

文章编号: 1002-0446(2008)02-0182-05

仿壁虎机器人足端工作空间分析及其实实现协调运动的步态规划

代良全^{1,2}, 张昊¹, 戴振东¹

(1 南京航空航天大学仿生结构与材料防护研究所, 江苏 南京 210016

2 南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 基于对壁虎爬行运动的研究, 提出一种四足仿壁虎爬壁机器人. 对其机械结构、运动学、足端工作空间和越障能力进行了分析, 规划了两种爬行步态, 并针对实验中出现的过驱动问题进行了分析, 设计了一种多关节协调控制算法. 实验结果表明, 使用该控制算法的机器人运动是协调稳定的, 验证了分析结果的正确性和控制算法的有效性.

关键词: 爬壁机器人; 仿壁虎机器人; 运动学; 步态

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A

Analysis on Feet Workspace of Gecko Robot and Gait Planning for Its Coordinated Motion

DAI Liang-quan^{1,2}, ZHANG Hao¹, DAI Zhen-dong¹

(1 Institute of Bio-inspired Structure and Surface Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2 College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract Based on the climbing motion of gecko, a quadrupedal gecko wall-climbing robot is introduced. Its mechanical structure, kinematics, feet workspace and obstacle-climbing capability are analyzed and two kinds of wall-climbing gaits are designed. The phenomenon of over-actuation is analyzed and an algorithm for multi-joint coordinated control is proposed to solve this problem. The experiment results show that locomotion of the robot using this control algorithm is coordinated and stable, and both the validity of the analysis results and the effectiveness of the control algorithm are verified.

Keywords wall-climbing robot; gecko robot; kinematics; gait

1 引言 (Introduction)

目前, 爬壁机器人所采用的移动方式主要有轮式、履带式 and 足式. 其中, 轮式移动机器人移动快速, 控制灵活; 履带式移动机器人对壁面适应性强, 着地面积大; 但轮式和履带式机器人越障能力弱, 不能充分实现运动的灵活性. 自然界的许多动物能够在三维空间无障碍地运动, 这是因为这些陆上动物为适应复杂多变的生存环境, 选择了连杆作为运动机构. 受此启发, 可以通过研究、模仿来复制和再造某些生物特征和功能, 研制采用连杆运动机构和足式移动方式的机器人. 这类足式机器人具有轮式和履带式机器人所没有的优点^[1]. 足式移动方式的机器人可以相对容易地跨过较大的障碍 (如沟、坎等), 并且它的足具有大

量的自由度, 使机器人运动更加灵活, 对凹凸不平的地形适应能力更强. 足式机器人的立足点是离散的, 与壁面接触的面积小, 可以在可达范围内选择最优支撑点. 在所行走表面极度不规则的情况下, 机器人通过严格选择足的支撑点也能够行走自如. 足式机器人结构多样、运动灵活, 适应于各种形状壁面, 而且能够跨越障碍物, 采用足式结构的爬壁机器人有着较好的应用前景^[2].

壁虎是一种可在地面、陡壁、天花板等不同法向面上自由灵活运动的四足动物. 壁虎的吸附原理和移动方式为突破传统爬壁机器人的限制提供了新的思路, 因而仿壁虎爬壁机器人成为一个新的研究方向^[3]. 仿壁虎足式机器人有着很强的运动灵活性, 同时对行走地面要求低, 有着广阔的发展前景^[4].

但是在仿壁虎足式机器人研制过程中发现: 在腿机构的摆动相, 运动系统为开环机构, 机构的自由度多; 而当腿处于支撑相时, 机器人脚掌在目标体上形成稳定的连接, 机构演变为闭环机构, 自由度少, 机构处于过约束状态, 即机器人在工作过程中, 脚掌约束情况的变化使机器人机构的约束状况也发生非连续变化. 这就对机器人的步态规划、驱动及控制提出了更高的要求^[1]. 本文以壁虎 (gecko) 为原型, 研制了一种能够在三维空间内自由运动的机器人, 分析了机器人的非连续约束机构的运动机构设计、驱动与控制问题.

