

正在形成控制论新分支的帅搏客学的研究进展(评述)

万百五[†]

(西安交通大学 系统工程研究所, 陕西 西安 710049)

摘要: 本文从控制论观点侧重在科技层面评述帅搏客学的研究. 概述帅搏客研究的初创、展开、应用, 以及向社会的扩散. 简单介绍帅搏客研究在社会引起的伦理思考, 以及分析帅搏客与脑-机接口关系. 对帅搏客学研究的要点、难点及其技术框架加以讨论. 本文给出搏客学的新定义, 认为它正形成控制论的新分支, 并确认帅搏客研究已进入茁壮成长时期. 最后, 对帅搏客的定义、分类、机体-机器关系等加以分析、评议, 并提出对今后的研究方向的思考.

关键词: 控制论; 帅搏客; 帅搏客学; 脑-机接口; 植入技术; 思想通讯; E-医学; 深层脑部刺激; 机体-机器结合; 伦理学

中图分类号: T811 文献标识码: A

Progress in cyborgology research that is forming a new branch of cybernetics (review)

WAN Bai-wu[†]

(Systems Engineering Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China)

Abstract: From the viewpoint of cybernetics and focusing on science and technology the cyborgology research is reviewed in this paper. And it provides an overview of the start-up and growth of cyborg research, its related applications, its proliferation in society and ethical problems caused. The relation between cyborg and brain-computer interface is analyzed also. The main contents, difficulties and technical frame of cyborgology research are discussed. The paper provides a new definition for cyborgology and thinks that it is forming a new branch of cybernetics. And the paper confirms that the cyborgology research has entered a thriving period. Finally the definition, classification and organism-machine relation of cyborg have been commented and thinking about further research directions are given.

Key words: cybernetics; cyborg; cyborgology; brain-computer interface; implant technology; thought communication; E-medicine; deep brain stimulation; organism-machine combination; ethics

控制论不像其他的科学, 是由阻碍探索和设置不可能性的规则及定律所统辖的. 从控制论的角度看几乎任何事情都是可能的, 控制论仅仅提供一个时间约束.

—— 凯文·沃里克 《控制论——系统的现代科学》

1 引言(Introduction)

人-机器拼合的概念早在二次大战以前就在科幻作品中广为流传了. 1960年, 在美国航天医学空军学校进行合作研究的两位学者M·克莱因斯(Manfred E Clynes)与N·克林(Nathan S Klin), 首先创立 cyborg 的概念^[1]. Cyborg是由两个英文字全称“cybernetic organism”(控制论机体)的头三个字母合并而成的简称. 原本是一个理论或虚构的、既具有机体又具有机电一体化部件的生物体^[1-2]. 人类脆弱的肌体显然无法承受动辄上百光年的高速旅行等未来人类在星际旅行中面临的多种问题. 为了克服人类生理机能的限制,

两位学者提出, 向人类身体移植辅助的、由机-电部件组成的神经控制装置, 增强人类适应外层空间的生存能力. 这样的人就是帅搏客, 是能够“自我调节的人-机系统”.

Cyborg还没有经审定的标准汉译名, 已被译成: 赛伯(博)客、机械化人、改造人、人-机合体人、半机械化生物、生化人、电子人等. 台湾译为赛伯人. 本文音意兼顾地译为“帅搏客”; 如果这个机体是动物, 如猴, 则译为“帅搏格猴”(cyborg monkey). 作者强调 cyborg 与科幻作品中“cyber-X”要严格区分^[3], cyberman被作者译为“帅拨人”.

帅搏客这个概念是很大的创新,自提出以后,立即受到学术界的普遍关注.然而,这个概念要与一般的种植牙,植入起搏器、心律除颤器、耳蜗,或者残疾人的一般假肢相区别.这些都修复或增强了人的部分机能、功能,但一般不认为接受者是帅搏客.

在20世纪90年代的中、后期,出现了许多采用植入技术(implant technique)以增强或延伸人能力的尝试.经过科幻小说、影视的过分渲染,出现了各种各样的“帅搏客”.例如电影《机器战警》(RoboCop)系列里的男主角,便是在死后被回收再利用,变成“机器战警”的机体部分,而自身则失去了记忆及自由意志的“帅搏怪”.美国科幻剧《星际迷航》(Star Trek)系列里的大反派“搏怪”(borg),就是一个企图同化人类的帅搏怪.

作为学术研究,帅搏客的机体不仅限于人,它可以是飞禽、走兽、昆虫,甚至微生物.然而,有人将“organism”理解为社会“组织”,并将大型通讯网络、道路系统、公司、政府包括在内,以致出现所谓“帅搏格金融”(cyborg finance)^[1].因为,管理人员通过计算机系统有反馈地控制和增强他所管理的金融体系的功能.人通过计算机与金融体系形成关键的拼合,则被认为是“帅搏格金融”.但本文只限于评述基于生物机体的帅搏客(格).

帅搏客的研究成果促进并正形成“帅搏客学”(cyborgology).帅搏客学主要集中在五方面的研究:各类帅搏客(格)的研发、帅搏客的社会应用、机体-机器关系的模式、帅搏客学的技术框架结构以及帅搏客所引发的伦理及哲学等问题.

对帅搏客研究的综述,国外仅见美国教授C.H.格雷(Gray)等在1995年主编的文集《The Cyborg Handbook》(帅搏客手册)^[4],其中包括科技论文、评论、科幻故事、影视目录等.但缺乏20世纪90年代后期迄今极重要的研发成就及其评述.此外,维基百科有概述资料“cyborg”^[1]可查.在医学界及生物医学工程界,大脑皮层控制假肢的研究受到很大的重视.但并不称之为帅搏客研究,而是以神经元控制、意念控制或大脑皮层控制假肢的名义,如文[5-6]等.仅有的是狭窄范围的综述,如帅搏格虫综述^[7]、脑-(计算)机接口(brain-computer interface, BCI)综述^[8]、嵌入式假肢商品的控制综述^[9]和运动相关皮层电位的利用技术综述^[10]等.国内除上述综述^[7]外,评述[11-13]都从哲学、伦理角度注重在人文层面.而本文则从控制论的角度并注重在科技层面,评述的是帅搏客学的整体.

2 帅搏客研究的开展(The development of cyborg research)

20世纪70年代开始研究人员和科学家通过移植、修补之类的技术,将生物体与机器(器械)拼合以恢复或增强生物体的机能、功能.这样的努力使得帅

搏客逐步由科幻走向现实.

20世纪70年代一些科学家开始采用脑部植入技术来处理后天性的失明患者.其中世界领先的人工视觉专家、医生W·多贝尔(Dobelle)1978年采用包含68个电极、单阵列的脑-机接口植入于后天失明者的视觉皮层企图来恢复视力^[14].最初装在眼镜上的摄像头及其所附2000千克重的主机,只能帮助他在有限范围内看到灰色的阴影.

1997年美国医生、科学家P·肯尼迪(Kennedy)为乔治亚洲已中风的越战退伍老兵J·雷(Ray)施行电极植入神经手术,以使他能做少许活动.手术很成功.但可惜这位被称为世界上“第一位帅搏客”的患者于2002年因脑动脉瘤去世^[1].

1997年,英国科学家P·科克伦(Cochrane)写道,“只是一小块硅芯片植在皮肤下,我们就能享受甩掉各种身份卡、护照或钥匙的自由”^[15].可惜当时没有人尝试过他的建议.

