

文章编号: 1002-0446(2005)02-0187-06

生物机器人的研究现状及其未来发展*

郭策¹, 戴振东¹, 孙久荣²

(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. 北京大学生命科学学院, 北京 100871)

摘要: 介绍了生物机器人与一般仿生机器人相比的主要优点及其应用前景, 对国内外生物机器人的研制工作做了综述, 并对未来的研究方向和工作重点作出了展望。

关键词: 生物机器人; 运动制导; 神经控制; 电极刺激

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

Current Status and Prospect of Research on Bio-robots

GUO Ce¹, DAI Zhen-dong¹, SUN Jiu-rong²

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

2. College of Life Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The application prospects and the main merits of bio-robots compared with biomimetic robots are introduced. With the discussion of the current status at home and abroad, the developing directions and emphasis of the research are forecasted.

Keywords: bio-robot; motion guidance; neuro-control; electrode stimulation

1 引言 (Introduction)

生物机器人是指利用动物体的运动机能、动力供应体制, 从动物运动的感受传入或神经支配入手, 实现对动物的运动和某些行为的人为控制, 从而利用动物特长代替人类完成人所不能和人所不敢的特殊任务。利用生物控制技术研制生物机器人始于上世纪 90 年代, 是电子信息技术、微制造技术和生物学高度发展与相互融合的产物, 是目前科技发展最活跃的领域之一。

自从仿生机器人诞生以来, 对工业生产、民用事业和国防科技等各方面都产生了深远的影响。而生物机器人在能源供给、运动灵活性、隐蔽性、机动性和适应性方面较机器人(或仿生机器人)具有更明显的优势。因而, 可广泛应用在反恐、侦查、定点清除、危险环境搜救以及狭小空间检测等各方面。目前, 世界上许多发达国家都纷纷投入了大量人力、物力、财力开展生物机器人的研制工作, 如日本政府早在 1995 年就决定投入 500 万美元, 资助日本东京大学的 Isao Shimoyama 教授研究蟑螂的生物控制技术^[1]。

另据最新报道, 美国 DARPA(国防部高级研究计划局)目前决定投资 2400 万美元, 资助美国国内 6 大实验室以老鼠、猿猴为研究对象, 进行有控制的生物系统计划 (the Controlled Biological Systems Program)^[2]。

2 生物机器人的应用前景 (Application prospect of bio-robots)

2.1 反恐安全方面的需求

9.11 事件之后世界各国均面临反恐斗争的严峻挑战。随着我国在国际事务中地位的不不断提升, 未来我国反恐安全的需要更加迫切。因此, 包括我国在内的世界各国在反恐装备研制方面均给予了高度重视。目前, 从生物体系获得灵感, 研制微小型生物机器人, 解决反恐面临的问题已成为国内外的研究热点, 利用这种生物机器人可以追踪、监视恐怖分子的活动和预警, 必要时还可先发制人, 遏制恐怖企图, 解救人质。

* 基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2002AA423230); 国家自然科学基金资助项目 (90205014); 国家青年科学基金资助项目 (30400086)。

收稿日期: 2004 - 05 - 15

2.2 安全保卫方面的需求

目前针对 VIP(非常重要人员)的安全保卫,需要对其活动的场所及其周边的各种可能通道做出检查.其中狭小空间的检测多数选用身材瘦小的侦察员来完成.这种方法对人员素质要求高,而且工作环境恶劣,效率低.而生物机器人形体小,速度快,可以方便地代替人类完成狭小空间(如大楼管道系统、中央空调的管道系统等)侦查任务.

2.3 从事复杂危险环境下搜救的需求

对复杂危险环境(如倒塌建筑物内)的搜救,目前广泛使用搜救狗、机器蛇和光纤软管.与之对比,生物机器人能够在各种几何表面和更加狭小的空间实现无障碍运动,速度快,成效显著.因此,具有更大的优势.最近湖南的衡阳大火如果能够尽早发现消防队员的位置,就会为及时营救争取到宝贵的时间.

