

## 动物机器人遥控导航系统

王勇<sup>1</sup>, 苏学成<sup>1</sup>, 槐瑞托<sup>1</sup>, 王敏<sup>2</sup>

(1. 山东科技大学机器人研究中心, 山东 青岛 266510; 2. 山东科技大学信息与电气工程学院, 山东 青岛 266510)

**摘要:** 介绍了一个通过 PC 机控制动物机器人的遥控导航系统. 该系统由计算机发出控制指令到动物机器人身上的控制器, 然后再由它发出双相刺激脉冲到动物机器人脑部的相关核团, 以控制其行为. 另外, 该系统能够同时控制动物机器人的多个不同脑部位, 并能扩展出更多的通道, 可以满足不同通道脑控制实验和其他的相关电生理实验. 实验证明: 即使在 300m 远的复杂环境中, 该系统也具有高保真性, 且工作稳定, 性能良好. 此外, 该系统体积小, 重量轻, 动物机器人容易携带.

**关键词:** 动物机器人; 导航系统; 电极刺激; 神经控制

**中图分类号:** TP24 **文献标识码:** B

## A Telemetry Navigation System for Animal-robots

WANG Yong<sup>1</sup>, SU Xue-cheng<sup>1</sup>, HUAI Rui-tuo<sup>1</sup>, WANG Min<sup>2</sup>

(1. The Center of Robot Research, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China;

2. College of Information and Electrical Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

**Abstract:** A telemetry navigation system that controls animal-robots based on PC is described. In the system, the control command dictated from the PC can be sent to the controller embedded in the animal-robot, then the controller sends biphasic stimulation pulses to nucleus to control the animal-robot behavior. In addition, the controller can control several brain locations of animal-robots simultaneously, and extend more channels easily; so different brain control experiments as well as other related electrophysiological experiments can be provided. Experiments indicate that the system performs stably with high fidelity and outstanding capability even in complex environments over a distance of about 300 m. Furthermore, the system is small and light so that it can be easily carried by animal-robots.

**Keywords:** animal-robot; navigation system; electrode stimulation; neuro-control

### 1 引言 (Introduction)

近年来, 机器人领域各种各样的机器人层出不穷, 智能化、微型化是其中的一个发展方向, 但是微型机器人所携带的能量受到自身体积的限制, 因此不可能行走太远的距离. 动物机器人(本文所述的动物机器人指其行为受到人为控制的 Wistar 大鼠, 为方便陈述, 下文中均以“大鼠”代指“动物机器人”)则很好地解决了微型机器人携带能量不足的问题, 同时在军用或者警用领域有绝佳的隐蔽性, 还给残疾人康复治疗注入了新的活力.

动物机器人需要在控制器的控制作用下才能进行行走等各种活动, 显然对于清醒的大鼠, 我们不可

能用一根长长的电缆使其和控制器进行连接, 因为这种有线的方式不仅限制动物的自由运动, 而且分散其注意力或使其产生痛苦情绪<sup>[1]</sup>. 特别是象大鼠这样的小动物, 如果在其颅骨固定导线, 则其行为活动和可操作性将被限制在很小的空间内(代表性的是简单迷宫和实验室). 有时, 电缆也能造成视觉和运动假象, 所以控制电缆也常常被咬断或者抓掉. 这些问题随着实验的扩展和对其控制的复杂程度的增加, 将需要大量的脑部电极刺激而会变得更糟. 这一问题用我们研制的遥控导航系统将得到缓解, 该系统体积小、重量轻, 足以使动物在背上携带. 这样可以控制动物在非固定模式的、复杂的三维空间自由

活动.为了解决遥控导航系统在复杂环境工作时信息传送的保真性,我们采用了“指令无线传输,控制信号由背在大鼠身上的控制器有线导入大脑的工作模式”,同时为了减小控制器的质量和体积,我们采用了贴片封装的元器件和质量轻、能量高的聚合物锂电池,另外,我们采用了双相 TTL 电平脉冲,以保证刺激核团积累电荷为零,最大程度地减小了电脉冲对大脑组织的损伤.

实验证明,我们用电刺激相关核团来产生暗示和奖励,安排强化训练,使控制者能够从远处正确引导动物,使其按规定行程在不同的三维空间行走<sup>[2]</sup>.结果证明该导航系统运行可靠,大小适宜.