2 机器人机构设计 (Design of the robot mechanism)

通过对壁虎身体结构和运动规律的长期研究^[5], 我们研制了一种四足仿壁虎机器人, 如图 1 所示. 该机器人采用四足正向对称布置方式, 腿的主平面与前进方向垂直, 腿部采用串联式旋转关节结构, 每个腿具有三个转动自由度. 采用这种腿部关节布局, 机器人的重心低, 在做爬壁运动时翻转力矩小, 更有利于爬壁. 以图中的左前腿为例, 共有三个电机驱动腿部运动. 其中, 1 号和 3 号电机主要负责完成脚掌在平面内的运动, 实现脚掌在较大的区域范围内的定位; 2 号电机负责完成手臂在垂直平面的旋转运动, 实现抬腿和放腿动作. 1 号电机和 2 号电机等效于一个两自由度的铰链, 对应于壁虎身体 (body) 与股节 (femur) 间的关节 J_{BF} , 3 号电机对应于壁虎股节 (femur) 和胫节 (tibia) 间的关节 J_{FT} . 电机内部集成了多级减速机构, 其输出轴的转速和扭矩不经过减速就能够满足机器人的驱动要求, 因此所有的电机可以直接驱动关节运动, 不需要进行换向和减速. 由此, 大大简化了机器人的结构, 减小了机器人的体积和重量, 提高了运动精度和可靠性, 同时也增大了各个关节的运动范围.

3 运动学分析 (Kinematics analysis)

$${}^0_7T = {}^0_1T_1 {}^1_2T_2 {}^2_3T_3 {}^3_7T_7$$

$$= \begin{bmatrix} -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 & L_1 \\ -\cos\alpha & -\sin\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin\beta & -\cos\beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin\gamma & -\cos\gamma & 0 & L_T \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \cos\gamma & -\cos\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_T \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

上述的位姿变换矩阵表示了末端执行件 (脚掌) 的位姿和关节转角之间的关系, 在进行运动学分析时, 还需要建立操作臂的速度和关节旋转速度之间的

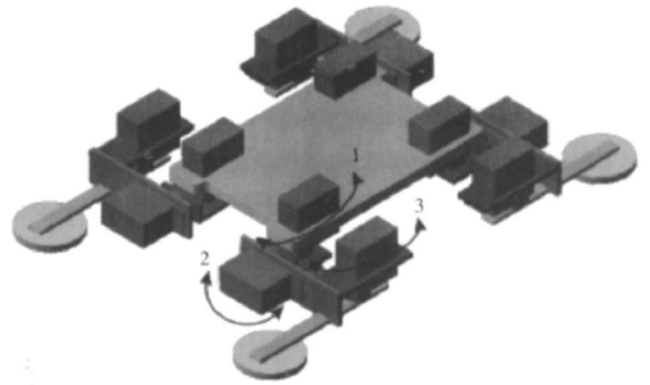


图 1 机器人机构布局示意图

Fig 1 The sketch map of the robot mechanism

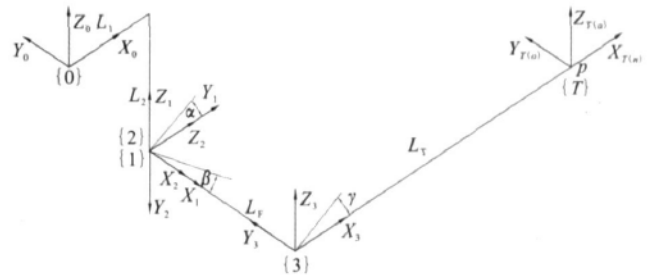


图 2 右前腿坐标系

Fig 2 The coordinate system of the right front leg

以机器人的右前腿为例, 它相当于一个三自由度的机械臂, 每个关节都是一个转动副. 在腿的摆动相, 腿部运动系统为开环机构. 以足根部为基础坐标系, 其中, X_0OY_0 平面与机身平行, X_0 轴方向为机器人前进方向, Z_0 轴方向与机身垂直. 利用 Denavit 和 Hartenberg 提出的 DH 方法建立如图 2 所示的坐标系^[6].

