

基于虚拟样机技术的四足机器人静态稳定步态规划

韩宝玲¹, 宋明辉¹, 罗庆生², 张天³

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081; 2. 北京理工大学 机电学院, 北京 100081;

3. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘要: 针对现有技术文献中广泛使用的多种静态稳定步态中速度稳定性与稳定裕度不可兼得的通病, 在随动质心的静态步态基础上, 利用参数化坐标变换矩阵方法规划出一种四足机器人前进过程中质心以曲线轨迹移动的静态步态方法, 使该步态方法以连续性速度运动的过程中保证一定稳定裕度; 通过 D-H 法求得四足机器人的逆运动学坐标变换矩阵, 分别在三维空间中对四足机器人的四组足端轨迹方程进行规划, 并带入 MATLAB 软件后以逆运动学方程计算出关节夹角驱动方程, 利用步态规划图求出机器人四条腿各自对应的夹角驱动方程以及机体质心轨迹方程; 最后在 MSC. ADAMS 软件中建立四足机器人虚拟样机并对规划的步态进行虚拟仿真, 仿真结果验证了该步态对提升四足机器人对于速度连续性以及稳定裕度的提升。

关键词: 四足机器人; 逆运动学; 步态规划; 静态稳定步态

Static Gait Planning of Quadruped Robot Based on Virtual Prototype Technology

Han Baoling¹, Song Minghui¹, Luo Qingsheng², Zhang Tian³

1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

3. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract: To solve the problem existed in relative essays that static gait planning methods can't embrace enough stability margin and velocity continuity simultaneously, a new static gait which the centroid of quadruped robot move along curved line was planned based on a widely used static gait. The new static gait can move in continuous velocity with enough stability margin. After establishing kinematic model of the quadruped robot by using D-H method, the parametric coordinate transformation matrices were derived and the foot motion trajectories of four legs could be solved in three-dimensional space. Joint angle equation were solved by computing in MATLAB software. Finally, the virtual prototype of quadruped robot was built in MSC. ADAMS and simulation of the new static gait was completed. The result of simulation proved that the new static gait can improve stability of quadruped robot's movements and velocity continuity effectively.

Keywords: quadruped robot; inverse kinematics; gait planning; static gait

0 引言

仿生机器人一直是机器人领域的研究热点。通过对不同动物结构形式和运动方式的模仿, 人们研制出了具有各种运动特性的仿生机器人^[1]。而四足步行是自然界许多生物采用的一种步行方法, 具有极高的灵活性和对地况的适应性。四足机器人的步态研究就是基于自然界四足步行动物的步态研究而展开的。该步态因其在复杂崎岖的地面环境表现出极高的机动性、稳定性及地形适应性, 在救灾探险, 地况勘测, 侦查战场的场合有着令人满意的表现, 吸引了国内外学者的密切关注。其中最具有代表性的是美国波士顿动力公司的“Big Dog”机器人^[2]和意大利理工大学的“HyQ”机器人^[3]。机器人步态的研究是实现步行机器人能否稳定步行的基础, 其对机器人的研究具有重要的理论和实际意义。

1 运动学模型的建立

四足哺乳类动物的每条腿由 5 段组成, 通过与躯干的连接构成 5 个关节, 每个关节至少有一个自由度, 这种超冗余自由度使动物的运动极其灵活。但是, 在四足机器人的结构设计

中, 为了降低控制的复杂程度, 它的腿部不可能像动物那样具有 5 段和超冗余自由度。在力求达到机器人运动灵活性的前提下, 对机器人的肢体结构进行合理简化, 四足机器人三维模型如图 1 所示, 为了提高机器人运动过程中的稳定性, 机器人的腿部采用“前肘后膝”的结构形式。该机器人四条腿为相同结构, 腿部的的设计模仿了四足哺乳动物(狗)的腿部结构。腿部结构包括侧摆、大腿、小腿 3 部分, 采用对称布置方式, 腿为开链式关节型结构。由于它的每条腿有 3 个自由度, 所以理论上能同时满足在空间上 3 个方向的自由度要求。其中侧摆关节连接机体和侧摆组件, 实现机体和腿部之间的侧摆运动; 髋关节连接侧摆组件和大腿组件, 膝关节连接大腿组件和小腿组件, 实现腿部的屈伸运动。机体运动采用液压驱动, 每条腿的侧摆关节、髋关节及膝关节分别由液压缸提供驱动力, 从而实现单腿的 3 个关节独立旋转。