## 2 原理(Principle)

该遥控导航系统中,PC 机运行一段指令发送程序,该程序在运行期间可实时调整刺激参数,并且各刺激参数直观地显示于电脑屏幕上,系统中控制指令通过与 PC 机 USB 口相连的指令发射器采用无线电波的方式向控制器发送.大鼠背上的指令接收器接收到正确指令后,再经由 UART(通用串行异步接口)传入到控制信号发生器,启动控制信号输出程序,以产生特定参数(脉宽、频率、个数等)的双相 TTL 电平脉冲.该脉冲通过导线和植入到脑部的微电极引入到大鼠神经系统相关核团:左右两侧胡须映射区 S1 以及欣悦运动中枢 MFB.在电刺激的作用下,大鼠神经系统会产生其左侧或者右侧胡须碰到东西的幻觉,使其产生正确的自动规避行为,并通过刺激 MFB 进行强化训练<sup>[3]</sup>,可达到对其进行准确控制的目的.

## 3 系统(System)

该系统由两部分组成:一个是供控制人员操作并发出控制指令的 PC 机控制发射站,另一个是背在大鼠的背部并与植入到其脑部相关核团的电极相连的控制器,如图 1 所示.

### 3.1 PC 机指令发送程序及控制发射站

该指令发生程序以 Visual C++ 书写,并可以实时调整控制信号的各种参数,如:频率、脉宽、强度、脉冲个数、组频率、重复次数等;可以选择刺激方式,如:单刺激、连续刺激;还可以设定 PC 机串口的各种通信参数,如:串口号、波特率、数据位等.选定参数以后,会在“发送内容”框中显示该指令的特定代码,此后可以随时通过点击功能按钮:“左拐”、“右拐”、“奖赏”,向 PC 机的串口送出一条指令.该指令由特

定 ID(身份认证码)和代表控制信息各种参数的特定数码组成,其中 ID 对于屏蔽传递的噪声、减少干扰、以及控制多个大鼠是十分必要的.每一条指令在发送时其各种参数是确定的,这些命令作为 ASCII 码字符串,以 2400 的波特率,通过串口送至发射器.

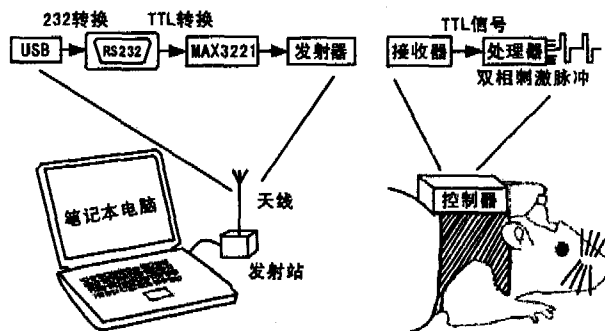


图1 遥控导航系统示意图

Fig.1 Overview of the telemetry navigation

### 3.2 发射器电路

该电路能量由 5V 的稳压电源经过降压稳压到 3.3V 供给.首先,计算机串口的 RS232 信号经过电平转换电路转换为指令发射器便于处理的 TTL 电平信号,然后传送至指令发送器.指令发射器中的 MCU 采用 Philips 公司生产的 P89LPC921F 型单片机.该单片机工作电压低,可工作在 2.4 ~ 3.6V,功耗低、体积小、集成度高、成本低,并且 I/O 可承受 +5V 的 TTL 电平信号.另外,自身带有片内时钟振荡源和 4kB flash 程序存储器,以及 1k 字节的可擦除扇区,因此其外围元件少,且不必扩展,有利于简化电路,提高工作可靠性.与其接口的单片射频芯片采用 Chipcon 公司生产的微功率单片集成收发射频芯片 CC1000,该芯片可工作在 2.4 ~ 3.6V,功耗低、体积小、灵敏度高、外围元件少、抗干扰能力强.

该指令发射器采用基于 FSK (Frequency-Shift Keying, 移频键控方式)的调制方式,并采用 FEC (Forward Error Correction, 前向纠错)信道编码技术.该编码技术不需要反馈信道,译码实时性好,发送端发送时能纠正错误的编码;在接收端根据接收到的码和编码规则,能够自动纠正传输中的错误,很大程度上提高了数据抗突发干扰和随机干扰的能力.其工作频率在 ISM 频段,无需申请频点,载频频率 433MHz,提供 4 个信道.另外,该指令发射器可采用外接天线,在视距情况下,天线位置大于 3m 时,可靠传输距离达 300m,见图 2(A).

