中国科学 : 信息科学　2012 年　第 42 卷　第 9 期 : 1130–1146
www.scichina.com　info.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS
论　文

控制动物机器人运动行为的脑机制和控制方法

苏学成*, 槐瑞托, 杨俊卿, 汪慧, 吕常智

山东科技大学机器人研究中心, 青岛 266510
* 通信作者. E-mail: sxch2009@yahoo.cn

收稿日期: 2012–08–15; 接受日期: 2012–08–19
国家自然科学基金 (批准号: 60543003, 60875068)、科技部国际合作项目 (批准号: 2008DFR00560) 和国家高技术研究发展计划 (863 计划) (批准号: 2007AA04ZA238) 资助项目

摘要　本文给出了一种普遍适用的控制动物运动行为 (motor behavioral) 的脑机制和控制方法的研究结果. 主要工作有以下 3 个方面: (1) 给出了一种控制动物运动行为的思想. 即不是像此前那样基于动物的特有生理特点 (例如: 大鼠的胡须 (vibrissae)、昆虫的翅膀) 而是基于动物自由活动状态下的共性神经机制, 探索和研究与所需运动行为控制相关的脑机制及其脑内代表区 (brain representations) 和这些代表区内的适宜神经位点 (neural sites); 通过选取适宜的仿真神经信息编码电信号, 刺激所选的相关位点, 能够导致所需的运动行为必定发生和运动过程必定可控. (2) 提出了明确的研究路线图. 即 "重点研究感觉 (sensory)、动机 (motivation) 和情绪 (emotion) 的神经系统与运动行为控制之间关系" 的观点, 并论述了该观点的神经科学依据. (3) 给出了普遍适用的控制动物运动行为的设计原理和方法, 并以机器人鸽为例做了实验验证.

关键词　脑机制　脑内代表区　运动行为控制　动物机器人　机器人鸟/鸽　仿真神经信息编码

1　引言

1.1　动物机器人介绍

"动物机器人" 也称 "半电子人 (cyborg)". 其原理是, 根据动物运动行为的神经生物学原理, 选取活体动物的能够导致发生人们预期运动行为的相关脑区 (brain region) 或/和神经, 利用适宜的人工电信号和适宜的方式微刺激所选脑区或/和神经的适宜神经位点, 导致动物发生相应的运动行为, 从而控制和引导动物沿预期的路径 (轨迹) 运动, 即通过电信号支配活体动物的神经活动, 将其变成运动行为受人操纵的动物. 因为它是以活体动物作为 "本体" 的机器人, 所以被称为 "动物机器人"; 同时, 由于它是受电子信号控制的活体动物, 所以也称为 "半电子人".

1.2　动物机器人研究概述

由于动物机器人研究在神经科学与工程、国家安全等领域具有重要的理论和应用价值, 特别是由于它具有天然隐蔽性、避障、避险和抗恶劣环境 (如大风、大雨等) 干扰等完备的自主智能和具备自身运动能源等突出优点, 目前已经成为备受关注的国际前沿研究课题. 2002 年 Talwar 等 [1] 研发出世界

引用格式: 苏学成, 槐瑞托, 杨俊卿, 等. 控制动物机器人运动行为的脑机制和控制方法. 中国科学: 信息科学, 2012, 42: 1130–1146, doi: 10.1360/112012-522

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/112012-522

上第一个动物机器人 ——“机器人大鼠 (robo-rat)”, 是一项开创性工作. 本文作者于 2005 年研发出我国首例机器大鼠、2007 年研发出世界上第一个 “机器人鸽 (robo-pigeon)” (实验鸽来源于市场上出售的家鸽)、2011 年研发成功机器人猫. 机器人鸽的优势是运动速度快、活动范围广和实用潜力大. 其他比较有代表性的案例, 还有机器人昆虫、机器人鲨鱼和机器人海龟等 [2~5]. 总之, 不仅所用动物种类繁多, 而且所依据的原理和采用的研究方案也各不相同, 显示出这一研究领域的活跃.

1.2.1 现有案例介绍

由于研究方案 (或研究模式) 繁多, 这里只能列举 2 类最有代表性的典型研究案例.

第 1 类: 研究者们认为, 研究动物机器人的神经机制的目的是为了控制动物的运动行为, 所以应重点研究动物的运动系统的神经机制, 即研究运动神经系统是如何控制肢体的运动动作、如何由一系列运动动作来形成运动行为、并且最终如何由这些运动行为实现预期运动路径 (或轨迹) 等的神经机制. 对于这类研究, 这里仅举 2 个有代表性的案例: (1)Sato 等 [3] 研发的 Mecynorhina beetle cyborg. 该研究方案中, 对 “运动行为控制机制” 的研究是基于 Mecynorhina beetle 的生理特点 —— 长有飞翔的翅膀, 通过用单向电压脉冲刺激肌肉神经来控制翅膀的扇动动作. 其中, 负向脉冲使翅膀肌肉振动, 正向脉冲使翅膀肌肉停止振动, 负向和正向脉冲的交替刺激就导致翅膀有节奏的扇动, 实现飞行; 在飞行中, 通过调节刺激不同侧翅膀肌肉的刺激电压脉冲幅度, 来分别调节两个翅膀的振动幅度, 从而实现飞行运动的左右转. 2009 年, 他们又采用交替的正和负电压脉冲刺激 2 个视叶神经来控制起飞. 这里, 除起飞瞬间外, 飞行动作、飞行过程和改变飞行方向都是通过控制肌肉神经实现的. (2)Bozkurt 等 [2] 研发的烟草天蛾机器人. 他们采用电压信号刺激肌肉神经来直接控制翅膀肌肉的驰和张, 使得翅膀扇动, 从而控制昆虫机器人的飞行. 此外, 两案例都采用将微电子模块中的微电极植入昆虫蛹体内, 待蛹蜕化为成虫后, 模块仍留在体外, 微电极仍埋在成虫体内, 从而对成虫实施控制. 本文将这类研究动物机器人 “运动行为控制” 机制和方法的思想称为 “控制动物完成 ‘具体动作’ ”. 与之相对应, 所采取的研究路线图是: 重点研究动物的 (由关节、骨骼肌以及支配它们的感觉神经和运动神经组成的) 外周躯体运动系统的神经机制、以及基于该神经机制控制动物实现预期运动行为的 “实现机制” (或称 “控制机制”). 该实现机制也称为动物机器人运动行为的制导原理和方法, 其特点为: 基于动物的生理特点, 通过控制肌肉神经实现具体运动动作; 采用单相电压脉冲作为电刺激信号.

第 2 类: 以 Talwar 等为代表. 他们不是通过控制肢体的具体动作, 而是根据大鼠长有特别敏感的胡须这一生理特点, 通过用 “电压型编码电信号” 电刺激大鼠胡须在脑内的代表区 (brain representation), 由这些代表区来引导大鼠的运动行为, 从而实现所需的运动路径. 他们选用大鼠触须在第一躯体感觉皮层 (primary somatosensory cotex, S1) 的代表区和内侧前脑束 (medial forebrain bund, MFB), 用编码电信号刺激 MFB 使大鼠产生亢奋和 “愉悦” 情绪 (如食欲、性欲亢奋等), 导致其产生运动; 再通过刺激大鼠胡须在 S1 区的代表区, 使大鼠误以为碰到障碍物而相应地改变运动方向, 从而达到对运动行为和运动路径的引导. 为提高对动物机器人运动行为 “引导” 的效果, Talwar 等提出了基于 “ ‘虚拟’ 奖赏” 的引导原理对大鼠进行训练, 即每当刺激大鼠某侧的胡须代表区时, 若大鼠能够正确地改变运动方向, 则刺激 MFB 予以奖赏, 使其情绪亢奋和 “愉悦”; 但若大鼠未改变或未能正确改变运动方向, 则不刺激 MFB, 不予奖赏. 这样, 经过一定时间的反复训练, 就会形成 “条件反射”—— 每当刺激大鼠任何一侧胡须代表区时它都能正确地改变运动方向. 为防止条件反射功能丧失, 每过一些天就需要重复上述训练.

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/112012-522

上述两类典型案例的共同点是, 他们都基于动物的特有生理特点, 例如昆虫的翅膀、大鼠的触须等.