接着在2002年,多贝尔为一些后天失明者进行了新一代的植入手术.这已经成为一项成熟的医疗服务.如今微电子产品和更高速的微型处理器使“人工眼”成为便携式,并能帮助失明者独立从事简单的工作^[16].例如加拿大患者J·瑙曼(Naumann)接受“人工眼”手术后立即就能在院内缓慢地驾驶汽车^[17].

2004年全色盲艺术家N·哈比森(Harbisson)借助颅内植入和头戴有一个“眼搏客”(eyeborg)的装置(假体)将颜色反射波转换成声波,使他“听”到各种颜色^[1].哈比森成为帅搏客艺术家.

2.1 帅搏客研究计划(Project cyborg)

1998年英国雷丁大学(University of Reading)控制论科学家、教授凯文·沃里克(Kevin Warwick)启动他的“帅搏客研究计划”^[18-19].在其皮肤下植入2.5 cm长封装在玻璃管内的硅芯片应答器,即简单的射频身份识别器(RFID)^[20],后者基于贴近效应可以控制大楼的门、灯以及室内加热器以及计算机所控制的其他设备.植入历时一周以验证人体对芯片的耐受度.试验表明,他没有感到计算机和植入芯片的互通信息对他身体造成什么不适.

2002年3月医生们为沃里克进行了新外科手术:冒着被感染的风险将一小型玻璃管内装23 mm长4 mm见方的芯片植入到沃里克的左腕内.管内除了硅芯片外还有电磁线圈等.芯片上100个电极组成带有连线的“多电极阵列”(MEA),与他左上臂的正中神经纤维连接.这样,接受的多电极阵列起了神经-计算机接口的作用,可以从正中神经直接发送信号经过左手腕套(带有射电发信机/收信机)到计算机,也可以通过导线或通过射电应答器的接线端连接到计算机.

试验表明计算机能通过芯片将一些数据、信号传输到他的大脑里,以便他进行处理,并且,反之亦然,

神经信号也能藉此操作一些电器及设备。

后来,在美国纽约哥伦比亚大学,沃里克将他的神经系统通过植入芯片连接到互联网。从纽约他可以控制在英国雷丁大学的机械手,并且他的神经系统获得从机械手指尖传感器的反馈信息。这使得沃里克成为首位亲自体验各种电信号对自己神经刺激的帅搏客。

沃里克带上左手腕套,还能从芯片取出信号数据进行直接控制。他只要经过1小时学习就能用意念通过手腕套来移动自己乘坐的电动轮椅^[21]。

沃里克还将2个超声波传感器安置在他戴的棒球帽顶上,将外界的超声波信号通过传感器、手腕套、植入芯片连接到他的神经系统,使他体验到超声波信号输入对神经系统的感觉。并且他能感受到超声波信号源的距离变化。这使他拥有第6感觉的新“器官”^[22]。

进一步的试验是,简单的电极阵列也植入沃里克妻子的左手腕。电极从她正中神经纤维取得手的运动神经信号直接连到计算机。沃里克希望知道他的大脑能否接收经过互联网来自妻子大脑的信号。试验显示,当妻子的手移动时,沃里克的大脑就经过植入芯片接收到信息。即两人能仅靠思想作电子沟通,是世界上首次两个帅搏客用神经系统相互直接沟通^[19,21]。

历时3个多月后,沃里克左腕内的芯片被取出。为了鉴定植入芯片对沃里克手臂功能的影响,著名医院严格地检查和评估其手的功能。结论是,没有发现芯片与神经系统的直接连接对机体有可以量测出的影响,芯片也未被机体“排斥”^[1]。事实上,神经组织环绕电极阵列进行生长,并包住了小玻璃管^[21]。

但试验的消极方面是植入电极的逐个断路,可能是由于连接线折断。96天试验研究结束时只有3个电极仍能完好地工作。这是试验不得不终止的原因。这是教训^[21]。

2.2 “帅搏客研究计划”的总结(Summary of ‘project cyborg’)

沃里克成功实施“帅搏客计划”,并总结在文[21]。对他自身正中运动神经纤维的电刺激实验中,使用的电流大小、波形、频率,刺激的切换机制特性等关键要素都作了总结。

沃里克还总结出:“思想通讯”(thought communication)和“E-医学”(E-medicine)是对不久的将来会产生深远影响的两项技术进步^[23]。

研究计划的试验结果预示:将芯片植入于大脑的运动神经区域,可能使那些身患残疾的人们只要凭借思想(意念)就可以实现一系列的控制梦想:开关电灯、制备咖啡、甚至驾驶汽车等。这些在后来的帅搏客研发中大多已经逐步实现了。

此外,这两项看来互不相关的技术却令人惊讶地具有共同的基础——“植入技术”^[24-25]。这里的植入技术当然是指芯片植入生物体的技术,而后来更发展

出“大脑植入技术”指的是大脑某部位植入芯片或电极以直接取得神经信号,也可以是对大脑某部位施以电刺激以治疗某些疾病。植入芯片还可帮助接受外来的,如红外线、超声波等传感器的信号输入^[22]。

关于思想通讯,沃里克指的是“脑对脑的直接通讯”^[26],即两个人神经系统之间的、直接的无线电报码式的通讯。它能提供一个更强有力的、有效的、较少误差的通讯新方法。这当然需要植入芯片使人成为互联网上的节点来实现。

沃里克和他妻子间是真正实现了直接的“思想通讯”:在一系列的双盲测试中,两人间手移动的神经信号集经过互联网的传输能被对方识别的成功率非常高^[26]。

关于E-医学,这指的是在患者脑内植入与神经系统相连的电极,然后通过医生控制的体外计算机对患者输入深层脑部电刺激^[27],以治疗帕金森病和癫痫等疾病^[28]。E-医学根据人脑和神经系统的电化本性,通过电刺激,即利用纯粹的电子信号显著改善人脑的功能。

20世纪末采用这个方法对帕金森病的治疗取得较大成功,以致在本世纪初经过这样处理的患者已有数百名。而据2012年统计已逾8万人^[29]。

思想通讯方面的研究此后有一些进展。2009年英国南安普顿大学C·詹姆斯(James)博士使用脑-机接口发送系列的1和0信息,方法是发送者想象移动左臂生成“0”信息,想象移动他的右臂生成“1”信息。信息穿越互联网被在另一端的计算机所接收和破译^[30]。

2014年美国波士顿哈佛医学院神经学教授A·帕斯夸尔-利昂(Pascual-Leone)领导的神经科学家和机器人专家的国际研究团队,使用与互联网连接的脑电图(EEG)和机器人辅助及影像引导的经颅磁刺激(transcranial magnetic stimulation, TMS)技术,实现从印度到法国的8000 km的、两人的脑对脑通讯。不过这里采用脑部传感器直接将发送者的“hola”(你好,西班牙语)和“ciao”(你好,意大利语),通过移动他的左臂或移动右腿的想象转译为“1”或“0”码,经过脑-机接口穿越互联网从印度到法国。在接收端,通过TMS技术,在收信者大脑感受到无创伤刺激的、“有”或“无”光幻视来体现“1”或“0”信息^[31]。

上述两项“脑-脑通讯”都没有采用脑部植入芯片技术,因而不能算是直接的思想通讯。

2.3 帅搏格脑操控移动机器人(Cyborg brain controls a mobile robot)

沃里克领导的雷丁大学科研团队利用“多电极阵列”于神经元的培育,并培养和训练它作为操控实体机器人的双向交互式“大脑”,称为“生物脑”^[32],本文则称之为“帅搏格脑”(cyborg brain)^[33](图1)。

帅搏格脑是由安放在一个巴掌大的培养皿中央的

鼠脑切片(含100,000神经元)和多电极阵列组成(图1左上). 内有 $60 \times 60 = 3600$ 根电极和脑切片相连. 然而在每一时间只有其中小部分神经元正在积极起作用^[32].



