



智慧动物与电子科技交互：现状与展望*

赵津晶¹⁾ 周扬帆¹⁾ 张秉傲¹⁾ 伊鸣^{2)**} 姜红²⁾ 许胜勇^{1)**}

(¹⁾ 北京大学电子学院, 北京 100871; (²⁾ 北京大学神经科学研究所, 北京 100191)

摘要 人类与动物的交互合作自古以来就有着悠久的历史, 伴随着智能芯片、可穿戴设备和机器算法的快速发展, 智慧动物与电子科技的交互成为了现实。如今, 人类可以借助电子系统与动物进行沟通、感知和控制。这类电子设备的目标在于实现以动物为中心的工作模式, 从而提升人类对动物的理解, 最终促进动物智能和创造力的发展。本文将中型、大型动物作为研究对象, 以发展其能力增强为目标, 提出了“智慧动物增强系统”的构想。该构想用以描述这类装置的特性, 并对现有的动物与计算机接口解决方案进行了全面综述。总的来说, 智慧动物增强系统主要分为植入式和非植入式两类, 均由接口平台、感知与解读、控制与指示三部分构成, 并通过不同层次的增强系统和架构模式, 从而实现人与动物的智慧交互。尽管已有的智慧动物增强系统仍然缺乏完整独立的交互系统架构, 但在未来的发展中, 智慧动物增强系统具备良好的前景和发展空间, 不仅可以用于替代尖端设备和运输设备, 还有望通过智慧共联实现跨物种的信息交互。同时, 智慧动物增强系统可以促进人与动物的双向交互, 对动物伦理和生态保护的发展也将产生重要的推动作用。更为重要的是, 基于动物主体的交互模型开发能够为设计人机交互系统提供可借鉴的研究经验, 从而有助于更高效地推进人机结合宏伟目标的早日实现。

关键词 动物科技交互, 动机结合, 植入式装置, 非植入式装置, 可穿戴装置, 智慧动物增强系统

中图分类号 Q6, TN710

DOI: 10.16476/j.pibb.2023.0246

随着科技的不断进步和发展, 人类与动物的交互方式正在发生深刻的变化。这种交互合作最早可以追溯到人类文明的远古时代。在人类早期的狩猎和采集阶段, 合理地利用动物资源是满足人类生产生活需要的重要方式^[1], 如狩猎野兽、捕捉鱼类和采集蜂蜜。随着农业社会的发展, 人类开始驯养动物, 利用它们的劳动力进行耕种^[2]。在工业革命之后, 人类开始利用动物进行运输和参与战争, 其中, 骆驼、骡子、犬、海豚、大象、鸟类, 甚至昆虫都被用于人类战争^[3]。在现代社会, 动物为人类提供的服务变得更加多元化, 如导盲、陪伴、勘探等^[4]。

长期以来, 人与动物的交互都是一个双向过程。除了人类从动物中学习, 动物同样可以在与人类和人工制品的交互中表现出高度的学习能力和适应性。在过去的十年里, 研究者已经开始尝试运用各种电子科技来研究和观察动物行为。例如, 通过附加在动物身上的微型传感器和全球定位系统

(global positioning system, GPS) 追踪器, 追踪动物的迁移路径、记录它们的行为习性, 并进一步理解动物对环境的响应。另外, 通过人工智能和机器学习, 可以更准确地识别和分析动物行为, 甚至预测它们的未来行为。而在动物福利和保护方面, 科技也发挥了重要作用, 例如利用无人机进行动物种群调查, 以及利用虚拟现实技术对动物进行无创训练等。

尽管如此, 动物与电子科技交互尚未完全发挥其潜在优势。该领域仍存在继续开发和扩展的空间。第一个问题在于, 对于复杂的应用场景, 单纯基于计算机系统的机器人研究并不能充分满足现实需要。例如, 在崎岖地形中, 轮式机器人和履带层机器人避障性能不足, 四足机器人难以减小尺寸和

* 国家重点研发计划 (2017YFA0701302) 资助项目。

** 通讯联系人。

伊鸣 Tel: 010-82805083, E-mail: mingyi@hsc.pku.edu.cn

许胜勇 Tel: 010-62745072, E-mail: xusy@pku.edu.cn

收稿日期: 2023-06-24, 接受日期: 2023-09-05

实现广泛灵活的运动^[5]。第二个问题则是, 动物的一些与生俱来的独特天赋是计算机无法模仿的。例如, 声纳技术无法完全模仿海洋动物的声学感知行为^[6]。因此, 让动物代替机器人与计算机系统相结合起来, 将会产生更加满足现实需要的人与动物的电子交互系统。

随着集成电子科技不断进步, 小型化与功能化兼备的辅助设备被研究人员迅速开发。这些装置是为具备一定程度的智能与效用的中型、大型动物创建的, 旨在实现“以动物为中心”的工作方式。本文把这样的辅助装置统称为“智慧动物增强系统”(intelligent animal augmentation system, IAAS)。IAAS是一个结合或增强动物生理功能、行为表现或者感知能力的技术系统。具体而言, 人类出于让动物能力增强、从而协助自身的目的, 在动物身上装备电子设备。这类电子设备可以促进人类对动物的理解, 提高动物的智能和创造力, 并创造了人类与动物之间、动物与动物之间的新型关系。系统实现远程信息的单向或双向传输, 通过植入式和非植入式的途径, 感知、控制或引导动物的运动行为, 完成远程检测、遥控、导航等任务。

智慧动物增强系统这一概念与过往文献中在动物与电子设备交互领域(以下也可被简称为“动机结合”)中已定义的一些系统概念相关, 但又具有较为显著的差异性, 包括犬类增强技术系统(canine augmentation technology, CAT)、动物机器交互系统(animal-computer interaction, ACI)、赛博格与仿生系统(cyborg and bionic systems, CBS)。其中, CAT于2006年被提出^[7], 是一种包含多种传感器件和通信资源的犬类辅助概念模型。ACI于2011年被提出^[8], 指的是通过计算机和其他电子设备来实现动物的交互, 包括如何设计和开发适合动物使用的计算机界面、如何使动物能够参与到计算机应用程序中、如何通过计算机系统来监测和理解动物的行为和需求等。2017年, CBS作为一个机器人、生物工程等交叉领域的会议主题被提出^[9], 涵盖有关活体机器人混合系统的多类研究成果, 涉及昆虫混合机器人、仿生机器人等。

与CAT相比, 智慧动物增强系统涉及更为广泛的动物种类, 关心所有可被训练的动物, 而不仅仅限于犬类。与ACI相比, 智慧动物增强系统不仅关心动物与计算机的交互问题, 更核心的目的是基于动物的独特天赋, 以电子设备和计算机技术等高科技技术作为手段, 从而发挥胜于人与机器的独特

优势。同时, 与CBS相比, 智慧动物增强系统集中面向于中型、大型的智慧动物, 而非小型生物、机器人等。

研究表明, 智慧动物增强系统在人类生活中发挥着越来越重要的作用, 特别是在军事领域。早在2009年11月, 一群海豚及其驯养员被部署到新喀里多尼亚, 并与其他设备一起清除二战期间埋设的水雷^[10]。同时, 具有足够计算能力和传感器能力的移动设备也在智慧动物增强系统的发展中提供各种可能性。在无线生物传感器网络中, 每个动物都将装备着包含数据捕获、处理和网络通信功能的植入或非植入平台^[11]。

研究人员已经对涉及多种动物的动机结合系统进行了一些总结。Zhou等^[12]对昆虫、鱼、小鼠等小型动物机器人进行了综述。该类小型动物机器人系统通过神经刺激实现在各种类型环境下的导航任务。然而, 小型动物自身存在着一些动机结合的劣势。其一, 昆虫、鼠类动物体型细小, 难以负担大型的物品, 因此, 系统可扩展性低。其二, 它们通常难以驯化, 在外部环境下, 完成任务后不能寻回。其三, 它们自身智慧较低, 难以接收电子设备传递的复杂指令, 不能与人类进行有效的“语言”交流。而关于中型、大型动物的综述工作一般包括对犬、猪、牛等的可穿戴装置研究。Jukan等^[13]概述了家用宠物、服务动物和工作动物的可穿戴装置, 利用电子系统智能计算和感知, 为动物带来福利。Hirskyj-Douglas等^[14]从ACI系统的角度出发, 讨论了触觉、嗅觉、屏幕交互方法与跟踪系统。

本文以有一定智慧能力的动物作为切入点, 系统介绍电子设备在这些中型、大型动物上的交互方案。分析了使用各种技术路径(视觉、听觉、触觉等)的智慧动物增强系统, 按照接口平台、感知与解读技术、控制与指示技术进行展开, 并仔细讨论该领域的研究前景。本文具体组织如下:

第1节提出了三级“层进式”增强系统, 均以动物自身为主体, 通过电子设备实现人与动物、动物与动物、动物与机器之间的交互, 从而增强动物的能力。在系统的设计中, 主要涉及到两方面的底层技术: 传感输入和信息反馈。

第2节讨论各种植入式和非植入式的智慧动物增强系统。在植入式/非植入式方案中, 包含电子器件的接口平台、动物状态的感知与解读、动物行为的控制与指示。

第3节列举了多个智慧动物增强系统所能应用

到的领域, 并指出他们对传统电子系统的优势。也探讨了智慧动物增强系统对于动物伦理研究的推动作用, 以及它对于人机结合技术的推动作用。

第4节, 总结。

1 智慧动物增强系统分类和辅助工具

本文提出的智慧动物增强系统将以“层进式”关系分为三类: a. 一级系统: 人和动物进行简单交互, 动物是功能性设备的携带者; b. 二级系统: 动物理解人的指令, 并按照指令操作功能性设备; c. 三级系统: 多种动物共同理解人的指令, 协同操作不同的功能性设备。

一级系统依靠一套信息传递的设备, 将人的命令转化为动物的行为, 并实时获得动物自身或(和)周围环境的反馈信息。在特定应用场景下, 其所携带的功能外设完全受后台的远程指令控制, 如用于农业自动化收割的多种末端执行器。

二级系统需要训练动物掌握简单的操作来控制功能外设。这样可以解决后台与功能外设之间的长距离频繁通信难度较大的问题。与短距离通讯相比, 长距离通讯受到电离层变化的影响, 导致信号衰落和抖动^[15]。同时, 把数据传输到更远的距离将意味着更高的能耗和成本, 且安全性较低, 容易被拦截和窃听。相较于与功能外设的长距离通信, 基于蓝牙、WIFI等短途通信技术的本地通信技术具有低能耗、低成本、高安全性等优势。在一级系统的基础上, 二级系统需要增加动物与功能外设之间的动物操作单元。

三级系统由多种动物协同交互, 操作不同的功能外设。这将在一个复杂任务场景中发挥不同动物的天赋能力, 极大地拓展了动物交互系统的应用边界。在二级系统的基础上, 三级系统需要准确理解不同种类动物的语言, 如表情、声音、肢体动作、气味等, 增加实现动物之间交流的编码、解码的“翻译”单元。

综上所述, 三类系统均以动物自身为主体, 通过电子设备促进实时、准确的动物与人或动物与动物之间的交互, 从而使动物能力增强, 完成复杂任务。智慧动物增强系统由传感输入单元、反馈输出单元、功能外设单元、动物操作单元和动物语言翻译单元组成。其中, 多个传感输入单元用于接收来自环境或动物自身的输入, 以及单个或多个反馈方式组成反馈输出单元, 向信息接收方提供其想表达的信息。下面的部分将详细讨论它们。

1.1 传感输入

在智慧动物增强系统中常用的传感输入有全球导航定位卫星(global navigation satellite system, GNSS)、普通摄像头、热成像摄像头、惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)等。

GNSS包括GPS、北斗等, 可以用于导航和测量速度、方向、距离、时间等信息。此外, 水下定位技术往往采取非卫星的定位导航技术, 如惯性/航位推算导航、水声学导航、视觉导航等, 使用数据增强、滤波算法、多传感器融合等方法来提高定位精度和鲁棒性。由于不同技术各有优劣, 水下智慧动物增强系统可采用多组合定位导航的方式^[16]。

普通摄像头, 如智能手机相机, 主要优势在于可以提供高质量的图像, 而且它们的尺寸也很小, 便于在系统中集成。但其主要限制是不提供深度信息, 因此, 此类系统无法确定动物与目标之间的距离。

热成像摄像头, 可以利用红外线技术检测物体的红外辐射, 从而得知物体的温度分布情况。使用热成像摄像技术能够在低能见度环境下, 观测物体的温度和轮廓, 提高了监控的效果和范围。但缺点是热成像摄像头的成本较高, 同时也存在分辨率较低、对温度变化敏感、无法识别物体的颜色和细节等技术问题。因此, 此类系统可以大致确定活体目标的方位。

IMU是测量物体3轴姿态角以及加速度的装置, 包括3轴陀螺仪和3轴加速度计, 部分IMU还包括3轴磁力计。以上3个组件分别用来测量物体的旋转变化率、线性加速度和朝向。IMU具有结构简单、体积小、重量轻、响应快、相对不易受到外界干扰等优点, 可以在黑暗或低能见度的环境下工作, 适用于各种动态环境。然而, 值得注意的是, IMU的一部分——3轴磁力计在强磁场环境下可能会受到影响, 因此使用时仍需考虑环境因素。缺点是可能存在误差累积、漂移、温度敏感等问题。因此, 此类系统需要使用算法进行校准和补偿。

