

DOI: 10.3901/JME.2010.15.017

# 仿生攀爬机器人的步态分析\*

江 励 管贻生 蔡传武 朱海飞 周雪峰 张宪民

(华南理工大学机械与汽车工程学院 广州 510640)

**摘要:** 面向农业、林业和建筑等领域的高空作业, 提出一种具有攀爬和操作功能的双手爪式模块化仿生机器人, 以期代替人们在高空复杂环境中从事危险工作。给出机器人的一种 5 自由度构型, 分析其在空间两杆之间攀爬过渡的能力, 然后根据其构型特征提出、分析和比较三种攀爬步态。在 ADAMS 仿真环境下, 对机器人采用这三种步态攀爬各种方位的杆件时主要关节所需的力矩和机器人所消耗的能量进行计算和对比。仿真结果为机器人的攀爬步态规划提供了依据。

**关键词:** 仿生机器人 攀爬机器人 模块化机器人 步态分析

**中图分类号:** TP242

## Gait Analysis of a Novel Biomimetic Climbing Robot

JIANG Li GUAN Yisheng CAI Chuanwu ZHU Haifei

ZHOU Xuefeng ZHANG Xianmin

(School of Mechanical and Automotive Engineering,

South China University of Technology, Guangzhou 510640)

**Abstract:** A novel biped robot with both climbing and manipulation functions is proposed for dangerous high-altitude operation in new potential fields of robotic applications such as agriculture, forestry, and construction. The structure of 5 degrees of freedom is presented for this robot, and the feasibility of the robot transiting between two cylindrical poles in any orientations is proved. Three climbing gaits are proposed and analyzed. The joint torque and energy consumption of the robot when it climbs poles in various orientations are calculated and compared in the simulation with the software tool ADAMS. The results are significant for gait planning with such biped climbing robots.

**Key words:** Biomimetic robot Climbing robot Modular robot Gait analysis

## 0 前言

随着机器人技术的发展, 农业、林业和建筑业等领域将成为机器人应用的广阔天地。在这些领域内的工作(如果树上果子的采摘, 树林中树木枝叶的修剪, 桥梁上钢架的喷漆检修等)都具有一些相同的特点: ① 高空作业, 工作地点离地面较高; ② 工作环境复杂和恶劣, 危险性高; ③ 工作量大, 消耗的时间很长, 单调乏味。鉴于以上特点, 开发具有攀爬功能的机器人代替人去从事这些高空危险工作将有重要意义。目前, 国内外已经认识到这点,

开始研究攀爬类机器人并开发出一些样机。日本早稻田大学已经开展了爬树机器人的研制, 在 2005 年爱知国际博览会上展出了其原型机 WOODY-1。西班牙开发了基于并联机器人的爬树机器人 CPR<sup>[1]</sup>。这两种机器人都由上下两个相同的环形部分组成, 其中一环抱着树干时, 另一环可松开, 由连杆驱动顺着树干作上下移动, 如此往复交替, 使整个系统升降; 伊朗研制了一种爬杆机构 UT-PCR, 该机构由三角形支架和端头安装有轮子的连杆组成<sup>[2]</sup>, 适用于圆柱杆件的攀爬; 美国卡内基梅隆大学等几所大学提出了另一种思路, 从仿生学角度开展爬树机器人项目 RiSE 的研究, 其样机为六足机器人, 能像蟑螂一样贴着树干爬行<sup>[3]</sup>。麻省理工学院研制了一种能爬窗梁的机器人 Shady3D, 能顺着窗架爬行移动<sup>[4]</sup>。哈尔滨工业大学正在研发爬树架

\* 国家自然科学基金(50975089)、国家高技术研究发展计划(863 计划, 2009AA04Z204)、高校博士点专项科研基金、中央高校基本科研费(2009Z20006)和国家杰出青年科学基金(50825504)资助项目。20090824 收到初稿, 20100516 收到修改稿

