

文章编号: 1002-0446(2002)02-0188-05

机器人仿生学研究综述*

张秀丽 郑浩峻 陈 曩 段广洪

(清华大学精密仪器与机械学系 北京 100084)

摘 要: 机器人仿生学是从仿生的角度对机器人进行研究,是机器人领域的重要分支.本文从结构仿生,材料仿生,功能仿生,控制仿生,群体仿生五个方面,归纳和评述了国内外机器人仿生学的研究现状、特点、主要成果以及发展趋势.

关键词: 机器人; 仿生学; 中心模式发生器; 行为主义; 演化硬件

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

RESEARCH ON ROBOTIC BIONICS

ZHANG Xiu-li ZHENG Hao-jun CHEN Ken DUAN Guang-hong

(Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract The robotic bionics researches on robotics from the view of bionics. It is an important branch in the robotics field. This paper summarized the researching status and development direction from bionic structure, biomaterials, bionic control algorithm, functional bionics and social bionics all over the world.

Keywords: robot, bionics, CPG, behaviorism, evolution hardware

1 引言(Introduction)

自然界在亿万年的演化过程中孕育了各种各样的生物,每种生物都拥有神奇的特性与功能,能够在复杂多变的环境中生存下来.因此,通过研究、学习、模仿来复制和再造某些生物特性和功能,将极大的提高人类对自然的适应和改造能力,产生巨大的社会效益.20世纪60年代初诞生的仿生学(Bionics),是生物科学和工程技术相结合的一门边缘学科,通过学习、模仿、复制和再造生物系统的结构、功能、工作原理及控制机制,来改进现有的或创造新的机械、仪器、建筑和工艺过程.现代仿生学已经延伸到很多领域,机器人学是其主要的结合和应用领域之一,这方面的研究引起各国相关研究人员和专家的极大兴趣和关注,取得了大量可喜成果和积极进展,可归纳为机器人的结构仿生、材料仿生、功能仿生、控制仿生以及群体仿生五个方面,本文从这五个方面总结和评述了国内外机器人仿生学的研究现状、特点、主要成果以及发展趋势.

2 结构仿生(Bionic structure)

结构仿生是通过研究生物肌体的构造,建造类似生物体或其中一部分的机械装置,通过结构相似实现功能相近.

2.1 海洋动物仿生——独特的形体结构和运动方式

海洋动物的形体几何参数、组织系统形态及皮肤构造机理符合流体动力学特性,能很好的适应水生环境.如鱼类具有流线型轮廓,可以减少运动时水流对身体的阻力;鱼类直线前进的速度虽然远逊于螺旋桨驱动的船只,但它们的急转和起动速度却无与伦比,转弯空间不到身体长度的一半,且具有高速高效、高机动性、低噪声等优点.鱼类常见的推进方式有两种:1)尾鳍或身体摆动,波动推进;2)胸鳍摆动,划动前进^[1].基于尾鳍推进的仿鱼形机器人有约翰·库普等制造的机器金枪鱼 Tuna 和机器梭鱼 Pike、梁建宏研制的机器鱼 Robofish 等.这三种机器人均具有多关节鱼身,通过伺服电机驱动各关节,实现躯体摆动.基于胸鳍推进的鱼形机器人有 N. Kato

等研制的仿鲈鱼机器人和 Toshio F. 提出的微型水下浮游机器人. 这种机器人通过胸鳍动作, 可以实现前进、后退以及在水平面和垂直面的盘旋及转向^[2].

海豚、海龟等动物, 身体具有柔性, 能够通过骨架及充气的肺部的变形, 使身体形状、截面发生变化, 改变水流对身体作用力的方向; 它们的皮肤为层状分布, 身体中段弹性小, 尾部弹性大; 皮肤表面的特殊物质, 使皮肤与水的边界发生层化, 减小了水的阻力. Babenko V. V. 等模仿海洋动物特殊的结构和表面层特性, 制造了多功能水下无人机器人, 这个机器人具有类似海龟的外形, 表面覆有层状弹性层, 使其在水下的运动能较好的符合流体动力学特性^[3].