1.2 反馈方式

具有多种传感输入单元的智慧动物增强系统可以在使用过程中完成导航、探测目标等任务。这些方向提示等增强信息, 需要发送给动物作为命令和指引。常见的反馈方式有视觉、听觉、触觉、其他电刺激反馈。大部分系统使用它们的组合, 提供多模式反馈来适应不同的应用场景。

视觉反馈一般使用点光源或图像。植入式系统使用人工视觉。非植入式系统使用激光、智能眼镜。视觉反馈结合地图多模态数据,使用增强现实、虚拟现实的技术手段扩展视野和认知。

听觉反馈使用音频信息。植入式系统使用电子耳蜗。非植入式系统使用耳机、扬声器。听觉反馈的缺点是听觉线索会分散注意力,周围的环境和危险容易被忽略。在不堵塞耳道的情况下感知音频信号可以在一定程度上减少这个问题,如电子耳蜗和骨传导耳机。考虑到隐蔽性,骨传导耳机可被安装于牙齿的部位^[17]。

触觉反馈被认为是一种无声反馈方式。植入式系统使用皮质内微刺激发出人工触觉反馈信号。非植入式系统使用振动马达,通过动物的胸前、背部或其他身体部位来提供反馈。触觉反馈可以避免受环境声音影响而分散注意力。该方式有时可能会让厚皮毛的动物感到困惑,在解码振动的高级含义时需要花费更长的时间。

其他电刺激反馈包括脑内电刺激、体外电刺激,实现动物运动行为指令控制,如左转或右转、向前等。利用电脉冲刺激肌肉或神经,使其产生收缩或放松,从而控制运动方向。这类方法方式的缺点在于只能实现方向控制,不能传递复杂反馈信息。一些电刺激缺乏感觉反馈或自然感觉,只是人为地激活肌肉或神经,动物运动的协调性、灵敏性和适应性可能会受到影响。

1.3 其他单元

功能外设单元是具有特定功能的可被动物装备的执行器,受本地指令以及后台远程指令控制。这类设备均被设计为易于装配和携带的形式。在不同应用场景下,功能外设单元能够被灵活使用和满足特定需求,如农业自动化收割的多种末端执行器^[18]、军事便携式无人飞行器等。

动物操作单元是为受过训练的动物提供理解人类指令和操纵电子设备途径的系统模块。该单元主要包含设备控制接口和动物操纵接口。设备控制接口使得不同类型的功能外设单元能够与动物操作单元进行通信和控制。动物操作接口一般基于触摸、声音或其他传感器构成。通过动物操作单元,单个动物独自或多个动物协同完成多个功能性设备的操作。

动物语言翻译单元实现动物之间信息的双向交互。一方面,该单元将工作动物获取的信息,完整、准确、及时地传输到后台监控中心。相关的应

用软件和算法利用计算机视觉和机器学习技术实现中型、大型动物的行为动作和表情识别工作进行感知^[19-21]。另一方面,该单元通过视觉、听觉、触觉等途径将后台人工指令完整、准确、及时地传输到工作动物。语音音频作为最常见的方式实现了非“自然语言”的直接输出指令。

2 智慧动物增强支持系统与技术

本文介绍 IAAS 的构想,更关心中型、大型动物,综述了可用于该系统的植入式方案和非植入式方案的研究工作(表1)。本文从增强能力的角度出发,总结了已完成的、功能的和被评估的系统原型,还包括那些被提出的带有原型的系统,以及那些有进一步发展潜力的技术。其中,植入式器件虽然缺乏完整的独立交互系统架构,但在实现核心功能方面具备技术途径。因此,植入式动物增强技术也将纳入以下讨论内容。

每种增强技术不同,均有其优点和局限性。本文没有对应用环境做出限制,根据系统是否为侵入式,分类为两类:植入式方案和非植入式方案。下面两小节将分三方面详细描述该分类:接口平台、感知与解读技术、控制与指示技术。其中,接口平台为感知与解读技术和控制与指示技术提供整合的物理平面。IAAS 是多种感知与解读技术和控制与指示技术任意组合于某种接口平台上。

2.1 植入式方案

植入式电子接口平台使得脑内电子设备具备了集成的条件。接口平台可以很好的将负责视觉、听觉、触觉、感觉神经刺激的电子设备聚集在同一个工作平台上,由外界统一供电和传输信息,从而降低植入手术的复杂度和风险。

植入式神经交互技术使用微型电子器件对动物某个特定功能区进行无线信息传输与精准调节。其中,通过在动物体内植入用于感知和刺激神经细胞的电子设备,实现电子设备对动物体的相互作用,猴、猪、犬等动物常被作为对象。本小节将根据脑神经、听觉、视觉、触觉等其他感知神经的顺序叙述,并提到了每个类别的一些代表性成果。

2.1.1 接口平台

Neuralink 公司^[22]实现了智能颅骨电子设备的简单原型(图1)。该装置由内置处理芯片、电路和电池组成,可以通过植入大脑皮层的数千个微电极收集动物的实时神经信号,是一种完全植入无线可穿戴装置。单个设备大小为1/4硬币,因此,埃

隆·马斯克 (Elon Musk) 提出在中型、大型动物的较大的大脑中，具有轻松植入多个该架构设备的可能性。

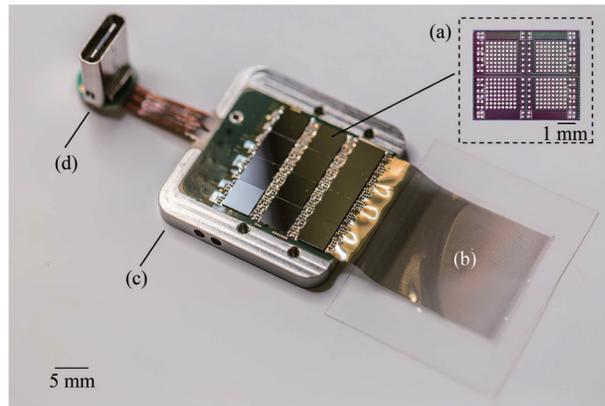


Fig. 1 A simple prototype of intelligent skull electronic device: packaged sensor device diagram [22]

图1 智能颅骨电子设备的简单原型：封装传感器设备图 [22]

(a) 能够处理256通道数据的单个神经处理专用集成电路，封装设备包含12个此类芯片，总共3 072个通道。(b) 聚对二甲苯-c衬底上的聚合物线。(c) 钛制外壳（盖子已卸下）。(d) 用于电源和数据的数字USB-C连接器。

北京大学Yang等 [23] 基于钛框架和聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 薄膜实现了一种透明颅骨窗口。该透明颅骨窗口的优点在于具有超90%的相对透明面积，且与人类头骨强度近似，这就使得它作为脑内结构部件来集成脑内的多功能系统成为可能。智能多功能颅窗是一种可能的动物双向交互平台 [23] (图2)。将颅窗与多种功能模块相结合的装置未来

有望成为一种植入式可穿戴电子设备。目前，大多数研究已经在啮齿类动物身上证明了植入式颅窗的可行性。在大型动物中，该装置也具有广阔的应用前景。

Shupe等 [24] 设计了一种多通道双向脑机接口NC3，它由装有紧凑组件的四块电路板组成，可以携带在非人类灵长类动物头部。Fallegger等 [25] 全面综述了可植入生物电子接口系统。系统包括集成在兼容基板上的有源多材料电子元件，如视网膜植入系统Argus II。集成平台需要将供电、数据传输和处理功能，即先进的电子电路与软传感器阵列相结合，同时确保机械完整性、稳健性和密封性。此外，天津大学和中国电子公司 [26] 实现了用于解码脑电波信息的专用编解码芯片，有望增强动物与机器、动物与人的快速通信。该款芯片提供脑电编解码接口、采集传输接口、解码专速器等定制化模块，形成了一套完整的嵌入式脑-机接口开发平台。

2.1.2 感知与解读

接口平台上的电子器件可以实现中型、大型动物脑神经信号的感知与解读。Rajangam等 [27] 展示了经过训练的植入多通道微电极阵列的恒河猴，可以使用其皮质活动作为主要控制信号导航机器人轮椅 (图3)。该运动信号直接从感觉运动皮层集合中提取、解码并用于直接控制电动装置运动，如电动轮椅的导航。

实际上，一项关于脑机接口的综述研究表明 [28]，现有的脑机接口研究工作和初步产品主要是单向获取部分简单的大脑信息，而后通过脑机接口将大脑的命令传递给外骨骼、机械臂、光标等外

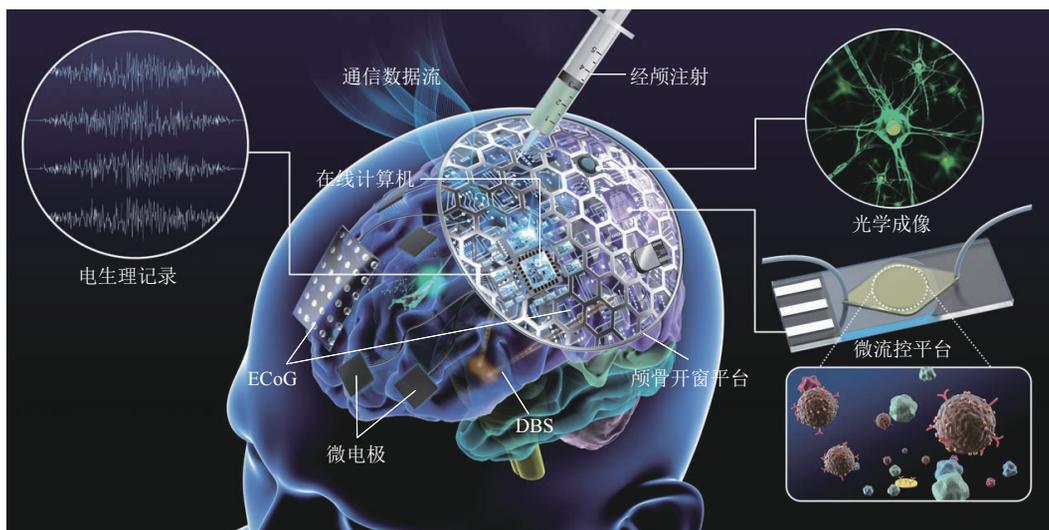


Fig. 2 A proposal for a large-area multifunctional cranial window as an implantable wearable smart electronic device [23]

图2 一种大面积多功能颅骨窗作为植入式可穿戴智能电子设备的设想 [23]

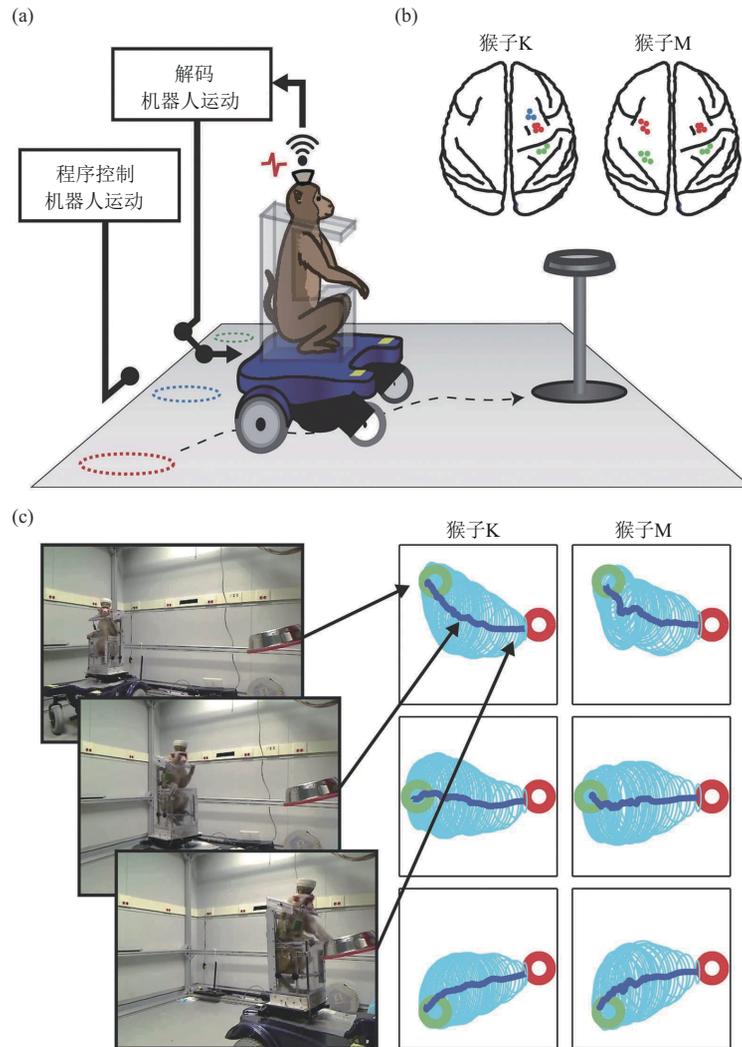


Fig. 3 Overview of the wireless cortical brain-machine interface system for whole-body navigation^[27]

图3 用于全身导航的无线皮层脑机接口系统概述^[27]

