

* 研究简讯 *

基于新型多通道脑神经刺激遥控系统的动物机器人研究*

杨俊卿 苏学成** 槐瑞托 刘小峰

山东科技大学 信息与电气工程学院机器人研究中心, 青岛 266510

摘要 介绍了作者研发的多通道脑神经刺激无线遥控系统, 与现有的 5V 遥控系统相比, 该系统具有良好的控制界面可完成实验参数的在线调整, 实验日志的保存和管理, 以及无线通信状态监控等功能; 由于采用集微控器和无线收发模块于一体的 nrf9e5 单片机, 研制出一个电压更低 (3.3V), 体积更小 (30mm×20mm×6mm (电池厚 4mm)), 重量更轻 (9g, 含电池 4.8g), 因此更适合小动物携带的接收控制器. 并结合对大鼠脑精确电极植入手术, 设计了一个实用的“脑机接口 (简称 BCI)”, 基于该 BCI 成功实现了人工电信号编码无线遥控自由活体动物 (大鼠) 运动行为的实验. 这不仅验证了基于这种设计方法的动物机器人实现的可行性, 同时实验证明了 3.3V 电压的控制器比现有的 5V 控制器更实用, 更有效.

关键词 动物机器人 无线多通道遥控系统 nrf9e5 脑机接口

人与动物的神经系统比自动控制系统和计算机网络系统要复杂得多, 但它们在信息的传递方式上有惊人的相似: 在神经细胞中, 信息是通过电信号传递的^[1], 这种电信号来源于神经和肌细胞所产生动作电位, 神经细胞中信息传递就像传送电报的 Morse 编码一样, 信息被编码为电冲动方式, 被神经元通过采用动作电位频率和样式的编码从一个部位传到另一个部位^[2]. 这就为神经科学与自动化、计算机科学交叉和融合提供了可能. 脑与计算机接口/或连接 (brain computer interface, BCI) 简称“脑机接口”, 是神经科学与计算机科学交叉和融合最为成功的事例, 它是指在大脑和外界之间建立起一种直接的信息交流通道, 通过这个通道, 一方面可以把外界信息直接传入大脑; 另一方面也可把大脑中的信息直接传出. 如果说过去若干年, 欲将人

或动物的神经系统与电路、计算机直接接口还仅是梦想的话, 那么现在这些研究已在一些国家悄然兴起, 正受到世界范围内更多的关注^[3], 并且已取得一定的成果^[4-8]. 我们设计了一个实用的脑机接口, 通过它施加人工电信号到动物的神经系统, 使动物变成“机器人式”的动物, 我们称这种动物为“动物机器人”或“机器人动物”.

动物机器人的研究有着广泛的意义, 与机电式机器人相比, 动物机器人具有较高的智能和可再生的能量, 而且在设计理念和控制方式上两者有天壤之别: 动物机器人的设计不需考虑复杂的机械结构; 控制上只需发送控制命令, 具体动作由受控动物自己完成, 不像机电式机器人设计那样, 为使它完成某个简单动作, 设计者不得不进行大量的软、硬件设计; 此外动物机器人除维持通信的能量外,

2006 04 17 收稿, 2006 08 14 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目 (批准号: 60543003)

** 通信作者, E-mail: sxch@sdust.edu.cn

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

不需要其他能量供给, 所以动物机器人有着更大的优势. 另外动物机器人的研究可进一步加深医学和计算机科学等相关学科的渗透和融合, 进而推动新的医疗仪器和先进诊断技术的诞生.

1 工作原理

选择生理学研究 and 生理实验中常用的大鼠作为动物机器人研究的对象. 受刺激的神经核团和位点选用以下 3 个区域: 下丘脑的内侧前脑束(MFB, 鼠脑中的愉悦中枢之一)和左右两侧的第一躯体感觉皮层 S1. 将一对电极植入下丘脑的内侧前脑束, 作为阳性强化刺激中枢(此处为欣快细胞群), 对 MFB 处进行

刺激, 可使大鼠产生强烈兴奋而向前奔跑; 另两对电极分别植入左、右两侧的第一躯体感觉皮层 S1 的胡须区. 在刺激左、右两个 S1 的胡须区时, 在大鼠身体的左、右侧产生碰到障碍物的幻觉, 从而控制大鼠左转、右转. 如图 1 所示, 整个控制系统由两大部分组成: 指令发生器和接收控制器. 指令发生器由笔记本电脑和以单片机 nrf9e5 为控制核心的发射基站组成; 接收控制器由单片机 nrf9e5 和外围逻辑电路组成. 背在大鼠身上的接收控制器在发射基站的控制下产生特定要求的脉冲信号, 该信号通过成对的电极形成控制回路将控制信号施加到大鼠脑的相应核团或位点以控制大鼠的动作.