的机器人,其主要目的是面向桥梁、体育场馆、塔类等基础设施的检测和维修<sup>[5]</sup>。北京航空航天大学 and 德国汉堡大学合作,研制了仿毛毛虫的多关节微小机器人,能在平整光洁的表面上爬行<sup>[6]</sup>。中国科学院沈阳自动化研究所研制了一种5自由度爬壁机器人,可以通过两个吸盘的交替吸附和各个关节的配合灵活地实现尺蠖式爬行和转向,并且能够在一定夹角范围的壁面之间实现过渡<sup>[7]</sup>。

总体来看,现有的样机基本实现了一定的攀爬功能,但都还存在不足:① 攀爬对象单一,只能爬杆、爬桁架或者爬树而难以攀爬不同的对象;② 受到自身结构限制,缺乏杆间攀爬过渡的能力,难以适应复杂的环境;③ 缺乏操作功能,作业时还必须另外加装执行器或操作臂。

受到尺蠖、猿猴、树懒等生物爬树原理的启发,本文提出了一种5自由度攀爬机器人。该机器人由3个摆动关节、2个回转关节和2个末端夹持器串联而成。其中,末端的2个夹持器可以看成机器人的两手爪,中间的5个关节和连杆构成机器人本体。其特点包括:① 机器人具有较强的攀爬功能,能爬杆、桁架和树木等多种对象,能在空间两杆之间过渡攀爬;② 由于具有足够多的自由度,可以采用多种不同的步态进行攀爬;③ 机器人本身也是一个操作臂,具有操作功能,不需要安装额外的操作装置。在结构上采用模块化设计方法。模块化机器人具有研发成本低,结构和功能的扩展性强等优点,是当前机器人系统研发的一个趋势<sup>[8-9]</sup>。GUAN等<sup>[10]</sup>已经就模块化机器人做了相关的工作,设计制造了多种独立完整的机器人单自由度关节模块和末端功能模块,包括一种回转关节模块、一种摆动关节模块和一种夹持器模块,并由这些模块构建了多种不同的机器人系统<sup>[11]</sup>。

本文对上述仿生攀爬机器人进行基础研究,就其构型、运动学作基本介绍,提出、分析和比较三种可能的不同攀爬步态,通过仿真计算和比较不同步态所需的最大关节转矩和功率消耗,为攀爬规划提供基本依据。

## 1 机器人构型和攀爬运动分析

### 1.1 机器人的构型

这里用5个单自由度关节模块依次串接构建机器人本体。3个摆动关节模块(关节轴与连杆轴垂直,称之为T型)在中间,关节轴线互相平行;两个回转关节模块(关节轴与连杆轴共线,称之为I型)分布在两端,其轴线与摆动关节的互相垂直。两个夹持

器模块分别连接在本体的两端,这样组成两端对称、首尾互置的双手爪式攀爬机器人。其CAD模型和机构示意图如图1所示(图1中字母T、I和G分别代表摆动关节、回转关节和夹持器,下同)。3个摆动关节的转动范围是 $-110^{\circ} \sim 110^{\circ}$ ,外径为100 mm,长度为238 mm,质量为2.5 kg,最大输出转矩117 N·m。2个回转关节可以做 $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 的全方位转动,外径为100 mm,长度为165 mm,质量为2.5 kg,最大输出转矩150 N·m。夹持器模块(称之为G型模块)夹持圆柱形杆件的范围为 $\phi 50 \sim 120$  mm,最大夹持力300 N,质量2.2 kg。这些模块和机器人的结构设计和夹持力分析可参见文献[10-11]。