图1 帅搏格脑操控机器人^[32]

Fig. 1 Cyborg brain controls a mobile robot^[32]

帅搏格脑是活的组织, 在体外必须保存于特定的温控中, 必须不断地给它输送氧气和养料, 同时, 它还要求外界的电刺激, 否则生物脑就会在数月内萎缩死亡^[32].

帅搏格脑神经元置于多电极矩阵和培养皿一周之内, 便可以看到一些单个神经元的自发放电, 直到逐步发展、覆盖. 由此产生的高度变化的多维信号经过机器学习接口适当地预处理和降维, 才能得到具有代表性的有用信号分量.

这个信号, 通过蓝牙技术及无线电通信与机器人躯体沟通, 实现了“身脑异处”地操控由两轮驱动的机器人(图1), 后者身上四面都装有“碰壁”传感器. 多电极阵列是活体脑组织和机器人部件的接口. 除了发出驱动机器人的电子脉冲外, 帅搏格脑还接受“碰壁”传感器发回的脉冲. 再遇到类似情况时, 机器人就会避开障碍物. 这样, 采用电生理学方法实现了, 培育的神经元和机器人之间的双向实时通讯. 某种程度上说, 帅搏格脑在“自学习”.

3 帅搏客研究向社会扩散 (The proliferation of cyborg research in society)

1) 植入硅芯片的小型化和商品化.

2006年11月日立公司在北京展示其制造的世界最小射频识别RFID芯片“ μ -Chip”. 芯片尺寸只有 $0.4 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$. 2015年15岁英国男孩在网络上花费了99\$购买了一枚可编程、米粒大小的“nXT”微型芯片. 他使用注射器独立完成对自己左手虎口皮下的芯片植入, 并借助近场通信技术^[34]能通过挥手便捷地

操控自己的智能手机和蓝牙音箱^[35], 成为最年轻的帅搏客. 科学家还成功将硅芯片植入活细胞中^[36].

2) 医学上的帅搏客.

美国罗德岛布朗大学教授J·多诺霍(Donoghue)历经多年苦心研究^[37], 2006年将4 mm见方的电子芯片植入瘫痪患者大脑运动皮层的中央前回处, 因为这里的大脑皮层是控制全身肢体的运动中枢. 多诺霍训练患者借助意念完成各项动作: 移动电脑屏幕上的光标、玩简单的电脑游戏、调节电视机音量、切换电视频道等. 最后, 患者, 这位帅搏客, 甚至还学会通过意念控制机械手抓住正在移动的小物体这样的高难度动作, 从而生活质量大大改观^[38].

所采用的原理是: 当患者开始想象自己运动时, 芯片上100枚比头发丝还细、1 mm长的电子传感器(多电极阵列)将大脑产生的脉冲信号记录下来, 然后通过细小的金线传送到镶嵌在患者头皮内的小型钛基座块. 接着再将脉冲信号通过导线传送给体外的计算机, 经过计算机程序的转译、破解过程, 转换成电子装置可以执行的机械手动指令系列. 类似的成果还有: 仅从小样本神经元信号, 即能使四肢瘫痪者多维控制复杂设备^[6].

美国匹茨堡大学医学院神经生物学系的、以科学家M·维里斯特(Velliste)为首团队研发的由大脑皮层控制的假臂和假手, 能从事多维的运动, 能从环境和被握取物获得反馈^[5]. 最新的进展是, 由佛罗里达大学科学家受美国国防部先进研究项目局(DARPA)的支持, 通过对患者大脑中植入的连接神经的微电极阵列, 而成功控制的假肢机械手, 能恢复患者的触摸感觉^[39]. 这两项进展使得成为帅搏客的患者具有接近自然的功能和感受^[5, 39]. 文[40]则比较了3种利用传感器进行假手感觉反馈的方法.

文[41]指出国内多个医院自1998年开始就进行了帕金森患者的深层脑部刺激疗法, 以治疗患者的运动失能, 如僵硬、震颤、行动缓慢、步态不稳等, 并减轻服药产生的异动, 恢复自主活动和自理能力, 从而大幅提高患者的生活质量. 到2010年仅厦门市第一医院已完成深层脑部电刺激手术近20例次, 术后程控180例次.

3) 帅搏格猴.

2012年浙江大学研究团队运用植入芯片技术成功提取并破译猴子大脑关于抓、勾、握、捏4种手势的神经信号, 使猴子的“意念”能直接控制外部机械手^[42].

被测试的猴子大脑的运动皮层被植入两个规格均为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的芯片, 每个芯片上有96个电极, 通过芯片可以采集其大脑中单个神经元的信号.

猴子头上戴的帽子就像网线, 将芯片与计算机连接, 这样就可以实时记录它一举一动发出的神经信号. 测试时猴子专注地看着面前的塑料板. 塑料板有4块,

上面分别挂着4个不同形状的“玩具”:有把手、圆环、塑料片和小圆柱体。4块塑料板分别亮起,猴子随着指示灯的变化,用抓、勾、握、捏4种不同的相应手部动作“对付”塑料板上4个形状的“玩具”。这样,通过植入微型芯片实现了猴子用意念控制机械手的动作,使它成为帅搏格猴。

更重要的一次试验,2012年是由美国南加利福尼亚大学神经工程系主任、教授T·W·伯格(Berger)领导的研究团队进行的。团队创立了能使猴子的决策正确性提高约10%的方法。团队让几个猴子玩图片匹配游戏,并从它们决策诞生区的大脑皮层记录神经元的活动,团队发现正确和不正确决策的信号模式是不同的。他们让几个猴子再次玩同样的游戏,但在猴子做出决策之前,他们通过植入的微电极注入其大脑“正确决策”的信号模式——很像电报电码的一系列电脉冲。结果猴子能捡起正确的图片^[33]。类似对帅搏格猴的研究还可见文^[32]。

4) 帅搏格酵母。

美国加州大学旧金山分校教授M·卡马什(Khamash)和瑞士苏黎世联邦理工学院(ETH)教授J·莱格罗斯(Lygeros)2011年成功合作在计算机和普通酵母菌之间形成“反馈环”以精确控制一些特别基因的“开放”与“关闭”。研究表明,在红色光线下黑暗容器中2个蛋白细胞(球)相结合,并形成酵母基因而发出黄色荧光;在近红外线下蛋白细胞不结合并分离。为此,形成了基因表达可被光控制的酵母。通过酵母基因的称为光敏色素的分子,计算机使用闪光来“开放”与“关闭”酵母内的基因表达,来精确控制黄色荧光蛋白的出现,这就通过光控制发酵的生物过程^[44-45]。

这样,酵母和计算机形成为具有控制性能的帅搏格酵母(cyborg yeast)。

5) 帅搏格禽和帅搏格虫。

美国国防部先进研究项目局非常重视帅搏客技术的军事应用,宣布在研究“帅搏格禽”(cyborg animal)及“帅搏格虫”(cyborg insect)。研究人员将微型传感器植入禽体内,甚至在昆虫成蛹阶段的体内。然而通过微型机-电系统控制其行动,让它在指定的区域进行巡视并侦察爆炸物的气味。例如,微电子设备被植入鲨鱼的神经元后,其行动可以被遥控,其感觉器官被开发成发送有关敌方船只和水下爆炸物的反馈信息^[1]。这就成为帅搏格鲨。

