \\ [\text{sgn}(n+m-p_i-v) + 1](p_i+v)/2, & \\ 0 < m < 1, & p_i \neq 0. \end{cases} \quad (3)$$

依据位置状态间的转换规则，机器人下一振荡周期可能的的位置状态 \mathbf{P}'_{n+1} 以及相应的稳定状态 \mathbf{S}'_{n+1} 分别为 $(p''_1, p''_2, p''_3, p''_4, p''_5, p''_6)$ 和 $(s'_1, s'_2, s'_3, s'_4, s'_5, s'_6)$ ，二者可分别按式(4)–(5)求得：

$$p''_i = \begin{cases} p'_i, & p'_i \neq 0, \\ \text{random}\{1, 2, \dots, n\}, & p'_i = 0, \end{cases} \quad (4)$$

$$s'_i = \begin{cases} 0, & p'_i = 0, \\ 1, & p'_i \neq 0. \end{cases} \quad (5)$$

如前所述，当 $p'_i = 0$ 即第 i 足端位于0号位置时，需按照一定规则，选取摆动相到支撑相的转换点 p''_i 。为增大步幅，减少机器人抬腿次数，降低能耗，针对 p''_i 的选取制定了如式(4)所示的选取规则，并且式中 $\text{random}\{1, 2, \dots, n\}$ 代表 p''_i ，依次试取 $1, 2, \dots, n$ 。考虑静态稳定条件， p''_i 的最终取值直接受其相邻两足的位置状态影响，且相邻两足位置状态具有时变特征。因此， p''_i 的选取表现出一定的随机性。当机器人六足均执行完式(4)所示转换，则可生成下一振荡周期可能的的位置状态 \mathbf{P}'_{n+1} 。此时需判断 \mathbf{P}'_{n+1} 是否位于稳定的位置状态空间。如 $S'_s(\mathbf{S}'_{n+1}) < 1$ ，则 \mathbf{P}'_{n+1} 为不稳定位置状态； \mathbf{P}'_{n+1} 满足式(6)，即为直接导致不稳定位置状态；满足式(7)，则为间接导致不稳定位置状态。上述3种位置状态均不位于稳定的位置状态空间，如 \mathbf{P}'_{n+1} 为其中任意一种，则需调整 $p'_i = 0$ 时 p''_i 的取值，直至 \mathbf{P}'_{n+1} 位于稳定的位置状态空间。此时，六足机器人下一个振荡周期的位置状态 \mathbf{P}_{n+1} 可取为 \mathbf{P}'_{n+1} 。如果遍历所有依式(4)所示转换规则生成的位置状态，均不能获得位于稳定位置状态空间的 \mathbf{P}'_{n+1} ，则说明初始位置状态 \mathbf{P}_n 为直接导致不稳定位置状态，需对其进行调整以生成稳定步态。

$$\{p''_i, p''_{i+1}\} \geq n+1-v, p''_i = p''_1, \quad (6)$$

$$\begin{cases} \{p''_i, p''_{i+1}\} \geq n+1-(k+1)v, \\ \{p''_i, p''_{i+1}\} < n+1-kv, \\ k = \left\lfloor \frac{n+m - \max\{p''_i, p''_{i+1}\}}{v} \right\rfloor, \\ 0 < m < 1, p''_i = p''_1. \end{cases} \quad (7)$$

六足机器人在以自由步态运动时，经常需要变换运动速度。假设机器人当前运动速度为 v_n ， \mathbf{P}_n 位于稳定的位置状态空间。基于位置状态间的转换规则，如果 \mathbf{P}_n 中存在两相邻支撑足，那么它们位置之差的绝对值必然大于等于 v_n 。因此，在调速过程中，如果 $v_{n+1} < v_n$ ，则在 \mathbf{P}_n 的下一个振荡周期中直接将速度调整为 v_{n+1} 即可，机器人必能得到稳定位置状态 \mathbf{P}_{n+1} 。但当 $v_{n+1} > v_n$ 时，如在 \mathbf{P}_n 的下一个振荡周期中直接将速度调整为 v_{n+1} ，机器人很可能搜索不到稳定的位置状态，此时，需引入一种调速机制以完成调速过程。当 $v_{n+1} > v_n$ 时，首先判断若在 \mathbf{P}_n 的下一个振荡周期中将速度调整为 v_{n+1} 能否得到稳定位置状态 \mathbf{P}_{n+1} 。如果 \mathbf{P}_{n+1} 位于稳定的位置状态空间，则在 \mathbf{P}_n 的下一个振荡周期中将速度调整为 v_{n+1} 即可；如果 \mathbf{P}_{n+1} 不满足稳定条件，则需在 \mathbf{P}_n 的下一个振荡周期中将速度调整为 $1(u/T_{os})$ 。当 $v = 1(u/T_{os})$ 时，机器人六足基本上可遍历所有稳定位置状态，且由于 $v_n \geq 1$ ，机器人必定能得到稳定位置状态 \mathbf{P}_{n+1} 。此后，重复上述过程，直至 x 个振荡周期后，可在 \mathbf{P}_{n+x} 的下一个振荡周期中将速度调整为 v_{n+1} 为止。