设 1 号电机、2 号电机和 3 号电机的转角分别为 α 、 β 、 γ 足跟部到第一个关节处的距离为 L_1 , 连杆 1、连杆 2 和连杆 3 的长度分别是 L_1 、 L_2 和 L_T .

定义末端的执行件 (脚掌) 的位姿为 $\{n, a, a, p\}$, 其中足端点 P 在基础坐标系中的位置为 ${}^0P = [P_x, P_y, P_z]^T$. 则末端的执行件 (脚掌) 坐标系 $\{T\}$ 相对于基坐标系 $\{0\}$ 的变换矩阵为

关系, 这就是操作臂的雅可比矩阵.

操作臂的雅可比矩阵定义为其操作速度与关节速度的线性变换, 可以看作是从关节空间向操作臂空

间运动速度的传动比^[7]. 本文研究机器人足端点在基础坐标系 {0} 下的线速度 P^* .

$$P^* = J(\theta)\dot{\theta}$$

其中 $\dot{\theta}$ 为关节的操作速度, $J(\theta)$ 为足端点在基础坐标系下的雅可比矩阵. 对于本文介绍的爬壁机器人的三自由度手臂, $J(\theta)$ 为一个 3×3 的偏导数矩阵^[7,8].

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_x}{\partial \alpha} & \frac{\partial P_x}{\partial \beta} & \frac{\partial P_x}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial P_y}{\partial \alpha} & \frac{\partial P_y}{\partial \beta} & \frac{\partial P_y}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial P_z}{\partial \alpha} & \frac{\partial P_z}{\partial \beta} & \frac{\partial P_z}{\partial \gamma} \end{bmatrix} \quad (2)$$

4 工作空间和越障能力分析 (Analysis on workspace and obstacle-climbing ability)

机器人足端的工作空间是指机器人在结构限制下足末端参考点能达到的空间点的集合. 工作空间可分为可达工作空间和灵活工作空间两种. 可达工作空间是指末端执行件至少能以一个方位到达的目标点的集合, 灵活工作空间是指末端执行件可以任意姿态达到的点构成的集合. 机器人工作空间是设计机器人的重要指标之一, 也是使用和控制机器人的主要依据. 机器人工作空间的大小代表了机器人的活动范围, 它是衡量机器人工作能力的一个重要的运动学指标^[9,10].

刘成良等人分析了不同臂部构型的三自由度机器人工作空间特征^[11]. 我们研制的仿壁虎机器人的三个关节的臂部构型为关节 1 与关节 2 垂直相交、关节 2 与关节 3 交叉垂直, 即文 [11] 中论述的 $R_1 \perp R_2 \times R_3$ 型, 其工作空间形状为球体型. 三个关节的运动范围分别是 $-55^\circ \sim 43^\circ$ 、 $-90^\circ \sim 60^\circ$ 和 $-38^\circ \sim 90^\circ$. 图 3 为机器人工作空间示意图.

在图 2 所示的坐标系中, 与越障能力相关的主要是足端脚掌在 X 向和 Z 向的运动范围. 其中, X 方向范围为 $8 \text{ mm} \sim 92 \text{ mm}$, Z 方向的运动范围为 $-45 \text{ mm} \sim 68 \text{ mm}$. 可见, 机器人能够跨越宽度为 84 mm 的沟, 能够翻越高度为 68 mm 的障碍物, 能够在最大凹坑深度为 45 mm 的不平地面行走.

5 过驱动条件下的步态规划 (Gait design under overactuation condition)

步态是指步行机器人的迈步方式, 是步行机器人各腿协调运行的规律, 即各腿的抬腿和放腿顺序. 它是研究步行机构的一个很重要的参数. 对于多足器

人, 其步态规划是多足机器人运动控制的重要内容, 是国内外学者研究的重点.