2.4 狭小空间内工业表面的状态检测需求

据了解我国现有各类管道 13340km,未来几年我国的油田集输、高压长输、中压配送 3类管道的长度增加到 8万 ~ 10万 km^3 .如何完成如此浩大工程的管道检修任务,是我国工程人员亟需解决的难题.而生物机器人作为目前采用的管道机器人的重要补充,在管道狭小、空间受限制时,以及在转角、直径较小的管道和非圆管道应用中具有明显的优势.因此,此类机器人在狭小空间检测、管道或大楼空调系统检修等业务中具有广泛的应用市场.

2.5 在人体康复上的应用需求

传统的运动功能障碍的康复手段,都需要病人有一定程度的自主运动控制能力,因此,对那些完全瘫痪的病人是不适用的.现在如果采用脑-机接口技术,即利用人脑信号直接控制外部设备,就可以帮助神经肌肉系统瘫痪的病人实现与外界的交流(如环境控制、轮椅控制、操作计算机等).这种技术还可以用于控制康复机器人,帮助运动障碍患者进行康复训练,以减小治疗人员的工作量,保证康复方案的执行质量.

3 国内外生物机器人的研究概况 (The general situation of the study of bio-robots at home and abroad)

生物机器人的研制始于上世纪 90年代,只有 10多年的历史,然而,生物机器人的研究工作进展迅速,特别是美国、日本等发达国家的研究工作走在世界前列.目前,国内外许多学者正从事这一领域的研究工作,生物机器人已成为机器人技术领域的主要

研究方向之一.

3.1 生物蟑螂机器人

蟑螂,体态娇小,无处不在.被科学家称为天才逃亡者,其爬行速度约为 0.9m/s ,在一秒钟内改变运动方向可达 25次^[4].如果利用蟑螂的这种特长在复杂危险的灾难环境中搜索营救遇难者,无疑将成为救援人员的得力助手.此外,蟑螂的这种特性还可用于军事上的情报搜集.日本东京大学的 Isao Shimoyama教授从上世纪 90年代初开始研究蟑螂的生物控制技术,科学家们选择体态最大、负重能力最强的美洲蟑螂做为实验对象^[5-9].图 1 是实验装置原理图.

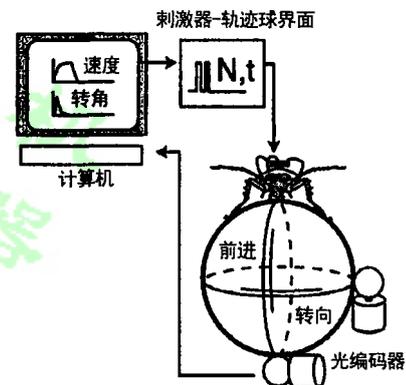


图 1 蟑螂运动行为实验装置图^[5]

Fig. 1 Experimental setup for cockroach's movements and behaviors^[5]

实验装置主要由轻质聚苯乙烯泡沫球、光编码器、微处理器和计算机等组成,微处理器与计算机之间可实现双向数据传递.蟑螂被固定在球体上,刺激电极安放在蟑螂的探须和尾须处,在球体的下方和侧面安放编码器,由编码器记录球体在两个平面的转动,即蟑螂前行和转向的运动量,通过微处理器解码,将数据传输到计算机中进行数据处理和存储.然后计算机再发出刺激命令,由蟑螂体上的刺激发生器产生刺激电流,使蟑螂产生运动行为.改变电刺激强度和电极安放位置,就可以得到蟑螂不同的运动行为规律.掌握蟑螂的运动行为规律后,科学家就可以通过遥控信号产生电刺激,再利用传感器的实时信号反馈,实现对蟑螂运动行为的控制,如图 2 所示.控制蟑螂产生特定运动行为的微控制器见图 3.目前,科学家们已在实验室初步实现了控制蟑螂沿直线方向运动.

3.2 老鼠机器人

老鼠能够适应多种环境,尤其擅长夜间活动,人类对其大脑神经系统的研究较早,1956年科学家就

发现在老鼠的大脑中存在一个快感片区,刺激该片区会令老鼠重复某一特定动作.利用这个特点,人类有可能对老鼠的运动实现人工控制,令老鼠帮助或代替人类完成某项工作.如在老鼠身上安装微型摄像机,通过人工控制,它们就可以帮助人类在坍塌的建筑物下面寻找幸存者,为不幸者带来万幸.