其他研究单位有针对飞蛾、蟑螂、蜻蜓、蜜蜂、鼠和鸽子等以达到各种军事侦测的目的。国内浙江大学郑能干等学者对“昆虫机器混合系统”(即帅搏格虫)作了很好的综述^[7]。该文对于帅搏格飞蛾、帅搏格甲虫及帅搏格蜜蜂三者的研制要点特别作了叙述:采用主要是基于硅芯片的电刺激,以及采用微机-电系统

技术构建的化学刺激系统、动量重定向、代谢调控昆虫载体等技术控制或扰动昆虫载体的飞行或爬行行为,诱导或控制昆虫实现了其行为的可静态预设或动态控制。此外,还需解决微型控制器与昆虫载体的耦合接口问题。

2015年上海交通大学研究组建立起人脑与蟑螂脑的功能性“脑-脑接口”^[46],把人脑信号发送到蟑螂大脑,实现了人脑对蟑螂运动的无线远程控制。这里,人的头部佩戴便携式无线脑电采集设备,从而取得脑电信号。计算机解码脑电信号,识别控制者的控制意念,并将意念转换为控制指令后,通过无线电发送到蟑螂的电子背包接收器。蟑螂脑部的触角神经被植入电刺激的微电极,这样就按照人脑指令改变其运动方向。

虽然,这不是芯片植入式的直接从人脑神经系统取得信号,但对于蟑螂却是植入了微电极。这样,就研制出了可控的“帅搏格蟑螂”。利用它能在隙缝中爬动、寻觅的天性,对因天灾、人祸造成的坍塌建筑中搜寻遭埋压的存活者,并发回信息给搜救队。

6) 帅搏格(机体)组织(cyborg tissue)。

这里组织指的是动植物的机体组织^[47],据2012年哈佛大学研究团队的报告:他们研制出新的机体组织,它们一半是活细胞,一半是电子元件。它们是由纳米线和晶体管交织在內的神经元、心脏细胞、肌肉、血管,甚至通过计算机3-D打印出帅搏格耳等。图2所示为心肌细胞上带有纳米电极。就细胞而论,它们是正常的活细胞;而电子元件的实际作用犹如一个传感器网络,容许计算机直接与细胞接口。对帅搏格心肌组织,研究人员已经用嵌入的纳米线来测量细胞的收缩(心率)。

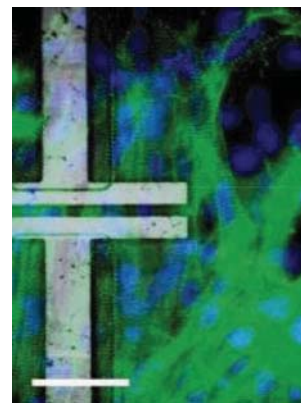


图2 带有纳米电极的心肌细胞^[47]

Fig. 2 Cardiac cells, with a nanoelectric electrode^[47]

研究人员研制帅搏格肌肉是这样进行的:以胶原蛋白为3-维支架,以纳米线和微型晶体管织入而建成纳米电子网状支架,再促成细胞围绕其生长。上文所说的神经元、心脏细胞(图2)、血管都这样生长而成带有内置的传感器网络的帅搏格(机体)组织。其中帅搏

格心肌可作为给心肌梗塞患者的心脏打“补丁”的材料,补丁用来代替梗塞部分以避免作心脏移植手术,还可以对心脏的功能进行监控^[48].

哈佛大学研究团队曾凭借此法生长出小鼠的机体组织,也曾成功生长出一段1.5 cm帅搏格(人类)血管.他们从血管的纳米电子支架读出细胞的数据,并正研究如何与这些细胞通讯.

帅搏格组织也用来表示新的纺织材料^[1].它由炭纳米管和植物或真菌的细胞构成,已被用于人造织物工程.研制成3维帅搏格织物是可用于机械和电子工业对温度敏感的新材料.

7) 帅搏格精虫.

为了帮助游动缓慢的精虫增加活力,德国科学家创立新方法:使用直径只有0.25 nm由塑料制成、外裹磁性金属的人造“尾巴”,正好能包住牛的精虫尾部.“尾巴”以磁铁提供动力,可以随着人为控制的外部磁场的转动而转动,于是增加了精虫的游动速度,促使母牛卵子受孕.这已在实验室中证实了可行性^[49].这样,接上人造尾巴的精虫成为帅搏格精虫.这项技术是为了帮助由于男性精虫动力不足而难以受孕的夫妇,以替代目前昂贵的“代孕”.科学家希望最终能在人类子宫中用人类精虫重复这个实验.

8) 帅搏格细胞.

文[36]报导将小于3 μm 的硅芯片植入人类活细胞中,芯片可以作为细胞的传感器来使用.这样,可以对单细胞进行定性和定量研究:对细胞体内的活动进行快速实时监控,以及专门瞄准某个活动的区域或针对某些细胞有效释放药物.主要应用于细胞疾病(如癌症)的早期发现和新的细胞修复机制的研究.这形成帅搏格细胞.

4 帅搏客与脑-机接口(Cyborg and brain-computer interface)

脑-(计算)机接口又称为脑-机器接口,在上文中曾屡次提到过,已经在帅搏客的研发中发展成为独立的技术.这是机体(脑或神经系统,或脑细胞的培养物)与机器(外接设备,如计算机、假体)之间联系用的、由硬件及软件组成的直接通道,是帅搏客(格)的核心部分.文[14]是脑-机接口的资料汇集,文[8]综述残疾人适用的脑-机接口研究成果.

脑-机接口分成非侵入式(无创伤式)和侵入式(创伤式)两种.前者不需要施行外科植入手术,如第2.2小节的“脑-脑通讯”所使用的脑电图(EEG);侵入式脑机接口主要通过植入电极、芯片从大脑(或机体神经)的恰当部位取得信号.

它又分成正向式——从脑(或机体神经)作用到机器(外接设备,如假体);反向式——从机器(外接设备)作用到脑,如受控的帅搏格蟑螂.更有双向式,如帅搏客的假体能反馈信息至大脑,帅搏格虫能反馈侦察信

息等.这无疑更先进并是接口的发展方向.

微弱脑电信号的采集是正向式脑-机接口关键.非侵入式通常使用的脑电图(EEG),就是通过医学扫描仪器记录脑部微弱生物电的曲线图.此外,还有脑声机图(encephalophone)、脑磁图(MEG)以及功能核磁共振成像仪(fMRI)都已成功作为脑信号采集之用.

皮层脑电图(EECoG)的技术基础和脑电图相似,但是其电极直接植入到大脑皮层上硬脑膜下的区域,或应称为部分侵入式脑-机接口.

除了大脑信号采集外,脑-机接口研究的内容还包括信号预处理、特征提取、模式分类、机体的应用程序及控制系统等.其中前3项都已拥有研究综述^[8-10],还仍在继续发展.

帅搏客研究中由于多种机体和多种研究目标,所以,接口种类繁多,如由残疾人面部表情操控的轮椅,具有正向非侵入式“面-机接口”^[50].