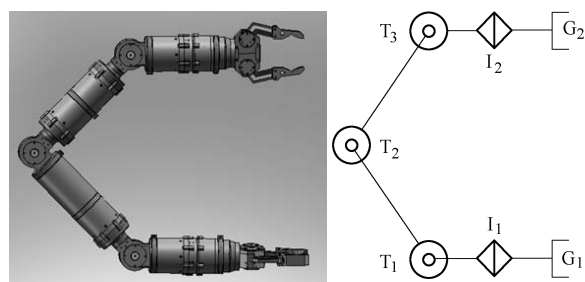


图1 模块化仿生攀爬机器人的CAD模型和机构简图

### 1.2 空间杆间攀爬过渡运动分析

机器人攀爬时,一端的夹持器抓紧杆件以支撑整个系统,另一端夹持器运动到目标位置和姿态,夹紧目标杆件后松开前一个夹持器,两个夹持器交替抓夹,角色互换。目标端夹持器对于参考坐标系的位置和姿态相可以用一个矩阵来表示,即

$$T = \begin{pmatrix} n & o & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, $n$ ,  $o$ ,  $a$ 为夹持器的姿态矢量, $p$ 为夹持器的位置矢量。虽然实现三维空间的任意位姿需要机器人具有6自由度,但考虑到机器人攀爬的对象一般为杆件和树木等,它们的横截面多数可视为圆形。在这种情况下5自由度机器人一般可以满足要求,能够实现从攀爬过渡。下面进行证明。

机器人初始姿态和坐标系的建立如图2所示。根据机器人运动学的D-H描述方法<sup>[12]</sup>,每一个位姿的变换矩阵可以表达为

$$A_n = \begin{pmatrix} c_n & -s_n c_{\alpha_n} & s_n s_{\alpha_n} & a_n c_n \\ s_n & c_n c_{\alpha_n} & -c_n s_{\alpha_n} & a_n s_n \\ 0 & s_{\alpha_n} & c_{\alpha_n} & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

式中, $c_n = \cos \theta_n$ ,  $s_n = \sin \theta_n$ ,  $c_{\alpha_n} = \cos \alpha_n$ ,  $s_{\alpha_n} = \sin \alpha_n$ 。

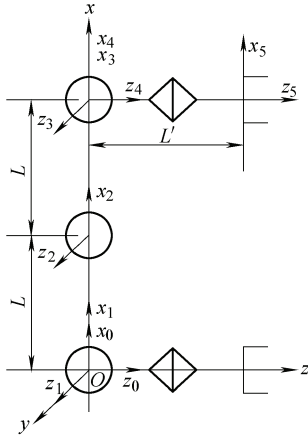


图2 机器人运动学参考坐标系

于是抓取目标端夹持器的位姿可以表示为

$$\mathbf{T} = \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 \mathbf{A}_3 \mathbf{A}_4 \mathbf{A}_5 \quad (2)$$

对于圆柱状杆件, 为使夹持器能够夹住目标杆件, 必须满足以下两个条件: ① 夹持器能移动到目标位置; ② 夹持器开合方向与杆的倾斜方向垂直。其中, 夹持器的位置矢量由式(1)中  $\mathbf{p}$  给出, 其开合方向的法向矢量由式(1)中  $\mathbf{n}$  给出。

设抓取目标杆的方向矢量为  $(a_x \ a_y \ c_z)^T$ , 则夹持器的目标位置的集合都可以由  $\mathbf{p}$  给出

$$\mathbf{p} = (x_0 + a_x k \ y_0 + b_y k \ z_0 + c_z k)^T$$

式中,  $k$  为一固定系数,  $\mathbf{p}_0 = (x_0 \ y_0 \ z_0)^T$  为任意一个可实现抓取的目标位置坐标。

令  $\mathbf{n} = (a_x \ b_y \ c_z)^T$ , 并将式(1)代入式(2)中, 得

$$\begin{pmatrix} \mathbf{n} & \mathbf{o} & \mathbf{a} & \mathbf{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 \mathbf{A}_3 \mathbf{A}_4 \mathbf{A}_5$$

等式两边依次左乘矩阵  $\mathbf{A}_i^{-1}$ , 可以角度进行解偶。由于矢量  $\mathbf{n}$  和  $\mathbf{p}$  提供了 5 个已知量, 在解偶过程中可以分别解出  $\theta_1 \sim \theta_5$  的值