自由步态通常应用于复杂地形以获取较大的灵活性进而保证机器人行走的通过性、连续性。因而,机器人在执行自由步态时,不可避免地要跨越一些障碍。当六足机器人跨越障碍时,依据位置状态间的转换规则及相应的稳定性判据,会得到0号位置到支撑相位置的理论转换序列。如果足端在依此序列执行足端轨迹时,通过足端反射发现求得的理论落足点实际上并不稳定,则可在算法上认为该位置状态为不稳定位置状态。此时,机器人只需返回上一位置状态,重新选取0号位置足端转换到支撑相的位置,直至实际上的落足点稳定为止。该过程实质上实现了基于局部规则与基于CPG原理步态规划方法的融合,利用反射模型提供的足端反馈信号实现了对CPG模型参数的动态调整。

经分析可知,自由步态生成算法能够实现步态的自由转换与非周期性循环的原因在于处于0号位置的足端可随机的转换到支撑相的任意位置,且0号位置会随着运动速度的变化而变化,导致机器人运动过程中相对相位、占地系数等步态参数的动态调整。其中,0号位置转换到支撑相的位置决定了相对相位,而运动速度与0号位置转换到支撑相的位置共同决定了占地系数。此外,该自由步态生成算法融合调速机制可实现机器人运动过程中速度的动态调整,结合足端反射可实现机器人在复杂地形上的稳定运行。基于离散化步态模型的自由步态生成算法不仅实现了基于局部规则与基于CPG原理步态规划方法的融合,而且可精细模仿生物步态以达到灵活运动的目的。

5 自由步态优化算法(Optimized free gait generation algorithm)

5.1 稳定裕量(Stability margin)

根据静态稳定条件,机器人重心在水平面的投影始终位于支撑足落足点构成的稳定多边形之内时,机器人静态稳定。机器人的静态稳定性可用稳定裕量 S_m 衡量。为简化计算,本文中稳定裕量是指机器人重心在水平面的投影沿机体轴线方向到支撑多边形的最小距离,其中重心在水平面投影沿机体轴线方向到支撑多边形前侧边界的距离为前侧稳定裕量 S_{mf} ,到支撑多边形后侧边界的距离为后侧稳定裕量 S_{mb} ,如图5所示。假设六足机器人节距为 J ,步距为 R ,以机体质心 c 为原点建立机器人的机体坐标系,其 y 轴沿着机体轴线指向前进方向, x 轴指向右侧中足。当机器人位置状态中 $p_i > 0 (i = 1, 2, \dots, 6)$,即六足均处于支撑相时,1至6号足的落足点在机体坐标系中的 y 轴坐标依次为 $J + R/2 - (p_1 - 1)R/(n - 1)$, $R/2 - (p_2 - 1)R/(n - 1)$, $-J + R/2 - (p_3 - 1)R/(n - 1)$, $-J + R/2 - (p_4 - 1)R/(n - 1)$, $R/2 - (p_5 - 1)R/(n - 1)$, $J + R/2 - (p_6 - 1)R/(n - 1)$ 。依据几何关系,机器人

的前侧稳定裕量由1, 2, 5, 6号足确定,而后侧稳定裕量则由2, 3, 4, 5号足确定。如果机器人当前位置状态为 \mathbf{P} ,稳定状态为 \mathbf{S} ,则机器人的前侧稳定裕量 S_{mf} 与后侧稳定裕量 S_{mb} 可分别由式(8)–(9)求出,于是可求得机器人的稳定裕量 S_m 为 $\min\{S_{mf}, S_{mb}\}$ 。如果机器人在整个运动过程中 $S_m \geq 0$ 恒成立,则机器人静态稳定。