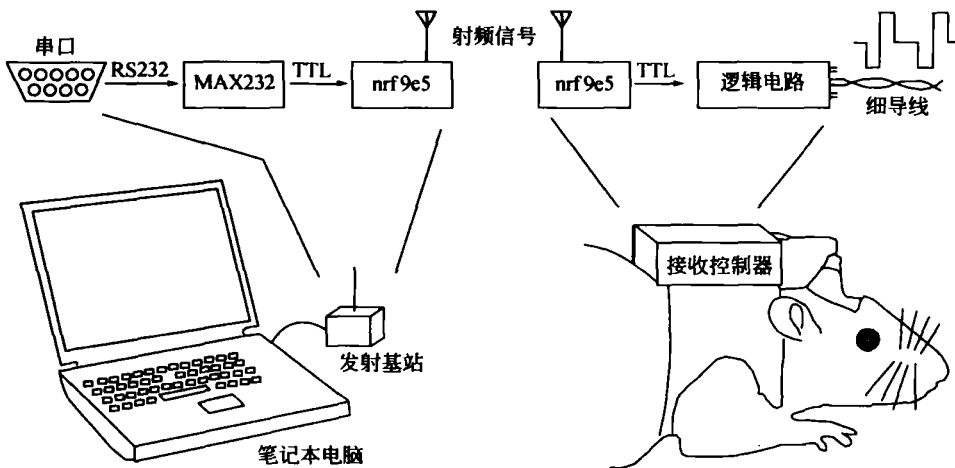


图 1 动物机器人控制示意图

2 无线遥控系统的设计

2.1 控制系统软件设计

整个系统的软件设计共有两部分——指令发生部分和接收控制部分. 指令发生部分包括运行在笔记本电脑上的控制台程序和运行在发射基站中的无线通信程序, 接收控制部分运行在接收控制器上, 负责根据接收到的命令和参数产生相应的控制信号, 系统的整个框图如图 2.

控制台程序是我们信息输入及信息回馈的窗口, 程序用 VC 编写, 共分 5 大模块: 串口通信、参数配置、实验日志记录、实验日志管理和通信状态监控. 参数配置模块主要用来完成 3 种参数的设置: (i) 接收控制器编号选择, 通过它定义目标地址, 实现对多个接收控制器的通信; (ii) 串口通信

参数的设置, 用来设置通信波特率、数据位、停止位、校验位等参数; (iii) 刺激方式及刺激脉冲参数的配置, 刺激方式可分单次刺激和连续刺激, 刺激脉冲参数包括脉冲的频率、脉宽(文中所有脉宽皆指单峰脉冲的宽度)、脉冲个数. 以上参数都可以根据需要在线修改, 不仅增加了控制的灵活性而且提高了工作效率. 串口通信的任务是负责打包上述

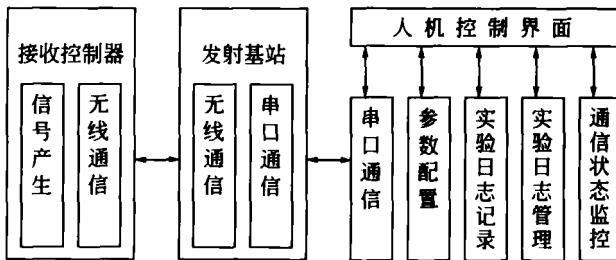


图 2 控制系统软件结构框图

参数并将其发送到发射基站, 数据格式见表 1. 表 1 中接收控制器编号中的“XXXX”是指接收控制器的身份编号, 根据实际情况可在 1—100 中任取一值. 数据中的“XXXXXX”是指脉冲参数信息包括脉冲的频率、宽度和个数. 0xcc 是数据包结尾的标志. 串口通信同时负责接收发射基站的回馈信息, 利用 VC 的多线程技术, 专门设计一个独立的线程负责这个模块的运行以保证通信的实时性和可靠性; 实验日志记录和查询模块是利用 VC 的数据库编程实现的, 所有实验数据实现了以 Access 数据库格式进行存储和管理, 方便了数据统计和分析; 通信状态监控是通过接收控制器的应答信息判断它的当前运行状态, 并以图形和文字的方式在界面上显示, 可以方便及时地了解当前接收控制器的运行状态以便决定何时发出以及发出何种控制命令, 实现更好的控制效果.