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{p_y}{p_x}\right)$$

或

$$\theta_1 = \theta_1 + 180^\circ$$

$$\theta_{234} = \arctan\left(-\frac{c_z}{c_1 a_x + s_1 b_y}\right)$$

或

$$\theta_{234} = \theta_{234} + 180^\circ$$

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{(c_3 + 1)\lambda - s_3 \rho}{(c_3 + 1)\rho + s_3 \lambda}\right)$$

$$\theta_3 = \pm \arccos\left(\frac{\lambda^2 + \rho^2}{2L^2} - 1\right)$$

$$\theta_4 = \theta_{234} - \theta_2 - \theta_3$$

$$\theta_5 = \arcsin(-s_1 a_x + c_1 b_y)$$

或

$$\theta_5 = \theta_5 + 180^\circ$$

式中,  $c_i = \cos \theta_i$ ,  $s_i = \sin \theta_i$ ,  $c_{234} = \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$ ,  $s_{234} = \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$ ,  $p_x = x_0 + a_x k$ ,  $p_y = y_0 + b_y k$ ,  $p_z = z_0 + c_z k$ ,  $\lambda = p_z + c_{234} L'$ ,  $\rho = c_1 p_x + s_1 p_y - s_{234} L'$ 。

当解出  $\theta_1 \sim \theta_5$  的值分别都在各关节的极限转角范围内时, 机器人便可以实现此杆件的抓取, 从而实现攀爬的过渡。

应该指出, 由于只有 5 自由度, 任意两杆件的过渡位形只有一个。在树上或桁架中攀爬时, 由于环境复杂, 障碍很多, 要实现灵巧避碰穿梭攀爬, 应增加关节模块使机器人自由度达到 6 以上。

## 2 三种攀爬步态

根据其构型的特点, 机器人在攀爬时可以运用 3 种不同的步态, 即尺蠖模式、扭转模式和翻转模式。

第一种步态为尺蠖模式, 如图 3 所示。

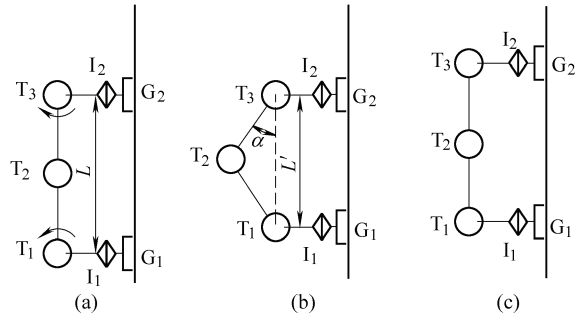


图3 尺蠖式攀爬步态

其攀爬步骤如下。

(1) 机器人位于初始位置, 夹持器  $G_1$  和  $G_2$  都为夹紧状态。 $G_1$  慢慢张开,  $G_2$  仍然保持夹紧, 独立支撑机器人(图 3a)。

(2) 摆动关节  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_3$  开始协调转动, 机器人躯体收缩。要求当  $T_1$  和  $T_3$  转过  $\alpha$  角时,  $T_2$  应转过  $2\alpha$  角(图 3a、3b)。

(3) 当摆动关节完成转动后, 夹持器  $G_1$  开始闭合直至夹紧杆件。然后  $G_2$  慢慢张开, 机器人由  $G_1$  单独支撑(图 3b, 机器人完成了换手支撑)。

(4) 摆动关节  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_3$  开始协调运动, 回到其初始角度, 最后  $G_2$  夹紧。此时机器人便完成了尺蠖运动的一个循环(图 3b、3c)。