$$S_{mf} = (s_1 s_6) \left[\frac{J + R}{2} - \frac{(p_1 + p_6 - 2)R}{2(n - 1)} \right] + [s_1 s_5 (1 - s_6)] \left[\frac{J + R}{2} - \frac{(p_1 + p_5 - 2)R}{2(n - 1)} \right] + [s_2 s_6 (1 - s_1)] \left[\frac{J + R}{2} - \frac{(p_2 + p_6 - 2)R}{2(n - 1)} \right] + [s_2 s_5 (1 - s_1)(1 - s_6)] \left[\frac{R}{2} - \frac{(p_2 + p_5 - 2)R}{2(n - 1)} \right], \quad (8)$$

$$S_{mb} = (s_3 s_4) \left[\frac{J - R}{2} + \frac{(p_3 + p_4 - 2)R}{2(n - 1)} \right] + [s_3 s_5 (1 - s_4)] \left[\frac{J - R}{2} + \frac{(p_3 + p_5 - 2)R}{2(n - 1)} \right] + [s_2 s_4 (1 - s_3)] \left[\frac{J - R}{2} + \frac{(p_2 + p_4 - 2)R}{2(n - 1)} \right] + [s_2 s_5 (1 - s_3)(1 - s_4)] \left[\frac{(p_2 + p_5 - 2)R}{2(n - 1)} - \frac{R}{2} \right]. \quad (9)$$

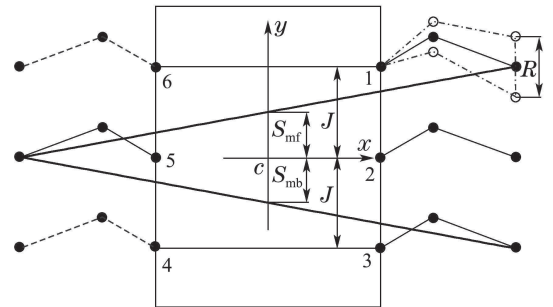


图5 六足机器人的稳定裕量

Fig. 5 Stability margin of the hexapod robot

稳定裕量实现了对机器人静态稳定性的定量描述,与定性的静态稳定判据相比,扩展了适用范围,提高了判定的准确性。如果六足机器人的位置状态满足 $S_s(\mathbf{S}) \geq 1$,则必存在 $S_m \geq (J - R)/2$ 。因此,当机器人的节距大于步距时,如果机器人的位置状态满足定性的静态稳定判据,则机器人在整个步态周期中的静态稳定裕量至少为 $(J - R)/2$ 。

5.2 基于平均稳定裕量的自由步态优化算法(Optimized free gait generation algorithm based on average stability margin)

自由步态生成算法可协调机器人各足生成稳定的

步态序列,然而同一初始位置状态可能产生多种步态序列,自由步态生成算法只是随机选取了其中一种.因此,本文基于平均稳定裕量提出了自由步态优化算法,以机器人的平均稳定裕量为优化目标,从众多的步态序列中遴选出稳定裕量相对较大的步态序列,以使机器人在整个行走过程中尽可能处于稳定裕量较大的位置状态.

自由步态生成算法可生成多种步态序列的关键在于0号位置足端可随机转换到支撑相中的任意位置.当处于摆动相的足端转换为支撑相后,机器人在一个步态周期内的步态序列在一定程度上已经固化,加之机器人的稳定裕量主要由支撑相足端的位置状态决定.因此,基于平均稳定裕量对自由步态生成算法进行优化,实质上是对0号位置足端转换到的支撑相位置进行优化.于是,可把机器人整个运动过程中的步态序列以0号位置为分界点,离散为若干个子优化过程.在每个子优化过程中,依次求取各个位置状态的稳定裕量,执行该子过程中平均稳定裕量最大的步态序列,则能使机器人在整个运动过程中稳定裕量尽可能最优,如图6所示.

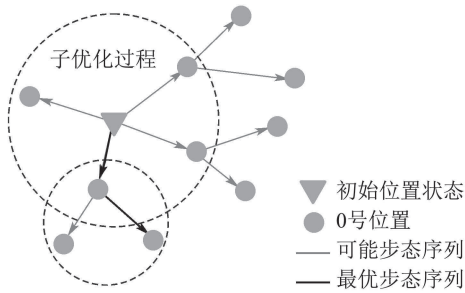


图6 步态优化过程

Fig. 6 Optimization process of the gait

假设六足机器人当前位置状态为 P_n ,运动速度为 v ,根据自由步态生成算法,可得到下一振荡周期的位置状态 P_{n+1} 和稳定状态 S_{n+1} .如果在 P_n 中摆动相足端的位置为 p_i ,支撑相足端的位置为 $p_j(j \neq i)$,那么在 P_{n+1} 中原 P_n 中摆动相足端的位置 p_i 将会转换到支撑相位置 p'_i .由于0号位置可随机转换到任意支撑相位置,打乱原来相对固定的步态序列,于是,每个子优化过程包含的振荡周期数 n_k 如式(10)所示.