1.2.2 当前动物机器人研究存在的问题

从上述典型案例知, 当前动物机器人研究存在 3 个普遍性的问题.

(1) 现有各案例都是基于动物特有的生理特点 (例如昆虫的翅膀、大鼠的胡须等), 而不是基于 "运动行为控制" 的共性机制. 给人们造成一种错觉, 似乎研究动物机器人控制动物运动行为, 只能从动物的特有生理特点入手. 这样, 取得的研究结果仅适用于案例自身或与案例中有类似特点的动物.

(2) 由于对刺激电信号与动物机器人运动行为控制之间的机理的认知方面存在概念上的错误, 导致各案例在刺激电信号选用上, 不仅存在重大差别, 而且不同程度地违背了神经生理学原理. 这都直接影响了动物机器人的控制性能.

(3) 由于动物机器人研究是一个高度跨学科的交叉领域, 至今没有一个普适性或系统化的研究体系, 这种缺乏普适性的现状已成为制约动物机器人研究发展的 "瓶颈".

1.3 本文工作的主要特点

本文作者在按照过去已有模式研究鸽子的运动行为控制 (机器人鸽) 的过程中, 屡遭挫折, 最后不得不进行新的探索, 在探索中逐步形成了一种新的模式和研究体系. 该新模式的主要特点有:

(1) 在控制机制上, 不是研究如何利用动物的生理特点, 而是研究动物运动行为控制的共性神经机制. 该共性神经机制是: 动物在自由活动状态下, 运动行为的发生起因于 "外界刺激或自身主观的运动意愿"; 不论外界刺激还是自身主观意愿 (例如动机与情绪), 都是以神经电信号的方式在神经系统中表达、传递和处理的. 从这一机制出发, 研究与运动行为控制有关的脑机制及其相关的脑内代表区, 确定能够实现所需运动行为控制的脑内代表区及其区域内的适宜的神经位点; 通过用仿真神经生物信息的编码信号刺激这些脑内代表区的神经位点, 导致动物发起所需运动行为. 通过对鸟类和哺乳类动物的实验, 证明该机制和方法具有普遍适用性. 为讨论方便, 在下文中将 "脑内代表区" 简称为 "脑区", 它包括脑内的某些皮层区、神经核团和神经束.

(2) 提出了明确的研究路线图. 即提出 "重点研究感觉、动机和情绪的神经系统与运动行为控制之间关系" 的观点、并论述了该观点的神经科学依据.

(3) 在刺激信号的选取上, 明确提出微刺激电信号应该是以仿真神经系统固有的神经信息编码为目标的电信号, 该信号应具有恒流特性 (即信号源为恒流源、脉冲幅值为恒电流); 指出只有恒流信号才符合神经生物学原理.

(4) 基于上述论点, 本文给出了具有普适性的动物运动行为控制方法、设计原理及其应用实例. 其中之一是基于 "主动逃避行为 (actively avoid behavior)" 的原理和方法, 并做出了相应的实验验证.

2 一种普遍适用的动物机器人的脑机制和控制方法

尽管已有很多研究动物躯体运动系统的脑科学文献, 但它们多是对躯体运动系统本身神经机制的研究; 而关于如何控制动物实现人们预期的运动行为的脑机制研究的文献却非常罕见. 因为研究控制动物运动行为的脑机制与孤立地研究躯体运动系统本身的神经机制不同, 它需要重点研究怎样才能对躯体运动系统进行控制并产生预期的运动行为. 这就需要在整体水平上了解神经元的活动与不同类型的随意运动 (voluntary movement) 之间的关系. 特别是重点研究哪些脑区能够直接和/或间接地控制

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/112012-522

躯体运动系统并产生所需的运动行为, 以及相应的控制机制; 研究脑区之间如何相互影响, 人类能否和如何控制这些脑区的神经系统活动等等. 同时, 由于目前控制动物机器人的主要手段之一就是对所选脑区施行电刺激, 所以还必须研究电刺激的神经生物学机制, 根据该机制研究如何选取和确定适宜的刺激信号等等. 显然, 控制运动行为的脑机制和电刺激的神经生物学机制是两个相互关联和不可分割的方面. 本文正是通过对这两个方面的研究, 为动物机器人运动行为控制的脑机制和控制方法研究建立了一套系统化的研究体系.

本文是以人和哺乳动物的脑科学以及近期鸟脑科学的重大研究成果为依据进行的. 这是因为: 第一, 人们对人和哺乳动物的脑科学熟悉, 文献也最全, 容易把问题阐述清楚, 并且研究所得的结论也可供研究其他种类的动物机器人参考; 第二, 在已查阅的文献中尚未见到关于机器人鸟的研究案例, 本文首次对此作了探索性研究.

2.1 新的研究思想、控制原理和方法

2.1.1 新的 “研究思想” 及其应用模式

本文之所以明确提出 “研究思想” 这一概念, 是因为上述的几种不同的研究案例已经表明, “研究思想” 直接决定着所采用的研究方案, 以及最终的结果. 因此, 它是动物运动行为控制和动物机器人研究中必须首先解决的问题. 特别是因为本文重点研究的机器人鸽是个全新的课题, 加之它是在三维空间中运动, 所以机器人鸟的研究更具有挑战性. 这里以作者在机器人鸽研究中先后采用的 2 个方案为例, 阐明 “研究思想” 的内容及它的重要性, 并从中归纳出符合动物机器人研究规律的研究思想.

方案 1: 与上述以 Sato 等为代表的案例中采用相类似的方案. 我们曾想通过用电信号刺激支配关节和骨骼肌的神经系统来控制鸽子翅膀的运动动作. 但实践使我们认识到, 要想用人工电信号控制鸽子的真实运动, 在目前的科技条件下是很难实现的. 这是因为, 运动行为的完成, 有赖于全身数百块肌肉在一个变化着的、常常不可预料的环境中进行各种不同组合形式的协调活动; 即使是一个简单的扇动翅膀的动作, 也需要许多块肌肉协调活动, 需要多个关节在时间域上十分协调的运动才能完成, 而要想靠外加的电信号来控制鸽子的飞行, 几乎是不可能的.

方案 2: 类似于 Talwar 等 [1] 利用大鼠胡须特别敏感这一生理特点进行控制的模式和方法. 也即通过在鸽子脑内找到与大鼠胡须的脑内代表区类似的脑内代表区, 从而实现对鸽子飞行的控制. 根据 Funke[6] 对鸟类躯体感觉的研究, 它的上纹状体入口部 (hyperstriatum accessorium, HA) 和上纹状体背部 (hyperstriatum dorsal, HD) 具有躯体感觉功能, 所以我们原以为电刺激鸽脑的 (与大鼠 S1 功能相当的) HA 和 HD 上的适宜位点, 实验鸽也会像大鼠一样向相应的一侧运动. 可是多批次的实验结果表明, 当刺激鸽脑中 HA/HD 等的多个位点时, 鸽子的普遍反应是急切地用喙梳理羽毛, 而不是向相应的一侧运动或起飞. 这是由于鸽子身披厚厚的羽毛, 没有与大鼠胡须类似的脑区, 电刺激鸽的 HA/HD 只能导致鸽子 “认为” 皮肤 “出了问题”, 本能地梳理羽毛, 因此刺激 HA/HD 不具有所需的运动行为控制机制, 故无法用 Talwar 等的方法来控制鸽子的运动行为. 为解决对鸟类运动行为的控制问题, 我们最终探索出了一种新的模式, 并成功研发出机器人鸽, 而且该模式也同样适用于机器人大鼠. 在作者已查阅的文献中, 尚未见类似的控制模式.