果在老鼠体上配备卫星全球定位系统、微型摄像机以及传感器等元件,老鼠不但可以帮助营救人员找寻倒塌建筑物下的遇难者,还可以协助军方扫除地雷、排除潜在危险或充当间谍等.图 6、图 7 分别是人工制导老鼠实现爬树和沿狭长面行走等日常少见的运动行为.

图 2 实现人工控制的蟑螂运动行为示例^[5]

Fig. 2 Example of movements and behaviors of artificially guided cockroach^[5]

图 3 控制蟑螂运动的微处理器^[6]

Fig. 3 Microprocessor applied to control movement of the cockroach^[6]

据 2002 年的《自然》杂志报道,在美国 DARPA 的大力支持下,美国纽约州立大学的 Sanjiv Talwar 博士领导的科研小组已成功实现了人工制导老鼠的各种运动行为^[10~16].科研人员通过在老鼠体上安装微处理器,在其脑部产生快感的片区和体觉感受皮层植入电极(见图 4),在 500m 外可遥控其完成转弯、前行、爬树以及跳跃等动作,甚至可以控制老鼠产生一些有违其习性的运动行为,如暴露在充斥强光的空间中.图 5 是研究人员实验控制老鼠运动行为的示意图.

由图中可见,老鼠在人工控制下,可以完成爬梯、穿越狭长面、下阶梯、穿铁环以及走下 70°陡峭斜面等一系列越障碍运动.研究人员还进一步预言,如

图 4 人工制导的老鼠机器人^[11]

Fig. 4 Artificially guided robot-rat^[11]

图 5 人工控制老鼠运动行为的示例^[12]

Fig. 5 Examples of movements and behaviors of artificially guided rat^[12]

图 6 人工遥控老鼠爬树^[13]

Fig. 6 Rat was guided to climb trees^[13]

3.3 未来的思维控制机器战士

思维控制机器战士是美国 DARPA 资助的又一个研究课题.由美国杜克大学的神经控制工程中心

图 7 人工遥控老鼠在狭长面上行走^[12]Fig. 7 Rat was guided to cross a narrow ledge^[12]

Nicolelis博士主持,其目标是利用生物控制技术研制用于未来战争的“思维控制机器战士”,即战场上的机器人由脑内植入电极的士兵进行远距离操控,通过人的思维来指挥机器战士作战,实现无人战场. 2000年,课题组研究了利用猴子大脑信号操控机器人手臂抓取食物^[17-22].他们首先在猴脑中植入 96片电极,分别安放在包括大脑运动皮层在内的多个脑区中,然后训练猴子抓取食物,记录猴脑中的电极信号,并将其输入计算机中进行分析处理,从中识别出猴子完成抓取食物动作的神经信号模式,在与机器人手臂相连的计算机上进行编程并按此模式发送信号,以实现利用猴子思维控制机器人手臂的动作.科研人员还进一步实现了在 Internet上传输猴子大脑的神经信号,用于遥控 600英里以外的机器人手臂.目前科学家们正在尝试在猴脑中增加记录电极的数量,以便控制机械手和其他装置实现更复杂的运动行为.如果通过这种方式建立起来的神经模型能达到一定精度的话,除了军事上的潜在应用外,还会给身体残疾的人(如脑损伤或脊神经受损者)带来福音,将来病人有可能绕过神经传导的正常通路,通过这种神经信号模式直接刺激控制肌肉屈伸的神经,甩掉假肢带来的不便和束缚.图 8是猴子思维控制机器人手臂动作的演示图.

另据 BBC新闻报道,1998年由英国科学家组成的研究小组已成功地在人体上安装了仿生手臂,这条手臂通过电刺激可以实现许多假肢手臂无法实现的生物学功能,包括肩部的运动功能^[23].

