

非连续约束变结构机器人运动机构的仿生： 概念及模型

戴振东 张昊 张明 代良全 孙久荣

(南京航空航天大学仿生结构与材料防护研究所, 南京 210016; 南京航空航天大学航空宇航学院, 南京 210016; 北京大学生命科学学院, 北京 100086. E-mail: zddai@nuaa.edu.cn)

摘要 机器人的运动能力、效率和可靠性是衡量机器人品质的重要指标, 要进一步提高机器人的品质, 还有若干关键科学问题尚没有得到澄清和解决. 我们从仿生壁虎机器人运动协调的困惑中发现, 这类机器人的腿式运动机构为开环-闭环转变, 闭环状态下与接触体形成拟态构件长度也有变化的变结构机构, 开环到闭环转变中自由度和约束也呈现非连续变化. 提出了非连续约束的变结构运动机构的概念, 建立了非连续约束的表述方程, 这类机构的驱动和控制设计是机器人运动系统进一步提高性能和效率的关键之一. 借鉴生物脊椎-外周运动神经系统对运动的控制策略, 提出这类机构的运动控制和驱动策略, 并指出腿式机器人未来发展必须解决的若干关键问题.

关键词 非连续约束 变结构机构 机器人运动机构 仿生控制 仿生驱动

现代机器人技术在微制造技术及高速发展的信息与控制技术的支持下获得了长足的进展, 日本、韩国和我国研制的仿人机器人已经能够完成弹钢琴、跳日本舞、表演中国武术等高难度的动作. 但这类机器人依靠移动电源的工作时间多在 30 min 左右, 还远不能满足实际需求. Collins 等人^[1]分析表明, 本田公司的仿人机器人 Asimo 的耗能约为人耗能的 10 倍. 仿生机器蛇的效率国外最高为 25%, 国内约为 20%. 另一方面, 蛇在自然条件下能够一餐而数周不用进食, 并同样能够做高速的运动. 什么造成仿生机器人和仿生对象(动物)之间如此巨大的能耗差异?

目前爬壁机器人的性能还不能满足实际的需要, 但很多动物却能够在 3 维空间做无障碍的运动, 这类动物的黏附与脱附、机构与控制机制还未被完全认识. Dickinson 等人^[2]指出, “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”. 经过 35 亿年的演化、进化和生存竞争, 动物在运动系统的演化方面已经形成了高度的、多方面的优化——包括运动机构、驱动方式、环境感知和简约有效的系统控制. 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. 这类机构在未知环境中具有很好的环境适应性, 因而是军用机器人、搜索机器人和外空探测机

器人运动机构的首选.

我们在腿式仿壁虎机器人研制的过程中发现, 这类机构在工作中存在着约束的非连续变化. 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连接, 机构演变为闭环机构, 由此带来常规机构所没有的新问题: () 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; () 由于机器人的运动, 使闭环机构中“机架”的尺寸成为变值. 我们将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, 称为非连续约束变结构机构.

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、设计方法和分析方法. 金国光等人在变胞机构分类和构态的研究的基础上^[6], 研究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^[4].

本文以仿生壁虎机器人运动机构设计为例, 提

出非连续约束变结构机构的概念, 研究非连续约束机构的运动机构设计、驱动与控制问题, 为这类机构在机器人和其他机械中的应用奠定基础. 从机构构件数量变化和自由度改变的角度看, 本文要讨论的非连续约束机构与 Dai 等人^[3-5]提出的变胞机构有共性之处, 是变胞机构的一种特例, 即机构自由度和构件数目的变化是由于脚掌与地面接触/非接触状态的变化, 即约束的非连续变化而产生的.

1 问题及其模型

根据对壁虎的解剖研究^[9], 我们提出了仿生壁虎机器人的运动机构(图 1(a)), 按照机器人机构的分类, 该机构和壁虎的运动机构均属于多关节机构^[10]. 与动物的腿运动机构一样, 腿式机器人的运动机构也有支撑相和摆动相之分, 在摆动相时机构为开环机构(图 1(b)), 而支撑相时为闭环机构(图 1(c)). 为了保证摆动相时仿生壁虎机器人的脚掌达到预期的位置和灵活性, 必须有足够的有效驱动, 本设计中, 万向节铰链 J_{BF} (J 表示铰链joint, 下标BF表示身体body与股节femur间)有 2 个自由度, 铰链 J_{FT} (下标FT表示股节femur与胫节tibia间)有 1 个自由度, 万向节铰链 J_{TD} (下标TD表示胫节tibia与跖节dactylus间)有 2 个自由度, 其中 J_{TD} 是为了保证脚掌对接触面的

顺应性而设计的随动铰链, 因此该机构应有 3 个驱动件. 而在支撑相, 为保证脚掌与接触面间的良好接触, 以产生足够的黏附力, 脚掌和表面间必须形成固定的约束; 在机身以一定速度运动的条件下, 闭环机构中机架长度的变化需要通过铰链 J_{BF} , J_{FT} 和 J_{TD} 的调节使之相适应.