机器人以尺蠖步态攀爬时, 一个运动循环移动

的距离为

$$\Delta L = L - L' = L - L \cos \alpha = L(1 - \cos \alpha) \quad (3)$$

摆转关节  $T_2$  的转动范围为  $-110^\circ \sim 110^\circ$ , 故有  $-110^\circ < 2\alpha < 110^\circ$ 。代入式(3)可得

$$0.57L < L' < L \quad (4)$$

从而

$$0 < \Delta L < 0.43L$$

显然这种步态的攀爬步距不大。攀爬中前后夹持器的顺序始终保持不变。

第二种步态为扭转模式, 如图4所示。

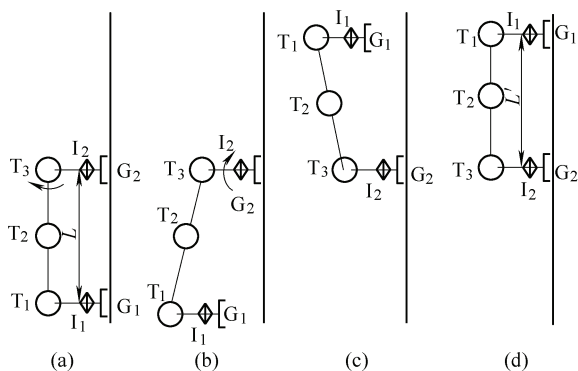


图4 扭转式攀爬步态

扭转过程如下。

(1) 机器人位于初始位置, 夹持器  $G_1$  和  $G_2$  都为夹紧状态。 $G_1$  慢慢张开,  $G_2$  仍然保持夹紧, 单独支撑机器人(图4a)。

(2) 关节  $T_3$  慢慢张开, 此时  $G_1$  向外移动, 完全离开杆件, 避免夹持器与杆件在机器人扭转时发生干涉(图4b)。

(3) 关节  $I_2$  转动  $180^\circ$ , 机器人整体扭转半周, 重新与杆件处于同一平面内(图4b、4c)。

(4) 关节  $T_3$  做逆向转动, 直到回到初始角度。最后  $G_1$  夹紧, 机器人便完成一个攀爬循环。其中,  $L'$  可通过摆动关节  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_3$  的角度进行调节。(图4d)。

机器人采用这种步态时, 一个攀爬循环的移动距离为

$$\Delta L = 0.5(L + L')$$

将式(4)代入得

$$0.78L < \Delta L < L$$

因此这种步态的攀爬步距较大。攀爬过程中夹持器的前后顺序交替变化。

第三种步态方式为翻转模式, 如图5所示。其步骤如下。

(1) 机器人位于初始位置, 夹持器  $G_1$  和  $G_2$  都为夹紧状态。 $G_1$  慢慢张开,  $G_2$  仍然保持夹紧, 单独支撑机器人(图5a)。

(2) 关节  $T_3$  转动  $180^\circ$ , 使机器人翻转(图5a、5b)。

(3) 关节  $T_1$  作  $180^\circ$  翻转, 使机器人回到初始形态。最后  $G_1$  夹紧, 机器人便完成翻转步态的一个攀爬循环(图5c)。

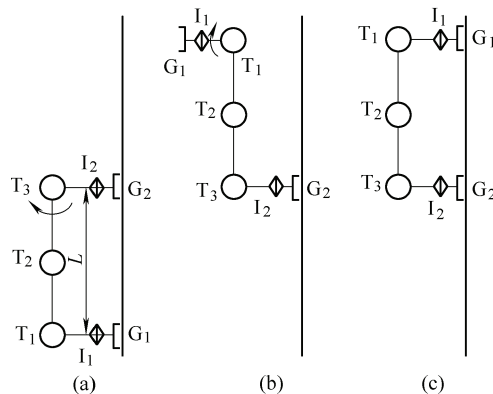


图5 翻转式攀爬步态

与扭转步态相似, 机器人采用这种步态时, 一次运动循环移动的距离为

$$0.78L < \Delta L < L$$

这种步态的攀爬步距与扭转步态的一样, 攀爬过程中夹持器的前后顺序也交替变化。

### 3 攀爬仿真与分析

从第2节看到, 在不同的攀爬步态中起主要作用的关节是不同的。这样机器人采用不同的步态攀爬时, 主要关节的转矩和机器人所消耗的能量会有所不同。下面对此作分析和比较。