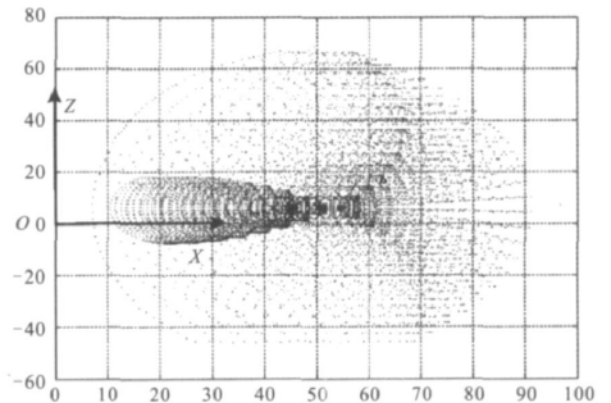
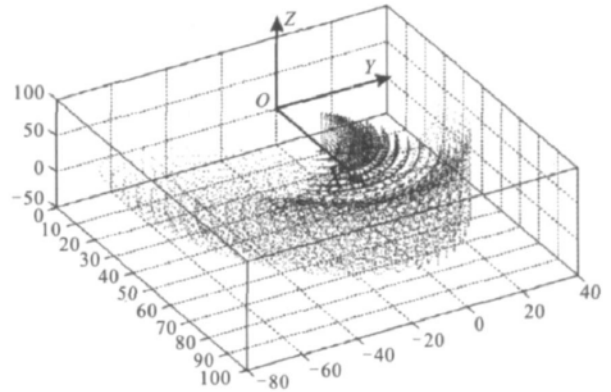


图 3 单足工作空间示意图

Fig 3 Sketch map of a single leg's workspace

McGhee 首先给出了描述和分析步态的数学定义^[12]; Preumont 对六足步行机器人做了实验平坦地面和凹坑地面的步态研究^[13]; 国内的沈阳自动化研究所研制的 LR-1 型六足步行机器人实现了全方位步行; 陈学东等人分析得出机器人在路面上实现全方位爬行的条件是在不平的路面上机器人机体能够保持与支撑站立脚的表面平行^[14]; 戴振东等人针对足式机器人运动学模型提出了非连续约束的变结构运动机构的概念^[1], 并借鉴生物脊椎—外周运动神经系统对运动的控制策略提出了针对这类机器人的运动控制和驱动策略.

5.1 基本步态规划

四足机器人常见步态有对角小跑步态、三角步态等. 通过研究壁虎运动发现, 壁虎在墙壁和天花板上爬行时贴壁脚数量要多于在地面爬行. 受此启发, 为了保证仿壁虎机器人有足够的吸附力在墙面爬行, 我们设计了一种任意时刻至少有三只脚掌着地的周期性三角步态, 见图 4 在一个周期内, 机器人前进两次, 第一步: 移动右前脚; 第二步: 同时移动左后腿; 第三步: 通过左前腿和右后腿驱动身体完成第一次前

进; 第四步: 移动右后腿; 第五步: 通过左前腿和右后腿驱动身体第二次前进, 同时左后腿也辅助推动身体前进.

为了验证步态的有效性和优化物理样机设计方案, 我们首先在 MSC Adams 环境中进行了步态仿真. 图 5 所示为仿壁虎机器人重心在前进方向上的位移. 机器人在 16 s 中前进了三次, 一共前进了 38 mm, 速度为 2.38 mm/s. 仿真结果初步验证了该步态的可行性.