外国学者 Denavit 和 Hartenberg 提出采用 4 个参数, 即用 2 个参数来描述连杆本身, 另外 2 个参数描述连杆与相邻连杆的链接关系, 该方法叫 DH 法, 利用该方法所建立的坐标系叫 D-H 坐标系。采用 D-H 法建立如图 2 所示的四足机器人运动学模型, 其中建立在机体质心处的坐标系 b 代表机体坐标系。四足机器人腿部杆件坐标系的建立方法一致, 以右前腿举例如进行说明: 坐标系 0 建立在侧摆关节中心处, 坐标系 b 的姿态保持不变。图中坐标系 1、2 和 3 分别表示侧摆、大腿以及

收稿日期: 2014-11-17; 修回日期: 2015-01-09。

基金项目: ×××部重点预研项目(2011~2015 年度)。

作者简介: 韩宝玲(1957-), 女, 教授, 博士研究生导师, 主要从事特种机器人技术、计算机图形学方向的研究。

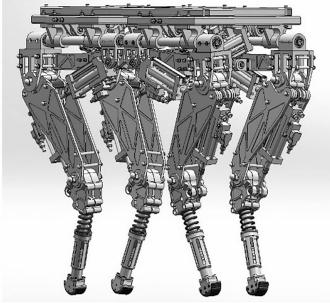


图 1 四足机器人 SolidWorks 三维模型

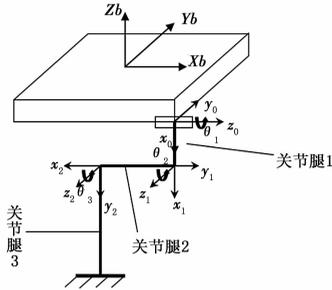


图 2 四足机器人单腿 D-H 坐标系

小腿对应的坐标系, 3 个坐标系分别建立在侧摆关节、髋关节中心以及膝关节中心处。、及分别为侧摆关节、髋关节以及膝关节处的关节角, l_1 、 l_2 和 l_3 分别为侧摆、大腿及小腿的长度。四足机器人各腿的 D-H 参数如表 1 所示。

表 1 腿部各杆件 D-H 参数

腿部杆件序号	关节变量	α	a	d	$\sin \alpha$	$\sin \alpha$
1	θ_1	90°	l_1	0	0	1
2	θ_2	0	l_2	0	1	0
3	θ_3	0	l_3	0	1	0

2 四足机器人的腿部运动分析

2.1 四足机器人的足端轨迹方程规划

四足机器人在运动过程中, 每条腿在支撑相和摆动相之间不断转换, 从而推动机体向前运动^[4]。每条腿在支撑相支撑着机器人的负载, 为机体运动提供动力; 摆动相决定机器人的步幅大小与跨越障碍物时抬腿的高度。支撑相和摆动相对于机器人的运动都至关重要。在一个步态周期内, 四足机器人腿部支撑相所占时间 T_s 和摆动相所占时间 T_b 之间的关系如下式所示:

$$\begin{cases} T_s = \beta T \\ T_b = (1 - \beta) T \end{cases} \quad (1)$$

在对机器人进行步态规划时, 机器人足端点轨迹的选择对机器人的运动特性有着重要影响。为有效降低四组机器人足端抬起和落地时的冲击, 防止足端和地面接触时产生滑动, 文献^[5]提出了一种零冲击接触的足端轨迹规划, 但该轨迹规划仅适用于平面复合摆线, 没有考虑到实现四足机器人侧向移动需要的侧摆关节的夹角变化, 从而无法实现本研究的步态规划方法。因此, 本文提出了足端三维空间轨迹规划方法。其中腿部的摆动相在运动周期中的轨迹定义为:

