

机器人技术研究进展

谭民¹ 王硕¹

摘要 机器人技术的研究已从传统的工业领域扩展到医疗服务、教育娱乐、勘探勘测、生物工程、救灾救援等新领域,并快速发展. 本文简要介绍了工业机器人、移动机器人、医疗与康复机器人和仿生机器人研究中的部分主要进展,并通过分析和梳理,归纳了机器人技术发展中的—些重要问题,探讨机器人技术的发展趋势.

关键词 工业机器人, 移动机器人, 医疗机器人, 康复机器人, 仿生机器人

引用格式 谭民, 王硕. 机器人技术研究进展. 自动化学报, 2013, 39(7): 963–972

DOI 10.3724/SP.J.1004.2013.00963

Research Progress on Robotics

TAN Min¹ WANG Shuo¹

Abstract The researches of robot technology are moving from the traditional industry to medical service, education and entertainment, exploration and exploitation, bio-engineering, rescue, etc., and the related technology develops rapidly. In this paper, some important progresses in industrial robots, mobile robots, medical and rehabilitation robots and biomimetic robots are introduced in brief, and some important issues of robot technology are summarized by means of analysis and classification. Finally, the trends in robot technology are discussed.

Key words Industrial robot, mobile robot, medical robot, rehabilitation robot, biomimetic robot

Citation Tan Min, Wang Shuo. Research progress on robotics. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(7): 963–972

21 世纪以来, 国内外对机器人技术的发展越来越重视. 机器人技术被认为是对未来新兴产业发展具有重要意义的高技术之一^[1]. 欧盟在第七框架计划 (FP7) 中规划了“认知系统与机器人技术”研究, 美国启动了“美国国家机器人计划”、日本、韩国在服务型机器人方面也制定了相应的研究计划, 我国在国家高技术研究发展计划 (863 计划)、国家自然科学基金、国家科技重大专项等规划中对机器人技术研究给予极大的重视. 国内外产业界对机器人技术引领未来产业发展也寄予厚望. 由此可见, 机器人技术是未来高技术、新兴产业发展的基础之一, 对于国民经济和国防建设具有重要意义.

近些年来, 机器人技术研究和应用取得了突出的进展, 但仍面临着巨大挑战. 本文针对近年来国内外机器人领域的一些主要研究进展进行介绍, 并以此为基础, 通过分析和梳理, 探讨机器人技术研究中的

的难点和热点, 以及可能的发展趋势.

1 机器人技术研究主要进展

在计算机技术、网络技术、MEMS 技术等新技术发展的推动下, 机器人技术正从传统的工业制造领域向医疗服务、教育娱乐、勘探勘测、生物工程、救灾救援等领域迅速扩展, 适应不同领域需求的机器人系统被深入研究和开发^[2–4]. 机器人技术所涉及的应用领域众多, 本文仅选取工业机器人、移动机器人、医疗与康复机器人和仿生机器人领域中的部分典型研究工作进行介绍和分析.

1.1 工业机器人

工业机器人已广泛应用于汽车工业的点焊、弧焊、喷漆、热处理、搬运、装配、上下料、检测等作业. 在物流、码垛、食品和药品等领域, 工业机器人正逐步代替人工从事繁重枯燥的包装、码垛、搬运作业. 工业机器人研究的运动学标定、运动规划、控制^[5–6]等已有成熟的控制方案. 但由于工业机器人是一个非线性、多变量的控制对象, 而制造业也对机器人性能提出新需求, 机器人的控制方法仍是研究重点, 工业机器人技术也朝着智能化、重载、高精度、高速、网络化等方向发展. 结合位置、力矩、力、视觉等信息反馈, 柔顺控制、力位混合控制、视觉伺服控制等方法得到大量研究, 以适应高速、高精度、

收稿日期 2013-05-20 录用日期 2013-05-24
Manuscript received May 20, 2013; accepted May 24, 2013
国家自然科学基金 (61273337, 51175496) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61273337, 51175496)

本文为黄琳院士约稿

Recommended by Academician HUANG Lin

1. 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室 北京 100190

1. State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

智能化作业的需求。利用网络技术,工业机器人不仅简化了系统结构,同时也实现了协同作业。例如, FANUC 公司的并联六轴结构的机器人 3iA 具有很高的柔性,集成 iRVision 视觉系统、Force Sensing 力觉系统、Robot Link 通信系统和 Collision Guard 碰撞保护系统等多个智能功能,可对工件进行快速识别,利用视觉跟踪系统引导完成作业。在工业机器人研究中,国内很多大学和研究机构,如哈尔滨工业大学、中国科学院沈阳自动化研究所、中国科学院自动化研究所、清华大学、北京航空航天大学、上海交通大学、天津大学、南开大学、华南理工大学、湖南大学、上海大学等^[7-9],开展了大量工作,在机构、驱动和控制等方面取得了丰富成果,为国内机器人产业的发展奠定了技术基础。而随着国内工业机器人的需求越来越迫切,沈阳新松机器人自动化公司、哈尔滨工业大学博实公司、广州数控设备有限公司、上海沃迪公司、奇瑞公司等企业也在工业机器人产业方面也不断发展壮大。

1.2 移动机器人

移动机器人的应用广泛,覆盖了地面、空中和水中,乃至外太空。下面简要介绍地面移动机器人中的轮式/履带式、腿足式和仿人形机器人,以及水下机器人和飞行机器人的一些研究进展。由于外星探索机器人工作环境特殊,因此也对其研究现状进行简要介绍。

1.2.1 轮式/履带式移动机器人

轮式/履带式移动机器人主要有智能轮椅、导游机器人、野外侦查机器人,以及大型智能车辆等,其定位、运动规划、自主控制、服务作业等技术和方法也得到广泛研究。

机器人利用航迹推算、计算机视觉^[10]、路标识别、无线定位、SLAM^[5,11]等技术进行定位;基于地图完成机器人运动路径的规划和运动控制;结合语音识别、图像识别,实现友好的人机交互,提供引导、解说、物品递送等服务。为家庭、老人、残障人服务的,具有单臂或多臂的移动机器人研究得到重视。Willow Garage 公司的 PR2 机器人,具有全向移动功能、双机械臂和夹持器、立体视觉和激光测距系统,夹持器上装有视觉传感器和力觉传感器阵列,通过视觉和力觉的感知、运动规划与控制,已实现打开冰箱、拿取不同物品等作业。日本物理与化学研究所(Institute of Physical and Chemical Research)开发的双臂服务机器人 RIBA,重 180 公斤,机械臂上由触觉传感器覆盖,并可通过触觉感知护理人员的引导信息、协助其抱起并移动 61 公斤重的患者^[12]。美国匹兹堡大学也研制了带有机械臂的智能

