科学通报 2008 年 第 53 卷 第 6 期: 618 ~ 622
评 述
《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

非连续约束变结构杆机构机器人：运动与控制的若干仿生基础问题

戴振东

南京航空航天大学仿生结构与材料防护研究所, 南京 210016
E-mail: zddai@nuaa.edu.cn

2007-08-16 收稿, 2007-12-04 接受
国家自然科学基金重点项目(批准号: 60535020, 50635030)、国家高技术研究发展计划(编号: 2007AA04Z201)、国家自然科学基金(批准号: 50675160)、江苏省六大高峰人才计划(编号: 06-D-027)、教育部博士点基金(编号: 2004-0287020)资助项目

摘要 在非连续约束变结构机器人运动机构的仿生概念及模型研究基础上, 系统分析这类机器人的机构学、冗余驱动下的运动协调、非连续接触引发的动力学、机器人脚及地面反力、爬壁杆机构机器人黏附性脚掌的设计及相关微制造和相关步态规划与控制策略的研究现状和存在的主要问题, 提出未来发展的建议.

关键词
杆机构机器人
运动协调
地面反力
机器人机构
步态规划
机器人控制策略

车轮是现代运动系统最常见的部件, 是人类最伟大的发明之一. 但轮式运动系统必须有对应的道路才能工作. 而在外星探险、灾难搜救等场合, 在需要灵活、大机动的军用移动系统, 轮式车辆的运动制约较大. 这时地面适应性好、越障能力强、运动方式多(走、跑、跳等)和运动鲁棒性好的杆机构运动系统(杆机构机器人), 就成为军用、搜救和外空探测等领域机器人的首选运动机构.

杆机构机器人在机构设计和分析、驱动和控制等方面较轮式运输系统复杂得多, 而现代非结构环境下的机器人在运动平稳性、灵活性、健壮性、环境适应性及能源利用效率等方面远远落后于动物[1]. 杆机构机器人进一步发展面临的基础科学问题, 包括杆运动机构机器人的机构学、杆机构冗余驱动下的运动协调、非连续接触引发的接触冲击、做爬壁杆机构机器人黏附性脚掌的设计及相关微制造和冗余驱动器、非线性约束、接触冲击和变结构机构等条件下的步态规划、控制策略等问题, 需要开展深入系统的研究. 幸运的是, 经过 35 亿年的演化进化, 大多数陆上多足动物都选择了杆机构作为其运动机构, 这些动物是如何解决上述问题的? 哪些能够为我们模仿? 或者给我们以启迪?

本文将从运动机构、运动协调、接触冲击及动力学、缓冲与脚掌设计、黏附脚掌及微制造技术、运动规划和控制策略几个方面讨论提升杆机构机器人运动能力的仿生学问题.

1 杆机构机器人的机构学

在研制杆式仿壁虎机器人过程中, 我们曾为黏附接触态的足经常发生的脱附分离而困惑, 后来领悟到该机构在工作中却存在着非连续的约束、开环-闭环的转变、变几何参数的结构和冲击载荷[2]. 具体而言, 在腿机构的摆动相, 运动系统为开环机构, 机构的自由度数多, 为实现对运动的控制, 需要有与自由度同样数量的原动件. 而当腿处于支撑相时, 机器人脚掌在目标体上形成稳定的接触, 机构演变为闭环机构, 由此带来常规机构所没有的新问题: (ⅰ) 机构的自由度大幅度降低, 若原动件数量不变, 则机构处于过约束状态; (ⅱ) 由于机器人的运动, 使闭环机构中“机架”的尺寸成为变值. 这种从摆动相到支撑

相、因脚掌约束情况的变化和机构构件长度变化而引起的变结构和变约束的机构，我们称为非连续约束变结构机构.