目前地面机器人的脚掌多采用点接触, 这样的脚掌不能提供所需要的黏附力, 因此不能用于仿生壁虎机器人. 这种由于摩擦和黏附作用引起的接触, 原则上有 3 种状态: 非接触状态、有滑动的接触状态和牢固的接触状态. 用约束力 F_s 表示上述问题, 可以写为公式:

$$\begin{cases} F_s = 0, & \text{开环状态} \\ F_s = C, & \text{滑动闭环状态} \\ F_s = \infty. & \text{完全闭环状态} \end{cases} \quad (1)$$

与上述 3 种状态相对应, 所需要涉及到的分析和设计技术状况如下: 在非接触状态, 机器人的腿机构为开环机构, 其分析方法已经非常成熟^[11]. 完全约束状态下, 腿机构为闭环、变构件长度的机构, 其构件尺度的变化规律与机器人本体的运动速度、所在表面的几何构形和机器人的运动模态等因素相关. 而滑动闭环机构, 即在非完全约束状态下机器人腿机构的运动学分析, 是一个更加复杂的问题, 需要综合界面摩擦条件的变化来研究.

机器人处于支撑相的腿的驱动, 应根据机器人的负载状态不同采用不同的驱动方式. 在驱动力需求较小的情况下, 采用单腿驱动, 其他支撑相的腿仅提供支撑力; 而在单腿驱动力不足时根据需要调整到双腿或者三腿驱动, 这时各条腿间需要有良好的协调, 以便保证不会出现过驱动和自身运动干扰的情况. 按照机器人机构的分类, 动物运动机构均属于多关节机构^[10], 为了不发生过约束的问题, 需要设计处于支撑相的几个腿的相应机构具有相互适应的运动特性, 而这种几何上的适应性又和接触表面的状态有密切的关系. 按照机器人操作系统的分类^[11], 生物运动系的机构属于关节型机器人的范畴, 这种类型的机构姿态和位置的控制, 特别是姿位控制的反问题具有一定的难度, 为此需要研究这类机构的运动学、动力学规律和生物系统的解决方案.

2 非连续机构的运动学和动力学分析

对机器人的运动而言, 摆动相机构自由度高, 需要较多的原动件, 但所需要的驱动力小. 这时需要研

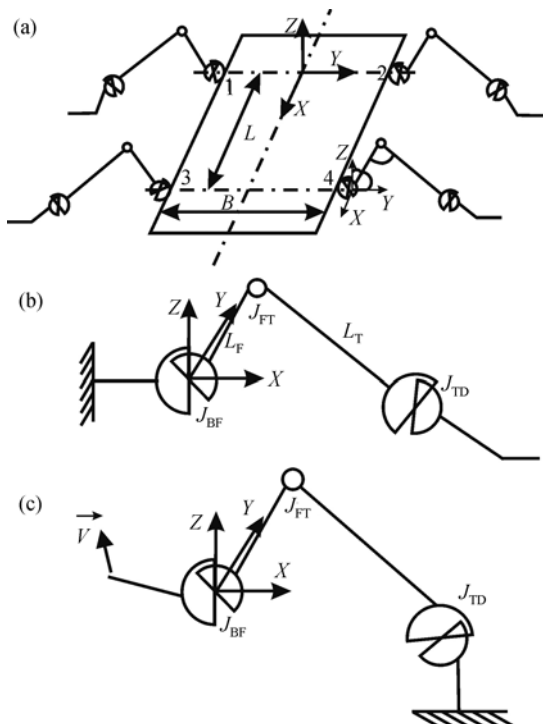


图 1 仿生壁虎机器人的机构(a), 摆动相开环机构(b)与支撑相闭环机构(c)