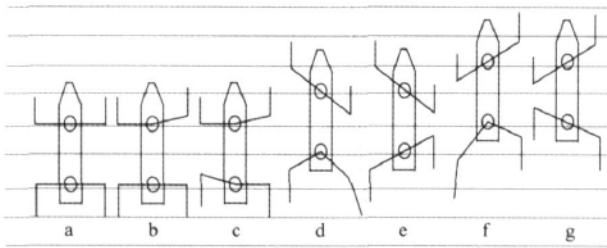


图 4 墙面爬行的三角步态

Fig 4 Tripod gait for wall climbing

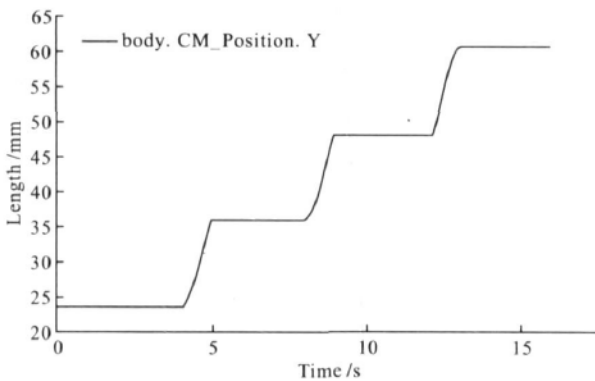


图 5 仿壁虎机器人重心在前进方向的位移

Fig 5 The displacement of the gecko robot's barycentre in the direction of forward motion

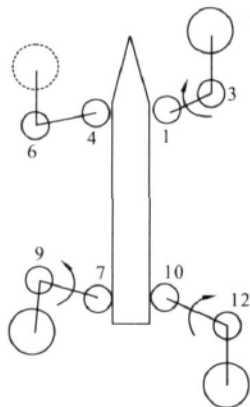


图 6 机器人运动时的闭环机构

Fig 6 The close loop mechanism of the robot in motion

5.2 过驱动条件下的步态设计

在物理样机的实验过程中, 我们发现机器人运动时存在着过驱动现象. 当三个脚掌同时着地并一起驱动机器人身体向前运动时, 处于支撑相的脚掌在地面上会有滑动现象. 通过观察和分析, 发现机器人在行走时, 处于支撑相的足与地面构成一个具有冗余自由度的空间多环并联机构^[15]. 当机器人爬行时, 假定处于支撑相的机器人脚掌与地面之间无滑动, 同时假定脚掌和小腿连杆之间的关节为球关节, 如图 6 所示. 则由三维空间内刚体自由度 $F = \lambda(n - j + 1) + \mathcal{G}^i$ ^[16] 得到机器人身体的自由度数为 6 而此时有 3 个脚掌处于支撑相, 共有 9 个电机驱动机器人运动, 整个机器人系统处于过驱动状态. 机器人在运动时的过驱动状态不仅会使脚掌吸附性能急剧下降, 而且会大大降低驱动效率, 损坏电机和机器人机构.

为了解决机器人运动过程中的过驱动问题, 我们提出了两种解决办法:

(1) 当有三只腿处于支撑相并同时驱动机器人运动时, 解除其中 3 个关节的自由度, 即让 3 个关节处于随动状态;

(2) 根据机器人运动学方程, 结合前面提出的三角步态, 先给定机器人本体的运动规律, 然后使用逆解方法解算出每个关节的实时角度, 并转换成每个电机的控制信号来驱动电机运动.

该机器人上使用的驱动电机内部使用了多级减速机构, 而且无法切断动力输出, 因此不容易实现第一种使关节随动的解决办法, 所以我们采用了第二种解决办法. 对于本文研究的爬壁机器人, 每个机器人手臂的运动学方程如式 (1) 所示. 在每个存在过驱动的运动过程中, 首先进行步态规划得到机器人足端运动轨迹, 然后利用机器人运动学方程的逆解, 由足端运动轨迹反解计算关节转角, 以此对电机进行控制. 通过实验发现, 采用了这种协调步态后, 机器人运动的平稳性大大提高, 解决了脚掌在地面的滑动问题.

6 实验研究 (Experimental investigation)

仿壁虎机器人物理样机如图 7 所示. 通过对物理样机进行实验, 验证了我们的研究达到了预期目标. 该机器人能够在 75° 的斜面上实现前进、后退、横向、左右转弯等动作, 前进时最大运动速度约为 7 m/min.