表 1 通信协议数据格式

报头	接收控制器编号	配置/命令	方式	数据	报尾
0x55	0xaa	xxxx	0x01/0x02	xxxxxx	0xcc

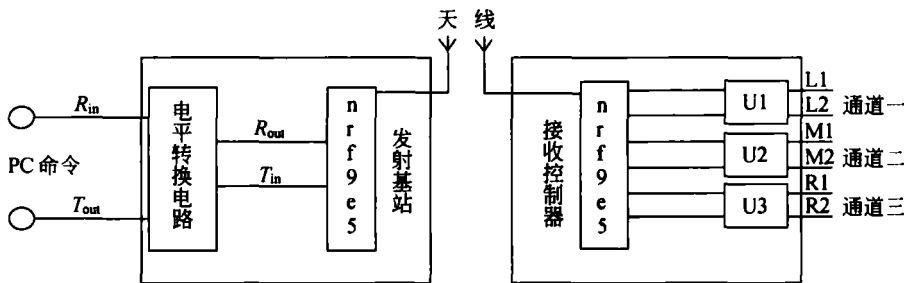
运行在发射基站中的程序由两个模块组成: 串口通信和无线通信. 串口通信负责与 PC 机交互, 无线通信与接收控制器的无线通信模块组成一个双向无线通道, 用来传输 PC 机与接收控制器之间的交互信息, 通过这个桥梁接收控制器的信号产生模块, 可根据接收到的参数信息产生特定规律的刺激脉冲信号, 同时负责发送自身运行状态信息回馈到 PC 机.

2.2 发射基站和接收控制器的设计

遥控系统的控制器选用挪威 Nordic 公司生产的 nrf9e5 芯片, 该芯片 32 脚, 14 个数字 I/O 引脚, 4 通道 10 位 ADC, 4352 字节 RAM, 7 个中断, 3 个定时器, 1 个 UART, 1 个 SPI 通信口, 具有 8051

兼容内核和 nrf905 无线通信模块等. 它的最大特点就是具有 51 内核的单片机和无线通信模块集成在一起, 从而避免了采用两个分立芯片而不得不进行的硬件和软件设计, 采用这种集成设计不仅提高了工作效率而且增加了整个控制系统的稳定性和可靠性. 不仅如此, 由于芯片尺寸只有 5 mm×5 mm, 整个接收控制器的尺寸为 30 mm×20 mm×6 mm(电池厚 4 mm), 共重 9 g(含电池 4.8 g), 所以相比文献[9]中所设计的接收控制器尺寸(48 mm×23 mm×19 mm), 重量(28 g)明显减小, 更适合小型动物携带, 有利于减小由于动物负重所造成的对实验效果的不利影响.

由于此款单片机 I/O 口没有三态功能, 为了保证 3 个通道的相互独立, 在电压为 3.3 V 系统的接收控制器电路设计中, 选用三片 sn74cb3t3306 数据总线开关以实现 3 个通道间的隔离, 如图 3 所示, 其中 U1, U2, U3 是分别控制 3 个通道的总线开关. 由于选用的是电压只有 3.7 V 的轻质聚合物电池, 所以要在 5 V 系统中设计升压电路, 另外选用 sn74lvc4245 作为电压转换芯片, 完成 3.3—5 V 的电压平移设计, 系统原理图如图 4 所示. 系统工作时, PC 机命令通过串口经 RS232 电平转换芯片 MAX2322, 以 19200, 8, N, 1 串口配置发送数据到 nrf9e5 的 UART, 在芯片内部完成循环冗余码校验(CRC), 经 Manchester 编码后, 以 1000 kbs 的速率无线发射数据, nrf9e5 采用 Gauss 频移键控(GFSK)调制方式, 此种调制方式比频移键控(FSK)调制方式有更宽的有效传输带宽. 接收控制器接收无线信号, 完成地址匹配, Manchester 解码后, 将有效数据传给用户程序进行处理. 根据接收到的参数, 控制器选择其中的一个通道, 产生刺激脉冲以刺激大鼠脑的相应核团和位点.



