

# 面向崎岖地形的六足机器人运动能力分析

陈杰<sup>1</sup>, 梁忠超<sup>1</sup>, 刘冲<sup>1</sup>, 赵杰<sup>2</sup>  
(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819;  
2. 哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘 要:** 对机器人自身运动能力的把握是进行合理运动规划和控制的前提. 针对面向崎岖地形应用的六足机器人的运动能力进行分析. 首先, 介绍了六足机器人平台及其系统设计; 然后, 分别对六足机器人腿部、由机器人躯干和各支撑腿构成的并联机构进行了运动学建模, 并分析了它们的工作空间; 最后, 基于 Adams 和 Matlab 建立了含有梅花桩崎岖地形的六足机器人仿真平台, 并进行了六足机器人运动仿真. 结果表明: 通过结合六足机器人自身运动能力和地形特征进行合理的运动规划, 可有效提高六足机器人在崎岖地形下的运动能力.

**关 键 词:** 六足机器人; 崎岖地形; 运动能力; 工作空间

中图分类号: TP 242      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2019)06-0819-06

## Moving Capability Analysis of a Hexapod Robot over Rugged Terrains

CHEN Jie<sup>1</sup>, LIANG Zhong-chao<sup>1</sup>, LIU Chong<sup>1</sup>, ZHAO Jie<sup>2</sup>  
(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China. Corresponding author: LIANG Zhong-chao, E-mail: liangzc@me.neu.edu.cn)

**Abstract:** The grasp of the moving capability of a robot is crucial to the motion planning and control of the robot. The moving capability of a hexapod robot which is used over rugged terrains is thus analyzed. First, the hexapod robot platform as well as the system design is introduced. Then, the kinematic models of the hexapod robot leg and the parallel mechanism consisting of the robot torso and each support leg are built respectively. Their workspaces are also analyzed. Finally, the hexapod robot simulation platform with a rugged terrain is built based on Adams and Matlab, and the motion simulation with the hexapod robot is performed. Results show that, through reasonable motion planning that takes account of both the moving capability and terrain profiles, it is possible to effectively enhance the mobility of a hexapod robot over rugged terrains.

**Key words:** hexapod robot; rugged terrain; moving capability; workspace

六足机器人是足式机器人的一种, 其拥有冗余的机械结构和非连续的运动形式, 故而具有比其他类型移动机器人更加出色的多地形运动能力<sup>[1-3]</sup>. 此外, 六足机器人作为以节肢动物为仿生原型的典型仿生系统, 其可为生物力学及神经科学研究提供可靠且易于操作的物理平台<sup>[4-7]</sup>. 德国、

美国和中国多家科研机构已研制出数款高性能的六足机器人原理样机<sup>[8-11]</sup>.

六足机器人的运动本质上是部分腿支撑躯干, 其余腿以躯干为基座向前摆动的往复过程. 当在崎岖地形下应用时, 对机器人自身运动能力的分析和把握在机器人运动决策和规划中至关

重要。

本文以六足机器人系统为研究对象,分别对其躯干和腿部的运动能力展开探究,以进一步评估机器人的运动性能,为六足机器人在崎岖地形下的全身运动规划和自适应控制奠定基础。

# 1 六足机器人系统

本文研究的六足机器人原理样机如图 1 所示。该六足机器人由 6 条结构相同的腿部及躯干构成。机器人腿部具有胫节、股节和基节三个旋转自由度。其中,各自由度的分配方式如图 2 所示。驱动系统采用电机及同步带加谐波减速器的二级减速设计方案。机器人的腿部和整体设计均采用模块化的思想,以提高互换性并简化机器人的建模和控制。六足机器人技术参数如表 1 所示。