轮椅 PerMMA^[13]。

在野外探测、危险作业中,轮式/履带式移动机器人受复杂的地形、天气等不确定因素的影响,在自主控制、环境适应方面面临巨大挑战。美国卡内基梅隆大学利用 Nomad 机器人在南极冰盖完成了自主搜索陨石作业^[14],研制了重 3.6 吨、高 1.2 m 的六轮无人作战车辆 Crusher,实现了通过 1.8 m 的障碍或深沟^[15]。斯坦福大学研制的无人车“斯坦利”集成了激光测距仪、摄像头、GPS 等多种传感器,设计了道路与路面识别、路径规划、速度和转向控制等算法,在加利福尼亚和内华达州之间的莫哈维沙漠实现自主行驶 6 小时 53 分钟,行程 200 km^[16]。美国卡内基梅隆大学设计的无人车实现了识别不同道路交通标识,按交通规则行驶^[17]。Google 公司也开发无人驾驶汽车,最新报道介绍其无人驾驶汽车已累计驾驶 30 万英里。

国内在轮式/履带式移动机器人方面开展了大量工作。哈尔滨工业大学、中国科学院沈阳自动化研究所、中国科学院自动化研究所、上海交通大学、北京航空航天大学、北京理工大学、清华大学、中国科学院深圳先进技术研究院、华中科技大学等单位开发了多种轮式/履带式移动机器人,如智能轮椅、可变形机器人、复合结构机器人等,开展了环境建模、避障路径规划、识别语音命令、人机对话、路标识别定位、作业臂抓取、多机协作等方法研究^[18-25]。国防科学技术大学、清华大学、中国科学院合肥智能科学研究所、南京理工大学、浙江大学等单位在无人车自动驾驶方面都开展了大量研究和研制工作^[26-27]。国防科学技术大学研制的 HQ3 无人车实现了行驶、变线、超车等自主控制,完成了 286 km 的高速公路无人驾驶。

1.2.2 腿足式移动机器人

腿足式移动机器人是模仿哺乳动物、昆虫、两栖动物等的腿足结构和运动方式而设计的机器人系统,研究包括系统设计、步态规划、稳定性等方面。卡内基梅隆大学在 1986 年研制出具有简单腿结构的液压驱动四足机器人^[28]。由于当时腿足式机器人的液压系统在尺寸、重量、性能、控制和便携动力源等方面存在较大困难,因此,此后的大部分研究工作中,四足机器人、仿昆虫多足机器人等多采用电机驱动方式。但电机直接驱动的机器人存在负重比较低、动态响应性能差、抗冲击能力弱等问题。2006 年,波士顿动力公司研制了新型液压驱动四足仿生机器人 BigDog,该机器人可负载 150 公斤,行走 20 km,负载能力高、环境适应性好、行走速度快、续航能力强^[29]。此后,该公司研制的液压四足机器人 AlphaDog 的抵抗侧向冲击、负重、环境适应性

和运动范围等性能得到进一步提高, 研制的液压四足机器人 Cheetah 实现了约 29 km/h 的奔跑. 韩国工业技术研究院研制了一种液压马达驱动的四足机器人. 意大利技术研究院研制了电、液混合驱动四足机器人 HyQ.

国内研制的腿足式移动机器人, 多以电机为主要驱动方式, 在四足、六足、八足等机器人机构设计、运动规划、控制方面开展了大量工作, 如清华大学、华中科技大学、中国科学院沈阳自动化研究所、哈尔滨工业大学等. 山东大学研制了液压驱动四足机器人实验样机, 实现了 Trot 动步态行走, 最高速度达到了 1.8 m/s^[30]. 北京理工大学、哈尔滨工业大学、国防科学技术大学、上海交通大学、北京邮电大学和南京航空航天大学等单位也在液压驱动四足仿生机器人研发方面开展了大量工作^[31].

1.2.3 仿人机器人

仿人机器人研究主要集中于步态生成、动态稳定控制和机器人设计等方面. 步态生成有离线生成方法和在线生成方法. 离线生成方法为预先规划的数据用于在线控制, 可完成如行走、舞蹈等动作^[32], 但无法适应环境变化; 在线规划则实时调整步态规划、确定各关节的期望角. 在稳定性控制方面, 零力矩点 (Zero moment point, ZMP) 方法^[33] 虽广泛应用, 但该方法仅适合于平面情况.

日本本田公司研制的仿人机器人 ASIMO, 高 1.3 m, 行走速度达 6 km/h^[34], 可完成“8”字形行走、上下台阶、弯腰等动作, 还可与人握手、挥手、语音对话, 识别出人和物体等. 日本川田公司的仿人机器人 HRP-2 高 1.5 m^[35], 可模仿人的舞蹈动作. 索尼公司开发了 0.6 m 高的小型娱乐仿人机器人 QIRO. Aldebaran Robotics 公司开发的用于教学和科研、高 0.57 m 的小仿人机器人 Nao, 集成了视觉、听觉、压力、红外、声纳、接触等传感器, 可用于控制、人工智能等研究^[36]. 此外, 值得关注的是波士顿动力公司在液压四足仿生机器人基础上开发的液压驱动双足步行机器人 Petman, 其行走过程显示出良好的柔性和抗外力干扰性, 可完成上下台阶、俯卧撑等动作^[37].

国内在仿人机器人方面也开展了大量工作. 国防科学技术大学研制开发了 KDW 系列双足机器人, 研制了仿人机器人“先行者”. 北京理工大学研制的 BRH 系列仿人机器人, 高 1.58 m, 32 个自由度, 行走速度 1 km/h, 实现了太极拳表演、刀术表演、腾空行走等复杂动作. 哈尔滨工业大学研制开发了 HIT 系列双足步行机器人. 清华大学研制开发了仿人机器人 THBIP-I. 在小型仿人机器人方面, 哈尔滨工业大学等单位开展了大量研究和研制工作. 北京理

工大学与中国科学院自动化研究所、南开大学等单位合作开展了乒乓球的高速识别与轨迹预测等关键技术研究, 实现了两台仿人机器人、人与机器人的多回合乒乓球对打^[38]. 浙江大学等单位研制的仿人机器人也实现了仿人机器人、人与机器人的乒乓球对打^[39].

1.2.4 外星探索机器人

外星探索机器人是在地外行星上完成勘测作业的移动机器人, 极端的环境下的可靠控制是其面临的严峻挑战^[40-41]. 美国开发的用于火星探测的移动机器人“探路者”、“勇气号”、“机遇号”和“好奇号”都成功登陆火星开展科研探测. 其中“好奇号”火星车采用了六轮独立驱动结构, 长 3 m, 宽 2.7 m, 高 2.2 m, 自重 900 公斤, 具有一个 2.2 m 的作业臂和摄像头等多种探测设备, 在 45 度倾角状态下不会倾翻, 最高速度 4 cm/s. 不同于以往火星车采用太阳能供电, “好奇号”采用核电池供电, 使系统续航能力得到极大提升.

我国在外星探索机器人方面经长期努力也取得了丰富的成果. 在外星探索机器人方面, 哈尔滨工业大学^[42]、北京航空航天大学等开展了相关研究工作研究了空间作业臂, 哈尔滨工业大学研制了两轮并列式、6 轮摇臂-转向架式、行星轮式等多种型号的月球车样车, 并搭载太阳能帆板、相机桅杆、定向天线、全向天线、前后避障相机等设备^[43]. 中国科学院沈阳自动化研究所^[44]、北京航空航天大学、清华大学、上海交通大学、国防科学技术大学、复旦大学等单位都开展了相关研究, 并研制了各具特色的月球车原理样机.