$$n_k = \min\left\{\left\lceil \frac{n - \max\{p_j\}}{v} \right\rceil, \left\lceil \frac{n - \max\{p'_j\}}{v} \right\rceil + 1\right\}. \quad (10)$$

在接下来的 n_k 个振荡周期中,步态序列将由 p_i 转换到的支撑相位置 p'_i 决定,为衡量机器人在 n_k 个振荡周期中的稳定性,计算机器的平均稳定裕量

$$\bar{S}_m = \sum_{i=1}^{n_k} \frac{S_{mi}}{n_k},$$

其中 S_{mi} 为位置状态 P_{n+i} 的稳定裕量. P_n 中处于0号位置的足端可能存在多个,且各足端转换到支撑相的

位置也不尽相同,所以 P_{n+1} 会存在多种情况,以致 $P_{n+2}, P_{n+3}, \dots, P_{n+n_k}$ 的位置状态也不尽相同.分别计算子优化过程中所有可能步态序列的平均稳定裕量 \bar{S}_m ,则 $\max\{\bar{S}_m\}$ 所对应的步态序列即为 P_n 所能转换到的平均稳定裕量最大的步态序列.

6 步态实验(Gait experiments)

实验样机采用对称布置的双3足结构,如图7所示,各足具有4个摆动关节和1个足端旋转关节,分别由5个舵机独立驱动.鉴于实验过程中轮式足端与胫节不存在相对运动,故可将其视为常规的六足机器人.机器人步距 R 为2.4 dm,节距 J 为4 dm,利用0至7共8个离散点对其足端轨迹进行离散化处理.为进一步分析本文步态规划方法的可行性,针对不同实验目标,利用实验样机依次进行调速、越障和自由步态生成算法与优化算法的对比实验,并记录实验过程中机器人的位置状态序列和相应稳定裕量.实验过程中的部分视频截图如图8所示.为清晰直观表现实验结果,以便结果分析,实验结果主要以步态图的形式给出.

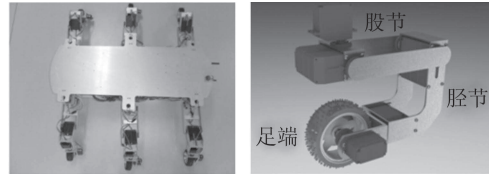


图7 六足机器人结构

Fig. 7 Structure of the hexapod robot

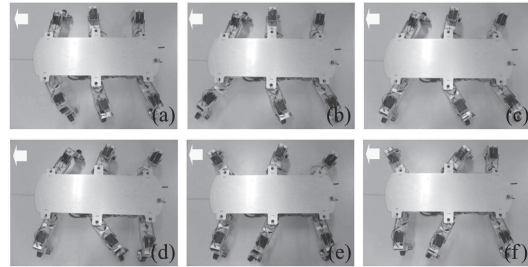


图8 步态实验中机器人运动过程

Fig. 8 Robot motion process in gait experiments

6.1 自由步态生成算法的调速实验 (Speed adjustment experiment with free gait generation algorithm)

针对自由步态生成算法的调速机制,利用实验样机,对其在平坦地形上的调速过程进行步态实验.实验要求机器人以(1, 4, 3, 5, 2, 6)为初始位置状态,先以 $2(u/T_{os})$ 的速度运动20个振荡周期,然后降速以 $1(u/T_{os})$ 的速度运动20个振荡周期,最后加速以 $4(u/T_{os})$ 的速度运动10个振荡周期.应用本文自由步态生成算法中的调速机制可得到机器人在50个振荡周期内的实际位置状态序列,如图9所示,其中虚线为给定的速度曲线,实线为实际速度曲线.从图9可以看出,

机器人在前20个振荡周期内以 $2(u/T_{os})$ 的速度稳定运行, 自初始位置状态经两个振荡周期调整后便收敛于周期步态. 机器人在降速过程中, 实际速度曲线无滞后现象, 说明机器人的降速过程能在一个振荡周期内完成, 间接表明如果机器人当前处于稳定的位置状态, 其降速后必处于稳定的位置状态. 机器人在40个振荡周期后要求以 $4(u/T_{os})$ 的速度运行, 但实际上机器人

经两个速度为 $1(u/T_{os})$ 的振荡周期调整后才达到规定的速度, 说明如果机器人当前处于稳定的位置状态, 其加速后不一定处于稳定的位置状态, 但可通过降速经若干振荡周期调整后达到规定速度. 实验结果表明自由步态生成算法可在平坦地形上根据给定的速度要求生成稳定的步态, 结合调速机制, 可高度跟随给定速度, 并实现机器人运动中速度的动态调节.