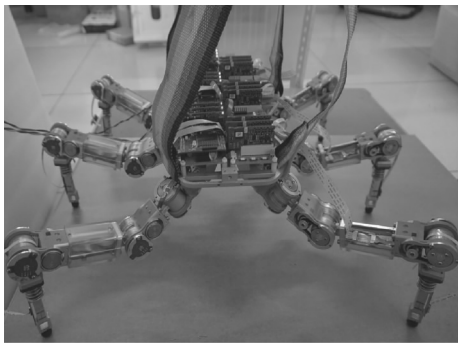


图 1 六足机器人原理样机

Fig. 1 Prototype of the hexapod robot

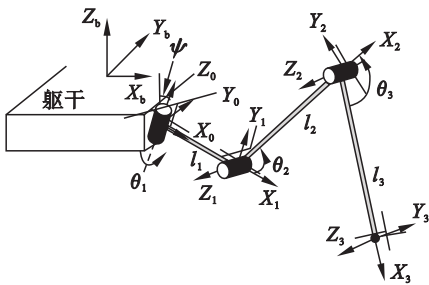


图 2 六足机器人腿部 D-H 坐标系

Fig. 2 D-H coordinate frames of the robotic leg

表 1 六足机器人技术参数

Table 1 Technical parameters of the robot

参数	参数值
基节长度 $l_1/\text{mm}$	68
股节长度 $l_2/\text{mm}$	129
胫节长度 $l_3/\text{mm}$	131
基节运动范围	$[-45^\circ, 45^\circ]$
股节运动范围	$[-60^\circ, 0^\circ]$
胫节运动范围	$[60^\circ, 120^\circ]$

# 2 机器人腿部运动能力分析

六足机器人的运动是部分腿支撑躯干,其余腿向前摆动的往复过程。因此,腿部的运动能力直接关系到机器人整体的运动能力和决策。

## 2.1 机器人腿部运动学分析

图 2 所示为建立的六足机器人腿部 D-H 坐标系。图中  $\{O_0 - X_0Y_0Z_0\}$ ,  $\{O_1 - X_1Y_1Z_1\}$ ,  $\{O_2 - X_2Y_2Z_2\}$ ,  $\{O_3 - X_3Y_3Z_3\}$  分别为腿部各关节及足端根据 D-H 方法建立的坐标系,  $\{O_b - X_bY_bZ_b\}$  为固结于躯干中心的坐标系。躯干坐标系  $Z_b$  轴与基座坐标系  $Z_0$  轴的夹角为  $\psi$ 。

足端坐标系  $\{O_3 - X_3Y_3Z_3\}$  到基关节坐标系  $\{O_0 - X_0Y_0Z_0\}$  的转换矩阵,可按 D-H 方法计算。设  $(p_x, p_y, p_z)$  为机器人足端的位置坐标,则其在躯干坐标系  $\{O_b - X_bY_bZ_b\}$  下的位置为

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\psi(l_1c\theta_1 + l_2c\theta_1c\theta_2 + l_3c\theta_1c\theta_{23}) + s\psi(l_2s\theta_2 + l_3s\theta_{23}) + c_x \\ l_1s\theta_1 + l_2s\theta_1c\theta_2 + l_3s\theta_1c\theta_{23} + c_y \\ -s\psi(l_1c\theta_1 + l_2c\theta_1c\theta_2 + l_3c\theta_1c\theta_{23}) + c\psi(l_2s\theta_2 + l_3s\theta_{23}) + c_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $c$  代表余弦函数  $\cos$ ;  $s$  代表正弦函数  $\sin$ ;  $\theta_{23} = \theta_2 + \theta_3$ ;  $c_x, c_y, c_z$  分别为腿部基节在躯干坐标系  $\{O_b - X_bY_bZ_b\}$  中的位置。

## 2.2 腿部工作空间分析

六足机器人腿部的运动能力直接关系到其可跨的障碍物高度以及可达到的最大运动步长等。图 3 所示为六足机器人足端的工作空间。可以看到,机器人足端在垂直方向的运动范围为 250 mm 左右,约为机器人站立高度的 2 倍(见图 3a 和 3b),该参数决定了机器人的最大越障高度;足端在机器人前进方向的运动范围为 400 mm,约为机器人前后腿安装距离的 1.6 倍(见图 3b 和 3c),该参数关系到机器人的最大运动步长;足端在机器人侧向的运动范围约为 200 mm,约为机器人躯干宽度的 1.15 倍(见图 3a 和 3c),该参数越大机器人可选择的落足点位置越多。这些工作空间参数充分满足了机器人的设计指标。较大的足端工作空间有利于提高机器人的行走效率和在崎岖地形下的移动能力。六足机器人腿部的运动学分析为进一步把握机器人的运动能力以及躯干运动能力分析和腿部轨迹规划奠定了坚实的基础。