(a) 让猴子坐着的移动机器人轮椅从三个起始位置之一(虚线圆圈)移动到葡萄分发器。无线记录系统记录猴子头部阶段的尖峰活动,并将活动信号发送到无线接收器以解码轮椅运动。(b) 大脑区域的示意图,记录调谐到速度或方向的单位。红点对应于M1中的单位,蓝色来自PMd,绿色来自体感皮层。(c) 三个视频帧显示猴子K朝着葡萄分发器行驶,右侧面板显示了从三个不同的起始位置(绿色圆圈)到葡萄分发器(红色圆圈)的平均行驶轨迹(深蓝色),浅蓝色椭圆是轨迹的标准偏差。

设使得使用者能够进行行走、手臂拿放物体、操作平板电脑等一些简单的动作。例如, Rizzoglio等^[29]利用猴子的运动皮层的潜在信号与其肌电图之间的相关关系训练了解码器,从而验证了动物之间存在一致的运动活动表征。该研究结论同样适用于训练各类大型智慧动物的脑机接口解码器,以便实现它们对电子设备的直接控制。Trautmann等^[30]研究了一种新植入物和成像系统,通过神经元的树突信号,显示出针对手臂运动不同方向的调整,成功在线解码运动方向。

植入式感知与解读技术对具有一定智慧能力的动物进行神经信号的提取和解码,可以用于构成动

物操作单元和动物语言翻译单元。

2.1.3 控制与指示

动物通过接口平台上的电子器件获取输入信息,从而完成知觉感知,自身姿态确定到运动模式动态调整的过程。在视觉领域内,“光流”(optic flow)现象是由于光线投射在视网膜上产生的视觉运动^[31]。这一现象为动物提供了关于自身运动和周围环境空间布局的丰富感知信息,进而帮助动物在飞行或移动过程中动态调整运动模式,引导动物在复杂环境中避开障碍物和通过间隙。鸟类通过平衡两只眼睛感受到的图像运动速度调节飞行速度。具体而言, Bhagavatula等^[32]证明左右光流方向的

变化不仅会导致虎皮鹦鹉飞行速度的显著变化,而且还会改变其轨迹,使它们飞得更接近垂直线。而水平线使虎皮鹦鹉飞得更快。Djebbara等^[33]认为,蜂鸟、蜜蜂等动物与人类使用相似的策略来指导其行为。

在听觉领域内,动物移动或者其周围环境发生变化时,周围的声音模式也会随之变化形成不同的声场流动结构^[34]。基于不同的方向检测机制,动物通过感知声流来确定自身的移动方向以及周围环境的变化。例如,几乎所有的陆生脊椎动物似乎都通过利用左右耳对声源位置的不同声压差异来解决定位问题^[35]。这些差异的起源和大小在各类群和物种之间有很大的差异。同时, Jones等^[36]表明,蝙蝠、齿鲨等动物具有从其他动物的回声定位信号中收集信息的潜力,但编码信息的机理与可靠性仍待考察。除了视觉和听觉,动物的嗅觉、触觉等其他感知系统也对其运动模式产生影响。

不同动物的视觉、听觉等知觉系统都具有本能模式和训练模式。本能模式帮助动物在天生具备的感知能力基础上快速做出适应性反应。例如,秃鹫通过视觉和听觉的感知信息,判断环境的变化,从而调整自身的飞行姿态和飞行速度,保持平衡和稳定的飞行^[37]。而训练模式则允许动物通过学习和经验优化其感知和运动反应,从而在特定任务中更加熟练和精确。例如,从听觉感知的角度, Gao等^[38]通过利用虚拟现实技术证明,经过训练的小鼠能够有效地学习和辨识虚拟空间中具有特定的声音特征的3个声学地标。同样,经过训练的犬可以熟练和精确地识别特定手势的视觉信号或口令的听觉信号^[39]。

总的来说,研究人员需要充分利用本能模式并为动物提供适当的训练和学习机会,以实现更好的控制效果,从而引导动物的空间导航和决策行为。在设计适用于不同动物的控制系统时,需要综合考虑不同动物的感知特性,操纵和传递感知信息来人为调节运动模式,如操纵视觉光流场、左右耳听觉声场。同时,研究人员需要充分利用本能模式为动物提供适当的训练和学习机会,以实现更好的控制效果,从而引导动物的空间导航和决策行为。

植入式器件通过对中型、大型动物各方面神经信号的操控,实现动物信息输入。现有的植入式控制与指示系统有两种作用形式。其一,提供真实的语音、图像等信息。其二,进行体内直接电刺激控制动物运动行为。二者均未针对性根据知觉系统特

性对控制与指示系统进行设计。因此,含有人工设计知觉信息的系统设计是一种重要的未来研究思路。接下来,本文将根据听觉、视觉、触觉、其他电刺激的顺序叙述现有的植入式研究工作。

听觉神经用于传递声信号,如含有指令信息的音频。植入式无线耳蜗可以无线传递听觉。在豚鼠耳内实现无线人工耳蜗遥控的研究工作^[40-42]利用特定的传输功率和数据信号刺激电极下的听觉神经。在大型哺乳动物耳内也具有植入电子耳蜗的条件,如猪^[43]、羊^[44-45]。

视觉神经用于传递光学信号,如植入无线视网膜的视觉传递。林衍旒等^[46]对人工视觉辅助系统进行了现状总结和未来展望,提出无线视网膜在动物身上同样具有植入无线视网膜的可行性。Güven等^[47]在犬类眼下靠近视网膜的位置实现电极阵列植入。Maya-Vetencourt等^[48]在猪眼内证明了共轭聚合物视网膜假体的生物相容性和可行性。

触觉产生于感觉皮层神经,可以实现人工刺激的触觉。O'Doherty等^[49]通过脑机接口界面为猴子的运动控制提供触觉。该工作允许通过初级体感皮层的皮质内微电流刺激发出人工触觉反馈信号。Cutrone等^[50]对植入式的人工触觉传感装置及其原理做出了总结。

其他电刺激用于传递控制简单运动的电信号。一些研究^[51-55]对鸽子脑部电刺激实现其运动行为指令控制,如左转或右转、向前等。进一步的,南京大学团队^[56]使用基于GPS的刺激背包产生可变刺激,并对GPS定位数据和刺激参数实时记录。

2.2 非植入式方案

非植入式方案是在动物体外部署多种单元,并集成于可穿戴装备上。与植入式方案相比,非植入式方案将不会面临成本高、术后问题多、产品生命周期短等问题。不同的设计方案均应当考虑系统的体积和重量。比如,较大的部件可能会减少动物的自然运动范围,并限制其在狭小空间内的运动。系统可以使用多种传感器,如摄像头、3轴加速度计、3轴陀螺仪等。本文讨论的系统依靠算法对传感输入进行计算,从而感知和引导中型、大型动物,如犬、海豚、海狮等。

2.2.1 接口平台

对于体型范围在猫和马之间的四足动物,非植入式接口平台被设计为头盔、颈环、背心、耳部标签的形式。其中,已有一些产品已被正式投入商用。

头盔用于装配摄像类传感器。优点是更有良好的视野范围, 不易被遮挡。Rex Specs公司开发了带有照明灯、集成摄像头和麦克风的工作犬护目镜。

颈环用于装配定位或(和)IMU传感器。优点是装置重量可被设计得较轻(例如, 商业犬类颈环FitBark的重量仅16 g), 对于动物更具有舒适感。同时, 可调节的设计使其更容易通用于大体型范围。缺点在于面积小, 难以作为大型功能设备的载体。在FitBark、Tagg、GlobalPetFinder、SpotLight、Retrieva等商用产品中, 定位发射设备被附加到颈环上。Ladha等^[57]开发了一个犬可穿戴颈环。其中, 传感器被安置的聚碳酸酯外壳中, 外壳两端被条带连接。Valentin等^[58]实现了一种装有3轴加速度计和3陀螺仪的颈环。Aich等^[59]分别设计了含有IMU的16 g颈环和13 g尾环(图4)。

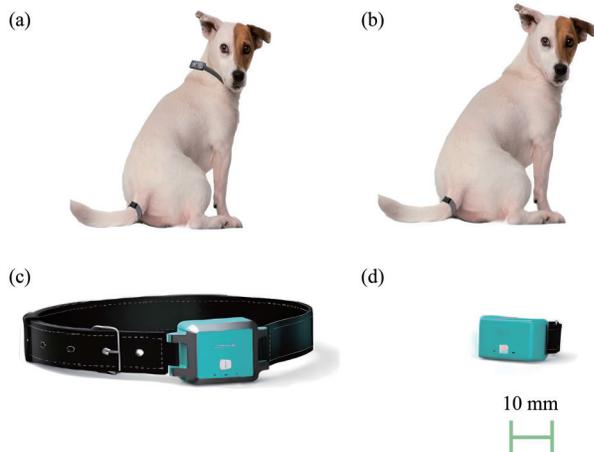


Fig. 4 Neck and tail wearable devices with IMU^[59]

图4 含有IMU的颈部和尾部可穿戴设备图^[59]

(a) 犬同时佩戴颈部和尾部可穿戴设备。(b) 犬仅佩戴尾部可穿戴设备。(c) 含有IMU的16 g颈部可穿戴设备。(d) 含有IMU的13 g尾部可穿戴设备。

背心则被用于装配多种传感输入、反馈输出、电池等设备。优点是允许更大的设备尺寸, 因此可以在上面放置更大的电池, 长期为系统供能。缺点是当载荷较大重量设备系着安全带运动时, 束带和动物皮肤之间的摩擦容易导致动物皮肤受伤。

战术电子公司提供两种类型的K-9摄像系统: 背装K-9MC4和胸装K-9CMC。K-9MC4摄像机系统直接安装在犬的背部。Brugarolas等^[60]建立了

一种含有无线传输系统的犬背心, 其范围包含臀部、胸部、腹部和背部。Komori等^[61]开发了一种搜救犬传感器背心。该套装重量为1.56 kg, 当使用较小的电池, 重量可降至1.1 kg。Kasnesis等^[62]设计了完全模块化的可拆卸式犬背心, 即所有的组件均用魔术贴贴在背心上。Bozkurt等^[63]实现了一个配有IMU的定制背带和一个用于处理IMU数据计算模块组成的犬背心。背心下方设有三个条带, 分别位于颈部、胸部、腹部, 用于装配传感器和固定。在之前工作的基础上^[63], 该团队^[64]继续减少重量和尺寸, 使犬背心更兼容、更舒适。同时, 颈部的安全带双通扣被修改为魔术贴, 使其比原来的更容易打开和固定。Vosinakis等^[65]开发了K9背心, 背部通过三轴稳定器固定RGB和热成像摄像头(图5)。



Fig. 5 K9 vest with RGB and thermal imaging camera^[65]

图5 含有RGB和热成像摄像头的K9背心^[65]

耳部标签的优点是耳朵较难受到影响, 并且相对地受到保护, 不受泥土和污垢的影响, 从而减少了对设备造成的潜在损坏。缺点是在尺寸和重量方面有十分严格限制, 容易受到动物耳道条件影响。耳部标签用于装配IMU。Haladjian等^[66]实现了可穿戴猪耳标签。该设备由3D打印技术设计符合猪耳的外壳, 包含由一个旋钮供电币形电池和定制的小型运动传感器。

同时, 上述多种设计可以被结合使用。Valentin等^[67]提出颈环与背心组合。IMU被附加到颈环, 位于脖子的底部。手机作为主要计算部件被安置背心中。Winters等^[68]将一个装有IMU的项圈和一个装有3轴加速度计的肚带组合。这种组合小而轻, 可以被任何大小的犬佩戴, 同时很容易地适应任何大小的四边形体型范围(从猫到马)。研究人员也尝试了将相机和其他传感部件分别集成在摄像头盔和背心中^[69-72]。

以上内容集中总结陆地生物的非植入式接口平台。对于海洋生物，非植入式接口平台目前被设计为背包、标签的形式，配备摄像头和其他传感输入。

背包用于装配多种传感输入、电池等设备。Davis等^[73-75]在海豹身上逐步实现了一种视频和数据记录的可穿戴背包。该可穿戴背包装置，包含一个录像机，微型计算机和压力、水速度、罗盘方位和翻板冲程频率的传感器。

标签与背包相比更加小型化，包括堵塞式侵入性锚标签和无侵入性吸盘标签。Linnenschmidt

等^[76]使用无侵入式吸盘电子标签对海豚进行了生物声学记录。该标签包括一个声学数据记录器、一个时间深度记录器、一个VHF无线电发射机和一个卫星发射机。Chapple等^[77]实现了一种附着于鲨鱼的非侵入夹钳标签(图6)，装置含有一套生物传感器(12个数据通道包括3轴加速度计、3轴磁力计、3轴陀螺仪、深度、温度、光和速度传感器)和相机标签。该相机标签包含一个类似的传感阵列和一个1280×720高清视频摄像机。Van等^[78]提供了第一个港口鼠海豚运动行为观测夹钳标签。该标签包括GPS传感器和潜水记录仪单元。