1.2.5 水下机器人

水下机器人, 包括远程操作水下机器人和自治水下机器人, 在军事、水下观测、水下作业方面具有很大的应用价值^[45], 其研究工作集中在系统模型、环境感知、定位导航、以及欠驱动和全驱动的推进系统控制、稳定控制等方面. 远程操作水下机器人 (Remotely operated vehicle, ROV) 是通过拖缆与母船连接, 实现供能、通讯、遥控操纵, 可完成水下设备的安装、监控、部件替换, 水下探测等. 日本研制的装配有摄像头、声纳等传感器和双机械臂的、可深潜 11 000 m 的机器人 Kaiko, 实现了 10 911 m 深潜, 共完成 296 次深潜作业. 日本 JAMSTEC 研制了 ABISMO^[46] 并进行了深潜测试. 美国伍兹霍尔海洋研究所 (Woods Hole Oceanographic Institution, WHOI) 研制自治水下机器人 (Autonomous underwater vehicle, AUV) Nereus 完成了 10 902 m 的深潜探测. 该机器人不仅可以自主探测, 也可以拖

缆作为 ROV 使用. 目前, 对于水下机器人的容错控制、水下机器人载体和作业臂的协调控制、多水下机器人协作等方面的研究得到越来越多的关注. 如多个水下滑翔器协作的研究, 水下滑翔器通过控制机器人的比重和方向舵以高度节能的方式实现水下运动^[47], 多个水下滑翔器可以进行长时间、大范围的环境信息采集.

我国在水下机器人方面的研究也取得了丰富的成果. 中国科学院沈阳自动化研究所研制完成多种 ROV、AUV 水下机器人, 如自治水下机器人“CR-02”、智能型水下机器人“北极 ARV”、水下滑翔器等. 其中“北极 ARV”参与了 2008 年北极科考, 成功获取冰底形态、海冰厚度、海水盐度等数据. 哈尔滨工程大学等单位在水下机器人设计、控制、环境感知等方面开展了大量研究工作. 2012 年我国研制的“蛟龙号”载人潜水器成功下潜 7 062.68 m, 并利用机械臂完成水下标本采集.

1.2.6 飞行机器人

飞行机器人、无人机的研究和应用在近些年得到越来越多的重视^[48]. 美国研制开发了全球鹰、捕食者、扫描鹰等一系列军用固定翼无人机, 并在实战中完成了搜索、侦察和攻击任务; 研制了无人直升机 MQ-8 火力侦察兵, 可在海军舰船上的起飞和着舰. 美国波音公司的两架 X45A 无人机完成了编队飞行和协同攻击任务的模拟演练. 此外, 美国还在研制 X37B、X43 等新型高空高超声速无人飞行系统. 欧洲联合研制了无人战斗机 NEURON. 日本、以色列等国也研制开发了大量无人机系统.

国内北京航空航天大学、西北工业大学、南京航空航天大学、上海大学、中国科学院自动化研究所、华南理工大学、浙江大学、国防科学技术大学、上海交通大学等单位在固定翼飞行器、旋翼飞行器、飞艇等飞行机器人方面开展了大量工作. 北京航空航天大学研制了固定翼 wz-5 型无人机、“海鸥” M22 无人驾驶直升机、折叠投放微小型无人机等. 南京航空航天大学研制了 CK-1 无人机、西北工业大学研制了 ASN 系列无人机以及小型无人旋翼直升机等. 上海大学研制了旋翼无人直升机和无人飞艇. 中国科学院沈阳自动化研究所^[49]研制了多款旋翼无人直升机, 起飞重量可达 120 公斤, 有效载荷 40 公斤, 最大巡航速度每小时 100 km, 最长续航时间 4 小时. 总参 60 所研制的 Z-5 型无人直升机最大起飞重量 450 公斤, 可携带 60~100 公斤的各种装备连续飞行 3~6 小时. 武警工程学院研制了“天眼 2”无人驾驶直升机. 此外, 国内在高超声速飞行器控制方面也开展了很多工作^[50].

1.3 医疗与康复机器人

1.3.1 外科手术机器人

外科手术机器人系统可分为 3 类: 监控型、遥操作型和协作型. 监控型是由外科医生针对病人制定治疗程序, 在医生监控下由机器人完成手术. 遥操作型是由外科医生操纵控制手柄来遥控机器人完成手术. 协作型主要用于稳定外科医生使用的器械以便于完成高稳定性、高级度的外科手术. 第一例机器人辅助外科手术是由 Kwok 等在 1985 年完成, 利用工业机器人将固定装置稳定保持在患者头部附近以便于神经外科手术的钻孔和将组织取样针插入指定位置. 此后, 用于辅助外科手术的机器人系统 Probot、ROBODOC、AESOP、da Vinci、Zeus 相继开发并获得应用. 基于虚拟现实和机器人结合的远程外科手术技术也得到重视和研究. 目前, da Vinci 外科手术辅助机器人是其中比较成功的商用系统, 获得美国 FDA 认证, 可用于多种外科手术. da Vinci 系统是一个主从结构的系统, 医生通过摄像头传回的图像获取手术部位信息, 依靠踏板控制摄像头和手术器械、依靠主控手柄遥控机器臂动作来完成外科手术^[51-52]. 此外, Hansen Medical 公司的血管介入手术机器人使用了触觉主控制器、臂式从动系统和送管机构. Mazor 公司开发的脊柱外科手术机器人系统已完成多例骨科手术. Acrobot 公司研制的高精度外科手术机器人完成了膝关节外科手术. 约翰霍普金斯大学研制了眼科外科手术辅助机器人系统^[53].

国内在外科手术机器人领域的研究工作也发展迅速. 北京航空航天大学与海军总医院合作研制开发了脑外科机器人系统, 并完成了多例脑外科立体定向远程遥操作手术^[54]; 与北京积水潭医院联合研制了骨科手术机器人系统, 并完成了长骨骨折髓内钉内固定远程遥操作手术; 与海军总医院、北京医院合作研制了心血管介入手术机器人. 天津大学研制了主从式遥操作结构、具有三维力传感器的显微外科手术机器人, 并成功地完成了动物实验. 中国科学院自动化研究所与上海胸科医院等单位合作研制了血管介入手术机器人, 并完成多例动物实验. 哈尔滨工业大学、北京理工大学、上海交通大学等也开展了不同类型医疗手术机器人系统的研究并开发了机器人系统^[55-56].

1.3.2 康复与助力机器人

机器人技术用于辅助病人康复、生活自理的研究工作很早就已经开展. 近些年来, 康复机器人、助力机器人方面的研究取得了较大进展.