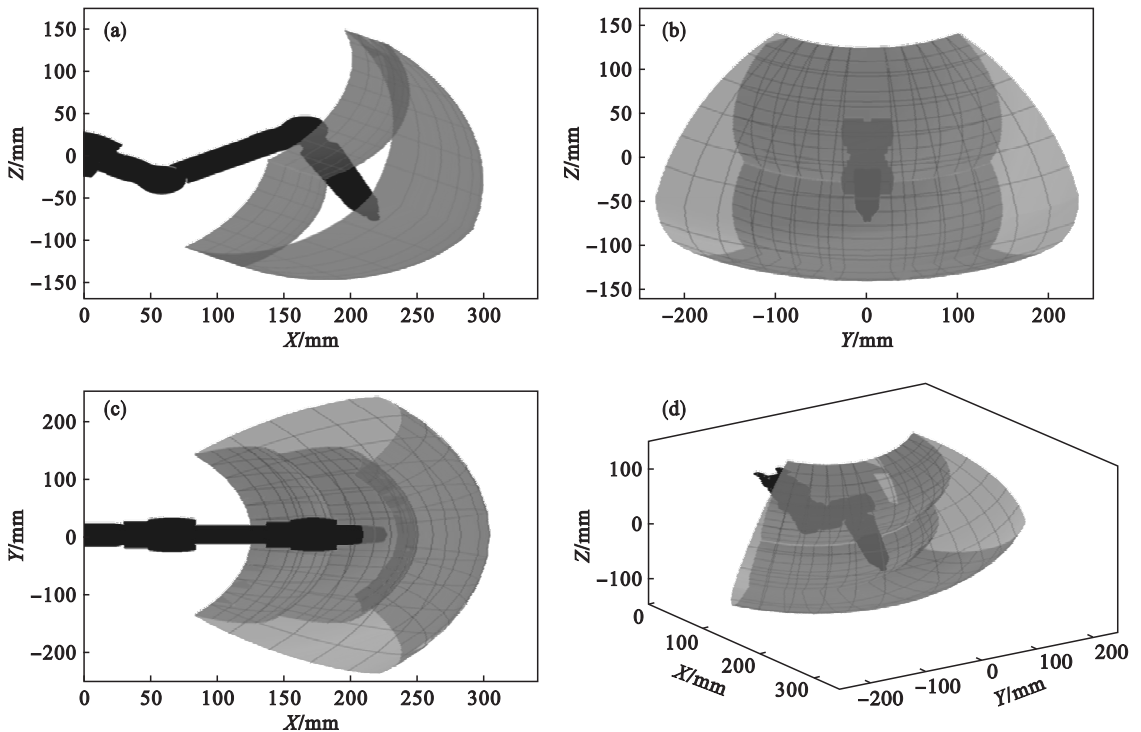


图3 六足机器人足端工作空间  
Fig. 3 Workspace of the robotic leg-end

### 3 机器人躯干运动能力分析

六足机器人的躯干与各支撑腿支链构成并联机构.以六足机器人三足支撑状态为例对六足机器人的躯干并联构型进行分析,因为三足步态是六足机器人诸多步态中行走效率最高、应用最为普遍的步态<sup>[12-13]</sup>.同时,获得的结论亦可扩展到多腿支撑时的情形.

#### 3.1 机器人躯干运动学分析

六足机器人的躯干D-H坐标系见图4.图中 $\{O_b - X_b Y_b Z_b\}$ 为机器人躯干坐标系, $\{O_w - X_w Y_w Z_w\}$ 为地面坐标系, $\{O_{ij} - X_{ij} Y_{ij} Z_{ij}\}$ 为各关节