$$\begin{cases} p_x = S_0 \left(\frac{t}{T_s} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{T_s} t\right) \right) & 0 \leq t \leq T_s \\ p_y = \frac{H_0}{4 + \pi} \left(\frac{4\pi t}{T_s} - \sin\left(\frac{4\pi t}{T_s}\right) \right) & 0 \leq t \leq \frac{T_s}{4} \\ p_y = \frac{4H_0}{4 + \pi} \left(\sin\left(\frac{2\pi t}{T_s} - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{\pi}{4} \right) & \frac{T_s}{4} < t \leq \frac{3T_s}{4} \\ p_y = \frac{4\pi H_0}{(4 + \pi)} \left(\left(1 - \frac{t}{T_s}\right) - \frac{1}{4\pi} \sin\left(4\pi\left(1 - \frac{t}{T_s}\right)\right) \right) & \frac{3T_s}{4} < t \leq T_s \\ p_z = S_0 \left(\frac{t}{T_s} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{T_s} t\right) \right) & 0 \leq t \leq T_s \end{cases} \quad (2)$$

式 (2) 中的 H_0 表示四足机器人运动的抬腿高度, S_0 表示四足机器人运动的步长。

2.2 求解关节夹角驱动方程

本次研究的四足机器人虚拟样机以液压缸驱动腿部关节运动, 直接去求解髋关节和膝关节液压缸的驱动函数比较复杂。本文先利用逆运动学方程求解髋关节和膝关节的关节角驱动方程, 然后根据液压缸在腿部的布置形式将关节角驱动方程转化为液压缸的位移驱动函数。

根据图 2 中建立的运动学模型可以得出各个腿部坐标系之间的 4×4 空间变换矩阵, 推导出足部末端位姿矩阵 T_{b3} 为:

$$T_{b3} = \begin{bmatrix} s_{23} & c_{23} & 0 & l_3 s_{23} + l_2 s_2 + a \\ s_1 c_{23} & -s_1 s_{23} & -c_1 & l_3 s_1 c_{23} + l_2 s_1 c_2 + l_1 s_1 + b \\ -c_1 c_{23} & -c_1 s_{23} & -s_1 & -l_3 c_1 c_{23} - l_2 c_1 c_2 - l_1 c_1 + c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

由足端末端位姿矩阵可以得到:

$$\begin{cases} R = \begin{bmatrix} s_{23} & c_{23} & 0 \\ s_1 c_{23} & -s_1 s_{23} & -c_1 \\ -c_1 c_{23} & -c_1 s_{23} & -s_1 \end{bmatrix} \\ p_x = l_3 s_{23} + l_2 s_2 + a \\ p_y = l_3 s_1 c_{23} + l_2 s_1 c_2 + l_1 s_1 + b \\ p_z = -l_3 c_1 c_{23} - l_2 c_1 c_2 - l_1 c_1 + c \end{cases} \quad (4)$$

其中: $s_{ij} = \sin\theta_i \cos\theta_j + \cos\theta_i \sin\theta_j$, $c_{ij} = \cos\theta_i \cos\theta_j - \sin\theta_i \sin\theta_j$; ($i, j = 1, 2, 3$)

其中: P_x 、 P_y 、 P_z 分别为足部末端在坐标系 b 中的平移变化量。对 (4) 式进行求解可以得到各个关节夹角变化的驱动方程:

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctan\left(\frac{p_y - b}{c - p_x}\right) \\ \theta_2 = \arcsin\left(\frac{p_x - a}{N}\right) - \arccos\left(\frac{l_3 \cos\theta_3 + l_2}{N}\right) \\ \theta_3 = \arccos\left(\frac{M - l_2^2 - l_3^2}{2l_2 l_3}\right) \end{cases} \quad (5)$$

(5) 式中的 M 和 N 的表达式如下所示:

$$\begin{cases} M = (\sqrt{(p_y - b)^2 + (p_z - c)^2} - l_1)^2 + (p_x - a)^2 \\ N = \sqrt{(l_3 \cos\theta_3 + l_2)^2 + (l_3 \sin\theta_3)^2} \end{cases} \quad (6)$$

