

Research on Control of Cockroach Movement Behavior Based on Artificially Designed Electronic Backpack

Yingyu Song Yongxia Gu* Hairong Cai Jiarong Huo Jiahang Ju

School of Computer and Artificial Intelligence, Beijing Gongshang University, Beijing, 102488, China

Abstract

This study aims to explore the motion behavior control of semi mechanical insects, especially the roboticization of Madagascar cockroaches as carrier insects. By designing an electronic backpack, we have successfully achieved manual intervention and control of cockroach movement behavior. This electronic backpack uses electrical stimulation signals to simulate the natural electrical signals inside insects, and controls cockroaches by adhering to their back and stimulating their whiskers. The study conducted an in-depth analysis of the neuromuscular system of cockroaches, taking into account biomimetic mechanisms, behavioral control systems, kinematics, and motion control issues. The experimental results show that semi mechanical cockroaches equipped with camera modules and motion sensor modules have efficient and flexible control capabilities in complex environments, and are suitable for tasks such as industrial pipeline inspection or post disaster rescue. Although there are some shortcomings, such as compatibility with insects, backpack size, and data processing methods, this study provides a theoretical and experimental basis for the improvement of semi mechanical insect backpacks in the future.

Keywords

semi mechanical insects; wireless control systems; insect movement behavior regulation; manual intervention control

基于人工设计电子背包对蟑螂运动行为的控制研究

宋颖玉 谷勇霞* 蔡海蓉 霍佳蓉 鞠佳航

北京工商大学计算机与人工智能学院, 中国·北京 102488

摘要

研究旨在探索半机械昆虫的运动行为控制,特别是针对马达加斯加蟑螂作为载体昆虫的机器人化。通过设计电子背包,我们成功实现了对蟑螂运动行为的人工干预和控制。该电子背包利用电刺激信号模拟昆虫体内的自然电信号,通过粘附于蟑螂背部的背包刺激其尾须来操控蟑螂。研究深入分析了蟑螂的神经肌肉系统,综合考虑了仿生机理、行为控制系统、运动学和运动控制问题。实验结果表明,搭载摄像头模块、运动传感器模块的半机械蟑螂在复杂环境中具有高效、灵活的控制能力,适用于工业管道探伤或灾后救援等任务。尽管存在一些不足,如与昆虫的兼容性、背包大小和数据处理方式,但本研究为未来半机械昆虫背包的改进提供了理论和实验基础。

关键词

半机械昆虫;无线控制系统;昆虫运动行为调控;人工干预控制

1 引言

半机械昆虫是由活体昆虫平台和微型电子设备融合而成的混合系统^[1]。它体积小、重量轻,运动能力强,能量消耗少。本研究以马达加斯加发声蟑螂为研究对象,其体型较大,能够携带微型电子设备。经过特殊处理的蟑螂,当背负

电子设备时,能适应各种小障碍,展现出强大的适应性。此外,在电子背包的功能拓展方面,本研究集成了多种传感器模块,如摄像头模块、运动传感器模块。使得昆虫控制背包不仅能够实现对蟑螂运动行为的精准调控,还能在执行任务时收集关键的环境数据。

2 半机械昆虫运动调控

2.1 运动调控原理

在半机械昆虫的早期研究中,主要集中于外周神经系统的传感器和肌肉控制,对于高级中枢的调控研究则相对匮乏^[2]。为了稳定可靠地调控半机械昆虫的运动行为,关键在于掌握其运动的神经控制原理,并选取恰当的刺激位点。控制蟑螂运动点位有外部感受器官、输入神经、脑区中枢神经、输出神经、腿部肌肉。本研究采用电刺激感觉器官的运动控制方