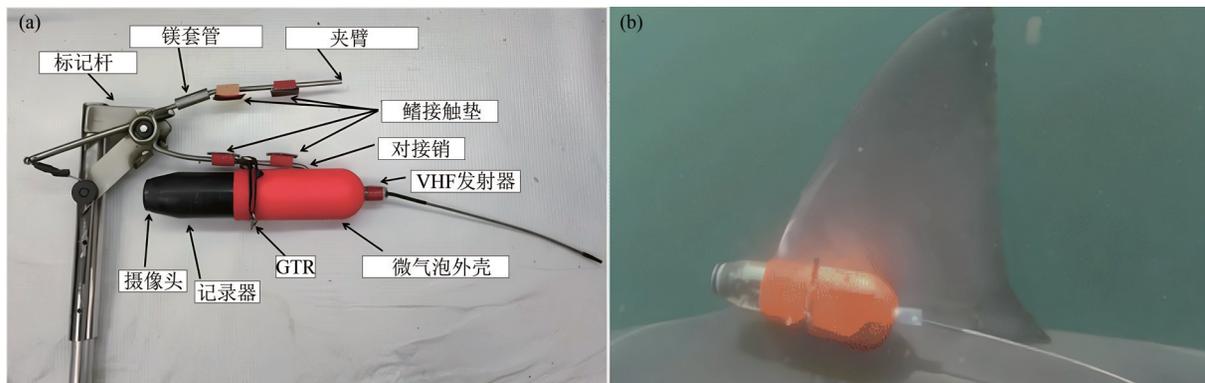


Fig. 6 A non-invasive rigid tag attachment for large predatory sharks^[77]

图6 一种附着于鲨鱼的非侵入刚性标签^[77]

(a) 标签和设备的固定。通过GTR和对接销，将CATS相机标签通过专门设计的附件夹固定在一起。(b) 标签固定在鲨鱼背鳍底部附近。

Mate等^[79]提出了一种经真皮附着的生物堵塞式高级潜水行为标签，包含3轴加速度计、3轴磁力计、压力、温度、光电平和GPS传感器。如果长期保留这类堵塞式皮下标签，将带来较大的肿胀，甚至肌肉坏死和空化^[80]。Goulet等^[81]发展了一种使用环氧树脂黏附的微型仿生声纳和运动标签(图7)。该标签含有深度、加速度、磁场和GPS传感器，能够快速实时同步记录宽带声纳数据。

2.2.2 感知与解读

在非植入式接口平台上的多种传感器与机器学习算法结合被用于感知与解读动物行为。对于犬类，采集和分析犬不同身体部位的运动和姿势，以及声音、心率等信息。

使用头部、颈部和躯干的运动信息的任意组合可以识别动物的静态姿势或(和)动态活动。对于中型、大型动物采取类似的方法，研究人员^[57-58, 60, 66-68]基于IMU和KNN、随机森林等机器学习算法，对犬、猪在自然环境中的静态和动态行

为特征进行识别和分类。除了姿态识别，研究人员将情绪感知也纳入研究范围，如Aich等^[59]使用IMU传感器和机器学习算法，在七种行为分类的基础上，增加了积极、中性和消极情绪跟踪。在城市搜救场景中，Ribeiro等^[82-83]证明了上述方法的实时有效性。进一步，动物的感知于解读^[84]已在智能手机中实现。

在使用动物身体部位的运动信息的同时，增加视频信息可以辅助识别。Zhan等^[69]提出了一种基于视觉和IMU传感器的犬动作重构和视频实时传输方案。Davis等^[74]基于三维运动和录像观察的数据，观察并重建海豹的三维运动。同时，该团队^[75]探究了海豹潜水分类和行为。

在使用动物身体部位的运动信息的同时，增加声音信息可以辅助识别。Komori等^[61]提出通过检测连续吠叫识别搜救犬状态，从而定位受害者信息。其中，连续的吠叫是通过声音信号和犬背心的IMU信号来检测的。Kasnesis等^[62]基于IMU和

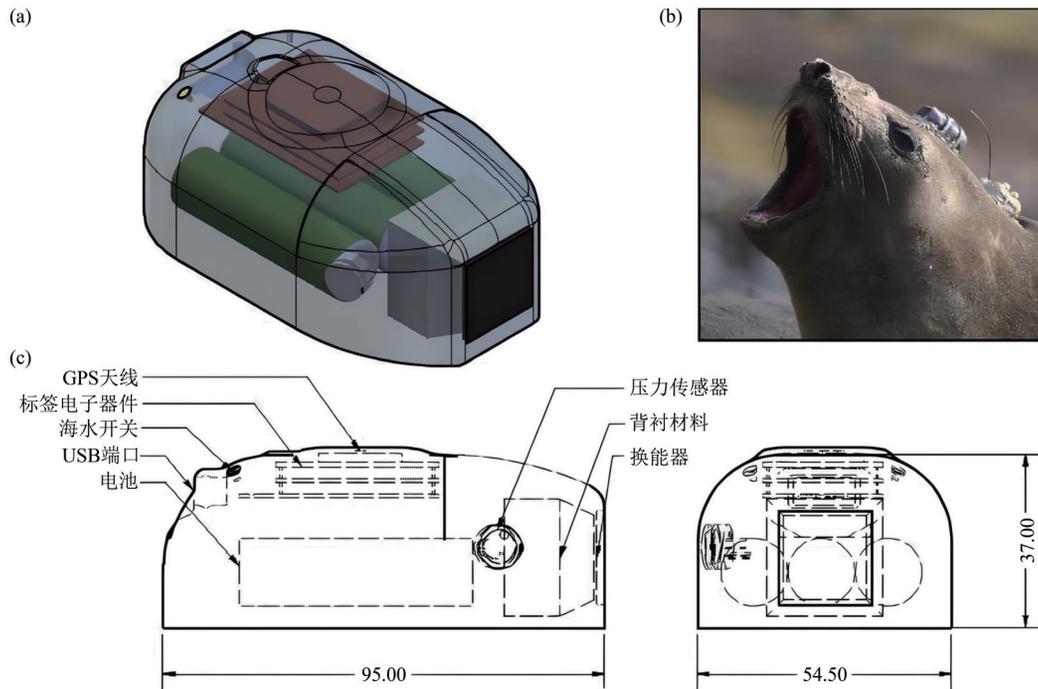


Fig. 7 A miniature biomimetic song and movement tag using epoxy resin adhesive^[81]

图7 一种使用环氧树脂黏附的微型仿生声纳和运动标签^[81]

(a) 声纳标签的示意图显示主要组件的位置。(b) 声纳标签部署于成年海豹头部。(c) 标签电子设备、声纳换能器、传感器和电池在环氧树脂中浇铸, 以创建尺寸为95 mm×55 mm×37 mm的单个标签。

麦克风的数据, 使用深度卷积神经网络对犬进行活动识别和声音分类。

在使用动物身体部位的运动信息的同时, 增加心率信息可以用于动物健康监护。一些研究工作实现了远程健康管理系统。美国北卡罗莱纳州立大学研究团队^[63]提出了一种犬的无线健康监测系统, 通过可穿戴心率传感装置远程持续监测犬的生命体征。该装置中的心电图电极与光电容积描记图用于心率检测、IMU用于识别犬类行为。进一步的, 该团队^[85]改善梳状阵列电极硬件, 使其克服犬类皮肤绝缘和致密的犬毛层所施加的限制, 实现了更准确可靠的生命体征监测。

通过使用定制的装置, 动物可以选择是否主动被感知与解读。这类装置通常基于“以动物自身为主体”的思路进行设计和实现。Jackson等^[86]开发了一种含有可激活传感接口的穿戴犬背心, 提供了五种不同的传感器。犬可以使用咬、拉等行为激活传感器, 远程向它们的训导员发出信号。Zeagler等^[87]实现了一种含有电容式咬伤传感器的可穿戴计算机通信犬电子背心。在传感器被激活时, 背心

会通过手机向处理者的智能手机发送信号, 包括GPS数据和激活信息。实际上, 工具性背心、触摸屏和设备等设备^[88]为犬类提供了新的方式, 让它们与周围的人交流其自身感知。

2.2.3 控制与指示

接口平台上的耳机、扬声器、振动马达可以实现中型、大型动物信息获取的不同方式。其一, 为动物提供真实的语音、图像等信息。其二, 进行直接体外电刺激控制动物运动行为。以下根据听觉、视觉、触觉、电刺激的顺序叙述。一些已被正式做成商业产品。

听觉用于传递含有指令信息的音频。研究人员^[65, 70-72, 84, 89]通过摄像头、麦克风和扬声器实现视频、音频反馈以及语音指令控制的犬系统。系统通过扬声器和麦克风组成的双向音频模块向犬提供远程指令。此外, 在一种基于听觉传递的视觉辅助商用装置BlindSight®中^[90], 3D主动成像声纳发射器被用于回声定位导航。它会产生与每种动物的听觉特征相匹配的脉冲(已用于犬和马)。声音脉冲以恒定和有规律的间隔产生, 用于提供回声。

视觉用于传递含有方向信息的光或含有增强信息的图像。Ohno等^[91]展示了用背心装置上的激光束控制犬移动方向。具体而言,使用三束不同方向的激光束操纵杆来控制犬类向左、向右和向前移动。Nishinoma等^[92]提出了一种由高亮度LED和凸透镜组成聚光灯装置,用于户外环境照射明亮的大斑点(直径70 mm)在室外环境有效的控制犬。韩国高级科学技术研究所的研究人员^[93-95]致力于实现基于光刺激的海龟远程导航定位系统。其中,海龟将黑色圆柱体识别为障碍物,朝向躲避黑色的方向运动。Kim等^[96]首次实现了一种智能隐形眼镜,通过提供额外的信息实现增强现实。该研究通过智能隐形眼镜上的图像可视化来处理信息的提供。通过控制施加电压的持续时间来证明不同的模式,并通过与莫尔斯码的电信来可视化单词。

触觉则用于传递振动刺激或含有指令信息的振动信号。Lee等^[97]首次提出了一种控制论系统,通过互联网将人类触摸信号远程传递给鸡。小鸡的可穿戴外套为其提供积极的振动刺激。延续该思路,研究人员^[98-102]基于多个振动单元的组合开发振动背心,用于向非人类动物传递视听互动之外的触觉信息。经过训练的动物可将组合方位的振动信号与实际命令联系起来,用于执行多种任务。

同时,听觉和触觉可以被结合使用。研究人

员^[62-63, 103]在增强系统中同时设有音频、振动模块,基于振动电机和扬声器分别传递触觉和听觉指令。进一步,二者组合形成的控制信号将形成更丰富的指示和引导,如奥本大学和车辆动力学实验室的研究人员^[104]开发了一种远程导航和控制系统。该系统支持远程启动音频和一组三个振动马达发出的控制信号,引导犬到达GPS目标。同时音频和触觉控制信号也可被应用于人机结合,服务于盲人等特殊群体。Mealín等^[105]为盲人提出了一种具有音频和振动触觉反馈的通信系统。

非侵入式脑机接口可以实现连续实时脑控。天津大学团队开发了一种基于微型非对称视觉诱发电位的新型脑机接口拼写器^[106]。该工作使用无感视觉刺激实现了良好的人机交互体验。该团队^[107]设计了一种基于mVEP-P300-SSVEP混合脑电特征的216指令高速BCI系统。依托这一技术,该实验室团队最新开发了一款面向严重手功能障碍患者的“神工-谛听”脑机微信操作系统。该系统是国内首个脑机接口领域综合性开源软件平台MetaBCI(<https://github.com/TBC-TJU/MetaBCI>)。同时,该团队^[108]提出了脑机多指令连续编码技术,并使用非侵入式脑机接口和脑机多指令连续编码技术,实现4自由度12指令的连续实时脑控无人机系统(图8)。

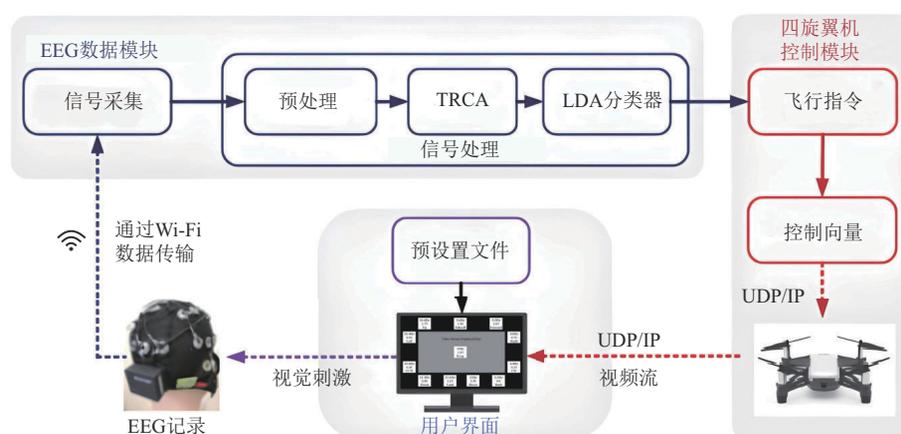


Fig. 8 The framework of the brain-control quadcopter system ©2020 IEEE^[108]

图8 脑控四旋翼机的系统框架^[108]

目前,多国商业产品供用户实现动物的简单控制和训练。美国 SportDOG、E-Collar Technologies 和韩国 DOGTRA 等品牌生产了专业犬类遥控项圈。

该类项圈利用无线通信技术,受发射端遥控装置控制,产生静电、震动或声音等非语言性刺激,从而远距离传达训导员意图。

Table 1 Classification of intelligent animal augmentation system

表 1 智慧动物增强系统分类

类型	动物种类	应用	技术手段	参考文献
体内	小型动物	接口	生物电子接口	[22-25]
		控制	电子耳蜗、其他电刺激	[40-42, 51-56]
	中、大型陆地动物	感知	微电极阵列	[27-30]
		控制	电子耳蜗、无线视网膜、人工触觉	[43-50]
体外	中、大型陆地动物	感知&控制	IMU, 蓝牙, GPS, 摄像头, 麦克风, 扬声器, 心率传感器	[57-72, 82-90]
		控制	激光	[91-96]
			振动马达	[97-105]
	中、大型海洋动物	感知	IMU, 蓝牙, GPS, 摄像头, 麦克风, 压力、温度、光电平、深度、磁场传感器	[73-81]