在实验过程中发现, 该爬壁机器人仍然存在一些问题, 如不能在 90° 垂直墙面上爬行, 脚掌吸附和脱附动作不稳定, 影响机器人在墙面运动的稳定性. 其

主要原因是脚掌材料吸附力不够大,脚掌不能实现主动的吸附和脱附。

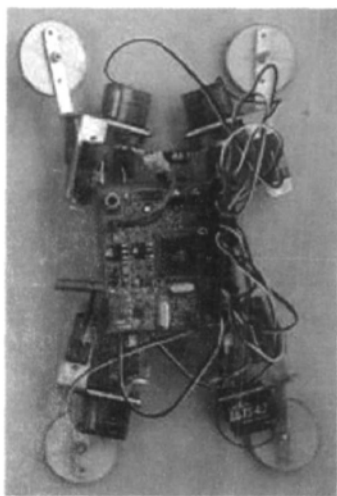


图 7 实验中的仿壁虎机器人

Fig 7 The gecko robot in experiment

7 结论 (Conclusion)

(1)仿壁虎爬壁机器人机构是一个非连续约束的变结构机构,单个摆动相足可以看作是一个 3自由度的串联操作臂,而 3个支撑相足、身体和地面构成一个具有冗余自由度的空间多环并联机构;

(2)三角步态保证了仿壁虎爬壁机器人在运动过程中有足够的吸附力在墙面自由运动;

(3)仿壁虎爬壁机器人在运动过程中存在过驱动问题,需要解除一些关节自由度或者采用多关节协调控制。

参考文献 (References)

- [1] 戴振东,张昊,张明,等. 非连续约束变结构机器人运动机构的仿生:概念及模型[J]. 科学通报, 2007, 52(2): 236- 239
- [2] 杨明,王硕,王德石. 仿生机器人运动建模与控制研究进展[J]. 海军工程大学学报, 2005, 17(1): 1- 6, 27.

- [3] 王田苗,孟德,裴葆青,等. 仿壁虎机器人研究综述[J]. 机器人, 2007, 29(3): 290- 297
- [4] 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
- [5] 刘晓燕,戴振东,曾小龙,等. 大壁虎附肢肌的定量研究[J]. 解剖学研究, 2005, 27(4): 292- 294, 301
- [6] 熊有伦,唐立新,刘恩沧,等. 机器人技术基础[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 1996
- [7] 蔡自兴. 机器人学[M]. 北京:清华大学出版社, 2000
- [8] 王立权,孙磊,陈东良,等. 仿生机器蟹样机研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2005, 26(5): 591- 595
- [9] Gosselin C M, Perreault L, Vaillancourt C. Simulation and computer-aided kinematic design of three-degree-of-freedom spherical parallel manipulators[J]. Journal of Robotic Systems, 1995, 12(12): 857- 869.
- [10] Gosselin C M, Hamel J F. Agile eye: A high-performance three-degree-of-freedom camera-orienting device[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 1994, 781- 786
- [11] 刘成良,张凯,付庄,等. 基于计算机图形学的机器人臂部构型分析及工作空间仿真研究[J]. 机电工程, 2002, 19(3): 44- 48
- [12] McGehee R B. Some finite state aspects of legged locomotion[J]. Mathematical Biosciences, 1968, 2(1- 2): 67- 84
- [13] Prémont A, Alexandre P, Ghys D. Gait analysis and implementation of a six leg walking machine[J]. European Journal of Mechanical Engineering, 1991, 36(2): 91- 94
- [14] 陈学东,郭鸿勋,渡边桂吾. 四足机器人爬行步态的正运动学分析[J]. 机械工程学报, 2003, 39(2): 8- 12
- [15] Wang L Q, Qu X R, Meng Q X, et al. Motor driving leg design for bionic crab-like robot[J]. Journal of Marine Science and Application, 2002, 1(2): 72- 77.
- [16] Tsai L W. Kinematics of a three-dof platform with three extensible limbs[EB/OL]. http://citeseer.ist.psu.edu/cache/papers/cs/3707/http%3A%3Awww.isr.umd.edu%3FechRports%3ES-R%31997%3FR_97-68%3FR_97-68.pdf/tsa07kinematics.pdf

作者简介:

代良全 (1984-), 男, 硕士生. 研究领域: 仿生机器人.

张昊 (1975-), 男, 博士生, 讲师. 研究领域: 仿生机器人.

戴振东 (1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 研究领域: 仿生学, 摩擦学.