在 ADAMS 环境下, 对机器人在不同方位杆件上以不同步态攀爬进行仿真。在仿真中作如下假设: ① 机器人夹持器总能够提供足够大的夹持力; ② 机器人自身的摩擦忽略不计。

为了使不同的攀爬步态有可比性, 机器人应该以这三种步态在相同时间内攀爬相同的高度。在仿真中设定机器人在 30 s 内爬升 0.78 m (一个  $L$  的长度)。这个距离正是采用扭转步态和翻转步态时伸展攀爬一个循环的最大步距。那么采用尺蠖步态时, 机器人应在以最大步距 0.33 m 完成两个攀爬循环, 每个循环的时间为 12.9 s。

图6为机器人攀爬仿真的一个场景。机器人在竖直杆上攀爬时部分关节的转矩和功率消耗曲线如图7~9所示。

在图7所示的尺蠖步态攀爬中看到关节转矩在 6.45 s 时刻有剧烈的突变。这是由于在这个时刻, 两个夹持器同时夹住杆件, 造成了机器人的过约



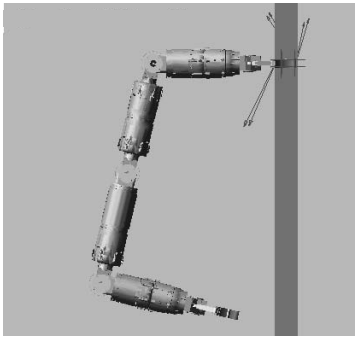


图 6 ADAMS 环境下机器人攀爬仿真

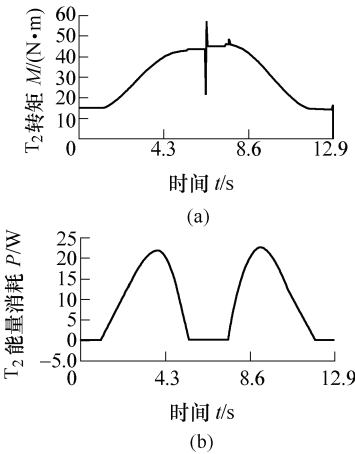


图 7 尺蠖步态中主要关节  $T_2$  的转矩和功率变化

束，从而使关节转矩值异常。同样的情况在图 9 中也可以看到。实际系统中，由于机器人自身拥有一定的弹性和柔顺性变形，将不会发生这种情况。

当被爬杆件的倾斜角度不同时，机器人进行攀爬时所需的关节转矩和消耗的能量都会有很大的区别。为了更全面地比较这三种步态，使机器人总能够在保证安全攀爬的前提下进行最低能耗的攀

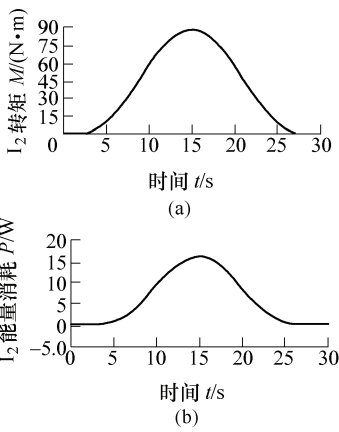


图 8 扭转步态中主要关节  $I_2$  的转矩和功率变化

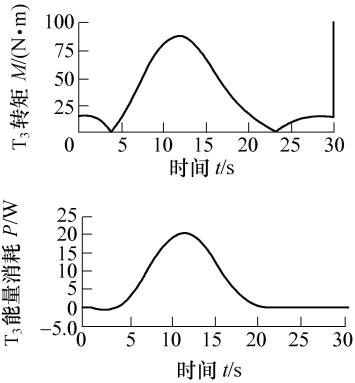


图 9 翻转步态中主要关节  $T_3$  的转矩和功率变化

爬，这里让机器人分别以这三种步态攀爬不同倾斜角的一系列杆件。以  $15^\circ$  为一间隔，将杆件从竖直状态到水平状态进行划分，而机器人的攀爬步距仍然为  $0.78\text{ m}$ ，攀爬时间也为  $30\text{ s}$ 。分别记录这七组试验中机器人在使用不同步态时所需的最大关节转矩和所消耗的能量，如下表所示。