3 讨论与展望

本综述从能力增强的角度出发, 分析了动物与电子系统进行交互的各种实现方案, 并根据底层技术和实现效果对其进行了分类。其中, 智慧动物增强系统是动机结合系统概念之一。

本章节首先展开讨论智慧动物增强系统的多方面应用, 以及在这些有潜力的应用领域中涉及到相关技术的研究进展。其次, 从动机结合的角度出发, 阐述该类系统研究对动物伦理和生态保护的发展。动机结合涵盖了智慧动物增强系统的技术概念, 因此带来了更加广泛和开阔的讨论思路和视野。最后, 关注动机结合, 尤其是 IAAS 技术, 对 人机结合领域产生的影响。在上述 3 个小节的基础上, 提出了一些未来可能的研究思路和建议。

3.1 智慧动物增强系统的多方面应用

3.1.1 用于替代尖端设备

智慧动物增强系统使得具备特殊本领的“工作动物”有能力完成人员和尖端仪器均难以完成的任务, 即用于替代尖端设备, 例如医疗检测设备、水下探测设备、地面探测设备等。

a. 医疗检测: 犬类的高灵敏嗅觉系统使其具备分析处理气味混合物的能力。因此, 穿戴智慧动物增强系统的医疗工作犬可以帮助医疗机构进行大通量的病症早期筛查, 实现医疗检测成本降低和效率提高。举例来说, 犬通过嗅觉检测出肺癌、乳腺癌、结肠癌、卵巢癌等多种癌症^[109]。对于癌症监测, CT 扫描、MRI 等医疗检测设备的局限性在于检测费用较高。训练犬类实现早期大通量的初筛将大幅降低检测成本。对于结核病检测, 医疗设备检测周期在几小时到几周不等。训练犬类在短时间内快速给出基础结果的判断, 将提高检测效率。

b. 水下探测: 现有声纳技术无法完全模仿鲸鱼的水下定位和导航天赋, 原因在于鲸鱼接收器具有高灵敏度, 其大脑对超声波信号的迅速处理, 以及其自身对于海洋环境具有适应性等。类似的大型海洋动物还包括海豚、海豹等^[110]。一些特定种类的鱼经过训练, 也用于寻找、定位和操纵水面上的物体^[111]。通过智慧动物增强系统可以对工作海洋动物所处环境进行感知和检测。进一步的, 装备电子设备的工作海洋动物可以替代水下传感机器人的角色。在水下环境中, 工作海洋动物通过电子交互进行自主或遥控的移动, 完成定位、探测等任务。与当前的三维水下地图生成技术相比, 使用工作海洋动物将在更大范围和更高精度的层面上实现水下定位和导航。

c. 地面探测: 陆地或空中的动物具有现代电子设备无法比拟的独特天赋和生理优势。同时, 相较于人类, 动物执行任务将更具有隐蔽性。在陆地上, 巨型非洲袋鼠具有极佳的嗅觉, 并且天生对非洲当地的寄生虫有抵抗力和疾病。已有研究工作^[112]训练袋鼠完成地雷和爆炸物的清除任务。进一步的, 工作袋鼠装备的智慧动物增强系统有助于特殊气味物品的定位和探测。该系统获取到的物品位置分布等信息可用于后台地图的信息增强。

d. 地空结合: 在完成合作任务时, 智慧动物增强系统有利于陆地和空中动物实现更紧密的配合。例如, 英国流行配合使用雕和貂配合抓田间野兔。貂具有身形小、在地洞内可穿梭的体型优势, 同时基于听觉实现洞内兔子的方位感知。而雕等猛禽的视力与当前摄像机相比, 有着更高的分辨率、更广的视野和更强的耐久性。当貂将兔子赶出洞时, 雕基于敏锐视觉实现目标快速锁定和捕捉。可穿戴电子设备有利于实现二者之间合作信息的实时交互。

具体而言,在兔子被赶出洞时,预警信号经过无线通信系统传递给雕,起到提醒和注意力集中的作用,有利于地面任务的完成。当仅考虑高空探测任务时,雕、鹰等猛禽具有高敏锐视觉天赋。与摄像机相比,该类工作动物将更快速、准确的对远处小目标进行锁定和持续监测。

3.1.2 用于替代运输设备

动物具备在人类和机器难以抵达的地方游刃有余的生存和活动的的能力。工作动物可以替代人和机器,进入难以抵达、或者抵达会面临巨大风险的地点,如深海、高山、极地、沙漠、深林,用于获取各类环境与现场信息以及实现特定的任务。

由于对特定极端环境具有耐受性和适应性,动物相较于人和机器来说将移动得更加自如和灵活。例如,深海鱼类可以在海沟、海山等极端水压和温度条件下生存,山羊、雪豹可以在氧气稀薄、低气温低气压的环境下自由活动,骆驼、沙漠狐狸可以穿越沙漠,猴子、马、大象可以在原始丛林中穿梭。在确保电子设备牢固安装的前提下,工作动物将有一定自主性地执行任务。在极端环境下,工作动物替代人和机器运输电子探测等功能设备,有利于降低成本、提高任务成功率。

3.1.3 用于实现智慧动物之间交互的设备

动物信息交互设备过去被涵盖于ACI领域,在智慧动物增强系统IAAS中被同样包含。2020年美国兽医协会调查^[113]表明,全球家庭宠物犬和宠物猫数量分别在8370万和6000万左右。同时,根据《2021年中国宠物消费趋势白皮书》^[114]的数据,2020年中国城镇犬猫数量超过1亿只。因此,该类设备在生活场景下仍有广泛的应用前景,有助于帮助宠物提高自身的认知、情感和社会性,增进其与人类和其他动物的关系。

含有动物语言翻译单元的智慧动物增强系统装置,一方面,可作为从工作动物到后台进行信息传输的交互设备。这类研究工作利用多种传感器与相关算法,感知和识别动物的面部表情信息、声音信息、耳朵和尾巴运动信息、体温、心率、呼吸频率生理信息等。另一方面,该系统可作为从后台到工作动物进行信息传输的交互设备,通过视觉、听觉、触觉等途径将后台人工指令完整、准确、及时地传输到工作动物。然而,当前已有的大多数研究成果仅实现了非“自然语言”的直接输出指令。人们将动物的行为感知技术与直接输出指令相结合,从而实现了简单意义上的双向交互系统。

与直接输出指令不同,动物自然语言涉及多种感官通道或信号模式,如视觉、听觉、触觉和化学等^[115]。与动物交流的更佳方式是模拟动物的声音、肢体语言,从而训练工作动物理解人的指令,并按照指令操作功能性设备。目前尚无基于电子设备识别动物语言进行人类和动物之间交流的研究。虽然研究人员尝试利用人工智能技术来分析和翻译动物的声音、行为和语言等^[116]。但是由于动物语言的复杂性和多样性,以及对于动物情境、文化和生理状态等多种因素的影响,这类研究仍然处于初步探索阶段,离实际应用还有相当大的距离。

更进一步的,如果动物“语言”被充分理解,那么动物与动物之间交流的编码、解码的“翻译”单元有望被人为实现,从而能够实现多种动物在电子技术的加持下的自主协同交互。在一个复杂任务场景中发挥不同动物的天赋能力将极大地拓展动物交互系统的应用边界。原因是单一动物通常只适合单一的场景,将多种动物排列组合将产生无限的可能。

最后,对于上述动物信息的双向交互设备,信息远程传输技术是关键,需要满足完整、准确、及时的要求。其中,应用的远程性取决于传输距离,实时性取决于传输延时。远程性和实时性均是智慧动物增强系统应当着重关心的内容。通信技术分为地面通信和水下通信。地面通信采用射频通信技术,其传输距离可以达到数十公里,延时毫秒量级,可以满足智慧动物增强系统远程应用的实时性需求。而水下电磁波的衰减非常快,因此,水声通信和水下光通信是目前两种主要的水下通信技术^[117]。一般来说,水声通信的传输距离可以达到数百公里,但延时为秒级,难以达到实时需求。而高速水下光通信的传输距离仅百米量级。因此,当前水下通信技术难以做到远距离与实时性兼备,水下动物信息的双向交互工作仍处于瓶颈阶段,需要广泛研究和进一步的通信技术突破。

3.2 动机结合赋能动物伦理发展

3.2.1 理解动物情感

理解动物情感对动物伦理研究的发展意义重大。人类不仅可以通过解码动物情感从而掌握动物行为与其情感表达的关联,而且可以更好地照顾动物情感,减少人与动物相处过程中给动物带来的恐惧或者痛苦。

视觉传感器和生物传感器是动物监控自动化解决方案的重要组成部分,用于收集特定物理、化

学、生物参数。热成像摄像头使用红外光捕捉动物图像, 准确显示动物的体温, 用于情绪测量。例如, 奶牛鼻腔温度的变化与积极的情绪状态有关^[118], 山羊的压力情绪与其眼睛温度有关^[119]等。心率变异性传感器被用来检测动物正常窦性心律下心动周期长度的逐次波动变化。心率变异指标可以客观地评估猪的情绪状态^[120]。脑电图是疼痛研究和伤害感受的关键技术, 用于测量动物压力以及对有害刺激的反应^[121]。与之类似的还有肌电图、呼吸率分析传感器以及嗅觉和化学传感器等。例如, 利用肌电图技术, 通过记录手臂和腿部肌肉的电位变化推断猴子的情绪, 如害怕、好奇和兴奋。

进一步, 多种传感器集成将克服单一传感器的功能限制, 实现更好的动物情绪信息的收集和解析。根据动物发声与表情的相关性, 同时提取声音和面部信息, 并辅以心率和体温信息, 可以协同分析动物复合情绪的表达, 从而实现了对动物思维模式和行为模式充分准确的理解。

3.2.2 保护野生动物和栖息地

非植入式和植入式电子设备将在保护野生动物及其栖息地方面也将发挥巨大作用。例如, 微型摄像头装载在动物身上可以获取其生态和行为的动物保护相关信息。一些对乌鸦^[122]和袋獾^[123]的野外观测工作中, 多种环境输入传感器被集成于野生动物的视频和环境数据收集系统中。

GPS、摄像头、麦克风、IMU等电子设备可以帮助动物保护组织获得更为复杂的数据信息, 如动物运动、行为和生理学信息, 以便人们更好地研究和保护野生动物。此外, 一些尚未广泛投入使用但前景广阔的技术有待进一步被探索, 如基于无线电技术的无人机跟踪技术、基于深度学习算法的声音和图像监测技术。

3.2.3 促进人与自然和谐相处

动机结合可以帮助研究者更准确地理解动物情感及其表达方式。这类研究的进步将帮助人们更好地了解动物喜怒哀乐的情绪, 进而激发人们的同理心。随着人类活动范围不断扩张, 物种灭绝、维持生命的关键生态系统组成减少等一系列生态环境问题愈发需要得到重视。传播动物伦理知识已经成为生态保护的关键问题。事实上, 许多非人类动物具有广泛的感知力和智慧。动机结合技术有利于人类更贴近地感受和了解动物的内心世界, 为动物保护带来不必要伤害减少、随意杀害抵制等多方面影响。基于脑电技术的神经调控, 也有望实现动物的

情绪调节以及神经系统疾病治疗等^[124-125]。

3.2.4 带来可能的多种风险

从动物权益和福利的角度考虑, 使用非植入式和植入式电子设备可能会对动物造成不必要的痛苦或困扰。虽然这些设备尽可能被设计为舒适可靠的, 但在安装和使用过程中仍可能对动物造成不利的影响。特别的, 对于植入式器件, 这种影响很大程度上取决于手术的复杂程度、麻醉方法以及动物的耐受能力。因而, 该类研究应该循序渐进以尽量延长产品周期与减少并发症。

此外, 动物是否愿意接受这种设备需要纳入研究人员的考虑范围。定向增强动物的听觉、视觉等感官可能会导致它们改变原有的生理反应机制。在实验过程中, 研究者应该密切关注动物对于新的生理功能变化的接受意愿情况, 更好地关心和照顾其情绪反应, 并及时叫停那些对动物身心有巨大损伤的实验。

动机结合在军事方面的应用也会涉及到动物的生命权的伦理挑战。动物可能在无知和非自愿的情况下冒着生命危险完成任务。举例来说, 为了模拟破坏交通线路的军事行动, 犬被要求背负炸弹模型在火车轨道上进行模拟训练。在这种训练环境中, 使用的道具和假设的情境会使犬误解这是一种互动游戏, 并且火车对其生命安全不构成威胁。然而, 在实际任务中, 携带真实炸弹的犬将需要以生命代价完成任务。

作为一个新兴领域, 动机结合可能带来以上多种风险。我们应该谨慎关注有关植入手术过程中、实验动物情绪反应、无害的实验用途以及长期的潜在风险等多个方面的伦理挑战。当开发和使用动机结合技术时, 必须充分考虑它们可能带来的伦理风险, 并采取适当的措施来防止和减轻。