该新模式的产生是基于从自动控制角度对神经生物学的理解和认知. 动物的躯体运动是由中枢运动控制神经系统控制的, 该系统的机制是神经生物学中比较成熟的一部分. 它可以这样简要描述: 中枢运动控制神经系统是以等级性的方式组构的 [7], 一般分为 3 个等级 (水平). 其中 “最高等级” 是以新皮层的联合皮层和前脑的基底神经节为代表, 负责运动的战略 (strategy), 即确定运动目标和达到运

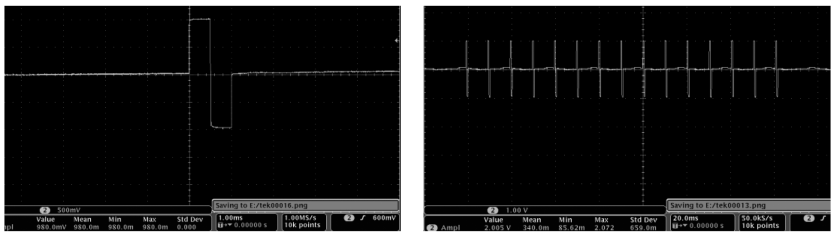
https://engine.scichina.com/doi/10.1360/112012-522

动目标的最佳运动策略; “中间等级” 以运动皮层和小脑为代表, 负责运动的战术 (tactics), 即肌肉收缩的顺序、运动的空间和时间安排, 以及如何使运动平滑而准确地到达预定的目标; “最低等级”, 它以脑干和脊髓为代表, 负责运动的执行 (execution), 即激活那些发起目标定向性运动的运动神经元和中间神经元池, 并对姿势进行必要的调整; 在最高水平的主导下, 通过 3 个等级的协同, 共同完成不同类型的随意运动 (voluntary movement). 然而, 问题是怎样才能使躯体运动系统产生运动行为, 从而达到对动物行为的控制. 由神经生物学知: 动物的运动行为的发生, 起因于外界刺激或自身主观的运动意愿; 且不论外界刺激还是自身主观意愿 (例如动机与情绪), 都是以神经电信号 (或称神经信息) 的方式在神经系统中表达、传递和处理的; 当这些信息到达中枢运动控制神经系统的最高等级并对这些信息处理后, 便形成了相应的 “运动战略”; 在该 “运动战略” 的主导下, 通过 3 个等级的配合与协同, 就会完成运动行为的发动和对运动过程的控制. 我们由此得到启示: 既然表达 “外界刺激或自身主观的运动愿意” 的神经电信号能够通过控制中枢运动控制神经系统而产生运动行为, 那么也应该可以采用在中枢神经系统的适宜神经位点注入与该位点固有电信号相同的电信号, 从而起到表达 “外界刺激或自身主观的运动愿意” 的作用, 并导致产生所需要的运动行为, 实现对动物运动的控制. 尽管由于目前人类尚未能解码神经信息, 但只要能够尽量仿真神经信息, 也应能够近似地表达 “外界刺激或自身主观的运动意愿”. 本文正是根据这一启示, 提出了与此前所有案例不同的、新的动物运动行为控制的 “研究思想”, 并基于该思想给出了相应的控制原理和方法.

上述新的研究思想包含两个相互关联的基本要点. 第一, 不是从动物的特有生理特点出发, 而是从活体动物在自由活动情况下的共性脑机制出发, 重点研究能够产生表达 “外界刺激或自身主观的运动意愿” 的、与运动行为控制有关的脑机制及其相关脑区 (确切地说是脑内代表区), 从中选取能够确保预期运动行为必定发生和运动过程必定可控的相关脑区及脑区上的适宜神经位点. 这个 “适宜神经位点” 即是 “注入电信号” 的位点. 需要指出是, 由于这些被选用脑区的功能一般都很复杂, 它的不同部位对于所需运动行为控制的灵敏度是不同的, 因此需要寻找适宜的部位作为刺激位点. 第二, 采用 “尽量仿真” 神经信息编码的电信号刺激 (即注入) 所选取的神经位点, 使这些脑区因刺激能够产生所需的 “虚拟信息”、并上传到相应的中枢运动控制神经系统的最高等级, 由此产生所需的运动战略, 再由该运动战略导致所需的运动行为. 这里强调 “尽量仿真”, 是因为电刺激信号越是与动物神经系统中固有的神经信息相似, 刺激所产生的 “虚拟信息” 越与固有上传的信息相似, 则在最高等级产生的 “运动战略” 越与预期运动行为相一致. 显然, 上述两基本要点既各司其职又互相关联.

前面已指出, 本文中的 “脑区 (brain region)” 包括神经核团/核团簇、神经束和脑皮层的各个区. 所以选取脑区时, 会有 3 类情况. 第 1 类, 在神经系统 (包括感觉、动机和情绪神经系统) 的上传通道中, 选取能够产生预期运动行为的相应脑区 (例如神经核团簇或神经束), 并在这些脑区的适宜位点注入人工编制的 “ ‘仿真’ 神经信息编码电信号”, 以代替该注入位点所在部位的 “固有的” 神经信息. 本文将 “注入 ‘仿真’ 神经信息编码电信号” 称之为 “采用仿真神经信息编码信号的微电刺激”, 简称为 “电刺激”. 这类电刺激会在这些脑区产生 “虚拟信息”, 并且同样会上传到中枢运动控制神经系统的最高等级, 并在该等级起到与 “固有” 神经信息相同的作用 —— 产生 “运动战略”, 从而产生所需的运动行为. 第 2 类, 直接选取中枢运动控制神经系统最高等级的相关区域 (脑皮层区), 当用 “仿真” 神经信息编码电信号刺激这些区域时, 由最高等级直接产生相应的运动战略, 产生所需的运动行为. 第 3 类, 混合选取上述二种脑区. 这里需说明: 尽管 “虚拟信息” 是由 “仿真神经信息编码电信号的刺激” 产生的信息, 而不是神经系统固有的 “外界刺激或自身主观的运动意愿” 的信息, 但是, 由 “虚拟信息” 在脑皮层产生的 “感受 (experience)”, 却与固有的神经信息在脑皮层产生的感觉相同或相近. 一旦停止电刺激, 这些 “感受” 也随之消失.

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/112012-522



(a) (b)

图 1 恒流型编码信号的样式

Figure 1 Pattern of constant-current type signals encoded. (a) Single biphasic pulse of which waveform is measured at two ends of 10 kΩ resistor serially connected to the stimulating current circuit, and needs not for serial connection of this resistor during the actual experiment; (b) one pulse series

2.1.2 控制运动行为的原理和方法

基于上述思想和模式, 我们的研究和实验证实, 可以给出多种控制动物运动行为的原理和方法. 本文仅重点阐述适用于多种动物的基于 "主动逃避行为 (actively avoid behavior)" 原理的控制方法, 并以鸟类、哺乳类动物为例进行讨论. "主动逃避行为" 是动物本能的和习得的能力, 由于刺激动物的那些能够导致产生触觉、痛觉等感觉、以及导致恐惧、厌恶和面临危险等情绪的脑区, 都满足 " '外界刺激或自身主观的运动意愿' 能够产生运动行为" 这一机制, 所以都能导致主动逃避行为. 但关键是要确保使动物必定发生逃避行为并且能够控制其逃避方向. 为此需要考虑以下 2 个问题.

1) 正确选取脑区和神经位点. 这是运动行为控制的基础、也是必要条件. 为实现预期的运动路径, 需要选取一组脑区, 即同时选取几个分别与各所需运动行为相关的脑区; 该组脑区的各个脑区分别由各自的刺激电信号控制, 各刺激信号能够根据需要, 适时、有序地分别刺激相应的脑区, 使之产生相应的运动行为 (例如向前、向左/右运动等), 从而实现预期的运动路径. 对于不同种类的动物, 其脑区组中各脑区的选取往往是不同的. 对于鸟类, 这组核团可以是: 能够导致鸟感到惊恐而逃避的脑区 —— 两侧的古纹状体后部 (posterior part of archistriatum), 以及能够导致两侧躯体感到触压和疼痛而逃避的脑区 —— 两侧丘脑的腹前背中核 (nucleus dorsalis intermedius ventralis anterior, DIVA). 又如, 对于哺乳类动物, 与鸽子古纹状体后部的控制功能类似的神经核团有杏仁核 (amygdala) 的基底外侧核 (basolateral nuclei), 与 DIVA 控制功能类似的有丘脑的腹后外侧核 (ventroposterolateral thalamic nucleus, VPL). 本文对这些脑区神经机制的研究 (详见 2.2 小节) 表明, 对于同一类动物, 具备这类功能的脑区有多组, 上述的核团组只是其中的一例. 例如, 导水管周围灰质 (periaqueductal gray substance, PAG) 与古纹状体后部及基底外侧核等有类似的运动行为控制功能, 同样能够导致鸟类和哺乳类动物感到惊恐而逃避.