这些机构学相关的命题中，变结构机构已经有了一些研究，其他问题在传统的机构学中很少研究. 1997 年起 Dai 等人[3~5]在研究折叠纸盒和手工艺品的过程中提出了变结构机构的概念，并定义为变胞机构，即变自由度或变构件数目的机构，这类研究改变了传统的机构学概念、设计和分析方法. 金国光等人[6]在变胞机构分类和构态研究的基础上，分析了这类机构的一般解析和仿真问题[7]. 杨廷力[8]系统研究了机器人机构拓扑结构的变化规律. 上述工作中有关变胞机构的研究是最具特色的[5]. 该机构组成的机器人运动机构是少自由度并联机构[9,10]. 作者引入非连续约束的概念，讨论了这类机构与变胞机构的关联性，初步给出了描述约束、开-闭环条件下的运动方程[2].

这类机构学问题的研究既是杆式机器人发展需要，也是认识并理解动物运动规律的需要. 建立包含变结构、变自由度和冲击载荷分析功能的机构分析和仿真系统，开展相关的研究是杆机构机器人机构学未来发展的主要内容之一.

2 杆机构冗余驱动下的运动协调

目前杆机构机器人中开展研究最多的是仿人机器人，日本、韩国和我国北京理工大学为代表的样机已经能够完成跳日本舞、弹钢琴、表演中国武术等高难度的动作，但效率低，靠移动电源的工作时间多在 30 min 左右，不能满足实际需求，提高效率是杆机构机器人未来发展的主要瓶颈之一[11]. Collins 等人[11]采用随动方法，使构件的自重成为驱动力，将双足机器人(杆机构仿人机器人)的效率提高到与人的效率相近. 我们在仿壁虎机器人研制中发现，若关节的驱动不能很好协调，就会发生运动干涉，浪费能源，且造成驱动足与接触面的分离，使爬壁机器人脚不能产生足够的黏附力. 具体而言，四足杆机构机器人处于支撑相的各个杆机构的初位置往往是不同的，但要求其与身体联接部位有同样的速度，多足杆机构机器人的这一要求，使问题更复杂. 由此感悟到实现支撑相杆式运动机构的运动协调是提高效率的关键. 实现运动协调的方法可以分为主动协调和从动协调两种.

杆机构的从动协调机构还未见研究报道，但轮式系统的运动协调有很好的成功范例. 汽车后桥的差动行星齿轮组是典型的从动协调系统. 汽车转向时，由行星齿轮组成的差动轮系自动补偿汽车转向对车轮速度差，保证车轮和地面间不发生滑动. 该机构对提高汽车的机动性、稳定性、转向时的运动协调起到了关键的作用. 杆运动系统若能发明类似的机构将是一次革命性的变革.

杆机构的主动运动协调研究也未见报道. 但 Chen 等人[12]对具有复杂拓扑和冗余驱动的四足机器人的运动学问题的研究，指出运动学逆问题和正问题是实时精确控制的基础，提出了直线运动和原地转向条件下的步态和控制算法[13]，使该问题的解决有了一定的基础. 同时大自然也给了我们丰富的启示.

在 35 亿年的演化和生存竞争中，大多数陆地动物均选择在复杂环境下具有明显优势的杆式运动机构组成运动系统. 从人[14]及壁虎[15]的解剖可知，动物运动系统肌肉对关节的驱动是高度的冗余的. 动物实现运动协调的机制对机器人冗余驱动下的运动协调具有直接的启示意义. 神经生物学对人运动神经系统及其协调和控制机理做了很好的研究[16]，其中曲肌和伸肌间的自动协调对提高系统的效率并保持系统的刚性具有非常重要的意义. 蝾螈运动中腿驱动肌的肌电和步态的测定[17]表明并非所有的腿部肌肉均处于力输出状态，这提示杆机构运动中部分杆件处于随动适应性状态(passive adaptation). 同步开展运动行为、运动神经电生理和中枢控制模式(CPG)控制网络的研究将是深入揭示动物运动协调规律的重要途径，此外我们最近开展的壁虎自由运动条件下，脚运动地面反力的测试结果(尚未发表)表明，地面反力的数据能够从运动力学角度为认识动物的运动协调提供启示.