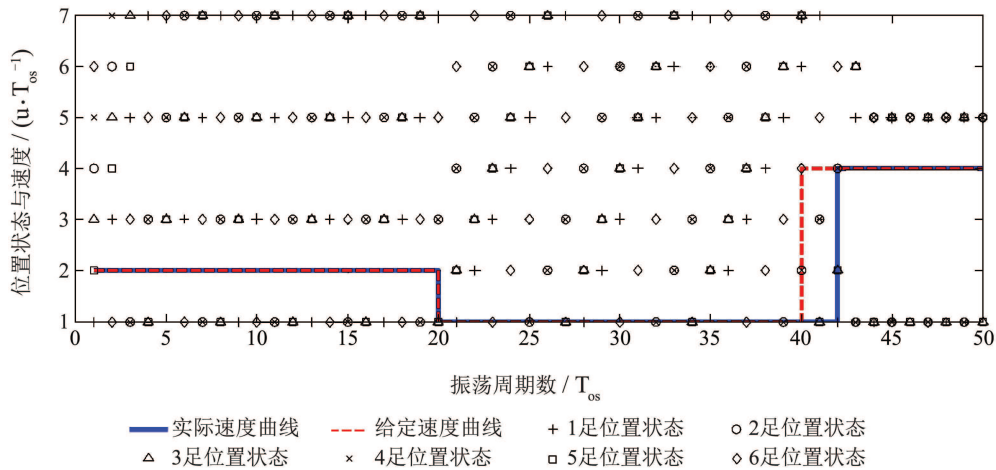


图 9 自由步态生成算法的调速过程

Fig. 9 Speed adjustment process with free gait generation algorithm

6.2 自由步态生成算法的越障实验 (Obstacle navigation experiment with free gait generation algorithm)

为验证自由步态生成算法对非结构环境的适应能力, 对样机的越障过程进行了实验研究. 设定机器人的初始位置状态为(1, 4, 3, 5, 2, 6), 以 $1(u/T_{os})$ 的速度在具有沟壑的非平整地面上行走. 经测算, 行

走过程中第15, 20, 23, 41个振荡周期中1足首次生成的理论落足点距沟壑后边沿距离分别为0.8 dm, 1.6 dm, 1.2 dm, 2.4 dm. 机器人在50个振荡周期中的位置状态及相应稳定裕量如图10所示. 图10表明, 结合足端反射, 自由步态生成算法可灵活选取有效落足点, 生成稳定的自由步态以适应不同地形, 而且能够使机器人跨越宽度为步距的障碍.

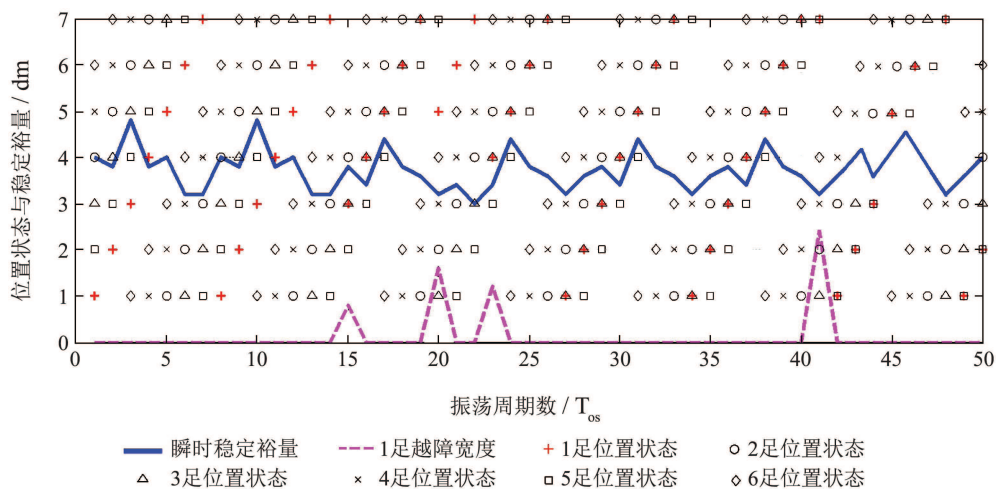


图 10 自由步态生成算法的越障过程

Fig. 10 Obstacle navigation process with free gait generation algorithm

6.3 自由步态生成算法与优化算法对比实验(Contrast experiment between free gait generation algorithm and the optimized algorithm)