2) 适宜的刺激信号的选取和产生. 基于人类现在尚未真正掌握神经信息编码规律、而仅掌握了神经信息编码的基本原理和特性这一现实, 只能以仿真神经系统固有神经信息为目标, 采用电子和计算机技术产生编码电信号, 使其能够尽量仿真被刺激神经位点的固有神经信息编码, 以起到与该位点的固有神经信息相同或相近的作用. 所以研究编码信号的选取和产生也是一个关键性课题. 这里仅给出与此相关的基本要点, 而关于这些 "基本要点" 的机制问题, 我们将在另一篇文章中讨论.

(1) 本文采用的仿真编码电信号的样式. 仿真神经信息编码是时序样式 (temporal patterns) 的编码电信号, 如图 1 所示. 图 1(a) 中, 仿真动作电位 (action potential) 的单元信号是双相 (phase) 脉冲; 图 1(b) 所示的脉冲列由波形相同各单元信号构成. 图 1 中, 电流脉冲的幅值、频率、宽度、每个脉冲列中脉冲的个数和脉冲列的频率等, 通常称为编码电信号的参数.

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/112012-522

(2) 仿真编码电信号的属性. 仿真编码电信号应是恒流型电信号而非恒压型电信号; 脉冲幅值是电流值而非电压值. 以保持与固有神经信息的电流特性相一致.

(3) 需要指出的是, 从实用性上, 恒压信号型存在多种缺陷, 因而认为恒流型和恒压型电信号 “二者等效” 的概念 [8], 是不正确的.

(4) 在实施微电刺激时, 前提条件是脉冲电流幅值必须满足阈值 (threshold) 条件; 在此前提下, 编码电信号的参数对刺激效果的影响力度依次为: 脉冲频率、脉冲宽度、脉冲列中的脉冲个数和脉冲列的频率.

在解决好上述两个问题的前提下, 用编码电信号刺激古纹状体后部的适宜位点, 鸽子会感到恐惧或面临危险, 于是产生主动逃避行为: 起飞或加快飞行; 再通过用适宜的编码电信号分别刺激左/右侧 DIVA 的适宜位点, 鸽子相应的右/左侧的驱体就会感觉到被触压和疼痛, 同样导致它产生主动逃避行为, 从而相应地改变飞行方向: 向左/右飞. 显然, 只需适时地刺激相应的神经位点, 就能够控制鸽子向前和/或向左/右运动, 就会使得鸽子沿着预期的路径运动 (详见第 3 节的实验).

显然, 根据上述原理和方法, 只是在需要控制运动行为的瞬间 (例如强迫它起飞、改变飞行速度和飞行方向等) 对鸽子实施控制, 其他时间的运动完全由鸽子自主完成. “自主” 意味着不仅保留了鸽子的运动能力、更保留了它的智能. 保留了鸽子的智能, 就能很好地解决机器人鸟在三维空间飞行必定遇到的复杂挑战: 自主避障、避灾、抗环境 (例如大风、大雨) 干扰, 这是动物机器人可贵的优势, 也是机电式 “ ‘仿生’ 机器鸟” 无可比拟的优势.

在基于上述研究思想的实践中, 我们获得了二个重要认知: (1) 要想可靠地控制动物沿预期路径运动, 必须同时满足 2 个基本条件: 施加的控制必须能够确保动物发起并保持运动, 即动物始终处于运动状态; 必须确保运动行为可控. (2) 只要能同时满足上述 2 个基本条件, 还可找到其他 (不是基于 “主动逃避行为”) 的控制动物运动行为的原理和方法, 即该研究思想具有广泛适用性: 不仅适用于多种动物, 且对于同一种动物也可寻找到不同的控制方法.

2.2 动物机器人运动行为控制的脑机制研究

本文脑机制研究的路线图为: 重点研究运动的脑控制而非脊髓控制; 在脑控制研究中, 将运动控制系统、感觉系统、动机和情绪神经系统视为密切关联的整体, 并将该整体作为研究运动行为控制的主体; 对于该整体, 重点研究感觉、动机和情绪与运动行为的决定、发起和控制之间关系的脑机制, 从中找出由于 “ ‘外界刺激或自身主观的运动意愿’ 而产生和控制所需运动行为” 的脑机制; 根据这些脑机制和预期的运动行为运动路径, 研究选取适宜的脑区组及对其实施控制的原理和方法. 下面将从 3 个方面进行阐述.

2.2.1 感觉与运动系统关系的脑机制

本文工作的核心内容之一是, 研究外界刺激引起的感觉信息控制动物的运动行为的脑机制以及确保运动行为必定发生的控制机制, 基于此, 发现并确定相应的脑内代表区.

感觉可导致运动动机的产生. 然而动机虽然是行为的驱动力, 但它不能担保该运动行为必定发生. 所以本文强调的关键点之一是, 当为了某种运动行为所需要而作出 “运动的战略” 之后, 需要解决确保该运动战略必定得以执行的机制问题, 即要找出适当的机制来控制那些有不同动机的运动行为能够被表达 —— 发生运动. 该机制我们称之为 “运动行为控制机制”. 根据我们的研究, 这种运动行为控制的机制有多种. 这里先以触觉和痛觉导致哺乳动物 “主动逃避行为” 的运动行为控制机制为例来讨论.

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/112012-522

而将鸟类的运动行为控制机制作为一个专题, 在 2.2.3 小节中进行讨论.

研究痛觉和触觉导致哺乳动物 “主动逃避行为” 的运动控制机制, 是为了找到能够确保 “主动逃避行为” 必定发生的脑区及其运动控制机制. 已有研究证实 [7,9~10], 对于哺乳动物而言, 来自躯干和四肢的外周刺激引起的痛觉和触觉信息通过不同路径主要投射到丘脑腹后核 (ventral posterior nucleus, VP nucleus), 经此核中继 (relay) 而分别投射到大脑皮层不同区域, 脑皮层根据这些感觉信息做出相应的应激反应 —— 发起运动. 根据这一神经机制, 我们猜想腹后核 (VP nucleus) 可能具备 “主动逃避行为” 的运动控制机制. 这不仅是因为它传导的信息中包含了痛觉和触觉信息, 更因为它是 “中继核”, 具有痛觉和触觉信息在此汇集和整合的特点, 所以与躯体感觉相关的神经元相对集中和密集. 这样, 在对该核施加电刺激时, 刺激信号作用到所需神经元群上的概率就高, 因而产生相应的 “虚拟” 信息并上传到相关的脑皮层区的概率也就高, 更容易实现所需的对运动行为的控制. 而腹后核分为较大的腹后外侧核 (ventroposterolateral thalamic nucleus, VPL) 和较小的腹后内侧核 (ventral posterior medial, VPM). VPL 具有对侧肢体、躯干及尾部的躯体定位区, 而头面及口腔在 VPM 有躯体定位区. 研究中, 对 VPL 和 VPM 都进行了实验: 当刺激左/右侧 VPL 时, 则其右/左侧躯体感到受到 “伤害”, 于是发生向左/右侧方向的逃避运动, 且响应的灵敏度可用刺激信号的频率和时程来调节, 从而能够确保 “主动逃避” 行为必定发生; 而电刺激左/右侧 VPM 时, 则头部产生大幅度的摆动, 响应过于强烈, 不易控制其运动方向. 两者相比, VPL 适用性更好, 所以最终确定选用具有较好运动行为控制机制的 VPL 核团作为控制动物向左/右运动的脑区. 此外, 由于每当动物对电刺激做出正确的 “逃避” 响应后, 将不再被刺激, 其负面感受将消失, 这在客观上对运动行为控制起到了强化和训练作用, 这种作用在实用上很有价值, 它对从实验室走向实用化有重要作用.