表 以三种步态在不同方位杆上攀爬时主要关节的转矩和机器人的能耗

	尺蠖步态			扭转步态			翻转步态		
	转矩最大 关节	最大转矩 $M/(\text{N} \cdot \text{m})$	能量消耗 $P/\text{J}$	转矩最大 关节	最大转矩 $M/(\text{N} \cdot \text{m})$	能量消耗 $P/\text{J}$	转矩最大 关节	最大转矩 $M/(\text{N} \cdot \text{m})$	能量消耗 $P/\text{J}$
竖直杆	$T_2$	48.50	378.21	$I_2$	88.04	178.12	$T_3$	88.22	206.30
$75^\circ$ 倾斜	$T_2$	47.02	417.37	$I_2$	84.81	174.70	$T_3$	88.20	207.00
$60^\circ$ 倾斜	$T_3$	56.44	466.86	$I_2$	75.99	161.35	$T_3$	88.17	206.44
$45^\circ$ 倾斜	$T_3$	72.06	516.95	$T_3$	77.04	137.31	$T_3$	93.66	206.03
$30^\circ$ 倾斜	$T_3$	82.82	565.47	$T_3$	89.60	104.27	$T_3$	96.93	206.27
$15^\circ$ 倾斜	$T_3$	87.87	608.84	$T_3$	94.15	64.38	$T_3$	100.73	207.50
水平杆	$T_1$	91.77	614.60	$T_3$	97.50	20.90	$T_3$	101.60	209.80

首先，从表中可以看到 7 组试验中，机器人攀爬所需的最大关节转矩值为  $T_3$  的  $101.6\text{ N} \cdot \text{m}$  (翻转步态在水平杆上攀爬)，小于摆动关节(T 型)模块的最大输出转矩  $117\text{ N} \cdot \text{m}$ 。因此，理论上机器人是可以完成各种形式攀爬的。但是，仿真中并没有考虑关节模块内部的机械摩擦对机器人传动效率的影

响。考虑到关节模块都采用了二级齿轮传动，不妨先假设模块的传动效率为  $80\%$ ，则摆动关节的最大输出转矩降为约  $93.6\text{ N} \cdot \text{m}$ 。

若以此数值作为参考，从表中的数据看到，当杆的倾斜角度不小于  $60^\circ$  时，三种攀爬步态所需的最大关节转矩都未超过  $93\text{ N} \cdot \text{m}$ ，而扭转步态消耗

的能量最小,因此,最宜选用扭转步态进行此类杆的攀爬;当杆的倾斜角度在  $30^\circ \sim 60^\circ$  之间时,只有尺蠖步态和扭转步态能够满足转矩的要求,同样由于扭转步态所消耗的能量较少,是攀爬这种方位杆件的良好选择;当杆的倾斜角度小于  $30^\circ$  而接近水平时,只有尺蠖步态满足转矩的要求。

这样可以以杆的倾斜角度不同将被爬杆件粗略的分为以下三种情况:① 直立杆,即倾斜角度大于  $60^\circ$  的杆,以上三种步态都可采用进行攀爬,而以扭转攀爬步态最节省能量;② 倾斜杆,即倾斜角度在  $30^\circ \sim 60^\circ$  之间的杆,可以进行选用扭转步态和尺蠖步态,而以扭转步态为佳,以节省能量;③ 水平杆,倾斜角度小于  $30^\circ$  的杆,只宜采用尺蠖步态进行攀爬。若要选用其他两种步态,则机器人的本体不能伸直而必须收缩,以较小的步距进行攀爬,代价是攀爬时间增加,能耗增大。