究开环机构的正问题的求解方法, 分析机构的工作空间; 记大腿的长度 L_F , 相对于身体的位置角分别为 α (大腿对 XOY 平面投影线于 X 轴间的夹角) 和 β (大腿相对于 XOY 平面的夹角), 大腿和小腿的位置角为 γ , 小腿的长度 L_T , 则小腿末端 J_{TD} 的位置 (X_{TD}, Y_{TD}, Z_{TD}) 在图 1(b) 可以计算如下:

$$\begin{aligned} X_{TD} &= [L_F \cos \alpha - L_T \cos(\alpha + \gamma)] \cos \beta, \\ Y_{TD} &= [L_F \cos \alpha - L_T \cos(\alpha + \gamma)] \sin \beta, \\ Z_{TD} &= L_F \sin \alpha - L_T \sin(\alpha + \gamma). \end{aligned} \quad (2)$$

小腿末端 J_{TD} 的速度通过(2)式两端对时间求导, 用角速度 $\dot{\alpha}$, $\dot{\beta}$ 和 $\dot{\gamma}$ 表示.

对于多数地面行走的机器人, 脚掌相对于接触面的角度通过球形脚掌的支撑实现自补偿. 而仿生壁虎机器人的脚掌需要和接触面有良好的面接触, 为此我们设计了 2 个自由度的随动铰链.

支撑相是驱动机器人运动的状态, 在小承载运动时, 可以采用单腿驱动模式, 令其他的支撑相机构处于随动状态. 主要需要解决的问题是解除那些原动件的驱动、什么时间解除这些驱动和如何恰当地解除约束. 黄真和李秦川^[12]对于少自由度并联机构的结构约束力学特性和几何条件的研究, 有利于本问题的解决.

多腿同时驱动时, 需要考虑使得每条腿间的关系具有几何适应性、速度和力学的协调性. 采用闭环链机构的逆求解方法, 对于关节型杆机构, 求解过程比较复杂, 需要结合脚掌地面反力的测定确定控制和补偿方案. 如果切向力的方向与运动方向一致, 表明该脚掌上的力已经成为阻力, 需要加快速度, 做几何补偿. 慢速运动时, 动物具有足够的时间调整各个腿机构的力学平衡关系; So 等人^[13]为了增加机器人的输出力而发展的冗余平行杆机构和线性驱动机构, 对本问题的解决有很好的启示, 但他们没有解决如何提高驱动效率的问题. 机器人机构的位置和速度逆解问题见文献^[10].

3 生物体系的解决方案

图 2 为脊椎动物的脊髓-外周运动神经系统图, 其中骨骼肌(屈肌和伸肌)的运动受到对应运动神经元的支配. 这组运动神经元通过 I_a 交互抑制中间神经元和 Renshaw 细胞形成互动的神经回路. Renshaw 细胞接受高级中枢的下行控制, 而 I_a 交互抑制中间神经元的主要功能是防止相拮抗的肌肉同时收缩, 以协

调反射运动^[14]. 也有专家认为脊髓-外周神经回路通过 I_b 抑制中间神经元形成回路, 而该神经元同时接受下行通路的神经指令、关节感受器、皮肤感受器和高尔基腱器官的神经传入的调控, 形成具有多重调控的神经网络. 生物的脊髓-外周神经系统的结构形成了完整的 CPG(中枢模式发生)模式. 中间神经元, 特别是抑制性中间神经元的参与, 保证了肢体运动过程中支配同一关节或者肢体两侧的屈肌和伸肌交替的收缩和舒张的节律性活动, 成为生物系统高效率控制的基础, 为仿生机器人的研究提供了很好的启迪.

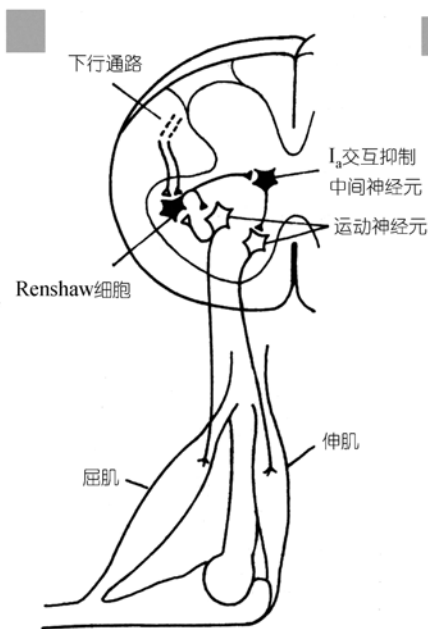


图 2 脊椎运动神经系统对力输出的调控^[14]

图 3 为蝶螈运动过程中各腿驱动肌的肌电和步态图^[15]. 可见在蝶螈运动中, 并非所有的腿部肌肉均处于力输出状态. 这提示我们腿机构中的一部分处于无力输出的随动适应性状态(passive adaptation). Collins 等人^[1]将这种设计理念用于仿人型机器人的研制, 获得了 3 种仿人机器人, 其能源效率接近人的能源效率.