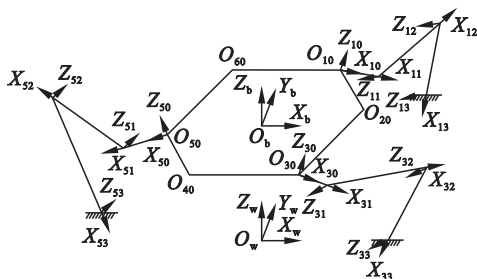


图4 六足机器人躯干D-H坐标系  
Fig. 4 D-H coordinate frames of the robotic torso

坐标系,其中 $i(i=1,3,5)$ 为六足机器人腿部编号, $j(j=1,2,3)$ 为腿部关节编号.设采用欧拉角 $(\psi, \theta, \varphi)$ 表示六足机器人躯干坐标系 $\{O_b -$

$X_b Y_b Z_b\}$ 相对于地面坐标系 $\{O_w - X_w Y_w Z_w\}$ 的姿态变换,则躯干坐标系 $\{O_b - X_b Y_b Z_b\}$ 相对于地面坐标系 $\{O_w - X_w Y_w Z_w\}$ 的转换矩阵可表示为

$${}^wT_b = \begin{bmatrix} c\psi c\varphi - s\psi c\theta s\varphi & -c\psi s\varphi - s\psi c\theta c\varphi & s\psi s\theta & X_b \\ s\psi c\varphi + c\psi c\theta s\varphi & -s\psi s\varphi + c\psi c\theta c\varphi & -c\psi s\theta & Y_b \\ s\theta s\varphi & s\theta c\varphi & c\theta & Z_b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $c$ 代表余弦函数 $\cos$ ;  $s$ 代表正弦函数 $\sin$ .设各支撑腿的关节角为 $[\theta_{i1}, \theta_{i2}, \theta_{i3}]$ ( $i$ 为六足机器人的支撑腿编号),足端在躯干坐标系 $\{O_b - X_b Y_b Z_b\}$ 的位置为 $[{}^b p_{ix}, {}^b p_{iy}, {}^b p_{iz}]$ ,而在地面坐标系 $\{O_w - X_w Y_w Z_w\}$ 的位置为 $[{}^w p_{ix}, {}^w p_{iy}, {}^w p_{iz}]$ ,则可得

$$\begin{bmatrix} {}^b p_{ix} \\ {}^b p_{iy} \\ {}^b p_{iz} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^wT_b^{-1} \begin{bmatrix} {}^w p_{ix} \\ {}^w p_{iy} \\ {}^w p_{iz} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据式(2)可知,躯干坐标系 $\{O_b - X_b Y_b Z_b\}$ 相对于地面坐标系 $\{O_w - X_w Y_w Z_w\}$ 的转换矩阵中包含6个未知数 $(\psi, \theta, \varphi, X_b, Y_b, Z_b)$ .三足步态行走时,分别取 $i=1,3,5$ ,即可得到式(4),从而求出转换矩阵中包含的6个未知数.

$$\begin{bmatrix} {}^w p_{1x} & {}^w p_{3x} & {}^w p_{5x} \\ {}^w p_{1y} & {}^w p_{3y} & {}^w p_{5y} \\ {}^w p_{1z} & {}^w p_{3z} & {}^w p_{5z} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = {}^w T_b \begin{bmatrix} {}^b p_{1x} & {}^b p_{3x} & {}^b p_{5x} \\ {}^b p_{1y} & {}^b p_{3y} & {}^b p_{5y} \\ {}^b p_{1z} & {}^b p_{3z} & {}^b p_{5z} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

### 3.2 躯干工作空间分析

六足机器人躯干由支撑腿构成的各支链并联支撑,躯干的工作空间是评估机器人运动能力的

关键指标.图 5 为两组不同的腿部初始形态下获得的六足机器人躯干工作空间.图中的半透明平面表示躯干能够达到的最高和最低高度,该高度也约束了机器人能够跨越或者穿过的障碍物大小,直接关系到机器人在崎岖地形下的运动规划.另外,六足机器人躯干在不同的腿部初始形态下均具有较大的工作空间,保证了机器人躯干的灵活性.