2.2 蛇类仿生——高冗余自由度

蛇体结构的最大特点是: 无四肢, 脊椎数目多, 这种高冗余度关节式结构, 使躯体能够灵活变形, 产生多种运动方式, 可在凹凸不平、松软或狭小弯曲的地方运动并保持力学稳定性. 仿蛇形机器人具有多于确定机器人空间位姿所需的自由度, 能灵活地避开障碍物; 而且, 可以通过机构内部的变形来获得动力, 不需要额外的驱动轮、动力足或牵引车等动力系统. H. Date 等提出了由主动关节和被动轮组成的多关节蛇形机器人, 被动轮用于改变系统纵横摩擦系数比, 通过控制各关节姿态角实现机器人的蜿蜒前进^[4]. Fumitoshi M. 等研究了蛇形机器人的模块化设计原则及冗余度可控性, 提出通过机器人的冗余自由度或给定理想状态参数可以避免蛇体位姿奇异值的产生^[5]. Shigeo Hirose 等研制的蛇形机器人“ACM-R1”具有正弦波运动方式, 能够灵活的穿行于狭小空间^[6]. 吕恬生等在提出“蛇体基本曲线”概念的基础上, 采用“脊梁曲线法”比较系统地解决了蛇式运动的动态模拟问题^[7,8].

2.3 变形虫仿生——形体的几何可变性

变形虫是一种低等的原生动物, 可以任意改变形体, 从不同方向伸出伪足, 依靠伪足运动. 模拟变形虫研制的具有变形能力的机器人, 由于其几何结构的可变性, 能到达狭小曲折的空间, 具有较大的操作灵活性, 成为机器人领域一个新的研究热点. Hiroshi Y. 等利用“软机械(soft-mechanics)”技术构造了机器变形虫, 它由多个具有传感器、指示器、控制器和执行器的同构机器人模块组成, 通过振动势能法对机器人进行控制, 可实现移动、避障、变形等能力^[9].

变形机器人的另一类是自重构机器人(self-reconfiguring robot), 这种机器人具有自安装、自修理、

主动适应环境的能力. Keith 等用 4 自由度的机器人模块“Molecule”, 作为自重构机器人的构建单元, 可以实现机器人的三维移动和变形^[10]. G. Chirkjian 提出的“多细胞机器人变形系统”, 由 6 根等长杆构成平面闭环机构, 通过各杆位置的变化实现机构整体变形. 清华大学的郑浩峻利用拓扑图、分枝树等数学工具, 从理论上深入研究了自重构机器人的可重组性, 并构造了模块机器人样机^[11].

2.4 人体仿生——高度灵活性和功能复杂性

人的四肢是由骨骼、肌肉、关节以及韧带组成的多关节弹性结构, 这种结构确保人体能够灵活运动, 完成复杂动作. 对人体的仿生以及拟人机器人的研究是仿生机器人领域的最高目标. 张永军等根据人体上肢结构原理, 提出一种上肢仿生机构, 并针对所提出的机构进行了优化设计和运动学分析, 为制造出灵巧方便的上肢仿生机构提供了理论依据^[12]. 人体下肢具有缓冲、节能等特点, 是一种高效的步行机构, 马建旭等模仿人体下肢设计的关节式弹性步行机构, 在机器人的小腿中安置弹性装置, 通过四组并联弹性元件和以机器人腿外壳为机架的四连杆机构的复合, 产生缓冲、储能效果^[13].

3 材料仿生(Biomaterials)

机器人技术的发展对构建机器人的材料提出了越来越高的要求, 一些柔性铰链、柔体机器人的建造需要高强度、高韧性、变形可控的高性能材料; 服务型机器人需要具有感知功能的智能材料来提高机器人的安全性. 由此, 在机器人领域出现了材料仿生这一研究方向, 即从生物功能的角度来考虑材料的设计与制作, 通过对生物体材料构造与形成过程的研究及仿生, 使材料具有特殊的强度、韧性以及一些类生物特性. 近几年, 一些具有人体皮肤、肌肉性能的仿生皮肤、人造肌肉以及一些集传感、控制、驱动三种功能于一身的智能材料被研究出来, 用于机器人的驱动、传感等领域, 如: 形状记忆合金、电致流变流体材料、磁致流变流体材料、电致伸缩材料、磁致伸缩材料、光导纤维和功能凝胶等^[14]. 美国航天局加州喷气推进实验室利用一种轻型聚合物研制出用于微型航天器的人造肌肉, 这种用轻型电池驱动的人造肌肉, 被电荷激活后, 能够伸长、收缩和弯曲, 可以抓住并举起石头, 具有手指一样的灵活性. Methran M. 等将高分子电解质离子交换膜(IEM)镀在金属铂片上, 在外加电场的作用下, IEM 产生类似鳗鱼的波动, 带动金属铂片一起摆动产生推进力, 可用于水下