分析动物对其运动机构的控制, 可见其控制过程如下: 对于多关节机构组成的运动机构, 站立(清醒)状态的动物, 驱动关节的肌肉群处于适度张紧状态, 以便保持系统具有一定的刚度; 而在完全随动(麻痹)状态下, 驱动关节的肌肉群处于完全松弛状态, 表现为机构不能保持其基本的结构形态, 就像醉

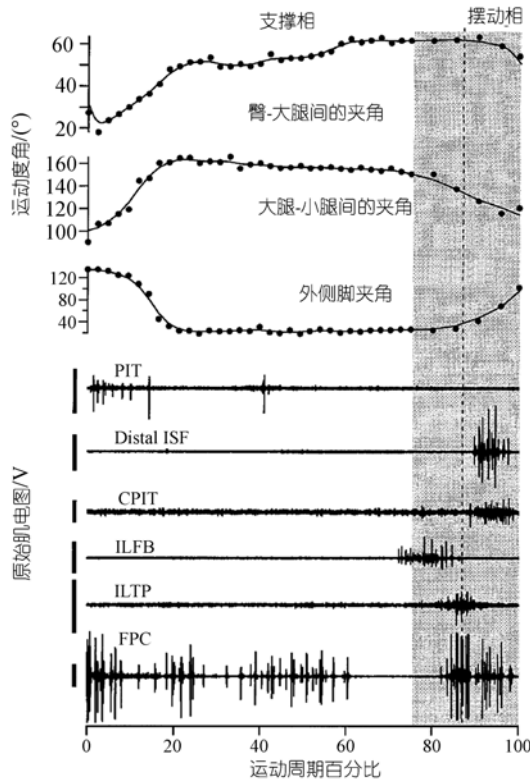


图 3 蝾螈前肢运动过程的肌电图^[15]

PIT, 耻坐胫骨联合肌; distal ISF, 末梢坐骨曲肌; CPIT, 尾侧耻坐胫骨联合肌; ILFB, 髂腓骨肌; ILTP, 髂胫骨后伸肌; FPC, 固有屈肌

酒的人一样; 在运动状态下, 动物依靠运动神经对其同名肌、协同肌和拮抗肌收缩和舒张的节律性控制实现对力输出的控制。因此动物对机构状态的控制是通过伸肌输出力 F_c 和屈肌输出力 F_a 的控制实现的, 上述关系进一步作力学上的简化, 可以表述为

$$\begin{cases} F_c = F_a = 0, & \text{麻痹状态} \\ F_c = F_a = C, & \text{站立状态} \\ F_c > F_a \text{ 或者 } F_c < F_a. & \text{运动状态} \end{cases} \quad (3)$$

现代机械驱动多数以扭矩 T_d 方式输出, 机器人的动力控制可以表述为

$$\begin{cases} T_d = 0, & \text{随动状态} \\ T_d = T_f, & \text{静摩擦状态} \\ T_d > T_f. & \text{加速运动状态} \end{cases} \quad (4)$$

4 结论

从上述分析可以得到如下主要结论:

() 仿生壁虎机器人机构是非连续约束的变结

构机构。摆动相腿机构为开环机构, 自由度多; 支撑相腿机构为构件尺度变化的闭环机构。

() 为提高机器人的驱动效率, 需要制定不同初始条件下, 支撑相时腿杆机构的运动协调关系。

() 在高速运动条件下进一步提高效率, 需要研究驱动机构的约束解除问题。

() 脊椎动物脊髓外周神经系统的反馈控制模式对机器人的控制设计提供了很好的仿生依据。

参 考 文 献

- Collins S, Ruina A, Tedrake R, et al. Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers. *Science*, 2005, 307(18): 1082—1085[DOI]
- Dickinson M H, Farley C T, Full R J, et al. How animals move: An integrative view. *Science*, 2000, 288 (7): 100—106[DOI]
- Dai J S, Rees J J. Mobility in metamorphic mechanism of foldable/erectable kinds. *Trans ASME: J Mech Design*, 1999, 121(3): 375—382
- 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
- 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
- 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
- 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
- 杨廷力. 机器人机构拓扑结构学. 北京: 机械工业出版社, 2004
- 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
- 牧野洋, 谢存禧. 空间机构及机器人机构学. 北京: 机械工业出版社, 1987
- 马香峰. 机器人机构学. 北京: 机械工业出版社, 1991
- 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
- 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
- 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
- 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