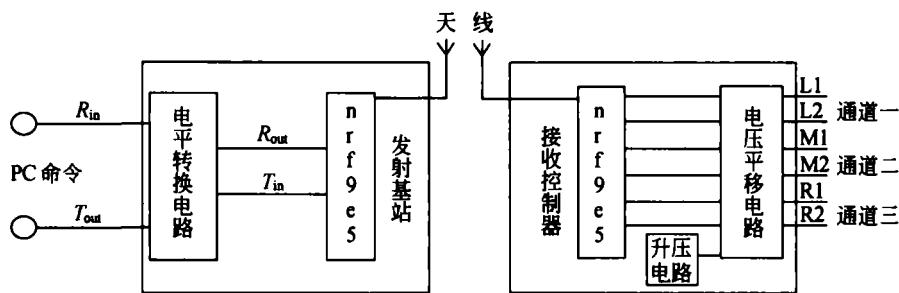


图 4 5V 电压遥控系统原理图

2.3 刺激脉冲的产生

我们选用了 P0 口的 6 个引脚，两个一对组成 3 个通道，每一通道可以独立产生双向刺激脉冲，如图 5 所示。图 5(a)和(b)分别是电压为 5V 和 3.3V 时控制系统产生的刺激脉冲波形，脉冲是双向且完全对称的，这样可以防止不对称脉冲产生的电荷积聚而损伤大鼠的大脑；用示波器的表笔一端接工作

通道另一端接非工作通道测得的波形图如图 6。图 6 (a)和(b)分别是电压为 5V 和 3.3V 时工作通道对非工作通道的干扰波形。比较两图可知 3.3V 系统较 5V 系统有更小的干扰波形，从而减小了工作通道对非工作通道干扰，这也是 3.3V 系统优于 5V 系统的一个重要原因，波形的相关参数见表 2。