建立基于动物杆式机构的中枢控制模式(CPG)的杆式运动机构机器人的运动控制方法，发展对应的控制技术和器件对未来提高机器人的运动能力具有重要意义. 但考虑到机械系统的驱动方式与动物系统的差异，如何将神经生物学对动物运动规律的研究成果与杆式运动机构机器人的控制设计融合起来还需要开展大量的研究.

3 非连续接触引发的动力学-接触冲击

车轮和道路是连续接触，理论上道路是车轮在

接触点的切面，因此轮式运动系统没有接触冲击问题，而杆式运动机构的足与地面接触时存在非连续(阶跃式)的冲击力研究表明，这种力冲击往往造成机器人驱动电机或者传动齿轮的损坏、引起机器人运动的不稳定，甚至跌倒(对仿人机器人)．杆式运动机构的接触力冲击问题已经成为国内外这类机器人研究广泛关注的问题．

尽管国内外对机器人的运动学与动力学[18,19]、步态及运动稳定性[20~22]、过驱动和欠驱动问题[23]等方面已经做了大量的工作．Full 等人[24]研究了蟑螂腿的刚度，并以此为基础设计研制了具有动力学类比特性的机器人，该机器人具有很好的越障能力．但对具有非连续约束变结构运动机构的机器人缺乏研究，建立包涵变自由度、冗余驱动和非连续约束功能的机构运动和独立性能的分析方法和计算技术是杆机构机器人研究走向成熟所必须研究的关键问题之一．

自然界中多数陆上动物进化出了杆机构运动系统(腿足结构)，目前情况下，动物的运动能力、速度和地面冲击反力远高于机器人，但动物的地面反力的数值及其相互关系目前缺乏了解．动物如何降低接触冲击？我们对蝗虫脚掌接触过程的有限元分析，表明几何结构和材料性能的优化，能大幅度降低冲击，提高黏附接触的稳定性，该结果为低刚度、高接触面积的脚掌设计提供了很好的启示[25,26]．同时我们对壁虎脚掌结构和运动形态的研究，也为开展的仿壁虎机器人脚掌的结构设计，对环境感知感受器的性能要求，提供了很好的启迪．

4 杆机构机器人脚及其地面反力反馈

杆机构为机器人适应复杂多变的环境提供了可能，但要做到这一点，还必须使机器人具有良好的脚结构和对接触状态的感知能力．脚结构主要通过脚的机械设计来实现和保证，接触感知则依赖于足底反力的测定．

机器人脚掌设计在仿人机器人中受到特别的重视．日本在该领域处于领先地位，本田公司以此为背景获得了大量仿人机器人脚的专利，内容涉及到脚的机构和脚的结构设计、地面状态感知和运动姿态控制等[27~31]．如一种用于两脚行走机器人的脚结构设计，采用硬软组合的材料布置，使对力的承受具有各向异性，从而降低脚着地时的冲击力，并保持机器人的稳定性[32]．Takenishi 等人[33]设计了仿人机器人用多触点脚，有助于提高机器人的静力学稳定性．Yang 等人[34]设计的带弹簧的齿轮驱动结构，能够降低齿轮系冲击载荷．韩国 Hong 和 Lee 研制的关节步行机器人的脚[35]，由前脚趾头和后脚趾头组成，能够使机器人步行更加稳定，还可以吸收接触过程的冲击载荷，对提高脚机构适应性有很好作用．国内马培荪团队设计了一种浮动支撑的四足机器人的脚结构[36]．郑世杰提供了一种基于欠驱动机构的机器人转向设计方案[37]．

足底反力测试方面，冯萍等人[38]研究了基于电荷传感器的足底反力测试装置．孙荣等人[39,40]将地面反作用力测量模块和机器人足部结构很好地融合了起来．吴仲城等人[41]研制了具有六维力学量感知能力的仿人机器人脚掌．足底反力的测试为力反馈控制奠定了基础．