2.2.2 动机和情绪神经系统与运动行为关系的脑机制

要研究 “自身主观的运动意愿” 驱动下产生运动行为的脑机制, 就要研究作为 “自身主观意愿” 一部分的动机和情绪与运动行为关系的脑机制. 但由于动机和情绪神经系统不属于感觉运动系统、并且动机和情绪的某些脑机制问题还不完全清楚, 初看起来将它们视为密切关联的整体且作为研究重点, 似乎不合理; 并且在作者查阅的文献中也未见此类观点. 但是动机和情绪对运动行为的决定、发起及行为过程的控制有着关键性影响, 却是公认的事实, 也为我们的机器人鸽/大鼠的研究案例所证实. 所以, 对这一观点和机制做出理论探讨, 对动物运动行为控制和动物机器人研究十分有价值.

动机和情绪是脑的高级神经活动, 全面讨论它们的神经机制会过于复杂, 这里仅以动机和情绪活动的关键脑区 —— 杏仁核为例来说明这一观点的脑科学原理. 已有的研究证实 [11~14]: 大脑皮质, 尤其是眶额皮质 (orbitofrontal cortex) 和扣带皮质 (cingulate cortex) 是情绪的主观感受的处理中枢, 而杏仁核则是联系这两者的关键中枢; 并且杏仁核也是动机活动的重要脑区. 为简化分析, 这里又以杏仁核关于恐惧情绪的神经机制为主, 因为恐惧能引发逃跑.

杏仁核是一个核团簇, 主要核团组有: 基底外侧核、皮层内侧核和中央核, 如图 2(a) 所示.

我们在对杏仁核与运动行为控制关系的脑机制研究中, 发现有 2 个特点对运动控制特别有价值: (1) 所有感觉系统的信息都传入杏仁核, 尤其是基底外侧核, 这些感觉信息在杏仁核的基底外侧核中得到整合、并中继之后传送至中央核; 激活中央核神经元可引起应激反应 (stress responce). 应激反应除包含引起动物警觉、恐惧和躯体运动系统发起一些动机性行为 (motivated behavior) 外, 还包含中央核通过导水管周围灰质 (PAG) 和大脑皮层引发的逃避行为和情绪体验 [7,14], 见图 2(b). (2) 杏仁核在动机性行为中有重要作用, 当前对动机的研究强调环境中各种刺激对动物的吸引力及对运动行为的激励性, 从而能够调控动物的行为来满足所需的运动 [15]. 这些特点为将杏仁核作为研究动机和情绪神

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/112012-522

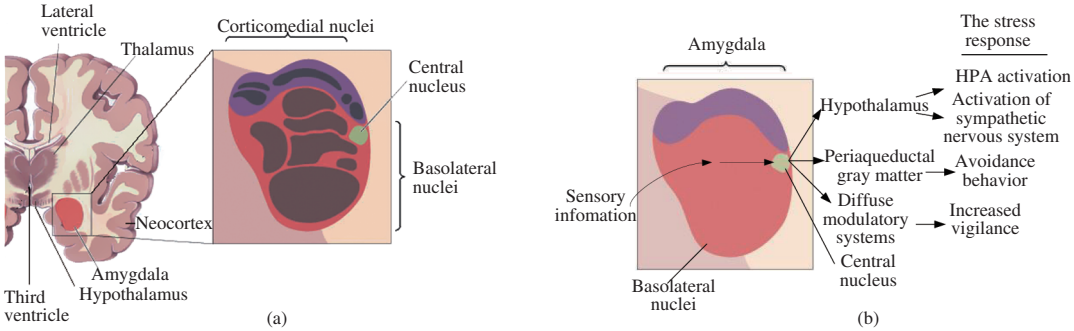


图 2　杏仁核的解剖及其对刺激的应激反应 [7]

Figure 2　Anatomy of the amygdala and control of the stress response by the amygdale[7]. (a) The brain is coronally sectioned to shows amygdala. The basolateral nuclei (surrounded by red) receive visual, auditory, gustatory and tactile afferents; the corticomedial nuclei (surrounded by purple) receive olfactory afferents; (b) the amygdala receives ascending sensory information from the thalamus and descending input from the new cortex. The information are integrated by the basolateral nuclei and relayed to the central nucleus. Activating the central nucleus leads to the stress reaction

经系统与运动行为控制的关系提供了神经学基础. 上述事实, 可用图 2 形像地描述. 由图 2(b), 很自然地得出这样的结论: (1) 动物的感觉运动系统与动机和情绪的神经系统确实是密切关联的, 在动物机器人控制的研究中, 将它们作为一个整体来研究是有神经学依据的. (2) 最重要的是, 能够通过采用适宜的电信号刺激杏仁核的基底外制核和中央核, 激发动物产生恐惧情绪, 产生 “自身主观的运动意愿”、并做出应激反应, 确保动物发起动机性运动行为. 据此, 我们对大鼠的杏核做了实验研究: 用编码电信号刺激杏仁核的基底外侧核能够可靠地导致大鼠因恐惧而发生主动逃避行为, 证实了杏仁核的基底外侧核是又一个具备运动行为控制机制的神经核团. 理论上, 中央核也有与基底外侧核类似功能, 但由于它体积太小, 实验中很难将电极准确植于其上, 因而实践中未选用.

由于在实验研究中, 我们意外发现与杏仁核联系密切的中脑导水管周围灰质 (PAG) 的反应灵敏度甚至超过了基底外侧核, 于是我们对这一现象做了专门研究与实验验证. 根据 Beitz[16,17] 和 Bandler 等 [18] 的研究, 导水管周围灰质 (PAG) 是边缘中脑区 (limbic midbrain areas) 之一, 其传入纤维联系十分广泛, 并且与许多脑区有着双向联系, 参与运动行为、情绪、动机和疼痛等的调节与控制. 特别是, 我们对 PAG 做了如下 2 种基本的实验研究: (1) 通过用伤害性刺激确实能够引起 c-fos 在大鼠 PAG 的表达, 这就从神经生理学上证实了 PAG 确有疼痛和恐惧表达; (2) 用编码电信号微刺激大鼠的 PAG, 可导致明确的恐惧表达并且发生主动逃避行为. 这些实验证实, 哺乳动物的 PAG 具有可靠的运动行为控制机制, 也可作为控制动物主动逃避行为的神经核团之一.

虽然杏仁核和 PAG 仅是情绪、动机神经系统的一部分, 但通过上述讨论, 已经能够得出这样的结论: 动物的感觉运动系统与动机和情绪的神经系统确实是密切关联的; 感觉、动机和情绪对运动行为的决定、发起和运动过程中运动状态的调节与控制确实起着关键作用; 上述讨论为选取最适宜脑区提供了一般性原则.

2.2.3　与鸟类运动行为控制有关的鸟脑机制

将这一问题专列出来讨论, 一是由于在我们查阅的文献中尚未见到关于 “鸟类运动行为控制” 脑机制的研究; 二是由于鸟类与哺乳类动物大约在近 3 亿年的时期就开始平行进化了, 它们的脑在解剖学和生理学上差别巨大, 然而近年来鸟脑科学的研究取得了具有里程碑意义的成果 [19~21], 这些成果不仅纠正了过去对鸟脑的不少错误认识, 而且给出了许多新的结论. 其中, 与本文研究密切相关的成

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/112012-522

果有: 证明了鸟类和哺乳动物脑的诸多同源性. 正是 “同源性” 为鸟类运动行为控制的脑机制研究提供了基础和线索. 基于此, 下面重点讨论与运动行为控制有关的 2 个问题.