机器人的驱动^[2]。李明东等模仿骨骼肌的工作原理,用 SMA 丝(形状记忆合金)来驱动一个微型机器人手臂,将机器人传统的关节驱动方式(joint-actuated)转变为肌肉驱动方式(muscle-actuated)^[15]。

4 功能仿生 (Functional bionics)

功能仿生的目的是使人造的机械具有或能够部分实现高级动物丰富的功能,如思维、感知、运动、操作等,这在智能机器人的研究中具有重大意义。

4.1 大脑功能仿生

大脑是人与动物的高级神经中枢,是思维活动的物质载体。微电子技术的发展使人们能够用仿生芯片代替脑部的特定功能区, Tsai R. H. 等采用模拟/数字混合神经网络微芯片 (Mixed-analog/digital Neural Network Microchip) 制成了海马神经元*, 能实现大规模并行信号处理,如数据存储、分类、识别,这项技术可用于脑损伤的治疗,也为未来仿生脑的出现奠定了基础^[16]。情态是大脑思维的重要表现,对情态的仿生将大大提高人机交互的友好与融洽。日本早稻田大学研制的“眼神机器人”,通过面部的仿生皮肤及皮肤下面模拟肌肉和神经的精密系统,能够自由地眨眼、转动眼珠,表现出高兴、伤心、愤怒、尴尬等人类的表情。NEC 开发的伴侣机器人“PaPeRo”,麻省理工学院研制的婴儿机械人“基斯梅特”,东京理科大学厚文雄教授等研制的女性面孔机器人, Sony 开发的智能机器狗 Aibo 等,均具有情态表达的功能,能够与人进行一定程度的交流,满足人类生活或情感的需要。

4.2 感知仿生

感知系统是生物体的信息输入通道,对生物体的行动、决策具有重要作用。对动物视觉、听觉、触觉等感知功能的研究,有助于工程问题的解决。Johns Hopkins 大学以灵长类视觉辨识系统为模型,模拟视网膜及大脑视觉功能区,研制出能实现视网膜三层细胞中第一层细胞能力的视觉功能芯片。装有这种芯片的机器人可应用到看护、外科手术、制造业以及电视会议方面。昆虫的视觉与脊椎动物相比是比较低级的,眼体不够灵活,焦距一般也固定。但在漫长的进化过程中,它们却具有了敏锐发现物体的能力。M. V. Srinivasan 等对蚱蜢的凝视机理、蜜蜂飞过管道的导航行为、采蜜时的定心能力进行研究,分别得出了物体范围确定方法、狭长通道导航技术和障碍密集环境中的路径规划算法^[17]。动物的听觉也能给人巨大的启示, H. Peremans 等模仿蝙蝠制造的超声

波仿生声纳头,可实现物体的三维定位^[18]; M. Rucci 等利用一个装有麦克风和摄像头的机器人来模仿仓鸮敏锐的视听系统,用于研究机器人视觉与听觉的协调^[19]。仿生机械手的灵活操作及复杂功能的实现,需要手部具有触觉、滑觉、力觉等感知能力。张玲等将具有压电、热释电效应的聚偏二氟乙烯 (PVDF) 以立式、螺旋式缠绕在合成橡胶基片上的高分子充水薄膜微球中,制成仿生皮肤传感器,可实现任意分布的触觉、滑觉、温觉的感知功能^[20]。