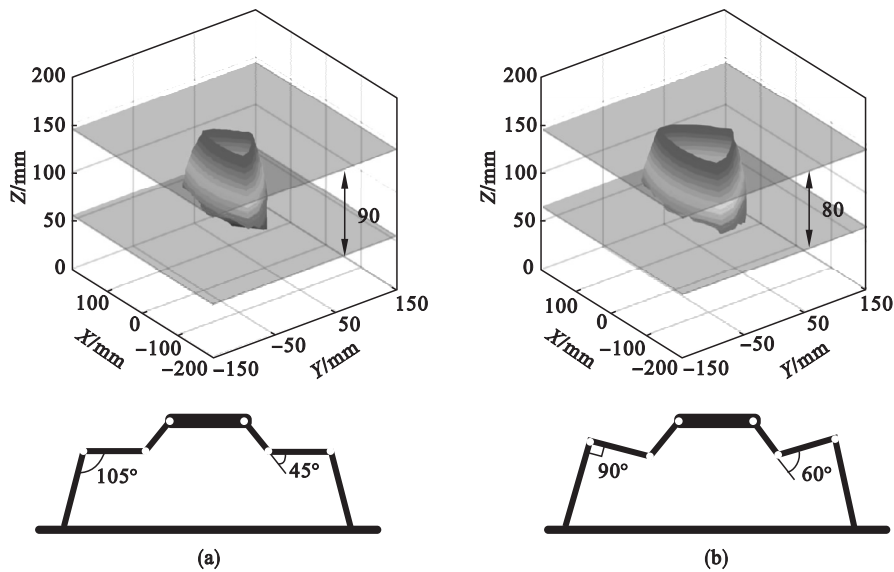


图 5 六足机器人躯干工作空间  
Fig. 5 Workspace of the robotic torso  
(a)—第一组; (b)—第二组.

## 4 运动仿真与结果分析

### 4.1 仿真平台的建立和运动规划方法

为了验证上述运动学分析的正确性和六足机器人的运动能力,在 Adams 环境下建立了如图 6 所示的六足机器人仿真平台.其中,地面环境设定为平坦地面与梅花桩构成的崎岖地形,整个仿真地形的尺寸为 1 600 mm×800 mm,梅花桩的宽度为 400 mm,各桩之间的距离和高度各不相同,梅花桩高度总体呈现先增后减的分布趋势,最高的梅花桩高度为 80 mm.因此六足机器人行走时各腿的运动步长和轨迹也不尽相同.

机器人的运动任务为:从图 6 中所示的位置出发,沿着给定的躯干路径经过梅花桩地形,最终运动至平坦地面处.首先,仿真系统需要结合机器人腿部和躯干的运动能力、各个梅花桩的分布方式和高度等合理规划机器人每步行走时各支撑腿的支撑位置以及各摆动腿的落足位置.所选择的支撑和落足位置应使机器人的躯干和足端:1)位

于机器人的工作空间内;2)尽量远离工作空间的边界以增大机器人的运动灵活度.在此基础上,分别采用三次样条曲线生成机器人足端和躯干的运动轨迹,并通过所获得的腿部和躯干运动学方程(1)和(4)求解得到机器人各关节的运动轨迹.机器人各关节采用 PD 控制,根据各关节的运动偏差实时地调整关节驱动力矩;腿部采用阻抗控制以调节足地接触时的足端受力<sup>[14-15]</sup>.整个运动规划及解算过程在 MATLAB/Simulink 中进行,通过与 Adams 联合仿真的方式加以实现.

### 4.2 仿真结果及分析

整个机器人的运动仿真过程如图 6 所示.由仿真结果可以看到,通过结合六足机器人的运动能力和地形特征合理地进行运动规划,可有效提高六足机器人在崎岖地形下的运动能力.图 7 所示为测量得到的机器人躯干俯仰角和横滚角的变化曲线.由图可知,躯干横滚角在整个运动过程的中段起伏较为明显,而在运动过程的起始和结束阶段变化较小.该趋势主要是由中段部分的梅花桩高度差较大所致.另外,机器人躯干俯仰角的变化