5 帅搏客学研究的要点、难点及其技术框架(The main contents, difficulties and technical frame of cyborgology research)

帅搏客学研究机体-机器的结合体.典型的机体是人脑及与之连接的脑-机接口;典型的机器是受控的假体.这涉及从生物到工程的多门学科.这比控制论传统分支的内容要复杂、面更广、综合性更强,相互移植、借鉴之处要少.而且,机体对象众多,假体也多种,如假眼、假手(臂)、假下肢、假喉等,有的还要求精确的动作或效果,甚至要反馈信息.

至于帅搏客研究要点与脑-机接口的研究要点有相似之处,但着重点不同.前者是:大脑皮层或神经信号的获取、信号的处理、机-电控制(假体)系统、机器(假体)反馈信号的感知等;而获取信号和感知反馈信号是在大脑的不同区域.对于帅搏格虫研究要点则是昆虫神经生理机制、行为刺激方法、电极-机体接口、刺激控制微机-电系统和昆虫传感反馈信号的获取、无线数据传输等.每个要点都需要开展研发.上述两要点可说是帅搏客学研究技术框架的雏形.

纵观帅搏客研究,就会理解需要一个多学科专家团队的参与,这充分体现其跨学科性、多学科性及综合性.这“三性”体现在:它涉及控制论、医学、生物医学工程、神经生物、生命、动物、信息、计算机、材料、机器人、化学、微型或纳米机-电系统等等学科和技术.从控制论另一创始人生理学家A·罗森勃吕特(Rosenblueth)、数学家维纳和电气工程师J·毕格罗(Bigelow)3人合作的、1943年最早的有关生物控制的控制论论文《Behaviour, purpose and teleology》(行动、目的和目的论)^[51],发展到由以沃里克为首的8位学者署名的、2010年帅搏格脑操控移动机器人的论文^[27],就是例证.如果所研究课题的复杂性、多科性再提升,则研究团队规模也随之膨胀.2012年文[6]拥

有多达11位学者。所以,帅搏客学的多学科性、综合性、复杂性、创新性,以及研究的集体性是它的特点也是难点。

帅搏客学研究框架本身仍在不断发展、创新。例如典型的盲人假眼反向式研究框架是:摄像头—图像处理—植入的多电极阵列芯片—大脑视觉皮层成像。而文[52]介绍2012年美国康内尔大学两位学者对反向式脑—机接口框架的创新。他们采用SoC芯片系统转换摄像头的输出为盲鼠大脑能够解读的编码,然后投影仪用来发送数据给早先通过基因治疗置入视网膜的光遗传蛋白。接着光遗传蛋白通过视网膜神经节和视神经将编码信号传给大脑。这样几乎能恢复盲鼠的视力。目前研发者们正迫不及待地准备将这种疗法实施给盲人。

6 帅搏客学正在形成控制论的新分支(Cyborgology is forming a new branch of cybernetics)

帅搏客——控制论这一极重要的创新发展^[53],打破了生物和机器的绝对界限,创造了有机体与机器的各种不同程度的结合体。它在学术、应用、伦理、哲学上的意义很巨大,对人类生活具有很深远的影响和拥有很广阔的发展前景^[21]。

人—机结合的模式是帅搏客学研究的关键内容之一。虽然,在本文引言中被帅搏客创始人称为它是“自我调节的人—机系统”,但这不是工程控制论中的人机工程学中的人—机系统;而帅搏客学研究的是人和植入物(如芯片、电极、微电子器件、计算机等)与假肢(体)之间的控制和通讯以修复、提高人的能力的人—机结合的系统。沃里克称这种人—机关系为“拼合”(merging)^[53],有人称为结合。而且帅搏客研究的机体本身不一定是人,可以是别生命体,所以人—机关系应该被机体—机器的关系所代替。

然而,全名为“控制论机体”的帅搏客到底与控制论是什么关系?这问题过去没有厘清过。为此,本文作者在8年前撰写的控制论综述中就没有给它一个位置^[54]。

帅搏客学与此前将控制论的基本思想及原理应用于某领域,而形成控制论的新分支截然不同,或者在控制论的基本思想及原理指导下将机器与另一领域相类比的研究方法也截然不同。而是机体和机器两实体在控制论思想下的不同程度有机结合,并形成新的不同质的实体。所以很难将它的研究归并到生物控制论,也不宜归属到机器人或工程控制论。

所以,根据近10年的研发进展,本文认为帅搏客学正在形成、创立。格雷曾定义它为构建控制论机体知识的学科^[4]。作者根据上述分析定义帅搏客学是,将控制论的思想、方法应用于研究机体—机器结合体,包括研究结合体内部之间和结合体与环境之间的控制

和通讯的学科。这里结合体包括从拼合体到融合体都在内。所以,帅搏客学正形成控制论的新分支。

7 帅搏客研究的伦理思考(The ethical thinking about cyborgology)

接入机—电装置的帅搏客可以具有超乎常人的体能。同样,存在采用深层脑部电刺激以下载和上传人类记忆的可能性。这可使帅搏客增加以前未曾亲自经历的记忆,即增加智能。于是帅搏客研究的有趣现象是:它所开发和形成的技术可以有两个用途:一是它有潜力增强人类使他们成为“超人”;或者,另一是它也可用来使身体或精神上有疾病的患者能做他此前所不能做的事情。不同的用途导致不同的后果。这述及到它到底能走多远;或者说帅搏客技术是“好”东西,还是使人类“技术进化”而不是生物自然进化的“坏”东西^[21]。

美国科技界杰出学者、女教授D.哈拉维(Donna Haraway)认为^[55]，“帅搏客”的出现,并不仅仅只是机器与人的“拼合”,而成为一种“新的合成生命体”。这模糊了自然有机体和技术机器的“边界”并引发一系列哲学与科学问题。

为研究上述问题,20世纪90年代出现了新的学科——帅搏客人类学(cyborg anthropology)。它从人类学的角度来研究人类和技术之间的相互作用^[56],以新的视野关注技术进步对文化和社会的影响。

有关伦理方面的讨论,越出本文从控制论的角度出发并注重在科技层面评述帅搏客整体的初衷。作者认为,上述一切都是值得严重关切的。在未来适当阶段,不仅在伦理上更要在法律上禁止某些损害人类的帅搏客研究^[57]。这里援引沃里克1994年在Kybernetes杂志上题为《Cybernetics—The Modern Science of Systems》(控制论——系统的现代科学)论文中的结尾名言:“审视诺伯特·维纳过去所从事的事业,他是与控制论来推进科学的未来,这正是今天我们仍在从事的。控制论不像其他的科学,是由阻碍探索和设置不可能性的规则及定律所统辖的。从控制论的角度看几乎任何事情都是可能的,控制论仅提供一个时间约束”^[58]。

8 对帅搏客学研究的其他评议(Other commentary on cyborg research)

1) 帅搏客研究进入茁壮成长阶段。

2002年沃里克在完成他的“帅搏客计划”时声称,帅搏客研究仍在初创阶段,仅解决了可实现性问题。14年过去了,本文认为帅搏客研究已进入多方向扩散、发展的茁壮成长阶段。本文对帅搏客学作出学科的技术框架雏形的设想。需要多学科专家的参与研究的帅搏客学,已经涌现一批先驱的科学家及其团队。帅搏客学是“迷人的研发领域”,它带动了多个学科和技术的发展。现今学者们正热情地引用帅搏客学以

解决面临的、难以解决的某些问题. 研究和探索正沿多个方向前进, 上文第2-5节表明研究正不断取得进展, 在治疗、康复上成功地应用. 为此, “帅搏客时代已经开始”^[59].