3.3 从动机结合延伸到人机结合

人类与动物存在一些本质特性上的相似性。因此, 研究动物与机器的交互可以提供一种基于交互模型的研究思路, 从而为设计人机交互系统提供指导。此外, 对于动物认知过程的研究和脑内神经活动的研究可以丰富和推进人类脑科学研究, 例如, 从简单的学习和记忆到更复杂的推理和决策。具体而言, 通过比较不同物种的认知能力有助于解释认知功能的共同基础, 通过观察和记录动物脑内的神经活动有助于解释与不同认知任务相关的神经回路和信号传递机制。

智慧动物增强系统技术促进脑机接口、人脑功

能、人工视网膜、人类神经疾病治疗等领域同步发展。对于动物植入式接口平台的研究有助于开发并强化稳定性更高、安全性更高的脑机接口技术。哺乳动物的感觉运动皮层控制技术对具有一定智慧能力的动物进行大脑皮层信号的提取和解码，有助于深入理解脑的工作机制。听觉神经控制，一方面将促进医学科学家更好地了解动物大脑处理声音的作用机制。另一方面，它也将为脑医学研究探索具有可操作性的研究范式。视觉神经刺激的研究成果可以更好地帮助人类医学领域尤其是眼科学的进一步探索，比如探索人工视觉假体的人体植入技术、验证人工视网膜设备的各项技术可行性、理解人眼与大脑皮层之间的相互信息交换关系等。对于哺乳动物感觉皮层信号传递的研究，在发展过程中，首先会在治疗神经系统疾病方面获得一些很好的成果，通过以动物为实验对象，分析动物感知系统，得到关于动物体神经结构的更精确的认知，从而能够以更低的试错成本推进如脊髓损伤、帕金森病等的治疗研究。

此外，“动机结合”到“人机结合”的延伸性可以从能力增强的角度来考虑。从某种意义上说，所有人都在需要某一方面的能力增强：没有一个人是完美的。每个人都可以更有能力、更充分地做事^[6]。例如，每个人都缺乏犬敏锐的嗅觉和听觉，或鸟类对威胁性捕食者的高度敏感，或马的体型和力量，或海豹抵御极端寒冷的能力。在智慧动物增强系统中，我们认为高科技技术进行“动机结合”的关键意图之一是增强工作动物的生理性能、思维能力和各项工作能力。因此，人类能力增强同样是“人机交互”的一个重要应用目的。

早在二十世纪五六十年代，“赛博格”体现出人类想通过“人机交互”进行能力增强的愿望^[126]。当时，美国两位科学家在一只小白鼠身上安装了一种渗透泵，自动把化学物质注射进小白鼠，以控制它的生化反应。他们在发表的论文中，给这只小白鼠造了一个新词叫“赛博格”(cyborg)，意思是“自动调整的人类机器系统”。1985年，哈拉维提出著名的赛博格宣言，她将赛博格定义为“无机物机器与生物体的结合体”^[126]。

近年来，人工智能和机器人技术的研发持续探索生物体与机器的界面交互。与此同时，有机体和机器之间的边界正在消失。2023年，美国斯坦福大学和北京天坛医院合作实现的神经形态电子皮肤系统提供了印证^[127]。该系统作为一种大型的、复

杂的、可延展的传感器，能够覆盖人体和机械驱动器组件(如假肢)。未来，机械电子组件的选择将取决于人类在不同应用场景下能力增强的不同需求，如太空探索、军事、医疗领域。

在太空探索领域下，宇航服是人类在极端环境下使用智慧动物增强系统的典型示例。实际上，宇航服是一个“增强人类体质”的小型航天器，用于保护人类免受大气层外和太空中各种危险环境的影响。它需要提供许多功能和性能要求，如热和压力控制、氧气和水供应、辐射和陨石屏蔽、移动性和运动、生物医学监测、小型推进器喷气推进、明亮的阳光屏蔽等^[128]。

在军事领域，可以通过安装人工智能设备来增强士兵四肢的力量，使眼睛可见红外线光和紫外线光，使耳朵具有亚音速听觉。人工智能设备可被安装在多个身体部位，增强普通民众或士兵的生理功能、行为表现或者感知能力。2019年，美国陆军作战能力发展司令部发布的一项研究认为，耳朵、眼睛、大脑和肌肉增强到2050年或更早在技术上是可行的^[129]。所述技术包括眼部增强成像、视力和态势感知，通过光遗传紧身衣传感器网进行恢复和程序化肌肉控制，用于沟通和保护的听觉增强和用于双向数据传输的人脑的直接神经增强。

在医疗领域，人机交互会通过修复因疾病或损伤而丧失的功能来积极地影响人类生活质量。植入式医疗电子器件已被用于多种的医疗应用。例如，心脏起搏器用于产生人工心跳，深部脑刺激器用于治疗神经系统疾病，人工视网膜用于创造人工视觉，迷走神经刺激器用于实现多器官功能^[130]。

4 总 结

本文对现有的植入式和非植入式动物与计算机接口解决方案进行了全面综述。以中型、大型动物为工作中心，对其生理功能、行为表现或者感知能力进行结合或增强，有望实现更高层次的“动机结合”。从智慧动物与电子科技交互的视角出发，我们提出了“智慧动物增强系统(IAAS)”概念。

我们认为IAAS可被应用于多个方面。其一，替代尖端设备，包括医疗检测、环境探测等。我们建议为“工作动物”装备电子系统，以提升工作效率。其二，替代运输设备。利用动物对于极端环境的耐受性开展运输、探测甚至作战任务，可以降低成本并保证成功率。其三，实现智慧动物信息交互。跨物种的协作交流有利于实现更加复杂的任务

场景。

IAAS 技术概念对动物伦理和生态保护的发展具有推动作用, 也存在可能的多种不利影响。目前研究动物伦理的一般方法存在一定的缺陷。建议利用视觉传感器、生物传感器等电子器件组成观察系统, 对动物的生理特征数据及其对应的情绪变化进行精确描述, 从而更好地理解动物情感、保护野生动物和栖息地, 进而促进动物伦理、和谐自然的发展。

IAAS 技术以动物作为初步实验对象, 可为人类临床实验提供验证, 从而促进脑机接口、人脑功能、人工视网膜、人类神经疾病治疗等领域同步发展, 也将会加速推进人机结合的发展进程, 有助于修复和替代受损器官、提高生命质量、延长工作年限和预期寿命。

进一步发展 IAAS 技术, 可借鉴本文提出的三级“层进式”增强系统分类方法, 从接口平台、感知与解读、控制与指示三方面对动机结合领域进行新的探索。

参 考 文 献

- [1] Thulin C G, Röcklinsberg H. Ethical considerations for wildlife reintroductions and rewilding. *Front Vet Sci*, 2020, **7**: 163
- [2] Vigne J D. The origins of animal domestication and husbandry: a major change in the history of humanity and the biosphere. *CR Biol*, 2011, **334**(3): 171-181
- [3] Hediger R. *Animals and War: Studies of Europe and North America*. The Netherlands: Koninklijke Brill NV, 2013: 5-13
- [4] R. Malamud. Service animals: serve us animals: serve us, animals. *Soc Altern*, 2013, **32**(4), 34-40
- [5] Takahashi N, Shibata N, Nonaka K. Optimal configuration control of planar leg/wheel mobile robots for flexible obstacle avoidance. *Control Eng Pract*, 2020, **101**: 104503
- [6] Montgomery J C, Radford C A. Marine bioacoustics. *Curr Biol*, 2017, **27**(11): r502-r507
- [7] Ferworn A, Sadeghian A, Barnum K, *et al*. Urban search and rescue with canine augmentation technology//Packianather M. 2006 IEEE/SMC International Conference on System of Systems Engineering. Los Angeles: IEEE, 2006: 309-313
- [8] Mancini C. Animal-computer interaction: a manifesto. *Interactions*, 2011, **18**(4): 69-73
- [9] Liu Q, Wang C, Zhang B, *et al*. Kinematics analysis and motion planning of a redundant robotic manipulator for surgical intervention//Wang Z D. 2017 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS). Beijing: IEEE, 2017: 1-6
- [10] Olds B, Harris C. Navy marine mammal systems in support of munitions clearance. *Mar Technol Soc J*, 2011, **45**(6): 96-98
- [11] Li Y, Panwar S S, Mao S. A wireless biosensor network using autonomously controlled animals. *IEEE Network*, 2006, **20**(3): 6-11
- [12] Zhou Z, Mei H, Li R, *et al*. Progresses of animal robots: a historical review and perspectiveness. *Heliyon*, 2022, **8**(11): e11499
- [13] Jukan A, Masip-Bruin X, Amla N. Smart computing and sensing technologies for animal welfare: a systematic review. *ACM Comput Surv*, 2017, **50**(1): 10
- [14] Hirschy-Douglas I, Pons P, Read J C, *et al*. Seven years after the manifesto: literature review and research directions for technologies in animal computer interaction. *Multimodal Technologies and Interaction*, 2018, **2**(2): 30
- [15] Yoshii K, Saitou M, Liu J, *et al*. Prediction of ionospheric fading for long distance emergency communication//Meng W X, Papadias C, Sheng M. 2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Shanghai: IEEE, 2019: 1-5. doi: 10.1109/ICCW.2019.8757151
- [16] 尹伟伟,郭士萃.非卫星水下导航定位技术综述.舰船电子工程,2017,**37**(3):8-11
Yin W W, Guo S L. *Ship Electronic Engineering*, 2017, **37**(3): 8-11
- [17] 约瑟夫·瑞恩·斯莫拉兹.使用骨骼传导的无线音频发射器和接收器骨骼设备.中国:CN115484891A. 2022-12-16
Smoraz J R. *Wireless Audio Transmitters and Receivers Using Bone Conduction Bone Devices*. China: CN115484891A. 2022-12-16
- [18] Vrochidou E, Tsakalidou V N, Kalathas I, *et al*. An overview of end effectors in agricultural robotic harvesting systems. *Agriculture*, 2022, **12**(8): 1240
- [19] Pons P, Jaen J, Catala A. Developing a depth-based tracking system for interactive playful environments with animals//Iurgel I, Sakamoto D, Moulthrop S. Proceedings of the 12th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology. New York: ACM, 2015: 1-8. doi: 10.1145/2832932.2837007
- [20] Neethirajan S. Affective state recognition in livestock—artificial intelligence approaches. *Animals*, 2022, **12**(6): 759
- [21] Wu X, Dai J. A deep-learning-based neural decoding framework for emotional brain-computer interfaces. *arXiv preprint*, 2023: arXiv:2303.04391. <https://arxiv.org/pdf/2303.04391.pdf>
- [22] Musk E. An integrated brain-machine interface platform with thousands of channels. *J Med Internet Res*, 2019, **21**(10): e16194
- [23] Yang N, Li Q, Zhang X, *et al*. From transparent cranial windows to multifunctional smart cranial platforms. *Electronics*, 2022, **11**(16): 2559
- [24] Shupe L E, Miles F P, Jones G, *et al*. Neurochip3: an autonomous multichannel bidirectional brain-computer interface for closed-loop activity-dependent stimulation. *Front Neurosci*, 2021, **15**: 718465
- [25] Fallegger F, Schiavone G, Lacour S P. Conformable hybrid systems for implantable bioelectronic interfaces. *Adv Mater*, 2019, **32**(15): 1903904
- [26] Liangyu. China Unveils Brain-Computer Interface Chip [N/OL]. China: Xinhua, 2019 [2023-08-30]. http://www.xinhuanet.com/english/2019-05/18/c_138069590.htm