针对中风、脊髓损伤病人的上肢、下肢、手腕、

手指、脚踝等肢体的康复, 国内外已研究和开发了很多不同类型的康复机器人, 部分已经商品化应用. 手臂康复治疗机器人有美国 MIT 大学开发的 MIT-Manus, 加利福尼亚大学研制的 ARM Guide 和 T-WREX, 此外, 还有 HWARD、Gentle/G、RUPERT 等手臂辅助康复系统. Hocoma 公司研制了下肢康复机器人 Lokomat 由支撑部分、机器人步态校正器和跑步机等几部分组成, 用于增强病人的行走功能. 类似的康复机器人系统还包括 LokoHelp、ReoAmbulator、ARTHUR、ALEX、LOPES 等. 对于瘫痪患者康复的机器人系统主要是通过辅助肢体运动达到锻炼肌肉、增强耐受力、关节灵活性和运动协调性. Swortec SA 公司开发的康复机器人 MotionMaker, 能够依据实时传感信息控制康复训练并配合电刺激以满足治疗需要, 临床实验显示系统效果良好. 用于足踝、膝盖等康复的机器人, 如 Rutgers Ankle、IIT-HPARR、AKROD、Leg-Robot、NUVABAT、PGO、PAGO、Anklebot、MIT-AAFO 等^[57]. 早期的康复机器人一般采用比例反馈的位置控制方法. 目前, 基于时间、受力、跟踪误差、肢体速度或体表肌电等信号反馈, 阻抗控制、自适应控制等方法已在康复机器人上应用. 康复运动的轨迹规划也有很多研究工作, 如模仿正常步态进行规划、依据健全肢体的运动进行规划等^[58].

针对老人、残障人辅助运动的动力机器外骨骼研究得到快速发展. 加利福尼亚大学伯克利机器人和人体工学实验室开发了穿戴式下肢骨骼负载器 BLEEX^[59] 以满足士兵的高机动性和大负重行军需要, 使用者可负重 70 公斤以 1.3 m/s 的速度行走. CYBERDYNE 公司和筑波大学开发的穿戴式动力外骨骼系统 HAL 系列^[57], 分为下肢型和全身型两种, 最新系统为 HAL5, 可辅助老人或残疾人行走、上楼梯、搬运物品. 类似系统的研究还有很多, 如美国 MIT 大学研制了 Leg exoskeleton、Yobotics 公司研制了 Roboknee 等^[60].

国内单位在康复机器人、助力机器人方面也开展相关科研工作. 清华大学、哈尔滨工业大学、北京航空航天大学、华中科技大学、东南大学等单位开展了各类不同功能的康复机器人研制工作. 哈尔滨工程大学研制了下肢康复机器人、手臂康复机器人等系统. 中国科学院自动化研究所研制了具有肌电图 (Electromyography, EMG) 信号采集和功能性电刺激的下肢康复辅助训练机器人. 中国科学院合肥智能机械研究所、华东理工大学、上海交通大学、哈尔滨工程大学、中国科学院沈阳自动化研究所等单位在助力机器人系统方面开展了研究和研制工作^[61].

1.4 生物启发的机器人系统——仿生机器人

随着机器人应用从工业领域向社会服务、环境勘测等领域的扩展, 机器人的作业环境从简单、固定、可预知的结构化环境变为复杂、动态、不确定的非结构化环境, 这就要求机器人研究在结构、感知、控制、智能等方面给出新方法以适应新环境、新任务、新需求. 因此, 很多学者从自然界寻找灵感, 从而提出解决新问题的新方法^[62]. 通过对生物结构和运动方式进行仿生是研究适应某种特定环境的机器人系统的基本方法之一, 如皮肤仿生、攀爬运动仿生等^[63-65].

由于鱼类运动的高效率、高机动、低噪声特点, 仿生鱼类运动方式的仿生机器鱼研究得到广泛的重视. 针对不同类型仿生鱼鳍的设计、建模和控制已开展了很多研究工作, 如 MIT 大学研制了机器鱼 RoboTuna 和 RoboPike, 大阪大学研制了胸鳍推进的机器鱼 BlackBass, 英国 Heriot-Watt 大学研究了波动鳍. 华盛顿大学、英国 Essex 大学在控制方面, 佛罗里达中心大学、日本名古屋大学、美国新墨西哥大学在微小型机器鱼方面, 美国西北大学、南洋理工大学、大阪大学在波动鳍推进方面都取得了很好的研究成果. 国内在仿鱼水下机器人研究方面也开展了大量工作. 北京航空航天大学^[66-67] 研制了 SPC 系列仿生机器鱼系统, 进行了湖试和海试, 完成了水下考古、环境监测等示范应用, 其中 SPC-3 UUV 体长 1.6 m, 巡航速度 1.12 m/s, 航程 70.7 km. 中国科学院自动化研究所研制了尾鳍推进和波动鳍推进的仿生机器鱼^[68-69], 实现了浮潜、倒游、定深、自主避障、快速启动、水平面和垂直面快速转向、多鱼协调等运动控制的实验验证, 并实现了仿生机器海豚的跃水运动. 国防科技大学在波动鳍仿生机器鱼方面开展大量研究, 研制了多种波动鳍推进的机器鱼系统. 哈尔滨工程大学、哈尔滨工业大学、中国科学技术大学、北京大学等单位也研制开发了仿生机器鱼系统并开展了很多研究工作.

此外, 蛇形机器人有东京工学院研制的 ACM R5、密西根大学研制的 OmniTread、挪威理工大学研制的 Kulko、卡内基梅隆大学研制的 Uncle Sam 等, 其中 Uncle Sam 实现了爬树运动^[70]. 仿生两栖机器人有瑞士洛桑联邦理工学院 (EPFL) 研制的 Salamandra、纽约瓦萨学院研制的 Madeline、加拿大约克大学等研制的 AQUA 机器人等. 仿生飞行器机器人有德国 Festo 公司研制的仿生鸟 Smartbird^[71]、多伦多大学研制的四翼扑翼飞机 Mentor、加州大学伯克利分校研制的飞行昆虫等. 美国东北大学研制的仿生机器龙虾. 南加州大学研制的自重构机器人 Conro 可自重构成蛇形、四足、履带等形状进行运

动。斯坦福大学在壁虎足部结构研究基础上研制了可攀爬墙壁的机器壁虎 Stickybot。名古屋大学机器人学实验室研制了仿生长臂猿机器人 Brachiator。国内在类似仿生机器人方面也有很多工作,如国防科技大学、中国科学院沈阳自动化研究所^[72]、上海交通大学、北京航空航天大学等单位研制了蛇形仿生机器人;哈尔滨工程大学研制了仿生机器螃蟹;中国科学院自动化研究所、中国科学院沈阳自动化研究所、北京航空航天大学等单位研制了水陆两栖机器人;西北工业大学、南京航空航天大学、北京航空航天大学等单位研制了扑翼飞行机器人;哈尔滨工业大学等单位研制了六足仿生机器人^[73]。

通过对生物内在感知、控制与决策机制的模仿是机器人控制和智能研究的重要方面。在仿人机器人、仿生机器鱼、四足机器人等研究中使用的神经网络模型、中枢模式发生器 (Central pattern generator, CPG) 模型、各种学习机制等计算方法就是来源于对生物系统的模仿。而利用机器人来验证神经科学、脑科学中的假设和研究成果不仅促进了相关学科发展,也推进了机器人基础理论的研究,如欧盟研究项目 MirrorBot 和机器鼠 Psikharpax^[74]、圣迭哥的神科学研究所研究的 Brain-Based Devices^[75] 和机器人 Darwin。