(1) 鸟类的感觉与运动行为控制之间关系的脑机制

在 2.1.1 小节的方案 2 中, 我们曾尝试利用鸽脑中 HA/HD 的感觉功能控制鸽子运动行为, 但失败了. Karten 等 [22~24] 的研究表明: 鸟类丘脑中的背外后核团 (dorsolateralis posterior thalami, DLP) 和两侧丘脑的腹前背中核 (DIVA) 都是将感觉信息上传到脑皮层的中继核团. 其中, DLP 是多觉型, 除躯体感觉外还包括视觉和听觉, 并且具有准确的驱体定位功能; DIVA 几乎是专一的躯体感觉中继核团, 但它不具备精确的驱体定位功能. 虽然 Karten 和 Wild 在研究 DIVA 的躯体感觉时仅重点研究了触觉, 未明确指出 DIVA 是否包含痛觉, 但却指出 DIVA 与哺乳动物的 VPL 具有同源性, 而 VPL 是主要上传痛觉信息的中继核团. 据此, 我们觉得 DLP 和 DIVA 都可能具备所需的行为控制机制, 于是对这二个核团进行了研究与实验. 对 DLP 的实验研究结果表明: 微电刺激 DLP 虽然能够导致约半数实验鸽的主动逃避行为 —— 向一侧运动, 但是, 由于 DLP 是多觉型的 (其中包含视觉), 微电刺激 DLP 时, 往往导致约半数实验鸽出现闭眼等视觉反应, 并且每当此时它就不再发生明显的运动行为, 这是 DLP 的一个重要缺陷. 对 DIVA 的实验结果表明: 微电刺激任何一侧的 DIVA, 都能可靠地导致相应的主动逃避反应 —— 向相应的一侧运动. 这表明微电刺激 DIVA 导致其向上投射的信息在脑皮层中产生了对侧躯体受到触摸和疼痛的感觉, 从而产生相应的主动逃避响应. 更重要的是, DIVA 的响应敏感度也远高于 DLP. 虽然 DIVA 不像 VPL 那样有准确的驱体定位功能, 但 DIVA 却能感知自己的对侧躯体受到了伤害 (只是不能准确判定受伤害部位的确切位置而已), 所以不影响 DIVA 对运动行为的控制功能. 于是我们选用了鸽子两侧丘脑的 DIVA 作为控制鸽子运动方向的神经核团, 并且成功用于机器人鸽的案例.

(2) 鸟类的动机和情绪神经系统与运动行为控制之间关系的脑机制

在文献 [19] 中, 给出了与哺乳动物杏仁核同源且具有类似功能的鸟脑的脑区 —— 与弓状皮层相邻的几个神经元群和曾经被认为是古纹状体的后部的区域与哺乳动物杏仁核的 “皮层区” 和 “皮层下区” 是同源的, 并重新命名它们是杏仁体 (amygdaloid complex) 的组成部分. 上述成果启示我们: 如果能在鸟脑中找到与杏仁核相当的脑区, 就可能在鸟脑中找到动机和情绪活动的关键脑区并且该脑区将具有有效的运动行为控制机制. 我们采用上述实验研究杏仁核和 PAG 等类似的方法, 发现古纹状体后部能够导致明确地主动逃避行为, 具备运动行为控制机制, 其中尤以古纹状体后部的边缘区域 (limbic region) 的灵敏度最好, 并成功地将其用于机器人鸽的发起运动和加快运动速度的运动行为控制.

另外, 我们还就导水管周围灰质 (PAG) 对鸟类运动行为的控制机制进行了研究与实验. 实验发现 PAG 能够导致明确的主动逃避行为, 其中 PAG 的头部区域的响应灵敏度最好, 并且也已成功运用到机器人鸟案例.

2.2.4 一点说明

在上述讨论脑区选取时, 虽然已将选取脑区的类型分为 3 种情况, 并将选取大脑皮层作为一种类型, 但本文仅重点阐述了如何选用与神经核团和神经束有关的脑区, 而未涉及大脑皮层的选用, 但这绝对不意味着大脑皮层不能被选用. 实际上, 本文选用的这些脑区的信息都是最终投射到大脑皮层的相关区域并且由大脑皮层做出最后决策和发出运动指令. 这表明, 选用相关的皮层并给予适宜的电信号刺激, 同样能起到与上述被选脑区的相似作用. 我们之所以选用上述那些脑区而未选用皮层的相关区域, 是基于我们自身的经验: (1) 选用的这些神经核团在脑中的部位 (region) 比较明确, 且认为这些核团中与所需运动行为相关的神经元分布密集, 特别是那些中继核团更具有这样的特点, 所以刺激电

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/112012-522



(a) (b)

图 3　二只做好实验准备的机器人鸽

Figure 3　Two robo-pigeons ready for the experiment. The controller is placed on the head (a) and back (b)

信号作用到这些神经元群的概率高; (2) 电刺激上传通道中的神经核团, 所产生的 “虚拟信息” 上传到中枢神经系统最高等级后, 是由最高等级本身的机制自行完成协同和整合、并做出战略决策, 因而刺激者无需完全弄清楚最高等级的哪些脑区参与了决策活动; (3) 如果直接刺激脑皮层的话, 则刺激者首先需要弄清是哪个或哪些脑皮层参与了决策、并据此采取相应的刺激策略, 这就要求刺激者对脑机制有更精细的了解.

3　实验验证及其结果

这里仅以机器人鸽的运动行为控制实验为例. 大鼠的实验与此类似, 不再重述.

3.1　实验方法、内容和步骤

1) 实验的前期工作. 第一, 选择适宜的脑区组. 在本实例中, 选用的神经核团组为两侧的古纹状体后部和两侧丘脑的腹前背中核 (DIVA). 第二, 在所选脑区的适宜位点植入刺激电极, 在每个核团上选取一个或多个适宜的神经位点 (本实验只选取一个), 并采用常规的动物实验手术在每个位点埋植一对微电极 (共 4 对电极), 再用牙科水泥将微电极固定在鸽子的颅骨上; 7∼10 天伤口痊愈后进行实验.

2) 实验内容和步骤. 第一, 实验开始时, 在鸽子头顶或背部放置好无线遥控 —— 恒流型编码信号发生器 (简称遥控器), 如图 3 所示. 第二, 将遥控器调试到正常工作状态. 第三, 对每个刺激位点进行实验. 对于每个选定的位点, 边调节刺激参数, 边观察动物被刺激时的运动响应, 直至满意为止. 这里所谓的 “满意”, 是指每刺激一次 (即发出一个脉冲列) 或至多 3 次, 鸽子就会作出明确的运动响应. 这里脉冲列的频率一般为 0.4∼2.5 Hz. 例如, 对于左/右侧的 DIVA (或左/右侧的古纹状体后部), 每分别刺激一次或至多 3 次, 若机器人鸽能发生明确的向左/右 (或向前) 的运动行为, 则认为该位点的可控性满足要求, 或称该位点 “合格”. 理想的情况是: 两侧的 DIVA 和两侧的古纹状体后部能同时满足可控性要求; 若两侧的 DIVA 和某一侧的古纹状体后部能同时满足可控性要求, 也可认为该机器人鸽是合格的, 因为若有一侧的古纹状体后部满足可控性要求, 不影响控制其向前的运动行为. 第四, 完成对 4 个位点的调试后, 对于合格的机器人鸽, 将其参数记入该鸽子的档案, 以备将来使用时参考. 第五, 按预期 (或设定) 路径运动的实验. 根据机器人鸽当前所处的状态及运动路径的需要, 操作遥控器, 适时地向相应的位点 (即电极对) 发出刺激信号, 使其发生所需的运动. 在运动中, 根据情况及时和协调地向所需位点发出刺激信号, 控制其运动方向, 使得偏离预期运动路线时能回归预期路径, 从而实现所需运动路径.

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/112012-522

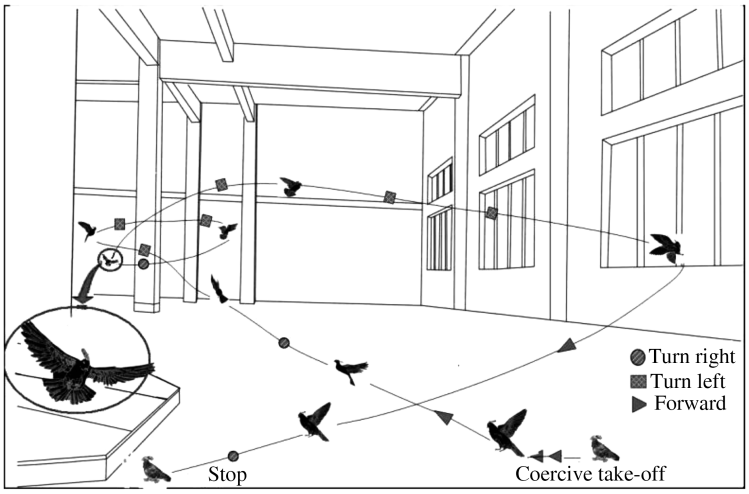


图 4 在电刺激器的控制下, 机器人鸽在一个空阔的车间 (18 m×17 m×4.8 m) 内强迫起飞和飞行

Figure 4 The pigeon takes off and flies in a spacious workshop (18 m×17 m×4.8 m) under the guidance and control of micro-electricity

3.2 几类有典型意义的运动行为控制的实验室实验

这里给出几个具有典型意义的实验结果.