### 3.3 控制器电路

该电路由两块印刷电路板组成：指令接收器和控制信号发生器。将其分开是为了使实验设备模块化，以提高设备利用率和搭配灵活度。其能量由 3.8V、500mAh 的聚合物锂电池提供，如图 2(B) 所示。

指令接收器有一个螺旋状天线和一个 LED 指示灯，接收到正确指令后将点亮 LED 指示灯。指令接收器也采用 FSK 的调制方式和 FEC 信道编码技术，其硬件组成同指令发射器一样。接收到的指令通过串口(USART)传入到控制信号发生器。控制信号发生器的 MCU 采用 Atmel 公司的 Atmega128L，该微处理器功能强大，集成度高，片内集成了定时器、PWM、比较器、A/D 转换、振荡器等功能模块，还有 128k 的 flash 存储器，因此外围电路简单，此外 I/O 口资源丰富，最多可扩展出 20 个通道<sup>[5]</sup>。控制信号发生器将

接收到的指令进行解码，确认是正确指令信息后，就转入到刺激脉冲产生的分支程序，如图 3 所示。并把当前不占用的 I/O 引脚置为高阻模式，以阻止控制信号发生器和电极之间的信息对话。在控制信号刺激期间根据 PC 机中的指令，信号可以从一个通道(每两个 I/O 引脚组成一个通道)切换到另一个通道，用到的 I/O 引脚置为输出模式，其余的为高阻模式。这样，微处理器将对来自 PC 机的 ASCII 码命令进行翻译解释而产生一系列周期、频率和脉冲个数等参数特定的双相 TTL 命令脉冲(脉宽 0.5ms，频率 100Hz，脉冲个数 10 个)，并沿颅顶适配器<sup>[4]</sup>到达大鼠脑部指定核团。刺激结束后，所有引脚复位成高阻模式，程序返回等待下一个控制指令。该控制器大小是 45mm × 30mm × 19mm，重量为 25g，整个控制器可以通过与之相配的 Velcro(维可牢尼龙搭扣)粘在鼠身上的马背上，即可固定于鼠背上。

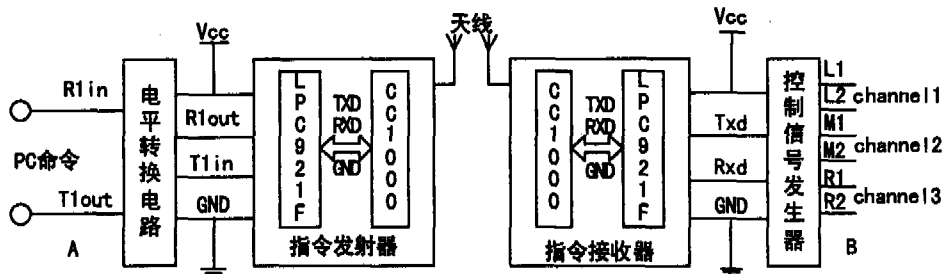


图 2 遥控导航系统原理框图

Fig. 2 Schematic diagram of the telemetry navigation

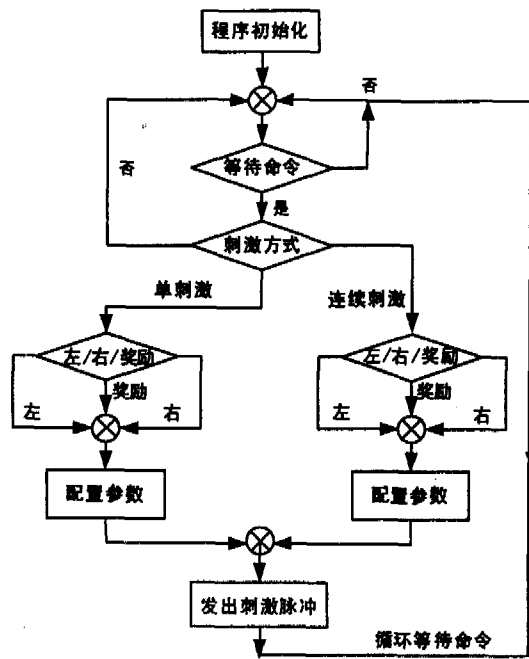


图 3 程序流程图

Fig. 3 Flow diagram of program

## 4 电极及手术 (Electrodes and surgery)

### 4.1 电极

电极采用经过电解液腐蚀至直径约 100 $\mu$ m(根据电生理学相关知识,电极与相关脑核团的直径比小于 1/5 即可保证核团不受功能性损伤)、尖端约 30 $\mu$ m 的不锈钢针灸针,经清洁处理后,用树脂均匀涂于表面(由液体张力自动露出尖端),再经 150 $^{\circ}$ C 恒温烘干制成。

### 4.2 手术

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,并用适量的 3% 双氧水或乙醚擦拭颅骨以去除表面油脂。

经过大量前期实验,并由实验后经过脑切片证实:250g 左右的大鼠,根据 Paxinos 和 Watson 大鼠脑立体定位图谱,在三维立体定位仪的引导下,在如下位置进行定位:

MFB:前向后 1.8mm,向右 2.1mm,电极深 8mm

左侧 S1:前向后 1.8mm,向左 4.8mm,电极深 3mm

右侧 S1:前向后 1.8mm,向右 4.8mm,电极深 3mm  
在上述位点用颅骨钻钻孔,在立体定位仪的引导下将电极对匀速缓慢地植入脑内并用牙科水泥牢固固定于颅骨表面,即可保证核团位点及电极植入准确率在 95% 以上.手术后经消毒处理,饲养 7 天,经观察生理参数无异常,即可用于训练实验.