2) 帅搏客的定义还未形成统一的共识.

牛津英语大词典认为, 凡是被机械技术延伸其体能超于常人的人, 就是帅搏客. 沃里克认为: 凡是被技术措施增强或延伸其体能或精神能力, 因而与其“集成”^[21]或“拼合”^[53]一体的“人”, 就是帅搏客. 有的学者认为假体要与人“联合一起”(unification)才算是帅搏客. 然而“集成”或“联合”等又如何界定?

很多人认为, 按照原英文名“cyborg”, 不仅是人, 是哺乳动物皆可^[1]. 更有人提出只要是生命体都可以作为帅搏客的机体, 如帅搏格鲨、帅搏格虫、帅搏格酵母等. 然而有人将社会组织做机体的人-机复杂系统包括在帅搏客内, 如帅搏格金融^[1].

本文的观点是: 帅搏客的研究正在茁壮成长, 暂不宜过早地过强求定义的统一. 过10年甚至更长时间集成共识也不迟, 这并不影响对它开展研究.

3) 机体-机器关系的模式.

机体与机器结合的程度是有不同的. 简单的如分立的假肢受人脑神经通过芯片操控而又有反馈信息给大脑, 这样的集成称为“拼合”; 而高级的如以胶原蛋白为3-维支架, 以纳米线和微型晶体管织入而建成纳米电子网状支架, 再促成细胞围绕其生长而成的帅搏格心肌, 这样的集成称为“融合”. 显然, 融合是高度的紧密结合. 所以融合为机体-机器关系揭开新的一页.

此外, 还有多种中间情况: 如将传感器芯片植入大脑、植入计算机芯片替代部分受损的大脑局部海马体(见第9节3), 并且植入有输入、输出电极的计算机芯片; 微型传感器植入禽体内, 甚至在昆虫成蛹阶段的体内植入, 以组成帅搏格禽或虫等.

机体与机器不同程度的结合, 使结合体引起质的变化. 而且结合程度愈深, 结合体的功能愈能提升. 注意, 只有纳米技术的出现才使得微型电子器件和机体-机器的融合成为可能. 当然, 应该根据需求和可能寻求高程度的、创新的结合.

哲学家或社会学家关注机体-机器关系中另一个问题, 是机体和机器结合体中何者为主^[13]? 这涉及到结合体到底算是机体, 还是机器? 例如, 背上微电子通信-控制背包、被控的昆虫蟑螂, 背包里的设备再复杂还是从属于蟑螂, 为控制蟑螂服务, 而且再复杂的微机-电设备也没有生命复杂, 所以被称为帅搏格蟑螂. 就本文所评述的基于生命机体的帅搏客(格)范围而言, 迄今为止还没有研制出一个以机器为主的帅搏格X.

4) 帅搏客(格)的分类.

帅搏客(格)种类繁多, 适当分类有助于研究. 作者认为从功能来区分, 可分为“修复型”和“增强型”, 如戴有人工眼的帅搏客属于前者, 而对自己左手虎口皮下植入芯片的英国少年属于后者; 从控制来区分, 可分为“受控型”和“控制型”, 如各种目的“帅搏格禽、虫”属于前者, 而控制它们的“帅搏客”属于后者; 从机体-机器结合程度区分, 可分为“集结型”、“结合型”和“融合性”, 如带有假肢的是前者, 上文带有计算机芯片以替代部分大脑海绵体的帅搏格是属于结合型, 而“帅搏格心肌”属于后者. 当然, 还可以有其他的分类. 如按机体是人还是动物来区分, 则有帅搏客和帅搏格动物等等.

9 帅搏客学研究今后方向的思考(Thinking about further direction of cyborgology research)

1) 思想通讯的最终目的是, 使人们能够即时将自己大脑内的想法、话语和图像直接发送到他人的大脑内. 这种全新的沟通方式不需要键盘、电话, 甚至不必动嘴, 只需要非常好的宽带网连接即可. 直接思想通讯目前只做到采用脑部传感器解决了以电报式长、短电码信号在两人(帅搏客)之间相联系的“0”, “1”信息的传输和接收解码问题. 这项研究现在还处在开创阶段, 即脑-脑通信阶段. 自然, 像文[31]那样的非侵入式、间接的思想通信更受到研发者的关注, 更容易被使用者所青睐, 所以发展前景广阔.

2) 帅搏格脑能“身脑异处”地操控移动机器人. 这样的生物神经操控结构的研究已经对医学产生直接的影响, 同时对机器人技术提供新的潜力.

这项研究使人们能够研究大脑学习和记忆的经验. 将推进人们对大脑是如何工作的理解. 并对单个神经元的活性和整个生物体的复杂行为之间的关系这样的基本科学问题, 可能得到一些解答. 同时, 这项研究可能有助人类弄清楚记忆和学习机能的根本构架, 探索自然智能和人工智能的分界问题^[60], 值得进一步研究.

3) 新的“大脑植入”, 又称“神经植入”(neural implant)技术及其部件研究^[61]. 植入物已经发展到计算机芯片, 而被控的假肢(体)不仅是假的手、脚, 更在研究以植入物代替已损坏的局部器官, 如大脑的局部海马体、心脏的局部心肌等.

电极植入或是芯片植入, 不应该给人带来任何创伤, 并且植入异物可能伴随终身. 根据目的选择恰当的植入位置、与神经的连接、人体承受度、机体“排斥”反应、抗感染、避免严重的不良反应(包括神经系统及精神疾病反应)、还有植入物的材料及所需能源等都是关键性问题, 是研发的重要内容^[28]. 新的研究是, 植入具有输入、输出电极的计算机芯片, 可根据神经元的治疗反应进行编程以改进深层脑部刺激^[62]. 同

时,从石墨材料中剥离出的单层碳原子二维结构面材料石墨烯(graphene),可用来做电极,能成为脑神经元的直接接口^[63]。

更重要的是:人脑植入可能被计算机控制或在其支持下增强正常人的记忆、智能、能力以影响甚至控制人的思考等^[64]。然而,类似的试验在人身上进行,还需要广日持久地等待以克服不少来自社会的伦理阻力。

4) E-医学中的深层脑部电子刺激治疗不仅对帕金森病、癫痫、阿尔茨海默病患者在成功进行,并对多发性硬化症(中枢神经系统与免疫有关的发炎及去髓鞘疾病)也有个别治疗成功的报导;并且对精神病人的狂躁、臆想,对抑郁症病人都正在试验治疗。因此这类研究和治疗正在很快增长,试验治疗的疾病种类也正在多样化。这些研究逐渐形成一门新的医术:神经修复术(neuroprosthesis),是E-医学的内容之一。

深层脑刺激治疗机理的研究是迫切的任务。为治疗目的,深层脑刺激电极的数量和类型、施加刺激的大脑区域(病灶范围)、电刺激信号的强度、波形、周期以及治疗机理的电化学解释、病理解释等都是需要深入研究的问题。

此外,融合而成的帅搏格(机体)组织,如帅搏格心肌、帅搏格血管、帅搏格耳,对医学、人类健康、疾病治疗上的应用及其功能是非常具有潜力的研究方向。

5) 帅搏客各类应用。除了上文已介绍的直接造福人类的疾病治疗、预防、康复、病躯修复或置换、假体配置、新材料研制、人脑功能的增强外,帅搏客在星际、太空飞行中的应用^[1,21],帅搏格飞禽、走兽、昆虫在未来战争中的应用等都是重要研究方向。