1) 强迫起飞. 即控制鸽子按命令及时 "起飞", 以保证在限定的时间内到达目标点或目标区域.

实验表明, 刺激单侧 (左或右侧) 或同时刺激两侧的古纹状体后部, 实验鸽都会很快地起飞; 或惊恐地在地面上走动, 在连续刺激下被迫起飞 (见图 4 中的起始段). 与此类似, 若分别刺激左/右侧 DIVA, 则会立即或走动一段距离后向左/右侧的方向起飞. 刺激古纹状体后部, 更多情况下是向前起飞; 而刺激左/右侧 DIVA, 表现为相应地向左/右侧方向起飞.

2) 飞行控制. 按照上述方法, 可控制机器人在空中的飞行. 根据实验录像按比例绘制的 "飞行制导" 轨迹图, 见图 4.

3) 地面运动. 实验过程中发现, 鸽子的飞行速度很快 ——10 m/S 以上, 为清晰观察和验证鸽子在编码电信号刺激瞬间的响应行为, 特设计本实验, 它相当于制导飞行过程的 "慢放镜头". 这里展示 2 种地面运动实验.

(1) 沿直线行走. 刺激古纹状体后部, 迫使其向前走; 当鸽子行走的实际轨迹向左/右偏离 "设定路线" 时, 则刺激其右/左侧 DIVA, 迫使其转向右/左侧方向走, 回归设定路线; 若向前走的过程中发生停歇或走得太慢, 可刺激古纹状体后部, 使其行走或快速行走, 否则可不予刺激. 图 5(a) 所示行走轨迹是依据录像并按比例画出的.

(2) 在地面的 "任一设定点连续转圈". 行走和飞行都是鸽子在常态下的自然行为, 为了更有说服力地展示本文提出的控制原理的有效性, 特设计了一个只有在强制状态下才能发生的非常态运动行为实验. 对于站立着的实验鸽, 连续刺激其一侧的 DIVA, 可控制其在任一设定点连续转动, 图 5(b) 所示的是鸽子右爪的运动轨迹.

3.3 动物机器人的生活与健康状况

动物机器人的生活与健康状况一直是人们关注的话题. 实际上, 对于机器人鸽, 一旦停止微电刺

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/112012-522

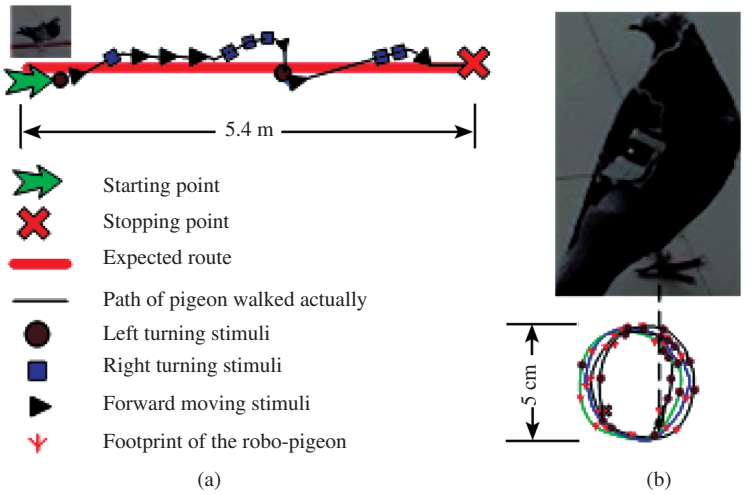


图 5　在电刺激的控制下, 根据实验录像按比例描绘的鸽子在地面上运动的轨迹

Figure 5 The trace of the pigeon walking along the preset path on the ground which in proper scale based on the experiment video. (a) Guide and control the pigeon to walk along the straight line; (b) guide and control the pigeon to turn at the any set point (one color for one circle)

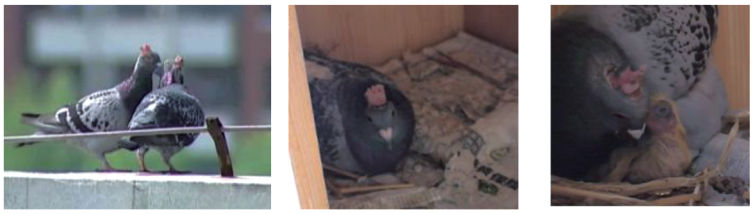


图 6　机器人鸽生活与繁殖的照片

Figure 6 Photos about life and propagation of robo-pigeons. (a) Kissing after successful courting; (b) hatching; (c) nursing

激, 就会立即恢复常态, 像其同类一样生活, 尚未发现其运动能力和寿命受到影响的证据; 最有说服力的是, 它仍保持着动物最具标志性的正常繁衍能力, 图 6 展示了机器人鸽的求偶、孵卵和育幼等活动的照片, 并录制了相应的视频. 图中机器人鸽头顶上的粉红色突起表明, 它们是自由状态下的机器人鸽.

3.4　实验结果

(1) 实验证实, 本文基于动物运动的共性神经机制探索和发现的一批脑区对相关的运动行为的控制达到了比较满意的结果, 证明这些脑区具备所需的运动行为控制机制. 这就突破了原来仅限于依据动物生理特点研发动物机器人的局面, 是对研发思路的重大拓展; 同时也证明了本文提出的研究思想和研究路线图的普遍适用性和科学性.

(2) 实验证实, 本文基于 "主动逃避" 原理提出的动物机器人的控制原理和方法, 不仅具有普遍适用性, 而且其对运动行为的控制具有强制性, 可靠性高.

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/112012-522

3.5 实验中发生的某些偏差的原因说明

由图 5 知, 机器人鸽在某些路段未能严格按设定路径走, 有时甚至与设定路线的偏差较大, 可能的原因有:

(1) 操作上的原因. 鸽子的运动速度较快, 当操作者发现偏差超过允许值而进行纠正 (刺激) 时, 它又走出一段距离.

(2) 仿真编码信号刺激带给动物脑的信息与动物自身感觉器官 (如眼睛和耳朵) 感觉到的信息存在冲突或差异. 例如当刺激古纹状体后部时, 会使实验鸽感到恐惧或处在危险环境中, 但凭其自己的视觉和听觉, 它并未发现任何危险, 于是就产生了犹豫, 导致它边走边观察 (视频录像中有清晰的反映), 只是由于连续刺激, 才迫使它做出与刺激相应的响应; 同样, 刺激 DIVA 时也有类似情况.

(3) 人类未能很好解码脑信息编码. 到目前为止, 人类还未 “读懂” 脑信息, 因而我们编制的信息编码还与神经系统固有的神经信息编码有差距, 尚不能被动物神经系统 “认识” 或 “理解”, 仅能让动物了解信息编码所表达的大概的甚至是模糊的涵义, 这也导致了动物对刺激信号响应的迟缓.

其中, 后 2 个原因是最根本的.

4 总结和讨论

4.1 小结

(1) 本文突破当前那种基于动物的特有的生理特点研究动物机器人的普遍模式, 给出了一种基于动物自由活动状态下共性神经机制的、具有普遍适用性的运动行为控制的新模式. 该共性神经机制是: 动物的运动行为的发生起因于外界刺激或自身主观的运动意愿; 且不论外界刺激还是自身主观意愿, 都是以神经电信号的方式在神经系统中表达、传递和处理的. 基于该神经机制的运动行为控制的新模式为: 采用在中枢神经系统中探索和研究与所需运动行为控制相关的脑机制及其脑内代表区和这些代表区内的适宜神经位点, 在所选位点注入与该位点固有电信号相同的电信号, 从而起到表达 “外界刺激或自身主观的运动意愿” 的作用, 于是导致产生所需要的运动行为, 实现对动物运动的控制.