3 静态步态规划基本参数

3.1 静态步态相关术语

步态稳定性是四足机器人能完成稳定行走步态的重要理论之一, 其中步态的参数设置对于稳定性有着重大影响。

步态参数主要包括负载因子 β 、步态、周期 T 、步距 λ 、单腿跨

距 A 等。

负载因子 β : 指单腿在地面的支撑时间与四条腿作一次循环时间的比值。步态^[6]: 指各条腿轮流抬跨顺序和各足底末端相对机体坐标系的位移关系, 可以认为包括不同步态间的变换。周期 T : 指四条腿实现一次循环运动所用时间。步距 λ : 4 条腿作一次循环, 机器人机体相对地面移动的位移。单腿跨距 A : 指单腿摆动过程中, 机体相对地面的位移。

根据本研究中四足机器人的结构尺寸以及运动要求确定具体参数。抬腿高度 $H_0 = 0.04$ m, 运动周期 $T = 1$ s, 速度 $V = 0.4$ m/s, 步长为 $S_0 = T \cdot V = 0.4$ m。

3.2 稳定性判断依据

McGhee 等国外学者对于步态稳定性的判断问题提出了稳定裕度的概念。稳定裕度是指, 步行机器人的重心在足支撑平面上的垂直投影点到四足机器人各足支撑点构成的多边形各边的最短距离, 用 S 表示。通常不用垂直距离, 而是用位移方向上到支撑区域边界的最短距离。它是衡量步行机器人在行走时的静态稳定程度。

4 四足机器人的静态步态规划

4.1 传统的静态步态规划

传统的静态步态可以分为固定质心的静态步态与随动质心的静态步态两个部分。固定质心的静态步态规划特点是为了获得较大的稳定裕度, 机体质心在迈腿过程中保持不变, 等到 4 个腿同时着地时再做重心调整。由于迈腿期间机体不作调整, 机体运动的不连续性导致运动速度变化较大, 是一种以运动速度换取稳定裕度的步态方法。

为了对上述静态步态存在的速度不稳定问题进行了改进, 学者们提出了随动质心的静态步态规划。该步态规划在迈腿过程中同时进行机体质心调整, 这是以稳定裕度为代价换取运动速度的稳定。

对于上述两种的步态规划方法中速度连续性与稳定裕度不能兼得的缺陷, 本文提出一种新的步态规划方法。本文在随动质心的静态步态基础上, 利用在 SolidWorks 中建立的虚拟样机上的侧摆结构实现机体质心在该步态中, 以曲线轨迹实现运动。通过质心的曲线位移有效增加运动过程中稳定裕度的平均值, 从而提升运动的稳定性。

4.2 曲线质心轨迹的静态步态规划

步态简图是描述四足机器人在一个周期循环过程中, 各腿连续抬跨的顺序和各足端相对机体的位移图。针对前面的确定的相关参数和和本研究对实现曲线质心轨迹的要求, 以随动质心步态为基础规划的步态简图如图 3 所示。步态采用 1-2-3-4 的迈步顺序。图中 O 点代表机体质心, K 点是 3 个足端支撑点围成得到三角形的角平分线与机体中心线的交点, K 点代表质心在整个步态中的移动位置。可以从图中的几何关系看出, 质心的曲线轨迹相比于直线轨迹可以在相同的位移量内, 使质心在进入足端点三角形后与三角形各边的距离更大, 相比于质心仅在 X 轴方向移动的随动质心静态步态, 新规划的步态可以有效提升运动过程中的稳定性。

如图 4 所示为在 MATLAB 中对曲线质心轨迹计算的得到的在一个周期内的质心轨迹, 如图 5 所示为步态简图中四足机器人在不同时间的位置重合后得到的质心轨迹。通过对比可以看出两者形状是相同的, 从而验证步态规划与 MATLAB 编程