综上所述,作为控制论新分支、充彻创新精神的帅搏客学的研究进展带动了多个相关学科和技术的发展,“研究进展可能会大大改善许多人的生活质量,尤其是在医疗方面”^[59]。

最后,维纳在《控制论》第8章中强调通讯对社会稳定的重要性:“任何组织所以能够保持自身的内稳定性,是由于它具有取得、使用、保持和传递信息的方法”^[65]。这可以解读为组织的领导者要认识到控制信息传输和舆论对组织内稳定的重要性。现今,思想通讯和E-医学这两种技术进步拥有巨大能力来传递信息和控制信息。它们在未来的逐步实现到底对社会的稳定性起到怎样的影响,这正是控制论学者和社会学家未来要高度关注的。

参考文献(References):

- [1] From Wikipedia, the free encyclopedia. Cyborg [EB/OL] //en.wikipedia.org/wiki/Cyborg. 015-05-01.
- [2] CLYNES M E, KLINE N S. Cyborgs and space [J]. *Astronautics*, 1960, 14(9): 26 – 27, 74 – 76.
- [3] From Wikipedia, the free encyclopedia. Cyber [EB/OL] //en.wikipedia.org/wiki/Cyber. 2015.

- [4] GRAY C, FIGUEROA-SARRIERA H, MENTOR S, Eds. *The Cyborg Handbook* [M]. New York: Routledge Publisher. 1995.
- [5] VELLISTE M, PEREL S, SPALDING M C, et al. Cortical control of a prosthetic arm for self-feeding [J]. *Nature*, 2008, 453(7198): 1098 – 1101.
- [6] HOCHBERG L R, BACHER D, JAROSIEWICZ B, et al. Reach and grasp by people with tetraplegia using a neurally controlled robotic arm [J]. *Nature*, 2012, 485(7398): 372 – 375.
- [7] ZHENG Nenggan, CHEN Weidong, HU Fuliang, et al. Research progress and challenges in cyborg insects [J]. *Scientia Sinica (Vita)*, 2011, 41 (4): 259 – 272.
(郑能干, 陈卫东, 胡福良, 等. 昆虫机器混合系统研究进展 [J]. 中国科学: 生命科学, 2011, 41(4): 259 – 272.)
- [8] NICOLAS-ALONSO L F, GOMEZ-GIL J. Brain computer interfaces, a review [J]. *Sensors (Basel)*, 2012, 12(2): 1211 – 1279.
- [9] KUMAR V, KUMARI P. A review on embedded control of animatronic prosthetic hand [J]. *International Journal for Technological Research in Engineering*, 2015, 2(6): 614 – 617.
- [10] SHAKEEL A, NAVID M S, ANWER M N, et al. A review of techniques for detection of movement intention using movement-related cortical potentials [J]. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2015, 2015(6): 2833.
- [11] LIU Ping, LI Song. Recent progress in cyborg research abroad [J]. *Journal of Hubei University of Science and Technology*, 2012, 32(10): 187 – 189.
(刘苹, 李松. 海外赛博格研究最新进展述评 [J]. 湖北科技学院学报, 2012, 32(10): 187 – 189.)
- [12] SHI Zhi'ou. *Ethics and philosophical rethinking about cyborg* [D]. Shanghai: East China University. 2014.
(施志鸥. 赛博格伦理及其哲学反思 [D]. 上海: 东华大学, 2014.)
- [13] WU Hsiaomei. Rewriting cyborg: a cybernetic perspective [EB/OL] //www.docin.com/p-7314440.html. 2001.
(吴筱玫. 重寫賽伯人: 一個模控的觀點 [EB/OL] //www.docin.com/p-7314440.html. 2001.)
- [14] From Wikipedia, the free encyclopedia. Brain – computer interface [EB/OL] //en.wikipedia.org/wiki/Brain%E2%80%93computer_interface. 2015.
- [15] COCHRANE P. *Tips for the Time Traveller* [M] //Orion Business Books, UK: Orion Publishing Group Ltd., 1997.
- [16] KOTLER S. Vision quest [EB/OL] //www.wired.com/2002/09/vision. 2016.
- [17] MACINTYRE J. BMI: the research that holds the key to hope for millions [EB/OL] //www.independent.co.uk/News/Science/bmi-the-research-that-holds-the-key-to-hope-for-millions-835850.html. 2011.
- [18] From Wikipedia, the free encyclopedia. Kevin Warwick [EB/OL] //en.wikipedia.org/wiki/Kevin_Warwick. 2015-06-26.
- [19] WARWICK K I. *Cyborg* [M]. Reprint Ed. Illinois, USA: University of Illinois Press, 2004.
- [20] From Wikipedia, the free encyclopedia. Radio-frequency identification [EB/OL] //en.wikipedia.org/wiki/Radio-frequency_identification. 2016-9-2.
- [21] WARWICK K. A study in cyborgs [J]. *Ingenia Journal of the Royal Academy of Engineering*, 2003, 16: 15 – 22.
- [22] WARWICK K, GASSON M, HUTT B, et al. An attempt to extend human sensory capabilities by means of implant technology [C] //Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 1663 – 1668.
- [23] WARWICK K. Cybernetics – The way ahead [M] //Cybernetics in the 21st Century. LACKO B, SEVCIK V Eds., London, UK: Unicorn Press, 2005.
- [24] From Wikipedia, the free encyclopedia. Microchip implant (human) [EB/OL] //en.wikipedia.org/wiki/Microchip_implant_(human). 2015.
- [25] WARWICK K, GASSON M, HUTT B, et al. The application of implant technology for cybernetic systems [J]. *Archives of Neurology*, 2003, 60: 1369 – 1373.
- [26] WARWICK K, GASSON M, HUTT B, et al. Thought communication and control: A first step using radiotelegraphy [J]. *IEE Proceedings – Communications*, 2004, 151(3): 185 – 189.