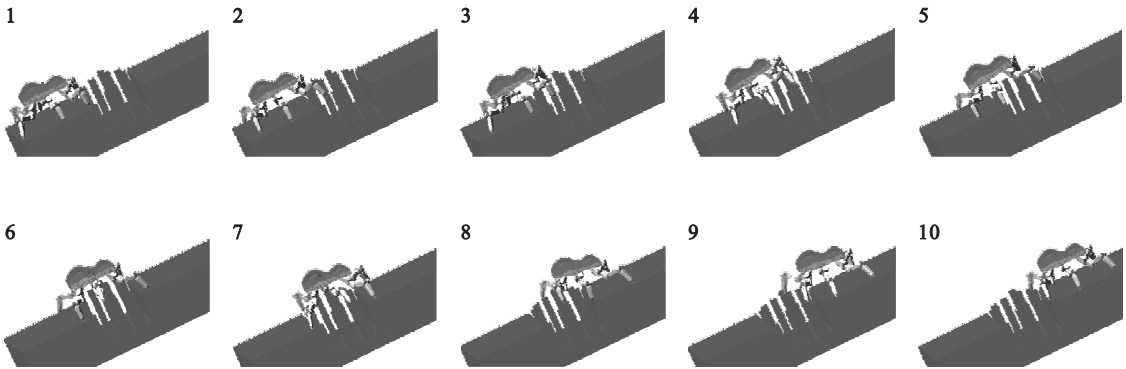


图6 六足机器人崎岖地形运动仿真过程  
Fig. 6 Simulation process of the robot walking over a rugged terrain

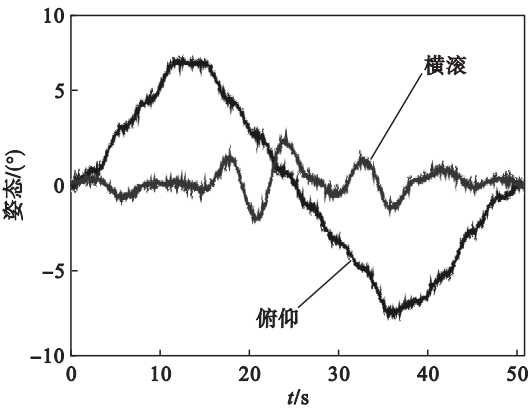


图7 机器人躯干运动轨迹  
Fig. 7 Motion trajectories of the robot torso

化大致分为三个阶段：首先从 $0^{\circ}$ 递增到 $8^{\circ}$ 左右，表示机器人进行的是上坡运动；然后逐渐下降到

$-8^{\circ}$ 左右，表示机器人由上坡运动转换到了下坡运动；最后从 $-8^{\circ}$ 递增到 $0^{\circ}$ ，表示机器人逐步运动到了平坦地形处。机器人躯干的上述变化趋势与图6中梅花桩地形的高低分布相对应。

图8为机器人右前腿和右中腿各关节在运动过程中的角度变化曲线。机器人腿部关节的运动曲线呈现出周期性的特点，这与足式机器人的运动方式相对应，即腿部在支撑与摆动状态之间反复循环。另外，由于各个梅花桩在空间不规则的分布方式，使得六足机器人每一步运动的落足点高度和步长不一样。相应地，机器人各关节在每个步行周期内的运动轨迹也不尽相同。在机器人的运动过程中，控制系统对各关节的调整控制量也不同。

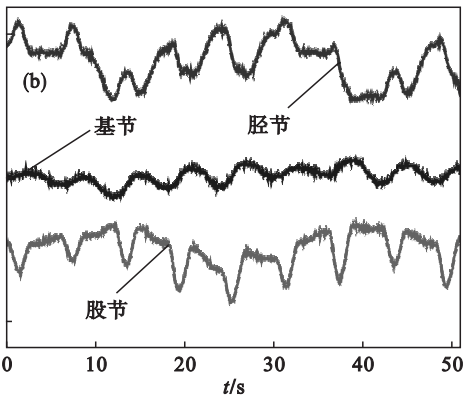
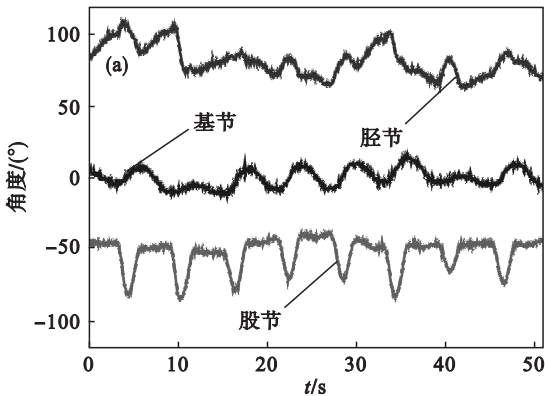