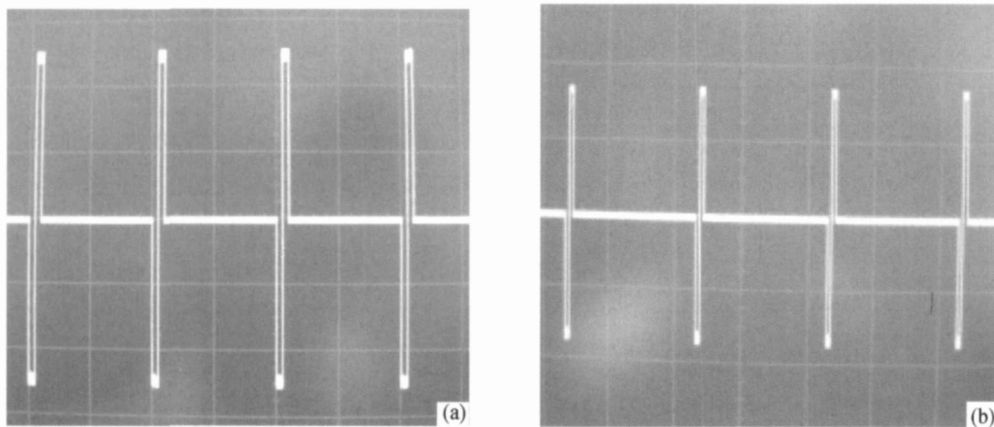


图 5 当前工作通道刺激波形图
(a) 电压 5V; (b) 电压 3.3V

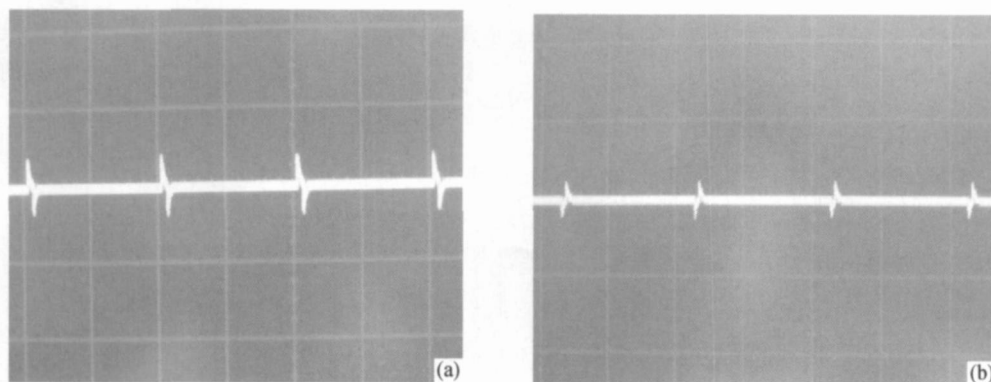


图 6 工作通道与非工作通道间干扰波形图

表 2 刺激波形的相关参数表

	图 5(a)	图 5(b)	图 6(a)	图 6(b)
电压/V	5	3.3	5	3.3
频率/Hz	100	100	100	100
脉冲宽度/ms	0.4	0.3	0.4	0.3
脉冲个数	4	4	4	4
示波器工作参数	(2V, 5ms)档	(2V, 5ms)档	(2V, 5ms)档	(2V, 5ms)档

3 手术

手术的任务是把直径约为 $100\mu\text{m}$ 尖端直径约为 $30\mu\text{m}$ 的 6 根不锈钢电极镀绝缘质后, 两个一组, 间距约 1mm 成对植入大鼠大脑的内侧前脑束和左右两侧的第一躯体感觉皮层 S1 的胡须区. 大鼠麻醉后, 固定于脑立体定位仪上, 手术使其颅骨完全暴露, 去除骨膜, 并用适量 3% 的双氧水或乙醚擦拭颅骨以去除表面油脂. 并在上述位点用颅骨钻钻孔, 将电极对在立体定位仪的引导下匀速缓慢地植入脑内并用牙科水泥牢固固定于颅骨表面, 7d 后经观察生理参数无异常, 即可用于训练实验.

4 实验及结果分析

4.1 训练方法

在一定参数电刺激脉冲的控制下, 大鼠首先训练“左拐”运动, 若正确, 则发送“奖赏”命令立即给予 MFB 刺激, 以示奖励; 接下来训练“右拐”运动, 同样地, 在正确的情况下予以奖励, 若上述某次刺激反应错误, 则不给予 MFB 强化. 此外, 点击“奖赏”刺激 MFB 还有促使大鼠兴奋并向前运动的作用. 每组实验训练大约在 15 min 左右, 经过 1—1.5 h 的强化训练即可得到理想的结果. 对 8 只大鼠反复进行上述

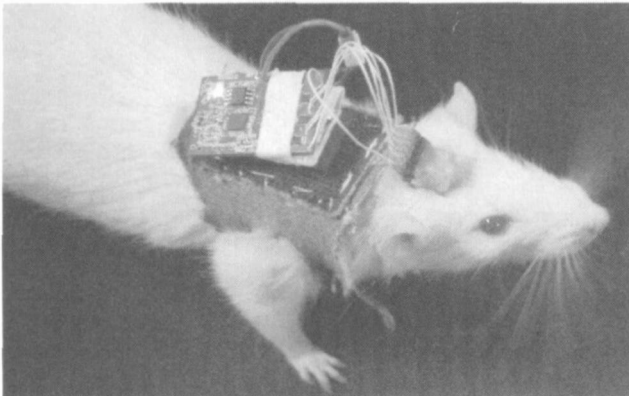


图 7 实验中的动物机器人

实验, 其中有 6 只大鼠能够按电信号的控制进行运动, 而它们中的 3 只大鼠的动作正确率几乎达 100%, 其他的正确率可达 90% 左右. 经过一段时间的强化训练, 有 2 只大鼠可以原地连续“向左”或者“向右”转 10 多圈, 还可以控制大鼠沿简单的指定路线行走.

4.2 刺激脉冲的参数对控制效果的影响

神经细胞的信息传递是由动作电位完成的, 动作电位的产生是细胞膜去极化的过程, 当去极化达到临界水平时, 神经元膜上就会产生动作电位, 所以刺激脉冲要有足够的强度以使膜电位去极化超过临界水平从而产生动作电位.