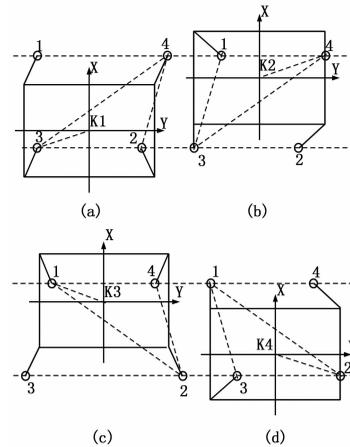


图 3 曲线质心轨迹的静态步态简图

的正确性。图中 K_i 代表步态周期不同阶段质心所在位置。

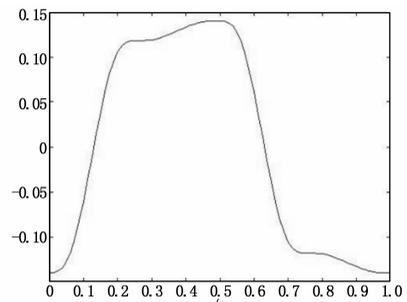


图 4 MATLAB 计算得到的质心轨迹

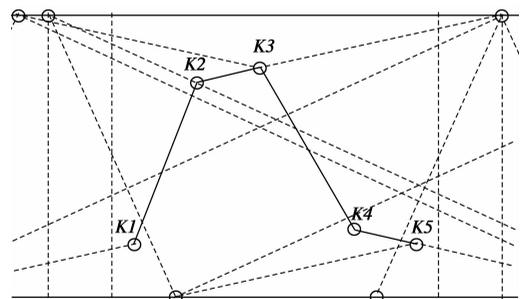


图 5 步态简图质心位置连线得到的质心轨迹

5 曲线质心轨迹步态的 ADAMS 虚拟仿真

设定机器人液压缸材料为钢, 其余机体结构为铝合金。并根据四足机器人实际运动在 ADAMS 中设定各个约束性质。四足机器人侧摆关节, 髌关节与膝关节采用转动副约束; 液压缸缸体和活塞缸之间采用直线移动副约束。仿真结束后可以在 ADAMS/PostProcessor 中查看运动学与动力学分析结果, 并将仿真结果以动画形式表现出来。

因为本研究中规划的曲线质心轨迹的静态步态运动特性与传统的随动质心的静态步态完全不相同, 无法通过对比质心位移移动以及俯仰角、偏航角、翻滚角等参数对比判断运动稳定性是否得到提升。本文通过调整 MATLAB 程序中相关参数, 使两种步态以同样的速度进行运动仿真, 并逐步提升速度大小。随着速度的提升, 传统的随动质心的静态步态首先出现仿真运动的翻倒现象, 而曲线质心轨迹的静态步态仍保持稳定运

(下转第 2370 页)

效警告、未收到无线数据警告。

当 GNSS 数据中数据状态位为“V”时，即表示 GNSS 数据无效，在显示屏上 (7, 0) 的位置显示“V”即数据无效警告；当 GNSS 数据中数据状态为“A”时，即表示 GNSS 数据有效，显示屏上清除“V”警告。每次处理完 GNSS 数据后检查未同步警告标志和未收到无线数据警告标志，若标志为 1 则显示相应的警告，若标志为 0 则清除相应警告，之后警告标志置 1。若接收到无线数据则将未收到无线数据警告标志置 0，否则保持到下一次检查。若 GNSS 有秒脉冲输出，则在端口中断中将未同步警告标志置 0，否则保持到下一次检查。

5 结论

多旋翼无人直升机在军事和民用领域具有广阔的应用前景，但其监视能力还停留在类似协同监视的水平，多旋翼无人直升机之间则没有互动。为了解决此问题，本文设计并实现了基于 MSP430F4152、nRF24L01+ 和 ATGM331C 的小型广播式自动相关监视设备，对系统的软硬件均进行了设计，并通过实验证明了该系统可以实现自动定位、广播自身位置信息并接收附近相同设备的广播，具有很强的实用性。

(上接第 2365 页)