(2) 基于上述模式, 提出了明确的研究路线图: “重点研究感觉、动机和情绪的神经系统与运动行为控制之间关系” 的观点、并从脑机制上论证了它的科学性. 根据该路线图, 我们发现了一批能够控制所需运动行为的脑内代表区和这些代表区内的适宜神经位点, 并阐明了这些脑区控制运动行为的脑机制.

(3) 给出了设计普遍适用的控制动物运动行为的原理和方法的一般性设计原则; 并以机器人鸽为例, 对基于 “主动逃避行为” 的原理和方法做了实验验证.

4.2 实验中发现的一些急需解决的难题

(1) 原本运动行为响应良好的实验鸽, 经过一段时间后, 会出现 2 种现象: 多数实验鸽在手术后 20 天左右, 开始表现出对电刺激响应的灵敏度日渐下降, 一般在手术后 40 天左右, 对刺激的反应基本消失; 但也极有少数实验鸽却能基本保持对电刺激响应的灵敏度不变. 至今我们仍未弄清出现种现象的机制. 这直接影响动物机器人的实用化. 因此, 这是必须从生理学机制和生物相容性技术上解决的一个重大难题.

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/112012-522

(2) 由于鸽子颅骨上的手术部位的肌肉会自然地再生, 导致实验鸽头顶部固定微电极的牙科水泥块多数在手术后 2 个月内脱落, 少数半年内也会脱落. 脱落后, 鸽子虽然仍能健康地生活, 但其受控功能已完全消失. 我们认为, 将遥控器模块芯片化并埋于皮下是解决这一普遍存问题并实现机器人鸟实用化的主要途径之一.

(3) 最理想的办法应是在颅外用无创的手段实现对相关脑区的刺激, 达到控制运动行为的目的. 这也是应该从机制和技术上解决的一个重大课题.

参考文献

1 Talwar S K, Xu S, Hawley E S, et al. Rat navigation guided by remote control. Nature, 2002, 417: 37–38

2 Bozkurt A, Gilmour R, Stern D, et.al. Mems based bioelectronic neuromuscular interfaces for insect cyborg flight control. In: IEEE 21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Tucson, 2008. 160–163

3 Sato H, Christopher W B, Brendan E C. A cyborg beetle: insect flight control through an implantable tetherless microsystem. In: IEEE 21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Tucson, 2008. 164–167

4 Sato H, Peeri Y, Baghoomian E, et.al. Radio-controlled cyborg beetles: A radio-frequency system for insect neural flight control. In: IEEE 22nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Sorrento, 2009. 216–219

5 Brown S. Stealth sharks to patrol the high seas. New Sci, 2006, 2451: 30

6 Funke K. Somatosensory areas in the telencephalon of the pigeon—II. Spinal pathways and afferent connections. Exp Brain Res, 1989, 76: 620–638

7 Bear M F, Connors B W, Paradiso M A. Neuroscience: Exploring the Brain. 2nd ed. 2001 [王建军, 译. 神经科学 — 探索脑. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2004]

8 Xu S, Talwar S K, Hawley E S, et al. A multi-channel telemetry system for brain microstimulation in freely roaming animals. J Neurosci Methods, 2004, 133: 57–63

9 Han J S. Neuroscience. 3rd ed. Beijing: Peking University Medical Press, 2009 [韩济生. 神经科学. 第 3 版. 北京: 北京大学医学出版社, 2009]

10 Nocholls G J, Martin A R, Wallace B G, et al. Neurobiology–From Neuro to Brain. 4th ed. Sundertand: Sinauer Associates, 2001 [杨雄里, 等译. 神经生物学: 从神经元到脑. 北京: 科学出版社, 2003]

11 Davis M. The role of the amygdala in fear and anxiety. Annu Rev Neruosci, 1992, 15: 353–375

12 LeDoux J E. Brain mechanisms of emotion and emotional learning. Curr Opin Neurobiol, 1992, 2: 191–197

13 LeDoux J E. Emotion, memory and the brain. Sci Am, 1994, 270: 50–57

14 Cardinal R N, Parkinson J A, Everitt B J, et.al. Emotion and motivation: the role of the amygdala, ventral striatum, and prefrontal cortex. Neurosci Biobehav Rev, 2002, 26: 321–352

15 Arana F S, Parkinson A J, Hinton E, et al. Dissociable contributions of the human amygdala and orbitofrontal cortex to incentive motivation and goal selection. J Neurosci, 2003, 23: 9632–9638

16 Beitz A J. The midbrain periaqueductal gray in the rat. I Nuclear volume, cell number, density, orientation, and regional subdivision. J Comp Neurol, 1985, 237: 445–449

17 Beitz A J. Periaqueductal gray. In: Paxinos G, ed. The Rat Nervous System. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 1995. 173–182

18 Bandler R, Shipley M T. Columnar organization in the midbrain psriaqueductal gray: modules for emotional expression. Trends Neurosci, 1994, 17: 379–388

19 The Avian Brain Nomenclature Consortium. Avian brains and a new understanding of vertebrate brain evolution. Nat Rev Neurosci, 2005, 6: 151–159

20 Sadananda M. Avian brain nomenclature change. Curr Sci, 2005, 89: 1662–1664

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/112012-522

21 Wang Y, Brzozowska-Prechtl A, Karten H J. Laminar and columnar auditory cortex in avian brain. PNAS, 2010, 107: 12676–12681
22 Karten H J, Konishi M, Pettigrew J D. Somatosensory representation in the anterior wulst of the owl (Speotyto cunicularia). Neurosci Abstr, 1978, 5: 554
23 Wild J M. The avain somatosensory system: connections of regions of body representation in the forebrain of the pigeon. Brain Res, 1987, 412: 205–223
24 Schneider A, Necker R. Electrophysiological investigations of the somatosensory thalamus of the pigeon. Exp Brain Res, 1996, 109: 377–383

Brain mechanism and methods for robo-animal motor behavior control

SU XueCheng*, HUAI RuiTuo, YANG JunQing, WANG Hui & LV ChangZhi

Robot Research Center, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510*, China*
*E-mail: sxch2009@yahoo.cn

Abstract Considering the present problem in the field of robo-animals that the motor behavioral control mechanisms in existing cases are all based on the inherent physiological features of animals, the authors present a common brain mechanism of motor behaviors control and control method accordingly. Three aspects are involved: (1) Presenting a key research idea based on the common mechanism not its inherent features like rat vibrissae and insect wings, exploring those brain mechanism, brain representations and its functional neural sites related to aim behavior; and ensuring aim behavior to occur and process controllable by stimulating those sites with appropriate encoding signals. (2) Proposing a definite research procedure that focuses on the brain mechanism about the relation among the nervous system of sensory, motivation, emotion and controls of the motor behavior, and discussing its scientific evidence. (3) Giving the principle and method for universally applicable design to control motor behavior of robo-animal, and finally, using "robo-pigeon" to validate the study system in the experiment.

Keywords brain mechanism, brain representation, motor behavioral control, robo-animal, robo-bird/robo-pigeon, simulation neuroinformation encoding

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/112012-522



SU XueCheng was born in 1938. He received B.S. degree in 1964 from Hefei University of Technology. He worked in Shandong University of Science and Technology (SDUST) until retired as a Professor in 2008. He focused on mechanical and electrical robot before 2002 and gained national award. After 2002, he focused on robo-animal research and invented the first robo-rat of China in 2005, the first robo-pigeon of the world in 2007 and the first robo-cat in 2011.



YANG JunQing was born in 1979. He received the M.S. degree in control theory and control engineering from SDUST, Qingdao in 2005. Currently, he is a Lecturer and Researcher at SDUST. His research interests include implantable ASIC and animal robot.



HUAI RuiTuo was born in 1978. She received the M.S. degree in zoology from Hebei Normal University, Shijiazhuang in 2004. Currently, she is a Lecturer and Researcher at SDUST. Her research interests include animal robot and neural physiology.



WANG Hui was born in 1980. She received Ph.D. degree from Shandong University, Jinan in 2008. Currently, she is a Researcher in Shandong University of Science and Technology. Her research interests include neural physiology and robo-animal.

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/112012-522