3.4 壁虎生物机器人

国内许多高校和科研院所在动物机能仿生方面已经开展了深入的研究工作,如中科院的生物物理研究所在该领域做出过很好的工作;中国动物研究

图 8 猴子思维控制机器人手臂运动演示图^[22]Fig. 8 Movement of the robo-arm controlled by the monkey's thought^[22]

所(北京、昆明)的研究者也在着手动物功能仿生的研究;清华大学的郑浩峻等人已将动物的运动控制机理应用于机器人的控制系统,有效提高了机器人的运动能力^[24];上海交通大学的黄恒等人在分析生物蛇的形体及运动特点的基础上制定了蛇形机器人的运动策略^[25];北京航空航天大学王田苗教授、科学院自动化研究所和哈尔滨工业大学根据鱼的生理、运动特性研究了机器鱼的水下推进技术和多仿生鱼协作系统,已经达到了很高的水平^[26-31],等等.但这些工作还未涉及生物机器人的研制,为了填补国内在该领域的研究空白,目前南京航空航天大学的戴振东教授正领导课题组从事壁虎生物机器人的研制工作,并在 2003年 10月的 214次香山科学会议“鱼游动和鸟飞行中的力学和材料”上做了关于“壁虎人工制导的初步探索”的大会发言,引起与会专家的极大兴趣和广泛关注.壁虎在各种表面(地面、墙壁和天花板)上有着超凡的自如运动的能力,可以实现全空间无障碍运动.产自我国广西、云南等地和东南亚的大壁虎(Gecko gecko)体态大、行动迅速、负重能力强,适合作为生物机器人的目标对象.目前课题组已取得的成果包括:初步探索了壁虎脑对运动控制的映射关系,表明能够通过脑区特定部位的电刺激实现壁虎特定的运动行为;研究了壁虎脊椎及外周神经的电刺激和壁虎运动行为间的关系;初步确认了外周神经对肌肉的支配关系并确定了壁虎控制上肢运动和下肢运动的相应神经;初步观测了壁虎骨骼、肌肉和神经系统的形态结构,并在浅麻醉状态下模拟了神经放电活动制导壁虎肢体活动,该课题组目前正在进一步探索模拟神经放电脉冲的时空编码顺序.

此外,还有一些国家的研究人员正在研究如何

将摄像机安装到蝗虫的腹部,通过遥控信号,让其充当飞行间谍,刺探敌方情报,等等。

4 生物机器人的研制展望 (The prospects of bio-robots)

生物机器人与一般的工业机器人、仿生机器人相比,有许多突出的优点和它们无法比拟的优越性。但是由于受到生物学、神经学、MEMS技术、控制技术、通讯技术、传感技术以及数学方法等相关学科发展的制约,至今基本上仍处于实验室研制的阶段。尤其是在克服生物疲劳性、适应性以及可靠实现预期运动行为等方面还不是十分理想,离实际应用还有相当长的一段距离。此外,生物机器人也不应仅局限于控制生物的运动行为,还应该研究如何通过生物的视觉、触觉和听觉来为人类服务。根据目前国内外研究现状,未来生物机器人的主攻方向,笔者认为应包括以下几方面:

4.1 生物学和神经学的发展

科学家们在研究生物运动行为过程中发现,在生物体内植入电极后,即使生物可存活较长时间,但在多次重复刺激后,生物就会产生疲劳效应和适应性,这不利于执行长线任务。如在蟑螂体内植入电极后,控制蟑螂沿直线方向行走时,常常会在后期发生蟑螂走偏现象。

另外,在控制老鼠运动行为时,科学家们发现,老鼠出于对危险的本能,在某种条件下,必须加大刺激强度,才能令老鼠实现某种运动行为;有时,即使加大刺激强度,也无法达到预期目标。

这些事实表明,人们对生物运动行为的机理了解得还不十分透彻,还需要进一步探索生物运动系统的神经控制网络,深入研究生物运动的调控机理。相信随着生物学和神经学的发展,科学家会找到更有效的控制策略,从而实现生物运动行为的可靠控制。

4.2 MEMS技术和集成技术的发展

受生物体态和生物负重能力的限制,控制生物运动行为的微控制器有严格的尺寸和重量要求。在有限的设计空间内,需要集刺激发生器、传感器、微型摄像机和电源等元器件于一体。在制备和植入微电极时,要求与神经纤维接触良好,而与周围组织绝缘。这些严格的要求必须得有高度发展的 MEMS技术和集成技术作为基础。这为 MEMS技术的发展提出了新的课题。