为进一步研究自由步态生成算法与自由步态优化算法生成步态的稳定性,应用两种算法在相同的实验条件下进行了对比实验.实验过程中样机所处地形、初始位置状态以及运动速度均相同.当机器人初始位置状态为(1, 4, 3, 5, 2, 6),以 $1(u/T_{os})$ 的速度在平坦地形上运动时,应用自由步态生成算法与自由步态优化算法生成的50个振荡周期的位置状态及相应稳定裕量分别如图11–12所示.从图11可以看出,当采用自由步态生成算法时,机器人自运动伊始便以7个振荡周期为一个步态周期的周期步态运动,整个过程的平均稳定裕量为3.832 dm.图12中,

机器人应用基于平均稳定裕量的自由步态优化算法,机器人经17个振荡周期的自由步态调整后同样收敛于周期步态,机器人在调整阶段的平均稳定裕量为3.933 dm,大于自由步态生成算法的平均稳定裕量,但是在稳定运动阶段其平均稳定裕量高达4.021 dm.

综上所述,自由步态生成算法与自由步态优化算法均可在平坦地形上生成稳定的步态,且该步态经若干振荡周期调整后均收敛于周期步态,符合生物在平坦地形上呈现周期步态的运动特点.实验结果表明,自由步态生成算法与自由步态优化算法均可生成在一定程度上符合生物运动特点的稳定步态,且基于平均稳定裕量的自由步态优化算法生成步态的稳定性要远大于自由步态生成算法.

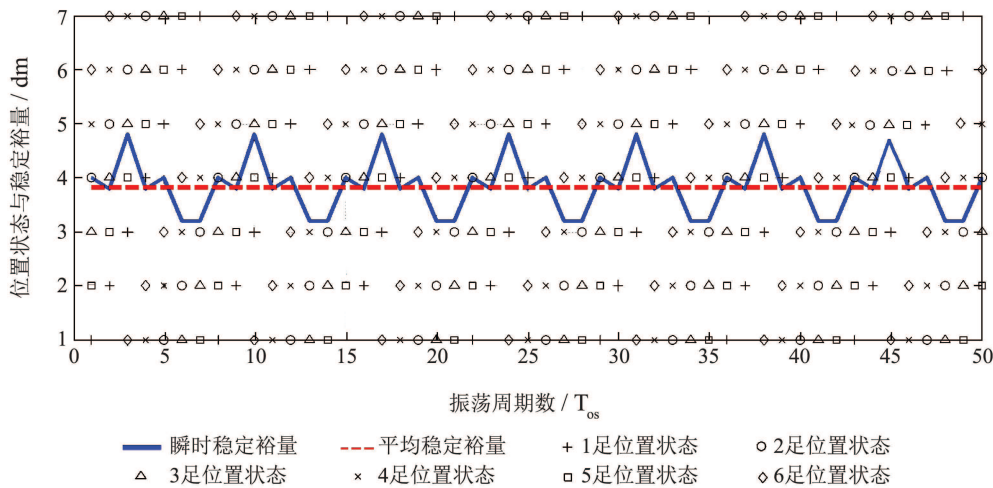


图 11 自由步态生成算法生成的各振荡周期的位置状态与相应稳定裕量

Fig. 11 States generated by free gait generation algorithm and corresponding stability margins