降低杆式机器人脚掌接触地面时的冲击力是这类机器人脚结构设计的重要环节．为解决仿人机器人的运动感知和运动稳定性问题，机器人脚的几何设计、感知和控制得到了广泛重视．动物脚[24,25]和腿[24]的设计均具有降低接触冲击的功能．驱动系(腿)的刚度设计及脚掌的精细设计和控制将是未来杆机构机器人进一步发展需要特别关注的领域．

5 爬壁杆机构机器人黏附性脚掌的设计及相关微制造

作为杆机构机器人的一个特例，三维空间无障碍运动(TDOF)机器人脚的设计和研制显得更加重要，黏附脚掌始终是 TDOF 机器人的关键技术之一．能够在非磁、非光滑表明上自如运动的机器人依赖于高适应性黏附脚掌的研制，已经成为国内外近年来特种机器人仿生领域研究的热点．研究集中在靠刚毛实现黏附的动物脚掌的黏附机制[42,43]、仿生脚掌的材料及其黏附性能研究[44,45]、仿壁虎刚毛阵列的微制造[46,47]和仿生机器人的研制[48]等方面．目前仿生刚毛阵列的微制造方法主要有光刻法、微模具法和化学腐蚀法．刚毛材料集中在聚氨酯、聚酰亚氨、碳纳米管等．刚毛直径已经可以达到 500 nm，并能够实现分级的设计．这方面美国 NSF 将相关研究作为 2006 年度的代表性研究成果[49]．但目前还没有获得适合于工业化生产的仿壁虎刚毛群的微制造技术．且研制的刚毛群刚毛密度较低，同时存在刚毛间相互黏连问题．提高刚毛密度、并防止相互的黏连是迫切需

要解决的问题. 揭示壁虎等队伍的刚毛群为什么不发生黏连, 将对解决上述问题提供启示.

根据对壁虎运动的详细观测发现, 脚掌的自如“ 内抓 ”和“ 外展 ”运动对壁虎脚趾的黏着是非常重要. 而仿生脚掌在其运动仿生方面, Stanford 大学设计了采用电机驱动的绳机构, 实现了脚爪的内抓运动, 外展依靠材料的弹性实现, 初步测试证明了设计的有效性. 发展结构-功能一体化的脚掌是未来发生脚爪研制的重要内容.

6 步态规划与控制策略

控制是多足机器人研制的关键环节, 对此国内外已经开展了大量的研究[50,51]. 鉴于多足多自由度杆-足式机器人运动控制的复杂性和步态的多变性, 近年来基于仿生理念, 以 CPG 为基础的机器人控制技术得到了更多的关注[52,53]; 生物学家分析了动物的运动控制系统的组成, 即涉及中枢神经系统、感受器及骨骼-肌肉执行系统. 这里中枢神经系统的 CPG 作为中心控制单元产生节律信号, 整合感受信号控制效应器运动. 工程师设计研制了包括 CPG 控制单元, 伺服电机驱动、具有主动关节位置和速度检测、躯体姿态检测、足部障碍检测的机器人系统. 马培荪等人[54](1997 年)采用模糊神经网络方法实现四足步行机器人控制. 郑浩峻等人[55]采用中枢神经控制方法做了相当的研究. 孙立宁等人[56](2005 年)以控制结构的开放性为重点, 将非线性力矩控制算法直接嵌入到底层电机控制中; TDOF 动物及其仿生机器人要求对脚底的接触状态具有更加精细和快速的感知和控制, 但未见 TDOF 动物 CPG 运动控制模式的研究, 基于该类动物 CPG 的机器人控制系统的研究还有待于探索. 这些问题的成功解决有赖于对动物运动神经网络、运动神经信息等动物运动规划的揭示.