4.3 运动仿生

动物经过亿万年的物种演化,产生了形式多样的运动器官和运动形式,如行走、奔跑、跳跃、爬行、蠕动、游泳、飞行等,使它们的生存范围遍及水下、陆地和空中。人们模仿自然界中动物的运动方式和相应的运动器官,实现机器人的运动功能。迄今为止,机器人所采用的运动方式主要有:轮式、履带式、足式、蠕动式、振动冲击式、泳动式、飞行式等。

5 控制仿生 (Bionic control algorithm)

5.1 高级神经系统仿生

模仿动物高级神经系统机理实现控制的方法主要有两种:人工神经网络和模糊控制。人工神经网络是由若干类似神经元的处理单元相互连接,构成一个庞大的信息处理系统,在复杂环境中具有高度的适应性和鲁棒性。K. Berns 应用神经网络对六足步行机“LAURON”实现在线学习;马培荪等将人工神经网络和模糊算法结合起来,采用力/位置混合控制,实现四足步行机“JTUWM-III”的慢速动态行走。

5.2 低级神经系统仿生

5.2.1 行为主义控制理论

昆虫没有存贮、规划、控制全身各部分运动的中心控制系统,是根据身体各部分的不同反应,将一些局部看来漫无目标的动作合成为有意义的生物行为,它的运动简单,却很灵活。基于昆虫智能产生的行为主义控制方法,基本思想在于:机器人的运动由一系列同时发生的简单动作或“能力”组成,通过自组织实现系统的复杂行为,这种“无思考智能”具有即时性和自组织的特点,在非结构化环境中具有良好的适应性。著名的应用行为控制理论的机器人有 MIT 的 Brooks 的“genghis”六足机器人、“阿蒂拉-I”机器人、“Hannibal”六足机器人、瑞士洛桑大学的“克

* 大脑侧面脑室壁上的海马状突起,主要由灰白质构成,在泛记过程(长期记忆)中起主要作用。

伯拉”机器人以及美国 Los Alamos 国家实验室的“Vbug”系列机器人等^[11]。

5.2.2 中心模式发生器

动物界最常见的运动方式是节律运动(rhythmic motion),如走、跑、跳、泳、飞等。生物学家普遍认为,节律运动并不是大脑的刻意行为,而是低级神经中枢的反射行为,由位于脊髓中的中心模式发生器(CPG)产生。CPG是一个神经振荡电路,能够通过自激振荡激发身体的节律运动^[21, 22]。工程界一般将CPG建模为一组互相耦合的非线性振荡器组成的分布系统,通过相位耦合实现节律信号的发生。从80年代初Cohen提出第一个CPG模型,人们一直在这方面进行着探索和研究。Avis H. Cohen等通过对脊髓控制下七鳃鳗运动行为的研究,构造出CPG控制电路,实现一个机器人腿的“走”和“跑”两种运动^[23-25]。Shinkichi INAGAKI等利用一个局部通信的非线性振荡器来模拟CPG,控制一个分布自律式四足机器马,实现了机器马的“走”、“小跑”、“奔跑”三种步态^[26]。

5.3 进化机制的仿生——遗传算法

遗传算法是模拟生物界“优胜劣汰,适者生存”这一进化法则而产生的一种控制算法,特别适用于非线性复杂大系统的全局优化。机器人是难以精确建模的复杂系统,可以利用遗传算法来控制机器人的复杂行为,如轨迹优化,冗余机器人的逆运动学方程求解,细胞机器人的结构位形优化和运动规则确定等。D. Floreano等首次在机器人“Khepera”上以实时在线方式应用了行为进化理论。相应于遗传算法的是演化硬件(EHW),这是一种象生物一样可以根据环境变化改变自身结构的大规模集成电路,Thompson采用内部演化的算法将这种硬件用于机器人有限状态机的控制^[27]。

6 群体仿生(Social bionics)

随着科学技术的发展,机器人面临更加复杂的作业环境,如机器人生产线、柔性加工工厂、消防、无人作战机群等。一些作业单个机器人往往难以完成,需要多个机器人协作。多机器人系统是模仿蚂蚁、蜜蜂以及人的社会行为而衍生的一种仿生系统,通过个体之间的合作完成某种社会性行为。群体仿生的目的在于:通过群体行为增强个体智能,提高系统整体工作效率,减少局部故障对整体的影响。从1996年开始的机器人世界杯足球赛是典型的多机器人系统,球队中的机器人通过相互作用产生系统的“组行