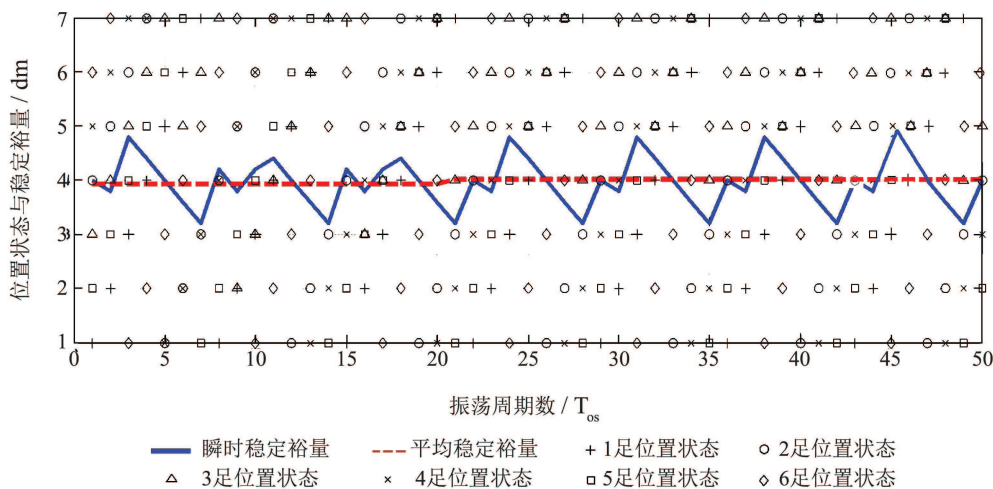


图 12 自由步态优化算法生成的各振荡周期的位置状态与相应稳定裕量

Fig. 12 States generated by optimized free gait generation algorithm and corresponding stability margins

7 结论(Conclusions)

本文从六足机器人足端轨迹的离散化入手, 融合CPG模型与反射模型的核心思想, 建立了离散化步态模型, 结合稳定性分析, 构建了机器人稳定的位置状态空间, 将步态规划问题予以合理转化, 提出了一种新的自由步态生成算法, 并基于平均稳定裕量对该算法进行了优化. 通过理论分析与实验研究得出如下结论:

1) 离散化步态模型可精确描述机器人行走过程中各足位置状态, 并通过制定位置状态间的转换规则与步态周期的等分处理, 将反射模型与CPG模型相融合, 恰当描述步态生成机理, 为精细模仿生物步态奠定基础.

2) 基于稳定的位置状态空间与位置状态间的转换规则, 六足机器人复杂的步态规划问题可等效简化为数学中简单的顺序决策问题, 即稳定的位置状态空间中位置状态间的排序问题, 通过制定相应的排序规则模拟生物步态生成机理, 可规划出丰富高效的仿生步态.

3) 自由步态生成算法能够实现步态的自由转换与非周期性循环, 其原因在于处于0号位置的足端可随机地转换到支撑相的任意位置, 且0号位置会随着运动速度的变化而变化, 从而导致机器人运动过程中步态参数的动态调整.

4) 自由步态生成算法可根据给定的速度要求生成稳定的步态, 结合调速机制, 可高度跟随给定速度, 并实现机器人运动中速度的动态调节. 机器人的降速过程可在一个振荡周期内完成, 降速不会影响机器人的稳定性; 机器人加速时可能需要引入降速调整环节, 直接加速一般会影响机器人的稳定性.

5) 结合足端反射, 自由步态生成算法可在大量离散点中灵活选取有效落足点, 生成稳定的步态以适应不同地形, 而且能够使机器人跨越宽度为步距的障碍.

6) 实验结果表明, 自由步态生成算法与自由步态优化算法均可生成在一定程度上符合生物运动特点的稳定步态, 且基于平均稳定裕量的自由步态优化算法生成步态的稳定性要远大于自由步态生成算法.

参考文献(References):