参考文献

1 Dickinson M H, Farley C T, Full R J, et al. How animals move: An integrative view. Science, 2000, 288 (7): 100—106[DOI]

2 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. 科学通报, 2007, 52(1): 1—4

3 Dai J S, Rees J J. Mobility in metamorphic mechanism of foldable/erectable kinds. Trans ASME: J Mech Design, 1999, 121(3): 375—382[DOI]

4 戴建生, 丁希仑, 邹慧君. 变胞原理和变胞机构类型. 机械工程学报, 2005, 41(6): 7—12

5 李端玲, 戴建生, 张启先, 等. 基于构态变换的变胞机构结构综合. 机械工程学报, 2002, 38(7): 12—16

6 金国光, 高峰, 丁希仑. 变胞机构的分类及其构态分析. 机械科学与技术, 2005, 24(7): 764—767

7 金国光, 丁希仑, 张启先. 变胞机构全构态动力学模型及其数值仿真研究. 航空学报, 2004, 25(4): 401—405

8 杨廷力. 机器人机构拓扑结构学. 北京: 机械工业出版社, 2004. 1—48

9 黄真, 李秦川. 少自由度并联机器人机构的型综合原理. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2003, 33(9): 813—819

10 So B R, Yi B J, Kim W, et al. Design of a redundantly actuated leg mechanism. In: Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Taipei, 2003. 4348—4353

11 Collins S, Ruina A, Tedrake R, et al. Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers. Science, 2005, 307(18): 1082—1085[DOI]

12 Chen X D, Watanabe K, Kiguchi K, et al. Real-time kinematics on the translational crawl motion of a quadruped robot. J Intell Robot Sys , 2000, 29(2): 111—131[DOI]

13 Chen X D, Watanabe K, Kiguchi K, et al. Implementation of omnidirectional crawl for a quadruped robot. Adv Robotics, 2001, 15(2): 169—190[DOI]

14 中国医科大学. 人体解剖图谱. 上海: 上海科学技术出版社, 1979. 12—66

15 刘晓燕, 戴振东, 曾小龙, 等. 大壁虎附肢肌的定量研究. 解剖学研究, 2005, 27(4): 292—301

16 韩济生. 神经科学纲要. 北京: 北京医科大学、中国协和医科大学联合出版社, 1993. 586—587

17 Miriam A A-R, George V L. Motor patterns and kinematics during backward walking in the pacific giant salamander: Evidence for novel motor output. J Neurophysiol, 1997, 78: 3047—3060

18 查选芳, 张融甫. 多足步行机器人腿机构的运动学研究. 东南大学学报, 1995, 25(2): 103—107

19 王新杰, 李培根, 陈学东, 等. 四足步行机器人动力学模型及脚力分配的研究. 华中科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(12): 12—15