动。如图 6 与图 7 所示为对两种步态分别仿真的动画截图，仿真结果证明了新规划的步态对于运动稳定性的提升。

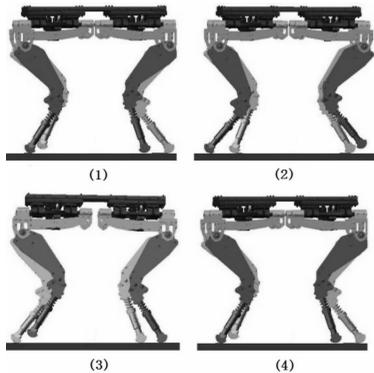


图 6 曲线质心轨迹的静态步态仿真

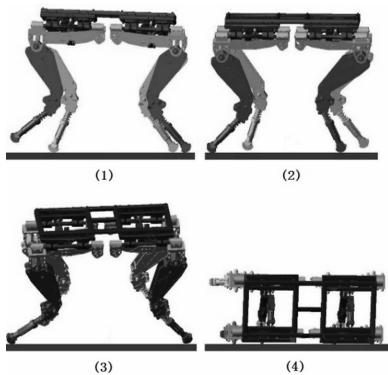


图 7 随动质心的静态步态仿真

6 结论

为了得到兼具较高稳定裕度以及运动速度的静态步态，在将固定质心的静态步态与随动质心的静态步态对比之后，归纳

参考文献：

[1] 花琦, 王帮峰, 钱小燕. 机场场面移动目标监控终端显示平台设计与实现 [J]. 科学技术与工程, 2013, 20 (35): 9688-9692.

[2] 彭良福, 林云松, 黄勤珍. 基于 SSR 和 ADS-B 混合监视的机载编队防撞系统设计 [J]. 电讯技术, 2012, 52 (5): 609-614.

[3] 张满栋, 杨胜强, 吕明. 基于 MFC 报警监控图形系统设计与实现 [J]. 工程图学学报, 2006 (2): 161-165.

[4] 唐勇, 刘昌忠, 吴宏刚. 基于 Google Earth 的三维航迹监视及六自由度飞行仿真 [J]. 计算机应用, 2009, 29 (12): 3385-3387.

[5] 王飞只. ADS-B 系统机载设备维护之研究 [J]. 科技资讯, 2010 (11): 5-5.

[6] 卢宇, 吴宏刚, 朱盼. A-SMGCS 中的航迹关联设计与实现 [J]. 计算机工程, 2013, 39 (6): 223-226.

[7] 白松浩, 朱晓辉, 陈志杰. 广播式与合约式自动相关监视的信息转换 [J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27 (9): 1658-1660.

[8] 孟军, 马彦恒, 董健, 等. 基于 ADS-B 的便携式空情报测系统技术方案研究 [J]. 计算技术与自动化, 2012, 31 (1): 132-135.

[9] 蔡志浩, 杨丽曼, 王英勋, 等. 无人机全空域飞行影响因素分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37 (2): 175-179.

出两种步态各自的优缺点并进行相互结合，提出一种曲线质心轨迹的步态方法。为实现对该步态方法的规划，首先，建立单腿关节坐标系及腿部运动学方程，并推导出由足端点坐标为参数的腿部关节夹角变化方程；其次，根据曲线质心轨迹步态的思路，设计出明确的质心运动轨迹以及划分步态周期，并结合逆运动学方程在 MATLAB 中对步态规划得到的足端运动轨迹方程进行计算，得到的四足机器人质心轨迹满足规划的曲线轨迹要求；再次，通过对四足机器人腿部结构尺寸分析，计算出液压缸活塞缸行程位移量与腿部关节夹角变化量之间的关系方程，从而为后续液压控制系统的搭建做准备；最后，对 ADAMS 中的虚拟样机进行运动仿真，仿真效果基本满足规划步态要求。并通过对传统静态步态与在其基础上规划的步态在相同速度下的仿真结果进行对比，判断曲线质心轨迹步态的稳定性得到有效提升。

参考文献：

[1] 吉爱红, 戴振东, 周来水. 仿生机器人的研究进展 [J]. 机器人, 2005, 27 (3): 284-288.

[2] Raibert M, Blankespoor K, Nelson G. Big Dog, the rough-terrain quadruped robot [A]. 17th World Congress, International Federation of Automation Control [C]. Amsterdam, Netherland: Elsevier, 2008: 10822-10825.

[3] Semini C. HyQ-Design and development of a hydraulically actuated quadruped robot [D]. Genova, Italy: Italian Institute of Technology, 2010.

[4] 张秀丽. 四足机器人节律运动及环境适应性的生物控制研究 [D]. 北京: 清华大学, 2004.

[5] 王立鹏, 王军政, 汪首坤, 等. 基于足端轨迹规划算法的液压四足机器人步态控制策略 [J]. 机械工程学报, 2013, 49 (1): 39-44.

[6] 徐铁群, 万隆君. 四足步行机器人稳定性步态分析 [J]. 制造业自动化, 2001, 23 (8): 5-7.

[7] 王鹏飞. 四足机器人稳定行走规划及控制技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.