4.3 控制技术和软件技术的发展

可靠实现生物的运动行为,需要有更复杂、更精确的控制方法和简约有效的控制算法。对生物大脑中多个记录电极产生的大量信息,要做到可视并实时进行分析、识别和处理,如在试验猴子思维控制机械手臂的运动时,在猴脑中植入了 96片电极,为了实现更复杂的控制运动行为,科学家们还计划在猴的大脑中植入多达 1000片的记录电极,如此巨大的信息量的处理,需要先进的计算机技术和软件支持。

4.4 传感技术的发展

未来的生物机器人需要安装大量传感器,包括用于收集、传递生物各类感觉,(如视觉、触觉等)的反馈信息的传感器和生物在执行特殊任务时携带的温度传感器、气味传感器等一些特殊用途的传感器。目前市面上出售的传感器精度还很不理想,远远达不到动物的感觉精度,国外精度高的传感器价格又非常昂贵。因此,发展传感器技术是研制开发生物机器人的基础。

经过 35亿年的演化和生存竞争,许多生物有着人所不及的特殊本领。未来的生物机器人是人类社会生活中不可缺少的好帮手,生物机器人的明天会更加灿烂辉煌。

参考文献 (References)

- [1] Talmadge E. Japan's latest innovation: a remote-control roach [N]. Associated Press, 2001 - 07.
- [2] Biological sciences [EB/OL]. <http://www.darpa.mil/dso/thrust/techthr.htm>.
- [3] 管道检测机器人研制成功. <http://sun2.nsem.com.cn/hts/bf/websch/web.hts?name=管道检测>.
- [4] Mody A. The roach, now within reach [N]. Indian Express Newspapers, 1999 - 03 - 01.
- [5] Holzer R, Shimoyama I, et al. Locomotion control of a bio-robotic system via electric stimulation [A]. Proceedings of the IEEE International Conference [C]. France: 1997. 1514 - 1519.
- [6] Eazel W. Robo-roach brings judgement day closer [N]. VNUNET, 2001 - 09.
- [7] Arabi K, Sawan M. Implantable microstimulator dedicated to bladder control [J]. Journal of Medical & Biological Engineering & Computing, 1996, 34(1): 9 - 12.
- [8] Kuwana Y, Shimoyama I, et al. Steering control of a mobile robot using insect antennae [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Systems and Robots [C]. America: 1995. 530 - 535.
- [9] Delcomyn F. Motor activity during searching and walking movements of cockroach leg [J]. Journal of Experimental Biology, 1987, 133 (11): 111 - 120.
- [10] Talwar S K, et al. Rat navigation guided by remote control [J]. Nature, 2002, 417(6884): 37 - 38.