刺激脉冲的参数有电压、脉宽、频率和一次性产生的脉冲个数(简称脉冲个数). 在研究过程中我们分别用 3.3V 和 5V 系统进行了实验. 实验中发现脉宽、电压、脉冲个数相同时, 频率在 95—105 Hz 时, 控制效果最好, 脉冲频率远离此频段时控制效果随之减弱. 我们在实验过程中还发现刺激脉冲个数为 10 时, 最小有效脉宽为 0.2 ms, 脉宽增大时控制效果增强, 但最大脉宽受限于脑组织的承受能力, 电压持续时间太长损害脑内的细胞组织, 脉宽不能超过 0.8 ms. 脉冲个数也影响控制效果, 实验发现单峰脉宽为 0.4 时, 脉冲个数最少不得小于 3 个; 电压为 5V 时, 15min 的实验中, 实验的前期(前 5—8 min)训练好的大鼠控制正确率高达 95%, 但随刺激时间的延长(约 10 min 后)控制效果明显下降, 大鼠经常出现呆滞的情况; 相同脉冲参数配置下, 电压为 3.3V 时, 在 15 min 的实验过程中, 效果一直很稳定, 可能的原因之一是 5V 的电压比 3.3V 的电压在脑组织中产生了较强的扩散效应, 随实验时间的加长, 扩散效应累积就越严重, 以至于影响到其他的核团和位点, 扰乱了脑内的神经系统. 实验证明频率 100 Hz, 脉宽 0.3 ms, 电压 3.3V, 个数 10 时控制效果最稳定.

4.3 影响正确率的因素

分析其影响正确率的因素主要有: (i) 与控制信号的参数选择有关. 因为大鼠之间存在个体差异, 而且电极植入时两电极间的间距有误差, 从而在相同参数的电脉冲的刺激下产生不同的效果. (ii) 与微电极植入脑部的三维定位精确度有关. 大鼠个体间的

差异和手术人员的经验都是影响定位精度的重要因素。(iii) 与环境的噪声(如陌生声音、敲击声等)有关。老鼠天生胆小, 易受惊吓, 这也是影响控制效果的因素之一。

5 结论与展望

到目前为止, 我们克服了电气设计和实验手术的种种困难, 通过不断地完善和改进, 依照切实可行的技术路线, 设计了一套电压低, 体积小, 重量轻, 多通道且可实现刺激通道独立配置控制参数的无线遥控系统, 掌握了准确定位大鼠脑核团和位点的方法, 并在此基础上, 设计了一个实用的BCI, 实现了对大鼠简单动作的控制, 验证了基于这种方法的动物机器人设计的可行性, 完成了基于大鼠的动物机器人初步设计, 同时不仅实验证明了3.3 V电压刺激的有效性而且较5 V电压刺激有更好的控制效果, 从动物机器人设计的角度来看, 我们已取得了一定的进展, 但还远远达不到实用的要求, 还需进一步地深入研究。

动物机器人的研究有着广泛的意义, 随着这项研究的深入开展, 势必加深从事计算机科学与神经科学乃至整个医学的人员间的交流, 推动计算机科学与医学两大学科的广泛交叉融合, 从而加速生物医学仪器与诊断技术的发展, 同时开辟出新的研究领域, 带来巨大的经济价值和社会效益。

参 考 文 献

- 1 Nicholls JG, Martin AR, Wallace BG, 等著, 杨雄里, 等译. 神经生物学. 北京: 科学出版社, 2005, 4
- 2 Bear MF, Connors BW, Paradiso MA 著, 王建军主译. 神经科学—探索脑. 北京: 高等教育出版社, 2004, 50—70
- 3 Iankertz BB, Muller KR, Curio G, et al. The BCI competition 2003: Progress and perspectives in detection and discrimination of EEG single trials. *IEEE Trans on Biomedical Eng*, 2004, 51(6): 1044—1051
- 4 Neuper C, Scherere R, Reiner M, et al. Imagery of motor actions: Differential effects of kinesthetic and visual motor mode of imagery in single trial EEG. *Brain Res Cogn Brain Res*, 2005, 25(3): 668—677
- 5 Talwar SK, Xu S, Hawley ES, et al. Rat navigation guided by remote control. *Nature*, 2002, 417: 37—38
- 6 Chapin JK, Nicolelis MA. Principal component analysis of neuronal ensemble activity reveals multidimensional somatosensory representations. *J Neurosci Methods*, 1999; 94(1): 121—140
- 7 Chapin JK, Moxon KA, Markowitz RS, et al. Real time control of a robot arm using simultaneously recorded neurons in the motor cortex. *Nature Neuroscience*, 1999, 2: 664—670
- 8 Francis JT, Chapin JK. Force field apparatus for investigating movement control in small animals. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2004, 51(6): 963—964
- 9 Xu S, Talwar SK, Hawley ES, et al. A multi channel telemetry system for brain microstimulation in freely roaming animals. *Journal of Neuroscience Methods*, 2004, 133(12): 57—63