【基金项目】北京市大学生科研与创业行动计划项目(项目编号: B025)。

【作者简介】宋颖玉(2004-),女,中国山西大同人,在读本科生,从事智能制造工程研究。

【通讯作者】谷勇霞(1968-),女,中国江苏淮安人,博士,副教授,从事仿生设计研究。

案，其典型的感受器官有触角和尾须。

2.2 运动调控刺激方式

为了通过电刺激控制蟑螂运动，首先要了解蟑螂神经系统的复杂行为，包括对神经节和运动神经元的刺激^[3,4]。本研究采用电刺激系统，因其高效操作性和出色的抗干扰性能。通过直接激活蟑螂的神经系统，实现对其运动行为的精确调控。通过在尾须中植入电极来控制蟑螂，刺激右尾须，蟑螂会“认为”右侧存在物体或威胁，并试图向左移动。实验中所用到的刺激信号是一个方波信号，具有3.3V的峰值电压、50Hz的频率和50%的占空比。

2.3 运动调控电刺激系统

半机械昆虫的刺激系统主要基于昆机接口，通过微电子系统与昆虫的神经系统或肌肉系统融合，实现精准电刺激，遥控昆虫运动。本研究中马达加斯加蟑螂通过电刺激系统控制，采用ESP32-S主控芯片进行运动指令的生成与处理。系统的稳定电源由AMS1117稳压芯片提供，确保3.3V的稳定输出。电源开关芯片管理电源状态，摄像头模块OV2640负责图像捕捉，运动传感器MPU6050跟踪动态，DAC芯片LTC2609则负责数字到模拟信号的转换。这些高度集成的组件共同构成了控制和监测半机械昆虫行为的电路系统。半机械蟑螂实物图见图1。

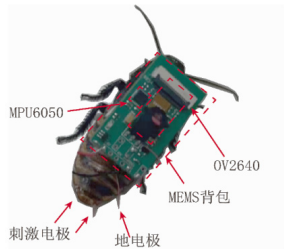


图1 半机械蟑螂实物图

2.4 半机械昆虫运动控制

蟑螂的运动控制通过无线通信实现。按下外部服务器上的开关，刺激电路会产生矩形输出电压，随后通过无线模块传输给蟑螂身上的接收电路。这种控制方式允许研究者在几乎没有延迟的情况下对蟑螂进行精确的运动控制。

实验前，先将马达加斯加发声蟑螂放入含有二氧化碳

的麻醉容器中进行麻醉处理，以便进行刺激电极的植入以及背包的固定。由于蟑螂的背部表面覆盖有一层蜡质层，故需用砂纸打磨其背部，用双面胶带将控制背包固定在蟑螂背部。然后修剪蟑螂的尾须，将电极的两端进行灼烧以去除绝缘涂层，将钨丝电极插入尾须中，深度约为10mm。参考电极被植入到蟑螂第二腹节的中间位置，深度为5mm，并用蜂蜡固定。电极植入后，蟑螂放回饲养箱中，打开盖子以便于空气流通。通过观察蟑螂的运动行为、活动能力和反应时间，判断其是否完全恢复活力^[3]。

将安装背包后的蟑螂放置于实验台中，实验台尺寸为80cm×80cm×100cm，底部设有20cm高的挡板以防蟑螂逃逸。实验台顶部装备了一台与计算机连接的高分辨率摄像机，用于记录并实时显示实验过程，同时保存视频资料以供后续分析。为减少外界干扰，实验台外覆盖透明纱网。实验开始前，蟑螂被精确定位于实验台的坐标原点，身体与x轴保持垂直，确保实验的标准化和测量精度。

3 半机械昆虫背包设计

电子背包电路主要是由主控芯片、稳压芯片、电源开关芯片、摄像头模块、运动传感器模块、DAC输出模块构成（如图2所示）。

3.1 主控芯片

ESP32-S芯片作为主控单元，整合了802.11 b/g/n/e/i无线局域网和蓝牙4.2功能，尺寸小、功耗低。该芯片不仅处理能力强，还具备丰富的数字和模拟I/O功能，便于与各类传感器无缝连接，确保了实验的流畅性。ESP32-S的多引脚配置，包括CSI接口、GPIO、I2C通信引脚以及TXD和RXD串行通信引脚，针对特定功能进行了优化。芯片配备了控制摄像头电源的CAM_PWR、垂直同步信号VSYNC以及用于系统重置的RST引脚。电路设计中包括了用于稳定逻辑电平和过滤噪声的电阻和电容，及自校准电路以自动调整，确保信息传递稳定。ESP32的两个32位LX6 CPU和240MHz主频，配合7级流水线架构，提供了高效数据处理能力，同时其超低功耗射频架构显著延长了电池使用时间。