- [27] Rajangam S, Tseng P H, Yin A, *et al.* Wireless cortical brain-machine interface for whole-body navigation in primates. *Sci Rep*, 2016, **6**(1): 22170
- [28] 葛松, 徐晶晶, 赖舜男, 等. 脑机接口: 现状, 问题与展望. *生物化学与生物物理进展*, 2020, **47**(12): 1227-1249
Ge S, Xu J J, Lai S N. *Prog Biochem Biophys*, 2020, **47**(12): 1227-1249
- [29] Rizzoglio F, Altan E, Ma X, *et al.* Monkey-to-human transfer of brain computer interface decoders. *bioRxiv*, 2022: bioRxiv2022.11.12.515040. <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2022.11.12.515040v1.full>
- [30] Trautmann E M, O'Shea D J, Sun X, *et al.* Dendritic calcium signals in rhesus macaque motor cortex drive an optical brain-computer interface. *Nat Commun*, 2021, **12**(1): 3689
- [31] Warren W H. Information is where you find it: perception as an ecologically well-posed problem. *Iperception*, 2021, **12**(2): 20416695211000366
- [32] Bhagavatula P S, Claudianos C, Ibbotson M R, *et al.* Optic flow cues guide flight in birds. *Curr Biol*, 2011, **21**(21): 1794-1799
- [33] Djebbara Z, Jensen O B, Parada F J, *et al.* Neuroscience and architecture: modulating behavior through sensorimotor responses to the built environment. *Neurosci Biobehav Rev*, 2022, **138**: 104715
- [34] Morley E L, Steinmann T, Casas J, *et al.* Directional cues in *Drosophila melanogaster* audition: structure of acoustic flow and inter-antennal velocity differences. *J Exp Biol*, 2012, **215**(14): 2405-2413
- [35] Brown A D, Hayward T, Portfors C V, *et al.* On the value of diverse organisms in auditory research: from fish to flies to humans. *Hearing Res*, 2023, **432**: 108754
- [36] Jones T K, Allen K M, Moss C F. Communication with self, friends and foes in active-sensing animals. *J Exp Biol*, 2021, **224**(22): jeb242637
- [37] Martin G R, Portugal S J, Murn C P. Visual fields, foraging and collision vulnerability in Gyps vultures. *Ibis*, 2012, **154**(3): 626-631
- [38] Gao S, Webb J, Mridha Z, *et al.* Novel virtual reality system for auditory tasks in head-fixed mice//Barbieri R. 2020 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC). Montreal: IEEE, 2020: 2925-2928
- [39] Ziv G. The effects of using aversive training methods in dogs—a review. *J Vet Behav*, 2017, **19**: 50-60
- [40] Qian X H, Wu Y C, Yang T Y, *et al.* Design and *in-vivo* verification of a CMOS bone-guided cochlear implant microsystem. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2019, **66**(11): 3156-3167
- [41] Wang S H, Huang Y K, Chen C Y, *et al.* Design of a bone-guided cochlear implant microsystem with monopolar biphasic multiple stimulations and evoked compound action potential acquisition and its *in vivo* verification. *IEEE J Solid St Circ*, 2021, **56**(10): 3062-3076
- [42] Kùlah H, Uluşan H, Chamanian S, *et al.* A fully-implantable mems-based autonomous cochlear implant//Ando T. 2022 IEEE 35th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems Conference (MEMS). Tokyo: IEEE, 2022: 396-399
- [43] 陈伟, 刘日渊, 张亮, 等. 荣昌猪电子耳蜗植入方法建立及听功能初步观察. *中华耳科学杂志*, 2016, **14**(1): 15-20
Chen W, Liu R Y, Zhang L, *et al.* *Chinese Journal of Otolaryngology*, 2016, **14**(1): 15-20
- [44] Trinh T T, Cohen C, Boullaud L, *et al.* Sheep as a large animal model for cochlear implantation. *Braz J Otorhinolaryngol*, 2023, **88**: 24-32
- [45] Schnabl J, Glueckert R, Feuchtner G, *et al.* Sheep as a large animal model for middle and inner ear implantable hearing devices: a feasibility study in cadavers. *Otol Neurotol*, 2012, **33**(3): 481-489
- [46] 林衍旒, 葛松, 杨娜娜, 等. 人工视觉辅助系统: 现状与展望. *生物化学与生物物理进展*, 2021, **48**(11): 1316-1336
Lin Y N, Ge S, Yang N N, *et al.* *Prog Biochem Biophys*, 2021, **48**(11): 1316-1336
- [47] Güven D, Weiland J D, Maghribi M, *et al.* Implantation of an inactive epiretinal poly (dimethyl siloxane) electrode array in dogs. *Exp Eye Res*, 2006, **82**(1): 81-90
- [48] Maya-Vetencourt J F, Marco S D, Mete M, *et al.* Biocompatibility of a conjugated polymer retinal prosthesis in the domestic pig. *Front Bioeng Biotech*, 2020, **8**: 579141
- [49] O'Doherty J E, Lebedev M A, Ifft P J, *et al.* Active tactile exploration using a brain-machine-brain interface. *Nature*, 2011, **479**(7372): 228-231
- [50] Cutrone A, Micera S. Implantable neural interfaces and wearable tactile systems for bidirectional neuroprosthetics systems. *Adv Healthc Mater*, 2019, **8**(24): 1801345
- [51] Cai L, Dai Z, Wang W, *et al.* Modulating motor behaviors by electrical stimulation of specific nuclei in pigeons. *J Bionic Eng*, 2015, **12**(4): 555-564
- [52] Seo J, Choi G J, Park S, *et al.* Wireless navigation of pigeons using polymer-based fully implantable stimulator: a pilot study using depth electrodes//Patton J. 2017 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). Jeju: IEEE, 2017: 917-920
- [53] Huai R, Yang J, Wang H. The robo-pigeon based on the multiple brain regions synchronization implanted microelectrodes. *Bioengineered*, 2016, **7**(4): 213-218
- [54] Yang J, Huai R, Wang H, *et al.* A robo-pigeon based on an innovative multi-mode telestimulation system. *Biomed Mater Eng*, 2015, **26**(s1): S357-S363
- [55] Wang H, Yang J, Lv C, *et al.* Intercollicular nucleus electric stimulation encoded "walk forward" commands in pigeons. *Anim Biol*, 2018, **68**(2): 213-225
- [56] Yang J, Huai R, Wang H, *et al.* Global positioning system-based stimulation for robo-pigeons in open space. *Front Neurobotics*, 2017, **11**: 40
- [57] Ladha C, Hammerla N, Hughes E, *et al.* Dog's life: wearable activity recognition for dogs//Baumann P. Proceedings of the 2013 ACM international joint conference on Pervasive and ubiquitous computing. New York: ACM, 2013: 415-418

- [58] Valentin G, Alcainho J, Howard A, *et al.* Towards a canine-human communication system based on head gestures// Iurgel I, Sakamoto D, Moulthrop S. Proceedings of the 12th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology. New York: ACM, 2015: 1-9. doi: 10.1145/2832932.2837016
- [59] Aich S, Chakraborty S, Sim J S, *et al.* The design of an automated system for the analysis of the activity and emotional patterns of dogs with wearable sensors using machine learning. *Appl Sci*, 2019, **9**(22): 4938
- [60] Brugarolas R, Loftin R T, Yang P, *et al.* Behavior recognition based on machine learning algorithms for a wireless canine machine interface// Cantarella G. 2013 IEEE international conference on body sensor networks. Cambridge: IEEE, 2013: 1-5. doi: 10.1109/BSN.2013.6575505
- [61] Komori Y, Ohno K, Fujieda T, *et al.* Detection of continuous barking actions from search and rescue dogs' activities data// Burgard W. 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Hamburg: IEEE, 2015: 630-635
- [62] Kasnesis P, Doulgarakis V, Uzunidis D, *et al.* Deep learning empowered wearable-based behavior recognition for search and rescue dogs. *Sensors*, 2022, **22**(3): 993
- [63] Bozkurt A, Roberts D L, Sherman B L, *et al.* Toward cyber-enhanced working dogs for search and rescue. *IEEE Intell Syst*, 2014, **29**(6): 32-39
- [64] Majikes J, Brugarolas R, Winters M, *et al.* Balancing noise sensitivity, response latency, and posture accuracy for a computer-assisted canine posture training system. *Int J Hum Comput St*, 2017, **98**: 179-195
- [65] Vosinakis G, Krommyda M, Stamou A, *et al.* A smart integrated vest for the canine companion of the K9 units. *Informatics*, 2022, **9**(1): 2
- [66] Haladjian J, Ermis A, Hodaie Z, *et al.* IPig: towards tracking the behavior of free-roaming pigs// Zamansky A, Wirman H. Proceedings of the Fourth International Conference on Animal-Computer Interaction. New York: ACM, 2017: 1-5. doi: 10.1145/3152130.3152145
- [67] Valentin G, Alcainho J, Howard A, *et al.* Creating collar-sensed motion gestures for dog-human communication in service applications// Exler A. Proceedings of the 2016 ACM International Symposium on Wearable Computers. New York: ACM, 2016: 100-107
- [68] Winters M, Brugarolas R, Majikes J, *et al.* Knowledge engineering for unsupervised canine posture detection from IMU data// Iurgel I, Sakamoto D, Moulthrop S. Proceedings of the 12th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology. New York: ACM, 2015: 1-8. doi: 10.1145/2832932.2837015
- [69] Zhan X, Huang Q, Zhu C, *et al.* A real-time police dog action recognition system based on vision and IMU sensors// Prabhakaran B. 2020 IEEE International Conference on Multimedia & Expo Workshops (ICMEW). London: IEEE, 2020: 1-6. doi: 10.1109/ICMEW46912.2020.9106042
- [70] Ferworn A, Sadeghian A, Barnum K, *et al.* Urban search and rescue with canine augmentation technology// El-Osery A. 2006 IEEE/SMC International Conference on System of Systems Engineering. Los Angeles: IEEE, 2006: 309-313
- [71] Tran J, Gerdzhev M, Ferworn A. Continuing progress in augmenting urban search and rescue dogs// Guizani M, Rachedi A. Proceedings of the 6th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference. New York: ACM, 2010: 784-788
- [72] You B, Tang N, Xu J. Wireless intelligent monitoring system based on police dog// Huang H J. 2008 China-Japan Joint Microwave Conference. Shanghai: IEEE, 2008: 746-749
- [73] Davis R W, Wartzok D, Elsner R, *et al.* A small video camera attached to a Weddell seal: a new way to observe diving behavior// Thomas J A, Kastelein R A, Supin A Y. Marine Mammal Sensory Systems. New York: Springer New York, 1992: 631-642
- [74] Davis R W, Hagey W, Horning M. Monitoring the behavior and multi-dimensional movements of Weddell seals using an animal-borne video and data recorder [M/OL]. Tokyo: Memoirs of National Institute of Polar Research, 2004 [2023-08-30]. <http://id.nii.ac.jp/1291/00002488/>
- [75] Davis R W, Fuiman L A, Madden K M, *et al.* Classification and behavior of free-ranging Weddell seal dives based on three-dimensional movements and video-recorded observations. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2013, **88**: 65-77
- [76] Linnenschmidt M, Teilmann J, Akamatsu T, *et al.* Biosonar, dive, and foraging activity of satellite tracked harbor porpoises (*Phocoena phocoena*). *Mar Mammal Sci*, 2013, **29**(2): e77-e97
- [77] Chapple T K, Gleiss A C, Jewell O J D, *et al.* Tracking sharks without teeth: a non-invasive rigid tag attachment for large predatory sharks. *Animal Biotelemetry*, 2015, **3**: 14
- [78] Van Beest F M, Teilmann J, Dietz R, *et al.* Environmental drivers of harbour porpoise fine-scale movements. *Mar Biol*, 2018, **165**(5): 95
- [79] Mate B R, Irvine L M, Palacios D M. The development of an intermediate-duration tag to characterize the diving behavior of large whales. *Ecol Evol*, 2017, **7**(2): 585-595
- [80] Norman S A, Flynn K R, Zerbini A N, *et al.* Assessment of wound healing of tagged gray (*Eschrichtius robustus*) and blue (*Balaenoptera musculus*) whales in the eastern North Pacific using long-term series of photographs. *Mar Mammal Sci*, 2018, **34**(1): 27-53
- [81] Goulet P, Guinet C, Swift R, *et al.* A miniature biomimetic sonar and movement tag to study the biotic environment and predator-prey interactions in aquatic animals. *Deep Sea Research Part I: Oceanographical Research Papers*, 2019, **148**: 1-11
- [82] Ribeiro C, Ferworn A, Denko M, *et al.* Wireless estimation of canine pose for search and rescue// Alexander B. 2008 IEEE International Conference on System of Systems Engineering. Monterey: IEEE, 2008: 240
- [83] Ribeiro C, Ferworn A, Tran J. An assessment of a wireless mesh