通过向生物组织输入信号、提取生物组织输出信号实现机器人控制也有很多研究工作,如美国西北大学等单位的研究人员用七鳃鳗大脑保持平衡的部分来控制两轮 Khepera 机器人的运动^[76];神户大学和南安普顿大学的研究人员利用黏菌细胞控制六足机器人实现避光运动^[77];杜克大学等单位的研究人员利用检测到的恒河猴脑信号控制机械臂运动^[78]。利用嵌入式系统输出电脉冲信号来控制生物的运动,如美国 MIT 大学等单位利用电刺激控制由生物肌肉驱动的仿生机器鱼运动^[79]、加州大学等单位遥控由甲虫头部插入的电极输出信号控制甲虫飞行^[80]。国内也开展了类似的工作,如清华大学研究的脑机接口、南京航空航天大学的生物壁虎控制、山东科技大学的鸽子飞行控制等研究。

2 机器人技术发展趋势

通过分析已有的机器人技术研究工作,机器人技术的应用和研究显现出从工业领域快速向其他领域延伸扩展。而传统工业领域对作业性能提升的需求、其他领域的新需求,极大促进了机器人理论与技术的进一步发展。

在工业领域,工业机器人的应用已不再仅限于简单的动作重复。对于复杂作业需求,工业机器人的智能化、群体协调作业成为解决问题的关键;对于

高速度、高精度、重载荷的作业,工业机器人的动力学、运动学标定、力控制还有待深入研究;而机器人和操作员在重叠的工作空间合作作业问题,则对机器人结构设计、感知、控制等研究提出了确保人机协同作业安全的新要求。

在工业领域以外,机器人在医疗服务、野外勘测、深空深海探测、家庭服务和智能交通等领域都有广泛的应用前景。在这些领域,机器人需要在动态、未知、非结构化的复杂环境完成不同类型的作业任务,这就对机器人的环境适应性、环境感知、自主控制、人机交互提出了更高的要求。

1) 环境适应性。机器人的工作环境可以是室内、室外、火山、深海、太空,乃至地外星球,其复杂的地面或地形、不同的气压变化、巨大的温度变化、不同的辐照、不同的重力条件导致机器人的机构设计和控制方法必须进行针对性、适应性的设计。通过仿生手段研究具有飞行、奔跑、跳跃、爬行、游动等不同运动能力的、适应不同环境条件的机器人机构和控制方法对于提高机器人的环境适应性具有重要的理论价值。

2) 环境感知。面对动态变化、未知、复杂的外部环境,机器人对环境的准确感知是进行决策和控制的基础。感知信息的融合、环境建模、环境理解、学习机制是环境感知研究的重要内容。

3) 自主控制。面对动态变化的外部环境,机器人必须依据既定作业任务和感知结果利用内建算法进行规划、决策和控制,以达到最终目标。在无人干预或大延迟无法人为干预的情况下,自主控制可以确保机器人规避危险、完成既定任务。

4) 人机交互。人机交互对于提升机器人作业能力、满足复杂的作业任务需求具有重要作用。实时作业环境的三维建模,听觉、视觉、力觉、触觉等多种人机交互的实现方式、人机交互中的安全控制等都是人机交互中的重要研究内容。

针对上述问题的研究,通过与仿生学、神经科学、脑科学,以及互联网技术的结合,可能将加速机器人理论、方法和技术研究工作的进展。

机器人技术与仿生学的结合,不仅可以促进高适应性的机器人结构设计方法的研究,对于机器人的感知、控制与决策方法的研究也能够提供有力的支持。

机器人学与神经科学、脑科学的结合,将使得人-机器人间的应用接口更加方便,通过神经信号控制智能假肢、外骨骼机器人或远程遥操控机器人系统,利用生物细胞来提升机器人的智能,为机器人研究提供了新的思路。

机器人学与互联网技术的结合,使机器人可以

通过互联网获取海量的知识, 基于云计算、智能空间等技术辅助机器人的感知和决策, 将极大提升机器人的系统性能.

3 结论

机器人技术的研究和应用已从传统的工业领域快速扩展到其他领域, 如医疗康复、家政服务、外星探索、勘测勘探等. 而无论是传统的工业领域还是其他领域, 对机器人性能要求的不断提高, 使机器人必须面对更极端的环境、完成更复杂的任务, 因而, 也为机器人研究提供了新的动力. 在概述工业机器人、移动机器人、医疗康复机器人和仿生机器人的主要研究进展基础上, 分析归纳了环境适应性、感知、自主控制、人机交互等机器人研究的主要问题, 并探讨了仿生学、神经科学、互联网等研究与机器人研究相结合的趋势.