3.2 稳压芯片

AMS1117-3.0芯片是一款广泛使用的线性稳压器，用于

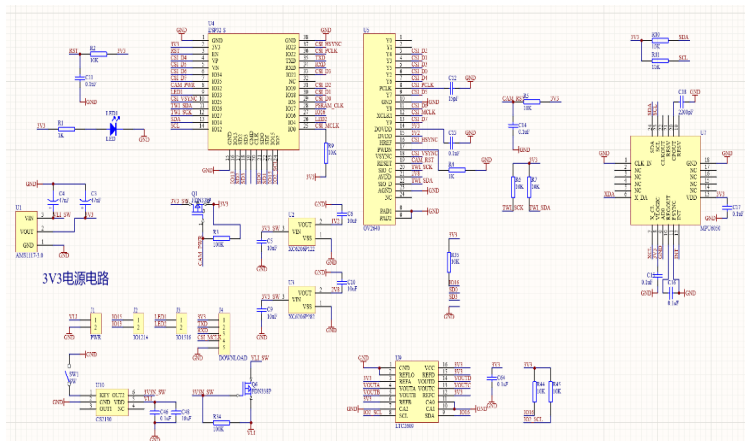


图2 电子背包电路示意图

将输入电压降至3.0V,适用于需要恒定3.0V电源的电子设备。本电路设计中, VIN 代表输入电压, VOUT 提供稳定的3.0V输出,而GND为接地端。电路中还包含两个47μF的电容(C4和C3),它们跨接在输出与地之间,用以滤除噪声并优化输出电压的稳定性,从而减少电路的瞬态响应。

3.3 电源开关芯片

GND 引脚是接地引脚, VDD 是电源输入(通常对应正电源电压), 3V3N_SW 是一个3.3V的开关电源输出,而 VLI 是另一个电压输入。KEY 和 OUT2 可能是这个芯片的输出引脚,它们用于发送信号或数据到其他部分的电路。

3.4 摄像头模块

OV2640 摄像头模块是一款集成了 UXGA (1632x1232) 相机和图像处理器的单芯片解决方案,适用于移动设备和嵌入式系统。该传感器支持全帧到窗口化的多种图像格式,最高可达每秒15帧的 UXGA 分辨率,并通过 SCCB 接口提供用户对图像质量、曝光控制、色彩调整等的完全控制。

该模块通过一系列引脚提供功能,包括 Y0 至 Y7 图像数据输出引脚、PCLK 像素时钟、VSYNC 和 HSYNC 同步信号、XCLK 外部时钟输入、DOUT 数据输出、SIOD 和 SIOC SCCB 通信线、RESET 重置以及 PWDN 电源关闭引脚。供电引脚如 DOVDD、DVDD 和 AVDD 以及 GND 地线确保了稳定的电源供应。电路设计中还包括了去耦电容和确保信号完整性用的电阻,如 C12、C13 电容和 R4 电阻,以提高整体性能和稳定性^[4]。

3.5 运动传感器

MPU6050 芯片集3轴陀螺仪和3轴加速度计于一体,在本实验中,主要用于监测马达加斯加蟑螂的动态。该芯片通过 I²C 接口的 SDA 和 SCL 引脚与系统通信, VDD 和 GND 引脚分别提供电源和接地。MPU6050 还具备 INT 中断输出功能,用于实时通知主控制器重要事件的发生。XDA 和 XCL 引脚作为辅助 PC 接口,支持额外传感器的连接。AD0/SDO 引脚允许改变 I²C 地址,使得多个 MPU6050 设备可在同一总线上运作。C15、C16 和 C17 电容则负责电源滤波和稳定,确保芯片运行的可靠性。