为”,从而表现出“组智能”,实现团体功能^[28]。P. Flocchini通过对多机器人的布局行为和聚结功能的研究,分析了多机器人系统分布式合作及组智能产生的机理^[29]。Michael J. B.和C. Ronald Kube等研究了群居昆虫的组队收集食物和合作搬运物体的行为,验证了群居昆虫的社会性行为是自组织的结果^[30, 31]。

7 结论(Conclusion)

综上所述,机器人仿生学已经涉及结构、材料、功能、控制以及系统仿生等多方面。虽然整体发展水平较低,应用范围也较窄,但带给人们的启示是巨大的。21世纪,人类的科学技术将高度发展,要解决象智能机器人、拟人机器人这样的科学难题,必须向自然界学习,从自然界为人类提供的丰富多彩的实例中寻求解决问题的途径。通过对自然界更完美的学习、模仿、复制和再造,发现和发展相关的理论和技术方法,这正是机器人仿生学的研究任务和发展趋势。

参考文献 (References)

- 1 杜家纬. 仿生梦幻(M). 郑州:河南科学技术出版社,2000(3),第一版,1-22,35-37
- 2 钦俊德. 动物的运动[M]. 北京:清华大学出版社,广州:暨南大学出版社,2000(5),第一版
- 3 刘军考,陈在礼,陈维山等. 水下机器人新型仿鱼鳍推进器. 机器人[J],2000,22(5):427-432
- 4 Babenko V V, Korobov V L, Moroz V V. Bionics Principles in Hydrodynamics of Automotive Unmanned Underwater Vehicles. IEEE Conf, 2000, 2031-2036
- 5 H Date, Y Hoshi, M Sampei. Dynamic Manipulability of a Snake-Like Robot with Consideration of Side Force and its Application to Locomotion Control. Proc AMAM, Aug. 2000
- 6 Fumitoshi M, Kazutaka M. Unit Design of Hyper-redundant Snake Robots Based on a Kinematic Model. Proc AMAM, Aug. 2000
- 7 Shigeo H. Super mechano-system project in Tokyo Institute of Technology. International workshop on bio-robotics and teleoperation, May, 2001, Beijing Institute of Technology, 7-12
- 8 吕恬生,王翔宇. 蛇的爬行运动实验和运动中蛇体曲线的动态模拟. 上海交通大学学报[J],1998,32(1):131-135
- 9 崔显世,颜国正,陈寅等. 一个微小型仿蛇机器人样机的研究. 机器人[J],1999(3),21(2):156-160
- 10 Hiroshi Y, Wenwei Yu, Jun Hakura. Morpho-functional machine: design of an amoebae model on the vibrating potential method. Robotics and Autonomous System[J],1999,28:217-236
- 11 Keith, Kotay, Daniela Rus. Locomotion versatility through self-reconfiguring. Robotics and Autonomous System[J],1999,26:217-232