References

- Xu Yang-Sheng. Intelligent robots leading high-tech development. *China Science Daily*, August 12, 2010 (徐扬生. 智能机器人引领高新技术发展. *科学时报*, 2010-08-12)
- Stephan K D, Michael K, Michael M G, Jacob L, Anesta E P. Social implications of technology: the past, the present, and the future. *Proceedings of the IEEE*, 2012, **100** (Special Centennial Issue): 1752–1781
- McCarthy N. Autonomous Systems: Social, Legal and Ethical Issues, Technical Report, ISBN: 1903496489, Royal Academy of Engineering, 2009
- Huang Yong-An, Xiong Cai-Hua, Xiong You-Lun. Research status and development trends of intelligent robot and application. *International Academic Developments*, 2009, (4): 38–39 (黄永安, 熊蔡华, 熊有伦. 智能机器人与应用的现状与发展趋势. *国际学术动态*, 2009, (4): 38–39)
- Garcia E, Jimenez M A, De Santos P G, Armada M. The evolution of robotics research — from industrial robotics to field and service robotics. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2007, **14**(1): 90–103
- Tan Min, Xu De, Hou Zeng-Guang, Wang Shuo, Cao Zhi-Qiang. *Advanced Robot Control*. Beijing: Higher Education Press, 2007 (谭民, 徐德, 侯增广, 王硕, 曹志强. 先进机器人控制. 北京: 高等教育出版社, 2007)
- Wang Tian-Ran, Qu Dao-Kui. Open system architecture for control system for industrial robot. *Robot*, 2002, **24**(3): 256–261 (王天然, 曲道奎. 工业机器人控制系统的开放体系结构. *机器人*, 2002, **24**(3): 256–261)
- Sun Tian-Hui, Tian Wen-Jie, Wang Hui, Huang Tian. Kinematic calibration of 3-DOF spindle head using double-ball bar. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, **48**(5): 22–27 (孙天慧, 田文杰, 王辉, 黄田. 基于球杆仪的三坐标并联动力头运动学标定方法. *机械工程学报*, 2012, **48**(5): 22–27)
- Lv Hong-Bo, Song Yi-Xu, Jia Pei-Fa. Incorporation of prior knowledge in adaptive learning for modeling the robotic profile grinding. *Robot*, 2011, **33**(6): 641–648 (吕洪波, 宋亦旭, 贾培发. 机器人修磨中融合先验知识的适应学习建模方法. *机器人*, 2011, **33**(6): 641–648)
- Ma Song-De, Zhang Zheng-You. *Computer Vision: Computation Theory and Primary Algorithms*. Beijing: Science Press, 2003 (马颂德, 张正友. 计算机视觉: 计算理论与算法基础. 北京: 科学出版社, 2003)
- Zhu Ji-Hua, Zheng Nan-Ning, Yuan Ze-Jian, Zhang Qiang. A SLAM algorithm based on central difference particle filter. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(2): 249–257 (祝继华, 郑南宁, 袁泽剑, 张强. 基于中心差分粒子滤波的 SLAM 算法. *自动化学报*, 2010, **36**(2): 249–257)
- Mukai T, Nakashima H, Kato Y, Sakaida Y, Guo S, Hosoe S. Development of a nursing-care assistant robot RIBA that can lift a human in its arms. In: *Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Taipei, China: IEEE, 2010. 5996–6001
- Grindle G G, Wang H W, Salatin B A, Vazquez J J, Cooper R A. Design and development of the personal mobility and manipulation appliance. *Assistive Technology*, 2011, **23**(2): 81–92
- Wagner M D, Apostolopoulos D, Shillcutt K J, Shamah B, Simmons R G, Whittaker W. The science autonomy system of the nomad robot. In: *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Seoul, Korea: IEEE, 2001. 1742–1749
- Ross B, Bares J, Stager D, Jackel L, Perschbacher M. An advanced teleoperation testbed. *Field and Service Robotics*. Berlin: Springer, 2008. 297–304
- Thrun S, Montemerlo M, Dahlkamp H, Stavens D, Aron A, Diebel J, Fong P, Gale J, Halpenny M, Hoffmann G, Lau K, Oakley C, Palatucci M, Pratt V, Stang P, Strohband S, Dupont C, Jendrossek L E, Koelen C, Markey C, Rummel C, van Niekirk J, Jensen E, Alessandrini P, Bradski G, Davies B, Ettinger S, Kaehler A, Nefian A, Mahoney P. Stanley: the robot that won the DARPA grand challenge. *Journal of Field Robotics*, 2006, **23**(9): 661–692
- 2007 Darpa urban challenge [Online], available: <http://www.tartanracing.org/challenge.html>, May 26, 2013
- Zhou Bo, Dai Xian-Zhong, Han Jian-Da. Real-time 3D outdoor environment modeling for mobile robot with a laser scanner. *Robot*, 2012, **34**(3): 321–328, 336 (周波, 戴先中, 韩建达. 基于激光扫描的移动机器人 3D 室外环境实时建模. *机器人*, 2012, **34**(3): 321–328, 336)
- Li Lei, Ye Tao, Tan Min, Chen Xi-Jun. Present state and future development of mobile robot technology research. *Robot*, 2002, **24**(5): 475–480 (李磊, 叶涛, 谭民, 陈细军. 移动机器人技术研究现状与未来. *机器人*, 2002, **24**(5): 475–480)
- Yang Ming, Dong Bin, Wang Hong, Zhang Bo, Araújo H. Research on laser radar based real-time pose estimation for mobile robots. *Acta Automatica Sinica*, 2004, **30**(5): 679–687 (杨明, 董斌, 王宏, 张钺, Araújo H. 基于激光雷达的移动机器人实时位姿估计方法研究. *自动化学报*, 2004, **30**(5): 679–687)

- 21 Zhang Chun-Gang, Xi Yu-Geng. Sub-optimality analysis of mobile robot rolling path planning. *Science in China (Series E)*, 2002, **32**(5): 713–720
(张纯刚, 席裕庚. 移动机器人滚动路径规划的次优性分析. 中国科学 E 辑, 2002, **32**(5): 713–720)
- 22 Yuan Kui, Xiao Han, He Wen-Hao. Survey on machine vision systems based on FPGA. *Computer Engineering and Applications*, 2010, **46**(36): 1–6
(原魁, 肖晗, 何文浩. 采用 FPGA 的机器视觉系统发展现状与趋势. 计算机工程与应用, 2010, **46**(36): 1–6)
- 23 Zhang Feng, Shi Li-Min, Sun Feng-Mei, Hu Zhan-Yi. An image based 3D reconstruction system for large indoor scenes. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(5): 625–633
(张峰, 史利民, 孙凤梅, 胡占义. 一种基于图像的室内大场景自动三维重建系统. 自动化学报, 2010, **36**(5): 625–633)
- 24 Li Peng, Huang Xin-Han, Wang Min. Mobile robot map building with hybrid DS_m model. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2008, **36**(S1): 174–176
(李鹏, 黄心汉, 王敏. 混合 DS_m 模型的移动机器人地图构建. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2008, **36**(S1): 174–176)
- 25 Ren De-Hua, Lu Gui-Zhang. Thinking in formation control. *Control and Decision*, 2005, **20**(6): 601–606
(任德华, 卢桂章. 对队形控制的思考. 控制与决策, 2005, **20**(6): 601–606)
- 26 Chen Qing-Yang, Zhang Xiao-Bo, Sun Zhen-Ping, He Han-Gen. Trajectory planning for autonomous driving in unstructured environments. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2011, **42**(11): 3377–3383
(陈清阳, 张小波, 孙振平, 贺汉根. 非结构化环境下自主车辆轨迹规划方法. 中南大学学报 (自然科学版), 2011, **42**(11): 3377–3383)
- 27 Wang Hong-Peng, Yang Yun, Liu Jing-Tai. Research and development trend of high-speed mobile robot. *Automation & Instrumentation*, 2011, **26**(12): 1–4
(王鸿鹏, 杨云, 刘景泰. 高速移动机器人的研究现状与发展趋势. 自动化与仪表, 2011, **26**(12): 1–4)
- 28 Raibert M H. Legged robots. *Communications of the ACM*, 1986, **29**(6): 499–514
- 29 Raibert M H, Blankespoor K, Nelson G, Playter R, the Big-Dog Team. BigDog, the rough-terrain quadruped robot. In: Proceedings of the 17th World Congress of the International Federation of Automatic Control. Seoul, Korea: IFAC, 2008. 10822–10825
- 30 Li Yi-Bin, Li Bin, Rong Xue-Wen, Meng Jian. Mechanical design and gait planning of a hydraulically actuated quadruped bionic robot. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2011, **41**(5): 32–36, 45
(李贻斌, 李彬, 荣学文, 孟健. 液压驱动四足仿生机器人的结构设计和步态规划. 山东大学学报 (工学版), 2011, **41**(5): 32–36, 45)
- 31 Zhang Peng-Xiang, Liao Qi-Zheng, Wei Shi-Min, Guo Lei. The research of control system for quadruped robot with hydraulic actuate. *Chinese Hydraulics and Pneumatics*, 2011, (1): 29–31
(张鹏翔, 廖启征, 魏世民, 郭磊. 液压驱动的四足机器人控制系统研究. 液压与气动, 2011, (1): 29–31)
- 32 Huang Q, Kajita S, Kaneko K, Arai H, Koyachi N, Tanie K. Planning walking patterns for a biped robot. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2001, **17**(3): 280–289
- 33 Vukobratovic M, Frank A A, Juricic D. On the stability of biped locomotion. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 1970, **BME-17**(1): 25–36
- 34 ASIMO frequently asked questions [Online], available: <http://asimo.honda.com/downloads/pdf/asimo-technical-faq.pdf>, May 26, 2013
- 35 Kaneko K, Kanehiro F, Kajita S, Hirukawa H, Kawasaki T, Hirata M, Akachi K, Isozumi T. Humanoid robot HRP-2. In: Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation. New Orleans, LA: IEEE, 2004. 1083–1090
- 36 NAO datasheet [Online], available: <http://www.aldebaran-robotics.com/zh/Discover-NAO/datasheet.html>, May 26, 2013
- 37 PETMAN robot climbs stairs in new video from DARPA, Boston Dynamics [Online], available: http://www.huffingtonpost.com/2012/04/13/petman-robot-stairs-darpa_n_1423488.html#s649482, May 26, 2013
- 38 Xiao Tao, Huang Qiang, Yang Jie, Yu Zhang-Guo, Zhang Wei-Min. Research on pushing operation by humanoid robot under certain hand manipulation trajectory. *Robot*, 2008, **30**(5): 385–391
(肖涛, 黄强, 杨洁, 余张国, 张伟民. 给定手部作业轨迹的仿人机器人推操作研究. 机器人, 2008, **30**(5): 385–391)
- 39 Tang Qing, Xiong Rong, Chu Jian. Stable biped walking based on linear search optimization algorithm. *Control Theory and Applications*, 2008, **25**(4): 661–664, 676
(汤卿, 熊蓉, 褚健. 基于最优线性搜索的稳定步态规划方法. 控制理论与应用, 2008, **25**(4): 661–664, 676)
- 40 Yoshida K. Achievements in space robotics. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2009, **16**(4): 20–28
- 41 Wang Yong, Xie Yuan, Zhou Jian-Liang. A research survey on teleoperation of space robot through time delay. *Journal of Astronautics*, 2010, **31**(2): 299–306
(王永, 谢圆, 周建亮. 空间机器人时延遥操作技术研究综述. 宇航学报, 2010, **31**(2): 299–306)
- 42 Jie Dang-Yang, Ni Feng-Lei, Tan Yi-Song, Liu Hong, Cai He-Gao. Development of a highly integrated large space end effector. *Chinese High Technology Letters*, 2012, **22**(2): 186–191
(介党阳, 倪风雷, 谭益松, 刘宏, 蔡鹤皋. 高集成度空间大型末端执行器的研制. 高技术通讯, 2012, **22**(2): 186–191)
- 43 Deng Zong-Quan, Fan Xue-Bing, Gao Hai-Bo, Ding Liang. Review and key techniques for locomotive system of manned lunar rovers. *Journal of Astronautics*, 2012, **33**(6): 675–689
(邓宗全, 范雪兵, 高海波, 丁亮. 载人月球车移动系统综述及关键技术分析. 宇航学报, 2012, **33**(6): 675–689)
- 44 Chang Yong, Wang Hong-Guang, Ma Shu-Gen, Tan Da-Long. Optimal design of lunar rovers “Rocker-Bogie” suspension. *Journal of Machine Design*, 2010, **27**(6): 64–70
(常勇, 王洪光, 马书根, 谈大龙. 月球车六轮摇臂转向架的优化设计. 机械设计, 2010, **27**(6): 64–70)
- 45 Feng Xi-Sheng, Li Yi-Ping, Xu Hong-Li. The next generation of unmanned marine vehicles dedicated to the 50 anniversary of the human world record diving 10912 m. *Robot*, 2011, **33**(1): 113–118