- network performance for urban search and rescue task//Mota M. 2009 IEEE Toronto International Conference Science and Technology for Humanity (TIC-STH). Toronto: IEEE, 2009: 369-374
- [84] Lemasson G, Pesty S, Duhaut D. Increasing communication between a man and a dog//Baranyi P. IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications. Budapest: IEEE, 2013: 145-148
- [85] Brugarolas R, Latif T, Dieffenderfer J, *et al.* Wearable heart rate sensor systems for wireless canine health monitoring. *IEEE Sens J*, 2015, **16**(10): 2203-2206
- [86] Jackson M M, Valentin G, Freil L, *et al.* FIDO—facilitating interactions for dogs with occupations: wearable communication interfaces for working dogs. *Pers Ubiquit Comput*, 2015, **19**(1): 155-173
- [87] Zeagler C, Byrne C, Valentin G, *et al.* Search and rescue: dog and handler collaboration through wearable and mobile interfaces//Juhlin O, Lawson S. Proceedings of the Third International Conference on Animal-Computer Interaction. New York: ACM, 2016: 1-9. doi: 10.1145/2995257.2995390
- [88] Jackson M M, Byrne C, Freil L, *et al.* Technology for working dogs//van der Linden D. Proceedings of the Fifth International Conference on Animal-Computer Interaction. New York: ACM, 2018: 1-5. doi: 10.1145/3295598.3295615
- [89] Qu Y L, Zhao M Y, Dong Z L, *et al.* Experimental study of a remote-controlled police dogbot//WANG M Y, WANG, Z D. 2005 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics-ROBIO. Hong Kong: IEEE, 2005: 533-537
- [90] Bedard M, Myrna K E, Diehl K A. Preliminary evaluation of effect of two visual aid devices on navigation in blind dogs. *J Small Anim Pract*, 2020, **61**(5): 308-315
- [91] Ohno K, Yamaguchi S, Nishinoma H, *et al.* Control of canine's moving direction by using on-suit laser beams//Wang Z D. 2018 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS). Hong Kong: IEEE, 2018: 59-64
- [92] Nishinoma H, Ohno K, Kikusui T, *et al.* Canine motion control using bright spotlight devices mounted on a suit. *IEEE T Med Robot Bio*, 2019, **1**(3): 189-198
- [93] Lee S, Kim C H, Kim D G, *et al.* Remote guidance of untrained turtles by controlling voluntary instinct behavior. *PLoS One*, 2013, **8**(4): e61798
- [94] Kim C H, Choi B, Kim D G, *et al.* Remote navigation of turtle by controlling instinct behavior *via* human brain-computer interface. *J Bionic Eng*, 2016, **13**(3): 491-503
- [95] Kim D G, Lee S, Kim C H, *et al.* Parasitic robot system for waypoint navigation of turtle. *J Bionic Eng*, 2017, **14**(2): 327-335
- [96] Kim M, Jung I D, Kim Y, *et al.* An electrochromic alarm system for smart contact lenses. *Sensor Actuat B Chem*, 2020, **322**: 128601
- [97] Lee S P, Cheok A D, James T K S, *et al.* A mobile pet wearable computer and mixed reality system for human-poultry interaction through the internet. *Pers Ubiquit Comput*, 2006, **10**(5): 301-317
- [98] ur Réhman S, Li H. Using vibrotactile language for multimodal human animals communication and interaction//Silva P A. Proceedings of the 2014 Workshops on Advances in Computer Entertainment Conference. New York: ACM, 2014: 1-5. doi: 10.1145/2693787.2693792
- [99] Morrison A, Møller R H, Manresa-Yee C, *et al.* The impact of training approaches on experimental setup and design of wearable vibrotactiles for hunting dogs//Juhlin O, Lawson S. Proceedings of the Third International Conference on Animal-Computer Interaction. New York: ACM, 2016: 1-10. doi: 10.1145/2995257.2995391
- [100] Byrne C, Kerwin R, Zuerndorfer J, *et al.* Two-way communication between working dogs and their handlers. *IEEE Pervas Comput*, 2014, **13**(2): 80-83
- [101] Byrne C, Freil L, Starner T, *et al.* A method to evaluate haptic interfaces for working dogs. *Int J Hum Comput St*, 2017, **98**: 196-207
- [102] Golan Y, Serota B, Shapiro A, *et al.* A vibrotactile vest for remote human-dog communication//Otauy M A, Ryu J, Gerling G, *et al.* 2019 IEEE World Haptics Conference (WHC). Tokyo: IEEE, 2019: 556-561
- [103] Miller J, Flowers G, Bevly D. A system for tracking an autonomously controlled canine. *J Navigation*, 2012, **65**(3): 427-444
- [104] Britt W R, Miller J, Waggoner P, *et al.* An embedded system for real-time navigation and remote command of a trained canine. *Pers Ubiquit Comput*, 2011, **15**(1): 61-74
- [105] Mealin S, Winters M, Dominguez I X, *et al.* Towards the non-visual monitoring of canine physiology in real-time by blind handlers//Iurgel I, Sakamoto D, Moulthrop S. Proceedings of the 12th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology. New York: ACM, 2015: 1-8. doi: 10.1145/2832932.2837018
- [106] Xu M, Xiao X, Wang Y, *et al.* A brain-computer interface based on miniature-event-related potentials induced by very small lateral visual stimuli. *IEEE T Biomed Eng*, 2018, **65**(5): 1166-1175
- [107] Han J, Xu M, Xiao X, *et al.* A high-speed hybrid brain-computer interface with more than 200 targets. *J Neural Eng*, 2023, **20**(1): 16025
- [108] Mei J, Xu M, Wang L, *et al.* Using SSVEP-BCI to continuous control a quadcopter with 4-DOF motions//Riccardo Barbieri. 2020 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC). Montreal: IEEE, 2020: 4745-4748
- [109] Taverna G, Tidu L, Grizzi F, *et al.* Olfactory system of highly trained dogs detects prostate cancer in urine samples. *J Urol*, 2015, **193**(4): 1382-1387
- [110] Lammers M O, Howe M, Zang E, *et al.* Acoustic monitoring of coastal dolphins and their response to naval mine neutralization exercises. *Roy Soc Open Sci*, 2017, **4**(12): 170558
- [111] Board N S, National Research Council. *Naval Mine Warfare: Operational and Technical Challenges for Naval Forces*. Washington: National Academies Press, 2001: 56

- [112] Poling A, Weetjens B, Cox C, *et al.* Using trained pouched rats to detect land mines: another victory for operant conditioning. *J Appl Behav Anal*, 2011, **44**(2): 351-355
- [113] Larkin M, Radich R. Pet population still on the rise, with fewer pets per household. *J Am Vet Med Assoc*, 2021, **259**(11): 1243-1245
- [114] 智研咨询. 2022-2028年中国宠物饲料行业市场经营管理及投资前景预测报告[EB/OL]. 北京: 智研咨询, 2023 [2023-08-30]. www.chyxx.com/industry/1101632.html
Intelligent Research Consulting. 2022-2028 China Pet Feed Industry Market Management and Investment Prospects Forecast Report [EB/OL]. Beijing: Intelligent Research Consulting, 2023 [2023-08-30]. www.chyxx.com/industry/1101632.html
- [115] Moore R K, Marxer R, Thill S. Vocal interactivity in-and-between humans, animals, and robots. *Front Robot AI*, 2016, **3**: 1-17
- [116] Balemarthy S, Sajjanhar A, Zheng J X. Our practice of using machine learning to recognize species by voice. *arXiv preprint*, 2018: arXiv1810.09078. <https://arxiv.org/abs/1810.09078>
- [117] Rodoshi R T, Song Y, Choi W. Reinforcement learning-based routing protocol for underwater wireless sensor networks: a comparative survey. *IEEE Access*, 2021, **9**: 154578-154599
- [118] Proctor H, Carder G. Can changes in nasal temperature be used as an indicator of emotional state in cows?. *Appl Anim Behav Sci*, 2016, **184**: 1-6
- [119] Marques J I, Neto J P L, do Nascimento J W B, *et al.* Pupillary dilation as a thermal stress indicator in boer crossbred goats maintained in a climate chamber. *Small Ruminant Res*, 2018, **158**: 26-29
- [120] Leliveld L M C, Döpjan S, Tuchscherer A, *et al.* Behavioural and physiological measures indicate subtle variations in the emotional valence of young pigs. *Physiol Behav*, 2016, **157**: 116-124
- [121] Klemm W R. Are there EEG correlates of mental states in animals?. *Neuropsychobiology*, 1992, **26**(3): 151-165
- [122] Rutz C, Troscianko J. Programmable, miniature video-loggers for deployment on wild birds and other wildlife. *Methods Ecol Evol*, 2013, **4**(2): 114-122
- [123] Andersen G E, McGregor H W, Johnson C N, *et al.* Activity and social interactions in a wide-ranging specialist scavenger, the Tasmanian devil (*Sarcophilus harrisii*), revealed by animal-borne video collars. *Plos One*, 2020, **15**(3): e0230216
- [124] Liu S, He Y, Guo D, *et al.* Transcranial alternating current stimulation ameliorates emotional attention through neural oscillations modulation. *Cogn Neurodynamics*, 2022, **17**: 1473-1483
- [125] Wang F, Cai Q, Ju R, *et al.* Low-intensity focused ultrasound ameliorates depression-like behaviors associated with improving the synaptic plasticity in the vCA1-mPFC pathway. *Cerebral Cortex*, 2023, **33**(12): 8024-8034
- [126] Gandy M. Cyborg urbanization: complexity and monstrosity in the contemporary city. *Int J Urban Regional*, 2005, **29**(1): 26-49
- [127] Wang W, Jiang Y, Zhong D, *et al.* Neuromorphic sensorimotor loop embodied by monolithically integrated, low-voltage, soft e-skin. *Science*, 2023, **380**(6646): 735-742
- [128] Chang E Y W. Fashion styling and design aesthetics in spacesuit: an evolution review in 60 Years from 1960 to 2020. *Acta Astronaut*, 2021, **178**: 117-128
- [129] Emanuel P, Walper S, DiEuliis D, *et al.* Cyborg soldier 2050: Human/machine fusion and the implications for the future of the DOD [R/OL]. USA: Defense Technology Information Center, 2019 [2023-08-30]. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1136654.pdf>
- [130] Magisetty R P, Park S M. New era of electroceuticals: clinically driven smart implantable electronic devices moving towards precision therapy. *Micromachines*, 2022, **13**(2): 161

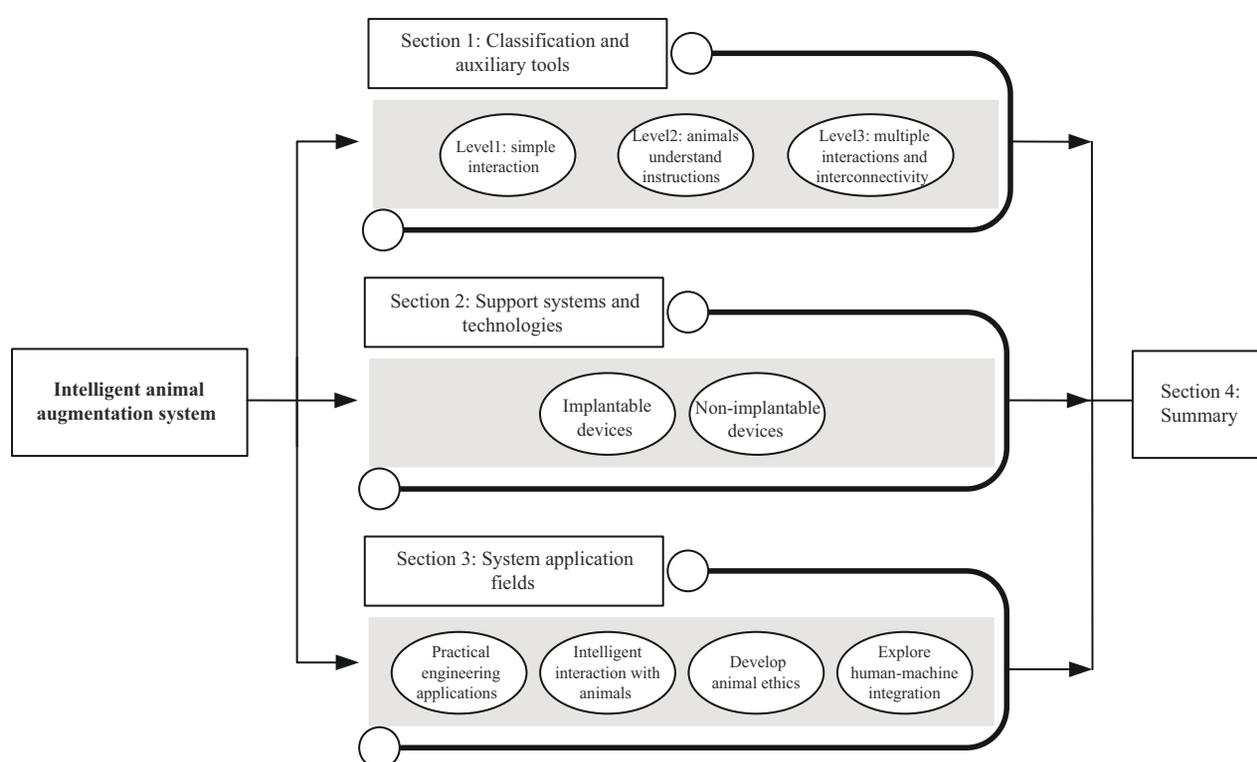
Interactions Between Intelligent Animals and Electronic Technology: Current State and Future Prospects *

ZHAO Jin-Jing¹⁾, ZHOU Yang-Fan¹⁾, ZHANG Bing-Ao¹⁾, YI Ming^{2)**},
JIANG Hong²⁾, XU Sheng-Yong^{1)**}

¹⁾School of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China;

²⁾Institute of Neuroscience, Peking University, Beijing 100191, China)

Graphical abstract



Abstract Human-animal interaction has a long-standing tradition dating back to ancient times. With the rapid advancements in intelligent chips, wearable devices, and machine algorithms, the intelligent interaction between animals and electronic technology, facilitated by electronic devices and systems for communication, perception, and control, has become a reality. These electronic devices aim to implement an animal-centric working mode to enhance human understanding of animals and promote the development of animal intelligence and creativity. This

* This work was supported by a grant from the National Key Research and Development Program of China (2017YFA0701302).

** Corresponding author.

YI Ming. Tel: 86-10-82805083, E-mail: mingyi@hsc.pku.edu.cn

XU Sheng-Yong. Tel: 86-10-62745072, E-mail: xusy@pku.edu.cn

Received: June 24, 2023 Accepted: September 5, 2023

article takes medium-sized and large animals as research objects, with the goal of developing their ability enhancement, and introduces the concept of “intelligent animal augmentation system (IAAS)”. This concept is used to describe the characteristics of such devices and provides a comprehensive overview of existing animal and computer interface solutions. In general, IAAS can be divided into implantable and non-implantable types, each composed of interface platforms, perception and interpretation, control and instruction components. Through various levels of enhancement systems and architectural patterns, intelligent interaction between humans and animals can be realized. Although existing IAAS still lack a complete independent interaction system architecture, they hold great promise and development space in the future. Not only can they be applied as substitutes for cutting-edge devices and transportation equipment, but they are also expected to achieve cross-species information interaction through intelligent interconnection. Additionally, IAAS can promote bidirectional interaction between humans and animals, playing a significant role in advancing animal ethics and ecological protection. Furthermore, the development of interaction models based on animal subjects can provide insightful research experiences for the design of human-computer interaction systems, thereby contributing to the more efficient realization of the ambitious goal of human-machine integration.

Key words animal-technology interaction, animal-machine integration, implantable devices, non-implantable devices, wearable devices, intelligent animal augmentation system

DOI: 10.16476/j.pibb.2023.0246