## 4 结 论

面向农业、林业和建筑业等领域中的高空作业,具有攀爬功能的机器人应运而生。本文受动物攀爬的启发,提出一种多自由度仿生攀爬机器人,并对其可能的步态进行了系统的分析。

由 3 个摆转关节和 2 个回转关节依次串接而构成机器人本体,两端分别连接夹持器构建成两端对称首尾互置的攀爬机器人能满足杆上攀爬和圆柱状杆间过渡的需要。这种攀爬机器人可采用尺蠖步态、扭转步态或翻转步态在杆上进行攀爬移动。不同的步态具有不同的特点,攀爬同一杆件时最大关节转矩和所消耗的能量也不相同。本文的仿真结果表明,针对不同杆件方位应该选用不同的攀爬步态。这对攀爬规划和控制具有重要的指导意义,将用于目前着手进行的攀爬试验中。

## 参 考 文 献

- [1] ALMONACID M, SALTAREN R, ARACIL R, et al. Motion planning of a climbing parallel robot[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003, 19(3): 485-489.
- [2] BAGHANI A, AHMADABADI M, HARATI A. Kinematics modeling of a wheel-based pole climbing robot (UT-PCR)[C]// IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, April 18-22, 2005, Barcelona, Spain. New York: IEEE, 2005: 2 111-2 116.
- [3] AUTUMN K, BUEHLER M, CUTKOSKY M, et al. Robotics in sensorial environments[C]// Proc. of SPIE, Feb. 12-16, 2005, Santiago, California. New York: SPIE, 2005: 291-302.

- [4] YEOREUM Y, DANIELA R. Shady3D: A robot that climbs 3D trusses[C]// IEEE international conference on Robotics and Automation, April 10-14, 2007, Roma, Italy. New York: IEEE, 2007: 4 071-4 076.
- [5] 吴伟国, 徐峰琳. 空间桁架用双臂手移动机器人设计与仿真分析[J]. 机械设计与制造, 2007(3): 110-112. WU Weiguo, XU Fenglin. Design and simulation analysis of a dual arm & hands mobile robot used In space truss[J]. Machinery Design & Manufacture, 2007(3): 110-112.
- [6] WANG Wei, WANG Yingying, ZHANG Houxiang, et al. Analysis of the kinematics of module climbing caterpillar robots[C]// IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, July 2-5, 2008, Xi'an, China. New York: IEEE, 2008: 84-89.
- [7] 王洪光, 姜勇, 房立金, 等. 双足爬壁机器人壁面凹过渡步态规划研究[J]. 智能系统学报, 2007(4): 40-46. WANG Hongguang, JIANG Yong, FANG Lijin, et al. Gait planning of concave transitions between different slopes for bipedal wall-climbing robots[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2007(4): 40-46.
- [8] ÜNSAL C, KILIÇÇÖTE H, PRADEEP K K. A modular self-reconfigurable bipartite robotic system: Implementation and motion planning[J]. Autonomous Robots, 2001, 10(1): 23-40.
- [9] CASTANO A, BEHAR A, WILL P M. The Conro modules for reconfigurable robots[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2002, 7(4): 403-409.
- [10] GUAN Yisheng, JIANG Li, ZHANG Xianmin. Mechanical design and basic analysis of a modular robot with special climbing and manipulation functions[C]// IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Dec. 15-18, 2007, Sanya, China. New York: IEEE, 2007: 502-507.
- [11] GUAN Yisheng, JIANG Li, ZHANG Xianmin, et al. Development of novel robotic systems with modular methodology[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 10-15, 2009, St. Louis, USA. New York: IEEE, 2009: 2 385-2 390.
- [12] JOHN J C. Introduction to robotics—mechanics and control[M]. London: Pearson Prentice Hall, 2005.

作者简介: 江励, 男, 1984 年出生, 博士研究生。主要研究方向为仿生机器人。

E-mail: jl19841215@163.com

管贻生, 男, 1966 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为仿生机器人。

E-mail: ysguan@scut.edu.cn.

张宪民, 男, 1964 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为精密定位与精密操作。

E-mail: zhangxm@scut.edu.cn