- (封锡盛, 李一平, 徐红丽. 下一代海洋机器人 — 写在人类创造下潜深度世界记录 10912 米 50 周年之际. *机器人*, 2011, **33**(1): 113–118)
- 46 The Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology. The automatic bottom inspection and sampling mobile “ABISMO” succeeds to dive to a depth of 9707 m at the actual test diving [Online], available: http://www.jamstec.go.jp/e/about/press_release/20071218/, May 27, 2013
- 47 Rudnick D L, Davis R E, Eriksen C C, Fratantoni D M, Perry M J. Underwater gliders for ocean research. *Marine Technology Society Journal*, 2004, **38**(2): 73–84
- 48 Ma Ling, Zhu Ai-Ping. Review of development of shipboard UAV. *Winged Missiles Journal*, 2009, (11): 36–41
(马凌, 朱爱平. 舰载无人机发展综述. *飞航导弹*, 2009, (11): 36–41)
- 49 Qi Jun-Tong, Han Jian-Da. Adaptive UKF and its application in fault tolerant control of rotorcraft unmanned aerial vehicle. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, **45**(4): 115–124
(齐俊桐, 韩建达. 基于 MIT 规则的自适应 Unscented 卡尔曼滤波及其在旋翼飞行器容错控制的应用. *机械工程学报*, 2009, **45**(4): 115–124)
- 50 Huang Lin, Duan Zhi-Sheng, Yang Ying. Several problems on control of modern aircraft. *Science and Technology Review*, 2008, **26**(20): 92–98
(黄琳, 段志生, 杨莹. 现代飞行器控制的几个科学问题. *科技导报*, 2008, **26**(20): 92–98)
- 51 Robotic Surgery [Online], available: http://biomed.brown.edu/Courses/BI108/BI108_2005_Groups/04/index.html, May 27, 2013
- 52 Albani J M. The role of robotics in surgery: a review. *Misouri Medicine*, 2007, **104**(2): 166–172
- 53 Davies B. Robot and computer assisted surgery — engineering better health [Online], available: http://www.raeng.org.uk/events/pdf/Engineering_Better_Health/Brian_Davies.pdf, May 27, 2013
- 54 Tian Zeng-Min, Lu Wang-Sheng, Wang Tian-Miao, Liu Da, Chen Yan, Zhang Guo-Lai, Zhao Quan-Jun, Bai Mang-Mang, Yin Feng. Clinical application of robotic telemanipulation system in stereotactic surgery. *Chinese Journal of Surgery*, 2007, **45**(24): 1679–1681
(田增民, 卢旺盛, 王田苗, 刘达, 陈延, 张国来, 赵全军, 白茫茫, 尹丰. 遥操作脑立体定向手术的临床初步应用. *中华外科杂志*, 2007, **45**(24): 1679–1681)
- 55 Hu Hai-Yan, Sun Li-Ning, Li Man-Tian, Xiao Tao. Multi-motor control system of a continuum robot for colonoscopy. *Micromotors*, 2011, **44**(8): 32–35
(胡海燕, 孙立宁, 李满天, 肖涛. 连续型结肠镜机器人多电机控制系统设计. *微电机*, 2011, **44**(8): 32–35)
- 56 Fu Yi-Li, Gao An-Zhu, Liu Hao, Li Kai, Wang Shu-Guo. Master-slave intervention of robotic catheter system. *Robot*, 2011, **33**(5): 579–584, 591
(付宜利, 高安柱, 刘浩, 李凯, 王树国. 导管机器人系统的主从介入. *机器人*, 2011, **33**(5): 579–584, 591)
- 57 Díaz I, Gil J J, Sánchez E. Lower-limb robotic rehabilitation: literature review and challenges. *Journal of Robotics*, 2011, **2011**: 759764
- 58 Marchal-Crespo L, Reinkensmeyer D J. Review of control strategies for robotic movement training after neurologic injury. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2009, **6**: 20
- 59 Chu A, Kazerooni H, Zoss A. On the biomimetic design of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX). In: Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Barcelona, Spain: IEEE, 2005. 4345–4352
- 60 Pratt J E, Krupp B T, Morse C J, Collins S H. The RoboKnee: an exoskeleton for enhancing strength and endurance during walking. In: Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation. New Orleans, LA: IEEE, 2004. 2430–2435
- 61 Ping Wei, Dun Xiang-Ming, Chen Wei-Dong. The general overview of research on assistant robot. *Mechatronics*, 2010, **16**(1): 17–19, 33
(平伟, 顿向明, 陈卫东. 助行机器人研究现状和展望. *机电一体化*, 2010, **16**(1): 17–19, 33)
- 62 Bruno S, Oussama K. *Handbook of Robotics*. Berlin: Springer, 2008
- 63 Huang Ying, Lu Wei, Zhao Xiao-Wen, Lian Chao, Ge Yun-Jian. Design and experiment of flexible multi-functional tactile sensors for robot skin. *Robot*, 2011, **33**(3): 347–353, 359
(黄英, 陆伟, 赵小文, 廉超, 葛运建. 用于机器人皮肤的柔性多功能触觉传感器设计与实验. *机器人*, 2011, **33**(3): 347–353, 359)
- 64 Xu Cao, Zhang Ya-Nan, Shen Lin-Yong, Xu Jie-Min, Gong Zhen-Bang. Automatic insertion system for a searching and rescuing robot in ruins. *Mechanical and Electrical Engineering Magazine*, 2010, **27**(11): 110–114
(徐草, 章亚男, 沈林勇, 徐解民, 龚振邦. 废墟狭缝搜救机器人自动送进系统研究. *机电工程*, 2010, **27**(11): 110–114)
- 65 Wang Yao-Nan, Wei Shu-Ning, Yin Feng, Yang Yi-Min, Tan Lei, Cao Wen-Ming. Review on key technology of de-icing robot running on overhead transmission line. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, **47**(23): 30–38
(王耀南, 魏书宁, 印峰, 杨易旻, 谭磊, 曹文明. 输电线路除冰机器人关键技术综述. *机械工程学报*, 2011, **47**(23): 30–38)
- 66 Su Bai-Quan, Wang Tian-Miao, Liang Jian-Hong, Li Ping. Parallel mechanism design on biomimetic tail fin propulsion. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, **45**(2): 88–93
(苏柏泉, 王田苗, 梁建宏, 李平. 仿生鱼尾鳍推进并联机构设计. *机械工程学报*, 2009, **45**(2): 88–93)
- 67 Wang T M, Wen L, Liang J H, Wu G H. Fuzzy vorticity control of a biomimetic robotic fish using a flapping lunate tail. *Journal of Bionic Engineering*, 2010, **7**(1): 56–65
- 68 Shang L J, Wang S, Tan M, Cheng L. Swimming locomotion modeling for biomimetic underwater vehicle with two undulating long-fins. *Robotica*, 2012, **30**(6): 913–923
- 69 Yu J Z, Tan M, Wang S, Chen E K. Development of a biomimetic robotic fish and its control algorithm. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics — Part B: Cybernetics*, 2004, **34**(4): 1798–1810
- 70 Liljebäck P, Pettersen K Y, Stavadahl Ø, Gravdahl J T. A review on modelling, implementation, and control of snake robots. *Robotics and Autonomous systems*, 2012, **60**(1): 29–40