- [11] Lemonick M D. Send in the robots[N]. TIME magazine, 2002 - 05 - 09.
- [12] Whitehouse D. Here come the robots[N]. BBC News, 2002 - 05 - 01.
- [13] Meek J. Live rats driven by remote control[N]. The Guardian, 2002 - 05 - 02.
- [14] Eisenberg A. Wired to the brain of a rat, a robot takes on the world [N]. New York Times, 2003 - 05 - 15.
- [15] Onion A. Rat robots-scientists develop remote-controlled rats[N]. ABC News, 2002 - 05 - 02.
- [16] Rowe D G. Robo-rat controlled by brain electrodes[N]. New Scientist, 2002 - 05 - 01.
- [17] Weiss R. Monkeys control robotic arm with brain implants[N]. Washington Post, 2003 - 10 - 13.
- [18] Camena J M, Lebedev M A, Crist R E, *et al*. Learning to control a brain-machine interface for reaching and grasping by primates[J]. PLoS Biology, 2003, 1(2): 193 - 208.
- [19] Monkey's brain signals control ' third arm ' [EB/OL]. <http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99994262>.
- [20] In pioneering study, monkey think, robot do[EB/OL]. <http://www.mesolimbic.com/brainstim/thoughtcontrol.html>.
- [21] Power of thought[EB/OL]. <http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns9999159>.
- [22] Animation of Duke monkey experiment[EB/OL]. http://news.mcd. duke.edu/filebank/2003/10/41/Robot_arm.swf.
- [23] Bionic arm[EB/OL]. <http://www.endtimeprophecy.net/~tttbbbs/EPN-1/Articles/Articles-Robo/bbcno006.html>.
- [24] 郑浩峻,张秀丽,等. 基于 CPG原理的机器人运动控制方法 [J]. 高技术通讯, 2003, (7): 64 - 68.
- [25] 黄恒,颜国正,等. 蛇形机器人的运动策略 [J]. 电机与控制学报, 2002, 6(3): 249 - 251.
- [26] 梁建宏,王田苗,等. 水下仿生机器鱼的研究进展 I—鱼类推进机理 [J]. 机器人, 2002, 24(2): 107 - 111.
- [27] 梁建宏,王田苗,等. 水下仿生机器鱼的研究进展 II—小型实验机器鱼的研制 [J]. 机器人, 2002, 24(3): 234 - 238.
- [28] 梁建宏,王田苗,等. 水下仿生机器鱼的研究进展 III—水动力学实验研究 [J]. 机器人, 2002, 24(4): 304 - 308.
- [29] 梁建宏,王田苗,等. 水下仿生机器鱼的研究进展 IV—多仿生机器鱼协调控制研究 [J]. 机器人, 2002, 24(5): 413 - 417.
- [30] 喻俊志,陈尔奎,等. 一种多仿生机器鱼协作系统的设计与初步实现 [J]. 系统仿真学报, 2002, 14(10): 1316 - 1320.
- [31] 刘军考,陈维山,等. 仿生机器鱼的运动学参数及实验研究 [J]. 中国机械工程, 2002, 13(16): 1354 - 1358.

作者简介:

郭策 (1971-),女,博士.研究领域:仿生机器人,神经控制和微制造技术.

(上接第 186 页)

5 结论 (Conclusion)

通过大量仿真计算,我们得到如下体会:

(1) 仿真结果说明可将厘米级误差降至毫米级,说明本文所提的方法可以有效提升 Stewart平台的动态定位精度.

(2) 在实际工程中,可先用文 [6, 7] 对铰节点标定后,再使用本文的方法,可进一步提高动平台的定位精度.

(3) 本文方法的不足之处在于需时时计算 G_1 、 G_2 以及雅可比矩阵,导致计算工作量较大,这对实时控制有影响,需作进一步研究.

参考文献 (References)

- [1] Stewart D. A platform with six degrees of freedom[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1965, 180(15): 371 - 386.
- [2] 黄真,孔令富,方跃法. 并联机器人机构学理论及控制 [M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- [3] Dasgupta B, Muthyunjaya T S. A Newton-Euler formulation for the inverse dynamics of the Stewart platform manipulator[J]. Mechanism and Machine Theory, 1998, 33(8): 1135 - 1152.
- [4] 苏玉鑫. 大射电望远镜精调 Stewart平台的优化、分析与控制 [D]. 西安:西安电子科技大学, 2002.
- [5] John E M. Modeling and design of flexure jointed Stewart platforms for control purpose[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2002, 7(1): 95 - 99.
- [6] 魏世民,周小光,廖启征. 六轴并联机床运动精度的标定研究 [J]. 中国机械工程, 2003, 14(23): 1981 - 1985.
- [7] 孙华德,陈五一,陈鼎昌. 用激光跟踪仪定标并联机床的理论探讨 [J]. 机床与液压, 2002, (5): 16 - 18.
- [8] Ji P, Wu H. A closed-form forward kinematics solution for the 6- P^2 Stewart Platform[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2001, 17(4): 522 - 526.
- [9] Krishna K B, Pousga K. Disturbance attenuation using proportional integral observers[J]. International Journal of Control, 2001, 74(6): 618 - 627.
- [10] Wang W H, Soh C B, Chai T Y. Robust stabilization of MIMO nonlinear time-varying mismatched uncertain systems[J]. Automatica, 1997, 33(12): 2197 - 2202.

作者简介:

保宏 (1971-),男,讲师,在职博士生.研究领域:机器人,柔性机构,机构控制.

段宝岩 (1956-),男,博士,博士生导师.研究领域:大型天线结构优化,机器人,机电耦合等.

陈光达 (1966-),男,硕士,副教授.研究领域:机器人,嵌入式控制.