20 何冬青, 马培荪, 曹曦, 等. 四足机器人对角小跑姿态对稳定步行的影响. 机器人, 2004, 26(6): 529—537

21 何冬青, 马培荪. 四足机器人动态步行仿真及步行稳定性分析. 计算机仿真, 2005, 22(2): 146—149
22 徐秩群, 万隆君. 四足步行机器人腿机构及其稳定性步态控制. 机械科学与技术, 2003, 22(1): 86—91
23 何广平, 陆震, 王凤翔. 欠驱动冗余度机器人运动优化控制. 宇航学报, 2002, 23(5): 16—20
24 Nelson G M, Quinn R D. Posture control of a cockroach-like robot. IEEE CONTR SYST MAG, 1999, 19(2): 9—14[DOI]
25 戴振东, Gorb S. 蝗虫脚掌微结构及其接触的有限元研究. 上海交通大学学报, 2003, 37(1): 66—69
26 Dai Z D, Gorb S. A study on contact mechanics of grasshopper's pad (Insecta: ORTHOPTERA) by finite element methods. In: The 14th Biennial Conference of the Canadian Society for Biomechanics, University of Waterloo, Ontario, Canada, 2006
27 Nishikawa M, Kumagai T, Abe S, et al. Europe Patent, 90313699.2, 1991-6-19; US Patent, 005255753A, 1993-10-26
28 Fujitsu. Japan Patent, P2000-254888A, 2000-9-19
29 Kawai T, Takenaka T, Hasegawa T, et al. US Patent, US006177776B1, 2001-1-23
30 Takenaka T, Gomi H, Hamaya K, et al. WO/2003 /055651, 2003-7-10
31 Honda Giken Kogyo Kabushiki Kaisha. Japan Patent, JP2000-351743, 2000-11-17
32 Honda Giken Kogyo Kabushiki Kaisha. Japan Patent, P2001-129774A, 2001-5-15
33 Takenishi A, Hashimoto K, Ohta A, et al. WO 2006/ 011577 A1, 2006-2-2
34 Yang A Q, Low K H, Fun W. Fuzzy position/force control of a robot leg with a flexible gear system. IN: Proceedings of the 2002 IEEE Intemational Conference on Robotics & Automation,Washington DC, 2002. 2159—2164
35 Hong Y S, Lee C W. US Patent, US005758734A, 1998-6-2
36 胡贯朋, 马培荪, 高雪官. 中国专利, CN 1586966A, 2005-3-2
37 郑世杰. 中国专利, CN 1730309A. 2006-2-8
38 冯萍, 程君实, 陈佳品. JYUWM-3 型四足步行机器人足底测力系统的研究. 微型机与应用, 1997, 3: 26—28
39 孙荣, 吴渊宅, 卢庆植, 等. 中国专利, CN 1524664A, 2004-9-1
40 利奥尼德·马斯洛夫, 孙荣, 郭朱泳. 中国专利, CN 1651295A, 2005-8-10
41 吴仲城, 戈瑜, 申飞, 等. 中国专利, CN 1513647A, 2004-7-21
42 Autumn K, Sitti M, Liang Y A, et al. Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae. Proc Natl Acad Sci USA, 2002, 99: 12252—12256[DOI]
43 Huber G, Mantz H, Spolenak H, et al. Evidence for capillarity contributions to gecko adhesion from single spatula nanomechanical measurements. Proc Natl Acad Sci USA, 2005, 102(45): 16293—16296[DOI]
44 戴振东, 惠春, Gorb S. 表面粗糙度对 4 种聚氨酯弹性体黏着性能的影响. 摩擦学学报, 2003, 23(3): 245—249
45 于敏, 吉爱红, 张昊, 等. 聚氨酯丝与 PET 丝摩擦磨损性能的试验研究. 摩擦学学报, 2006, 26(1): 28—31
46 Sitti M, Fearing R S. Nanomolding based Fabrication of Synthetic Gecko Foot-Hair Micro/Nano- structures. In: IEEE Conference on Nanotechnology, Washington DC. 2002. 137—140
47 Geim A K, Dubonos S V, Grigorieva I V, et al. Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair. Nature Mater, 2003, 2(7): 461—463[DOI]
48 Asbeck A T, Kim S, Cutkosky M R, et al. Scaling hard vertical surfaces with compliant microspine arrays. Int J Robotics, 2006, 25(12): 1165—1179[DOI]
49 National Science Foundation. FY 2007 Budget Request to Congress, 2006, Feb
50 王新杰, 李培根, 陈学东, 等. 四足步行机器人动力学模型及脚力分配的研究. 华中科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(12): 12—15
51 Seo J W, Haas C, Saidi K. Graphical modeling and simulation for design and control of a tele-operated clinker clearing robot. Automat Constr, 2006. 16(1): 96—106
52 郑浩峻, 张秀丽, 关旭, 等. 基于生物中枢模式发生器原理的四足机器人. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(2): 166—169
53 Inagaki S, Yuasa H, Suzuki T, et al. Wave CPG model for autonomous decentralized multi-legged robot: gait generation and walking speed control. Robot Auto Syst, 2006, 54: 118—126[DOI]
54 马培荪, 郑伟红. 四足步行机器人模糊神经网络控制. 机器人, 1997, 19(1): 56—60
55 郑浩峻, 张秀丽, 关旭, 等. 基于生物中枢模式发生器原理的四足机器人. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(2): 166—169
56 孙立宁, 王鹏飞, 黄博. 四足仿生机器人嵌入式多关节伺服控制器的研究. 机器人, 2005, 27(6): 517—520