- 71 Festo. SmartBird [Online], available: http://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/46270/Brosch_SmartBird_en.Ss.RZ_300311.lo.pdf, May 27, 2013
- 72 Lu Zhen-Li, Ma Shu-Gen, Li Bin, Wang Yue-Chao. 3-dimensional locomotion of a snake-like robot controlled by cyclic inhibitory CPG model. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(1): 54–58
(卢振利, 马书根, 李斌, 王越超. 基于循环抑制 CPG 模型控制的蛇形机器人三维运动. *自动化学报*, 2007, **33**(1): 54–58)
- 73 Zhao Jie, Zhang He, Liu Yu-Bin, Chen Fu. Development and walking experiment of hexapod robot HITCR-I. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2012, **40**(12): 17–23
(赵杰, 张赫, 刘玉斌, 陈甫. 六足机器人 HITCR-I 的研制及步行实验. *华南理工大学学报 (自然科学版)*, 2012, **40**(12): 17–23)
- 74 Schaal S, Ijspeert A, Billard A, Vijayakumar S, Meyer J. State of the artificial rat psikharpax. *From Animals to Animats 8: Proceedings of the 8th International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. Cambridge, MA: MIT Press, 2004. 3–12
- 75 Edelman G M. Learning in and from brain-based devices. *Science*, 2007, **318**(5853): 1103–1105
- 76 Fleming K M, Reger B D, Sanguineti V, Alford S, Mussa-Ivaldi F A. Connecting brains to robots: an artificial animal for the study of learning in vertebrate nervous systems. *From Animals to Animats 6: Proceedings of the 6th International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. Cambridge, MA: MIT Press, 2000. 61–70
- 77 Tsuda S, Zauner K P, Gunji Y P. Robot control: from silicon circuitry to cells. *Biologically Inspired Approaches to Advanced Information Technology*. Berlin: Springer, 2006. 20–32
- 78 Lebedev M A, Carmena J M, O'Doherty J E, Zakszenhouse M, Henriquez C S, Principe J C, Nicolelis M A L. Cortical ensemble adaptation to represent velocity of an artificial actuator controlled by a brain-machine interface. *The Journal of Neuroscience*, 2005, **25**(19): 4681–4693
- 79 Herr H, Dennis R G. A swimming robot actuated by living muscle tissue. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2004, **1**: 6
- 80 Sato H, Peeri Y, Baghoomian E, Berry C W, Maharbiz M M. Radio-controlled cyborg beetles: a radio-frequency system for insect neural flight control. In: *Proceedings of the 22nd IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*. Sorrento: IEEE, 2009. 216–219



谭 民 中国科学院自动化研究所研究员。1986 年获清华大学学士学位, 1990 年获中国科学院自动化研究所博士学位。主要研究方向为机器人学, 智能控制系统。E-mail: min.tan@ia.ac.cn

(TAN Min Professor at the State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute

of Automation, Chinese Academy of Sciences. He received his bachelor degree from Tsinghua University in 1986 and his Ph.D. degree from the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences in 1990. His research interest covers robotics and intelligent control systems.)



王 硕 中国科学院自动化研究所研究员。2001 年获中国科学院自动化研究所博士学位。主要研究方向为仿生机器人, 多机器人系统。本文通信作者。

E-mail: shuo.wang@ia.ac.cn

(WANG Shuo Professor at the State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute

of Automation, Chinese Academy of Sciences. He received his Ph.D. degree from the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences in 2001. His research interest covers biomimetic robot and multi-robot system. Corresponding author of this paper.)