- [1] CHEN X, WANG L Q, YE X F, et al. Prototype development and gait planning of biologically inspired multi-legged crablike robot [J]. *Mechatronics*, 2013, 23(4): 429 – 444.
- [2] TOMOHITO T, TATSUO A, KENJI I. Integrated limb mechanism robot ASTERISK [J]. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2006, 18(2): 203 – 214.
- [3] LIU C J, CHEN Q J, WANG G X. Adaptive walking control of quadruped robots based on central pattern generator (CPG) and reflex [J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2013, 11(3): 386 – 392.
- [4] BARFOT T D, EARON E P. Experiments in learning distributed control for a hexapod robot [J]. *Robots and Autonomous Systems*, 2006, 54(10): 864 – 872.
- [5] SERVET S, HASAN A. Kinematic and dynamic analysis of a hexapod walking-running-bounding gaits robot and control actions [J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2012, 38(2): 444 – 458.
- [6] 陈学冬, 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.
(CHEN Xuedong, SUN Yi, JIA Wenchuan. *Motion Planning and Control of Multilegged Walking Robot* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2006.)
- [7] ERDEN M S, KEMAL L. Free gait generation with reinforcement learning for a six-legged robot [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2008, 56(3): 199 – 212.
- [8] PABLO K, TEODOR M. Phase oscillator neural network as artificial central pattern generator for robots [J]. *Neurocomputing*, 2012, 97(6): 115 – 124.
- [9] 王刚, 张立勋, 王立权. 仿蟹机器人交错等相位波形步态研究 [J]. 机器人, 2011, 33(1): 237 – 243.
(WANG Gang, ZHANG Lixun, WANG Liqun. On alternating equal-phase wave gait of crab-like robot [J]. *Robot*, 2011, 33(1): 237 – 243.)
- [10] WANG B P, HU R X, ZHANG X D, et al. Gait planning and intelligent control for a quadruped robot [J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2009, 7(2): 207 – 211.
- [11] PORTA J M, CELAYA E. Reactive free-gait generation to follow arbitrary trajectories with a hexapod robot [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2004, 47(4): 187 – 201.
- [12] 陈甫, 臧希喆, 赵杰, 等. 六足步行机器人仿生机制研究 [J]. 机械与电子, 2009, 27(9): 53 – 56.
(CHEN Fu, ZANG Xizhe, ZHAO Jie, et al. Research on biomimetics mechanism of hexapod walking robot [J]. *Machinery and Electronics*, 2009, 27(9): 53 – 56.)
- [13] 董玮, 王如彬, 张志康. 大脑皮层信号作用下人体步态节律运动的探讨 [J]. 中国生物医学工程学报, 2010, 29(2): 247 – 252.
(DONG Wei, WANG Rubin, ZHANG Zhikang. Human rhythmic gait movement in the role of cerebral cortex signal [J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2010, 29(2): 247 – 252.)
- [14] CRISTINA P S, VITOR M. Gait transition and modulation in a quadruped robot: a brainstem-like modulation approach [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2011, 59(9): 620 – 634.
- [15] CRISTINA P S, VITOR M. CPG modulation for navigation and omnidirectional quadruped locomotion [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2012, 60(6): 912 – 927.
- [16] 郑浩峻, 张秀丽, 汪劲松, 等. 基于生物中枢模式发生器原理的四足机器人 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(2): 166 – 169.
(ZHENG Haojun, ZHANG Xiuli, WANG Jingsong, et al. Quadruped robot based on biological central pattern generator [J]. *Journal of Tsinghua University (Nature Science Edition)*, 2004, 44(2): 166 – 169.)
- [17] 郑浩峻, 张秀丽, 李铁民, 等. 基于CPG原理的机器人运动控制方法 [J]. 高技术通讯, 2003, 13(7): 64 – 68.
(ZHENG Haojun, ZHANG Xiuli, LI Tiemin, et al. CPG-based methods for motion control of robot [J]. *Journal of High Technology*, 2003, 13(7): 64 – 68.)
- [18] 黄博, 姚玉峰, 孙立宁. 基于中枢神经模式的四足机器人步态控制 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(7): 1 – 6.
(HUANG Bo, YAO Yufeng, SUN Lining. Quadruped robot gait control based on central pattern generator [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(7): 1 – 6.)

- [19] 黄麟, 韩宝玲, 罗庆生, 等. 仿生六足机器人步态规划策略实验研究 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(12): 72 – 75.
(HUANG Lin, HAN Baoling, LUO Qingsheng, et al. Experimental study on hexapod biomimetic robot's gait planning [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2007, 35(12): 72 – 75.)
- [20] 陈甫. 六足仿生机器人的研制及其运动规划研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
(CHEN Fu. *Development of hexapod biomimetic robot and research on its motion planning issue* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.)
- [21] ESTREMER J, COBANO J A. Continuous free-crab gaits for hexapod robots on a natural terrain with forbidden zones: an application to humanitarian demining [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2010, 58(5): 700 – 711.
- [22] 丁希仑, 王志英, ALBERTO R. 六边形对称分布六腿机器人的典型步态及其运动性能分析 [J]. 机器人, 2010, 32(6): 759 – 765.

(DING Xilun, WANG Zhiying, ALBERTO R. Typical gaits and motion analysis of a hexagonal symmetrical hexapod robot [J]. *Robot*, 2010, 32(6): 759 – 765.)

作者简介:

李满宏 (1987–), 男, 博士研究生, 主要研究方向为机器人运动学,

E-mail: lmh9181219@163.com;

张明路 (1964–), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能机器人技术, E-mail: zhangml@hebut.edu.cn;

张小俊 (1979–), 男, 副教授, 主要研究方向为机器人技术、机器人嗅觉, E-mail: xjzhang@hebut.edu.cn;

王 琰 (1990–), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为机器人运动学, E-mail: wangyan@163.com.