- [27] From Wikipedia, the free encyclopedia. Deep brain stimulation [EB/OL] //en.wikipedia.org/wiki/Deep_brain_stimulation. 2015.
- [28] WEAVER F M, FOLLETT K, STERN M, et al. Bilateral deep brain stimulation vs best medical therapy for patients with advanced Parkinson disease [J]. *Journal of American Medical Association*, 2009, 301(1): 63 – 73.
- [29] ROJAHN S Y. A brain implant that thinks [J]. *MIT Technology Review*, www.technologyreview.com/news/429204/a-brain-implant-that-thinks/. 2012
- [30] DILLOW C. Telepathy on the horizon: new interface allows brain-to-brain communication [J]. *Popular Science*, www.popsci.com/scitech/article/2009-10/telepathy-tested-brain-computer-interfacing-allows-brains-beam-thoughts. 2009.
- [31] PRIGG M. Groundbreaking experiment allows first brain to brain communication over the internet-between people 5,000 miles apart [EB/OL]. *Daily Mailonline*, www.axilumrobotics.com/pdf/dailymail-2014-09-03.pdf. 2014.
- [32] WARWICK K, XYDAS D, NASUTO S J, et al. Controlling a mobile robot with a biological brain [J]. *Defence Science Journal*, 2010, 60(1): 5 – 14.
- [33] ANGLER M W. Will we ever... have cyborg brains? [EB/OL] //www.bbc.com/future/story/20121218-will-we-ever-have-cyborg-brains. 2012.
- [34] From Wikipedia, the free encyclopedia. Near field communication [EB/OL] //en.wikipedia.org/wiki/Near_field_communication, 2016.
- [35] GRIFFITHS S. Don't try this at home! Teenager, 15, implants a microchip in his hand to control his smartphone and play music (for mailonline. ScienceTech) [EB/OL] //www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-3143349/Don-t-try-home-Teenager-15-implants-microchip-HAND-control-smartphone-play-music.html. 2015.
- [36] GO' MEZ-MARTI' NEZ R, VA' ZQUEZ P, DUCH M, et al. Intracellular silicon chips in living cells [J]. *Small*, 2010, 60(4): 499 – 502.
- [37] DENSFORD F. Battelle's neurolife uses thought to control paralyzed limbs [EB/OL] //www.massdevice.com/battelles-neurolife-uses-thought-to-control-paralyzed-limbs/. 2016-4-14.
- [38] HOCHBERG L R, SERRUYA M D, FRIEHS G M, et al. Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia [J]. *Nature*, 2006, 442(7099): 164 – 171.
- [39] MAHMOUDI B, PRINCIPE J C, SANCHEZ J C. Extracting an evaluative feedback from the brain for adaptation of motor neuro-prosthetic decoders [C] // *Proceedings of the 32nd Annual International Conference of the IEEE EMBS*. Buenos Aires, Argentina: The Printing House, Inc, 2010: 1682 – 1685.
- [40] CHAI Guohong, SUI Xiaohong, LI Peng, et al. Review on tactile sensory feedback of prosthetic hands for upper-limb amputees by sensory afferent stimulation [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2014, 19(5): 587 – 591.
- [41] Chinese Expert Therapy Team for deep brain electrical stimulation to Parkinson's disease. Chinese expert team consensus for deep brain electrical stimulation to Parkinson's disease [J]. *Chinese Journal of Neurology*, 2012, 45(7): 541 – 543.
(中国帕金森病深部电刺激疗法专家组. 中国帕金森病深部电刺激疗法专家共识 [J]. *中华神经科杂志*, 2012, 45(7): 541 – 543.)
- [42] ZHOU Wei. Controlling the manipulator by the monkey's thought [EB/OL]. *Journal of Zhejiang University(e-edition)*. 2012, (431): 01-01. www.zdx.cuepa.cn/show_more.php?doc_id=561292-.
(周炜. 猴子“意念”控制机械手 [EB/OL]. *浙江大学学报(电子版)*, 2012, (431): 01-01. www.zdx.cuepa.cn/show_more.php?doc_id=561292-.)
- [43] ZBOYLE R. New computer chip modeled on a living brain can learn and remember [J]. *Popular Science*, www.popsci.com/technology/article/2011-08/first-generation-cognitive-hips-based-brain-architecture-will-revolutionize-computing-ibm-says. 2011.
- [44] PALMER J. 'Cyborg' yeast genes run by computer [EB/OL] // *Science and Technology Reporter*; *BBC News*, www.bbc.co.uk/news/science-environment-15598887. 2011.
- [45] AGAPAKIS C. I Heard you like feedback loops [J]. *Scientific American*. blogs.scientificamerican.com/oscillator/i-heard-you-like-feedback-loops/. 2011-12-15.
- [46] Minimally invasive medical technology dynamic information. Shanghai Jiaotong university successfully implements the human brain thought to control cockroaches action [J]. *Journal of Minimally Invasive Medicine*, 2015, 10(3): 322.
(微创医学技术信息动态. 上海交大成功实现人脑意念控制蟑螂行动 [J]. *微创医学*, 2015, 10(3): 322.)
- [47] ANTHONY S. Harvard creates cyborg flesh that's half man, half machine [EB/OL] // *ExtremeTech Newsletter*. www.extremetech.com/extreme/135207-harvard-creates-cyborg-flesh-thats-half-man-half-machine. 2012-8-29.
- [48] JEFFREY C. Cyborg cardiac patch offers alternative to heart transplants [EB/OL] // *Gizmag*. www.gizmag.com/bionic-cyborg-heart-electronic-patch/42323/. 2016.
- [49] MEDINA-SAINCHEZ M, SCHWARZ L, SCHMIDT O G, et al. Cellular cargo delivery: Toward assisted fertilization by sperm-carrying micromotors [J]. *Nano Letters (American Chemical Society Journal)*, 2016, 16(1): 555 – 561.
- [50] PASOLINI A. Wheelchair controlled by facial expressions to hit the market within 2 years [EB/OL] // *Gizmag*. www.gizmag.com/wheelchair-facial-commands/43206/. 2016.
- [51] ROSENBLUETH A, WIENER N, BIGELOW J. Behaviour, purpose & teleology [J]. *Philosophy of Science*, 1943, 10(1): 18 – 24.
- [52] NIRENBERG S, PANDARINATH C. Retinal prosthetic strategy with the capacity to restore normal vision [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(37): 15012 – 15017.
- [53] WARWICK K. The promise and threat of modern cybernetics [J]. *Southern Medical Journal*, 2007, 100(1): 112 – 114.
- [54] WAN Baiwu. Sixty years of cybernetics since founding [J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(4): 597 – 602.
(万百五. 控制论创立六十年 [J]. *控制理论与应用*, 2008, 25(4): 597 – 602.)
- [55] HARAWAY D. Manifesto for cyborgs: science, technology, and socialist-feminism in the 1980s [J]. *Socialist Review*, 1985, (80): 65 – 108.
- [56] From Wikipedia, the free encyclopedia. Cyborg anthropology [EB/OL] //en.wikipedia.org/wiki/Cyborg_anthropology. 2015.
- [57] WITTES B, CHONG J. Our cyborg future: Law and policy implications [EB/OL] // *Brookings Institution*. www.brookings.edu/~media/Research/Files/Reports/2014/09/cyborg-future-law-policy-implications. 2014.
- [58] WARWICK K. Cybernetics – The modern science of systems [J]. *Kybernetes*, 1994, 23(6/7): 76 – 85.
- [59] Karlsruhe Institute of Technology. The cyborg era has started [EB/OL] // *Science News from Science Daily*, www.sciencedaily.com/releases/2014/01/140110103239.htm. 2014-1-11.
- [60] Science Daily. Robot with a biological brain: New research provides insights into how the brain works [EB/OL] // *Science News*. www.sciencedaily.com/releases/2008/08/080813175509.htm. 2008.
- [61] From Wikipedia, the free encyclopedia. Brain implant [EB/OL] // en.wikipedia.org/wiki/Brain_implant. 2016-8-19.
- [62] HALLEY D. Computer chip implant to program brain activity, treat Parkinson's (Singularity HUB. Singularity University) [EB/OL] // singularityhub.com/2010/07/21/computer-chip-implant-to-program-brain-activity-treat-parkinsons/. 2010-7-21.
- [63] DELACEY L. Graphene successfully interfaced with neurons in the brain. (Source: University of Cambridge) [EB/OL] // *Gizmag*. www.gizmag.com/graphene-electrode-brain-disorders/41591/. 2016.
- [64] STABRYLA L. A new way to revolutionize brain function: computer chips are the new hippocampus [EB/OL] // www.pitt.edu/~lms162/engineering%20and%20ethics.pdf. University of Pittsburgh Swanson School of Engineering, 2011.
- [65] WIENER N. *Cybernetics: Control and Communication in the Animal and the Machine* [M]. 2nd Ed., Boston, USA: MIT Press. 1963.

作者简介:

万百五 (1928-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为大系统递阶稳态优化控制、智能控制和工业产品质量控制以及控制论, E-mail: wanbw@mail.xjtu.edu.cn.