图8 机器人右前腿和右中腿关节轨迹  
Fig. 8 Joint trajectories of fore-right and middle-right legs of the robot  
(a)—右前腿；(b)—右中腿。

5 结 论

本文对面向崎岖地形应用的六足机器人的运动能力进行了分析。分别研究了六足机器人腿部

和躯干的运动学模型和工作空间，分析了六足机器人的运动能力。利用Adams和Matlab软件建立了含有梅花桩崎岖地形的六足机器人仿真平台，进行了六足机器人运动仿真，验证了运动学分析的正确性及六足机器人在崎岖地形下的运动

能力.

未来将在崎岖地形下落足点的识别和选取、基于地形形貌的机器人轨迹优化等方面展开研究,从而进一步提高六足机器人在崎岖地形下的运动能力,推动其走向实用化.

### 参考文献:

- [1] Roberts J M, Corke P, Winstanley G J. Development of a 3500-tonne field robot[J]. *International Journal of Robotics Research*, 1999, 18(7): 739 – 752.
- [2] Andrada E, Mämpel J, Schmidt A, et al. From biomechanics of rats' inclined locomotion to a climbing robot [J]. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 2013, 8(3): 192 – 212.
- [3] Oblak J, Cikajlo I, Matjacic Z. Universal haptic drive; a robot for arm and wrist rehabilitation [J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2010, 18(3): 293 – 302.
- [4] Jackson A. Neuroscience: brain-controlled robot grabs attention [J]. *Nature*, 2012, 485(7398): 317 – 318.
- [5] Cappello L, Elangovan N, Contu S, et al. Robot-aided assessment of wrist proprioception [J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2015, 9(198): 1 – 8.
- [6] Jarc A M, Nisky I. Robot-assisted surgery: an emerging platform for human neuroscience research [J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2015, 9(315): 1 – 9.
- [7] Jarrasse N, Proietti T, Crocher V, et al. Robotic exoskeletons; a perspective for the rehabilitation of arm coordination in stroke patients [J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2014, 8(947): 1 – 13.
- [8] Dominik B, Piotr S. Rough terrain mapping and classification for foothold selection in a walking robot [J]. *Journal of Field Robotics*, 2011, 28(4): 497 – 528.
- [9] 任冠佼, 陈伟海, 陈斌, 等. 基于双四杆机构的蟑螂机器人设计与分析 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(11): 14 – 22. (Ren Guan-jiao, Chen Wei-hai, Chen Bin, et al. Mechanism design and analysis of cockroach robot based on double four-bar linkage [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(11): 14 – 22.)
- [10] Annett S, Heiko H, Martin G. Stereo-vision-based navigation of a six-legged walking robot in unknown rough terrain [J]. *International Journal of Robotics Research*, 2012, 31(4): 381 – 402.
- [11] 李满宏, 张明路, 张建华, 等. 基于离散化的六足机器人自由步态生成算法 [J]. 机械工程学报, 2016, 52(3): 18 – 25. (Li Man-hong, Zhang Ming-lu, Zhang Jian-hua, et al. Free gait generation algorithm for a hexapod robot based on discretization [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(3): 18 – 25.)
- [12] Belter D, Skrzypczyński P. Rough terrain mapping and classification for foothold selection in a walking robot [J]. *Journal of Field Robotics*, 2011, 28(4): 497 – 528.
- [13] Tian Y, Gao F. Efficient motion generation for a six-legged robot walking on irregular terrain via integrated foothold selection and optimization-based whole-body planning [J]. *Robotica*, 2018, 36(3): 333 – 352.
- [14] Chen J, Liu Y, Zhao J, et al. Biomimetic design and optimal swing of a hexapod robot leg [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2014, 11(1): 26 – 35.
- [15] Zhang H, Liu Y, Zhao J, et al. Development of a bionic hexapod robot for walking on unstructured terrain [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2014, 11(2): 176 – 187.