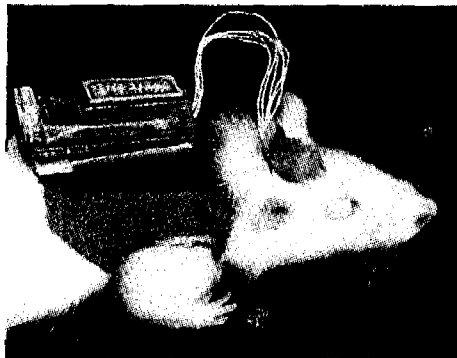


图 4 实用中的动物机器人控制器  
Fig. 4 The practical controller of animal-robots

## 5 实验结果 (Experiment results)

设定该遥控导航系统的控制信号参数为:脉宽 0.5ms,频率 100Hz,脉冲个数 10 个,刺激强度 5V,组频率 0.2Hz,在 3.8V、500mAh 聚合物锂电池供电情况下能够连续工作 10h,且视距情况下传输距离达到 300m 时仍能保持高保真性,工作稳定.在电池供电情况下,除 PC 机外,指令发射器和控制器总重量不足 45g,且体积小,易于携带,如图 4 所示.

在上述参数的电刺激脉冲的控制下,大鼠首先训练“左拐”运动,若正确,则点击“奖赏”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 10min 左右,经过 1~1.5h 的强化训练即可得到理想的结果.另外,通过加大脉冲个数可以提高刺激强度,达到提高动作正确率的目的.对 8 只大白鼠反复进行上述实验,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.

分析其影响正确率的因素主要有:(1)与控制信号的参数选择有关,因为大鼠之间存在个体差异;(2)与微电极植入脑部的三维定位精确度有关;(3)

与环境的噪声(如陌生声音、敲击声等)有关;(4)更重要的一点是,大鼠除了在电脉冲刺激作用下感受到“触觉(碰到物体的幻觉)”外,还有其视觉信息传入大脑的干扰:即在电信号的作用下感到某侧“碰到物体”而眼睛并没有看到“物体”,因而有时会“犹豫不决”,或迟疑一阵后才会做出正确响应,少数情况下做出错误响应.

## 6 结论 (Conclusion)

该系统通过向大鼠左右两侧 S1 皮层发出特定参数的双相电脉冲刺激序列(刺激强度 5V,脉宽为 0.5ms,频率为 100Hz 的 10 个脉冲组成的刺激序列)作为直接暗示,使动物学习左右转向,并通过 MFB 刺激使之强化.在这种强化的基础下,我们发现鼠能够做出正确的“左拐”、“右拐”等行为动作,甚至可以引导其正确地在特定三维路径下行走相当长的距离.这表明遥控导航系统传递的暗示与奖励是可靠的.该系统的突出特点就是采用笔记本电脑作为控制发射站,可以灵活机动,便于携带,适于不同的环境,且程序界面友好;大鼠背上的控制器重量轻,体积小,工作可靠,对大鼠自身的影响比较小,大鼠可以舒适地运动和工作,在 1h 的实验内无疲劳的迹象.整套系统经济可靠,工作稳定,通道扩展性强,适应性好(如:大鼠、兔子、猫等),特别适合于动物机器人.此外,该系统还可应用于生理学领域的电生理和神经生理学实验,这对研究动物在自由活动状态下的有关生理状态参数是十分有用的.

## 参考文献 (References)

- [1] Xu S, Talwar S K, Hawley E S, et al. A multi-channel telemetry system for brain microstimulation in freely roaming animals[J]. *Journal of Neuroscience Methods*, 2004, 133(1-2): 57-63.
- [2] Talwar S K, Xu S, Hawley E S, et al. Rat navigation guided by remote control[J]. *Nature*, 2002, 417(6884): 37-38.
- [3] Bear M F, Connors B W, Paradiso M A. 王建军,等. *Neuroscience: Exploring the Brain*[M]. 北京:高等教育出版社,2004.
- [4] 程明,高上凯,张琳.基于脑电信号的脑-计算机接口[J]. *北京生物医学工程*, 2000, 19(2): 113-118.
- [5] 马潮. 高档 8 位单片机 Atmega128 原理与开发应用指南(上)[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2004.

## 作者简介:

王勇(1981-),男,硕士.研究领域:动物机器人,特种机器人,复杂系统理论与控制.

苏学成(1938-),男,教授,博士生导师.研究领域:特种机器人,动物机器人,机器人技术及微机控制.

魏瑞托(1978-),女,讲师.研究领域:神经生理学,动物机器人.