- 12 郑浩峻. 可重构多机器人移动系统结构及运动学研究[D]. 清华大学, 1999(12)
- 13 张永军, 杨兰生. 基于仿生学的上肢机构研究. 机器人[J], 1998, **20**(1): 20- 24
- 14 马建旭, 马培荪, 杨保忠等. 四足步行机器人中一种新型腿结构缓冲特性. 上海交通大学学报[J], 1997, **33**(7): 847- 850
- 15 杨亲民. 智能材料的研究与开发. 功能材料[J], 1999, **30**(6): 575 - 581
- 16 李明东, 马培荪, 马建旭等. 形状记忆合金丝驱动的仿生转动关节臂. 上海交通大学学报[J], 1999, **33**(19): 1284- 1287
- 17 Tsai R H, Sheu B J, Berger T W, Huang R. One step closer to a bionic brain. IEEE Circuits and Devices Magazine[J], 1997, **13**: 34 - 40
- 18 M V Srinivasan, J S Chahl, K Weber. Robot navigation inspired by principles of insect vision. Robotics and Autonomous System, 1999, **26**: 203- 216
- 19 H Peremans, A Walker, J C T Hallam. 3D object localization with a binaural sonarhead. inspirations from Biology, IEEE Proc. Robotics & Automation, May, 1998, 2795- 2800
- 20 M Rucci, J W ray, G M Edelman. Robust localization of auditory and visual targets in a robotic barn owl. Robot and Autonomous System s, 2000, **30**: 181- 193
- 21 张玲, 何伟, 蒋阳. 一种适合于机器人仿生皮肤传感器的性能研究. 机器人[J], 1999(7), **21**(4): 309- 311
- 22 Bradley G Brewer, Ranu Jung. Sensitivity analysis of a hybrid neural network for locomotor control in the lamprey. Biomedical Engineering, IEEE Conf. 1997, : 353- 356
- 23 Rao D H, Kamat H V. Artificial neural networks for the emulation of human locomotion patterns. Engineering in Medicine and Biology Society, 1995, IEEE Conf., 2/80 - 2/81
- 24 A H Cohen, M A Lewis. Sensorimotor Integration in Lampreys and Robot I: CPG Principles, Proc AMAM, Aug. 2000
- 25 M A Lewis, R E Cummings, M Hartmann, A H Cohen. Sensorimotor Integration in Lampreys and Robots II: CPG Hardware Circuit for Controlling a Running, Proc AMAM, Aug. 2000
- 26 Lewis M A, Etienne-Cummings R, Cohen A H, Hartmann M. Toward biomorphic control using custom aVLSI CPG chips. Robotics and Automation, 2000(1), ICRA '00, IEEE Conf., 494 - 500
- 27 Shinkichi INAGAKI, Hideo YUASA. Gait Pattern Generation for an Autonomous Decentralized Myriapod Robot: a Method by Composition System of Hamilton & Gradient System on a Graph*, 12th SICE Symp. On Decentralized Autonomous System s, Okinawa, 2000: 487- 492
- 28 陈毓屏, 康立山, 潘正君等. 一个新的研究领域——演化硬件. 航空计算技术[J], 1998, **28**(1): 1- 8
- 29 战强, 王树国, 陈在礼. 世界多机器人技术的研究现状. 机器人技术与应用[J], 1999(2)
- 30 P Flocchini, G Prencipe, N. Santoro, *et al.* Distributed Coordination of a Set of Autonomous Mobile Robots. Proc of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Oct. 2000: 480- 485
- 31 Michael J B, Krïeger Jean-Bernard Billeter. The call of duty: self-organized task allocation in a population of up to twelve mobile robots. Robot and Autonomous System s[J], 2000(30): 65- 84
- 32 C Ronald Kube, Eric Bonabeau. Cooperative transport by ants and robots. Robot and Autonomous System s[J], 2000, **30**: 85- 101

作者简介:

张秀丽 (1975-), 女, 清华大学精密仪器及机械学系制造工程研究所博士研究生. 研究领域: 仿生机器人, 特种机器人, 并联设备, 数控技术等.

(上接第 153 页)

6 结论(Conclusion)

点样机器人系统是生物芯片制备中的关键设备, 有广阔市场前景. 本文研究的系统与同类产品相比就有较高的性能价格比, 通过实际应用, 证明其完全胜任生物芯片制备任务. 提出的关键技术为进一步开发相关产品提供了参考.

但由于生物芯片制备过程涉及学科较多, 还有许多有待完善之处, 如点样针材料、结构及加工工艺等. 此外, 液体样品的分配机理及定量控制还有待进一步研究.

参考文献 (References)

- 1 马立人. 生物芯片. 化学工业出版社. 2000 年 2 月
- 2 Samuel K M. Making Chips. IEEE SPECTRUM, March, 2001: 54 - 60
- 3 万群, 魏东芝, 袁勤生. DNA 芯片技术. 生命的化学 1999, **19**(2): 83- 88
- 4 盛宗棋. 物理化学. 西北工业大学出版社. 1995

作者简介:

赵东 (1977-), 男. 硕士研究生. 研究领域: 先进机器人技术.

周强 (1972-), 男. 博士研究生. 研究领域: 微操作机器人技术.

毕树生 (1966-), 男, 副教授, 研究领域: 机器人机构学, 微操作机器人技术.