3.6 DAC 输出

LTC2609 是一款多通道数模转换器(DAC)集成电路,具备 VOUTA、VOUTB、VOUTC、VOUTD 四个模拟输出通道,能够将数字信号转换成模拟信号。该芯片通过 I²C 接口的 SCL 时钟线和 SDA 数据线与微控制器通信,实现数字信号的发送及输出电压的设定。LTC2609 需要外部电源供电(如3.3V),并使用 GND 作为接地。REFLO 和 REF1 引脚用于参考电压的输入或输出,以设定输出电压的基准。此外,0.1 μF 的电容 C64 有助于电源稳定和噪声滤除。

4 实验结果及讨论

4.1 蟑螂运动控制

使用电刺激了蟑螂的右尾须,使其行为向左拐,利用 Tracker 等软件描绘了其运动的轨迹(见图3)。实验蟑螂独特的生理结构和运动行为,提供了一个研究昆虫运动机制

和神经控制的理想模型。通过模仿蟑螂的运动和感知能力,本研究设计出更加高效和灵活的半机械昆虫。

4.2 未来研究

为提升半机械昆虫的实用性,本研究着重增强其与电子设备的兼容性,确保设备稳定运作并减少对昆虫生理的干扰。面对传统背包设计中重量与体积的挑战,设计了一款微型化电刺激背包系统,显著降低了对昆虫运动的阻碍。该系统通过无线电刺激有效控制了蟑螂,验证了其在半机械昆虫载体中的潜力。此外,集成的先进传感器和通讯设备提升了任务执行的准确性和实时性。今后通过生物工程技术,有望使蟑螂适应性更强。目前系统摄像头存在分辨率限制,今后可以提升。可以预见半机械昆虫将在更多领域展现应用价值。

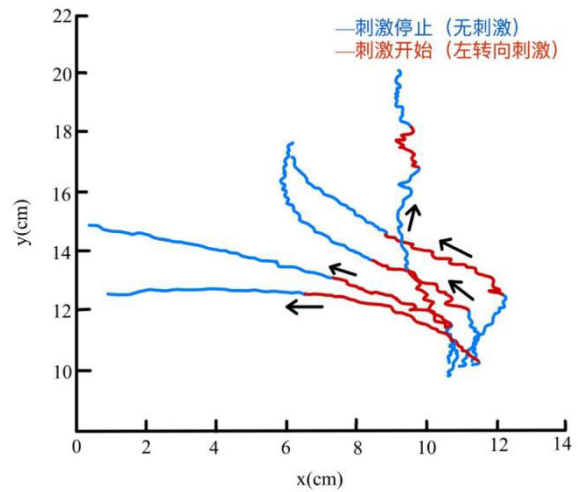


图3 蟑螂的运动轨迹示意图

5 结语

研究成果不仅为半机械昆虫的可控性提供了新的理论基础和技术途径,也为未来在复杂环境下的昆虫机器人应用奠定了坚实的基础。经过理论分析和实验验证,揭示并优化昆虫运动行为的神经调控机制。通过电刺激手段控制蟑螂的行为,深入研究昆虫的神经系统和行为反应,为理解外界刺激和行为之间的关系提供新的视角。

参考文献

- [1] Nguyen H D, Tan P. Ultra-Lightweight Cyborg Insect: Sideways Walking of Remote-Controlled Living Beetle with a Miniature Backpack[J]. IEEE,2019:11-16.
- [2] 高勇,陈伟海,陆震,等. 蟑螂机器人仿生机理及运动控制[J].机械工程学报,2010,46(13):91-99.
- [3] T Kitamura, Y Hasegawa, T Tsuji, S Sakaino. "Control Using High-carrier Frequency PWM in Functional Electrical Stimulation", IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Lisbon, Portugal, 2019, pp. 5358-5363, doi: 10.1109/IECON.2019.8926818
- [4] 赵慧霞.蜜蜂(Apis mellifera L.)脑机接口的飞行控制神经机理研究[D].杭州:浙江大学,2014.