

Design and Innovation of High-performance Semi-mechanical Insects Based on Lightweight Wireless Control Backpack

Yingyu Song Yongxia Gu* Hairong Cai Jiarong Huo Jiahang Ju

School of Computer and Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing, 102488, China

Abstract

The current design of insect motion control backpacks faces two major challenges: one is the difficulty in closely fitting the backpack to the insect's body surface, and the other is the potential interference of the backpack's weight with the insect's activities. The development of a system that can closely adhere to the insect's surface and wirelessly control insect movement has become particularly urgent. This study has developed a new type of wireless motion control system using Flexible Printed Circuit Board (FPCB) technology. The system is compact, lightweight, and its flexible design does not affect the insect's mobility, offering high precision in motion control. However, there are still certain limitations in aspects such as energy supply. Future efforts will be dedicated to the development of self-sustaining insect motion control systems, opening up new directions for the development of cyborg insect robot technology. This will not only enhance its flexibility and autonomy but also promote its wide application in search and rescue, environmental monitoring, and agriculture, bringing more benefits to human society.

Keywords

circuit design; semi-mechanical cockroach robot; wireless control backpack; obstacle-crossing experiment

基于轻量化无线控制背包的高效能半机械昆虫的设计与创新

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

目前昆虫运动控制背包的设计面临两大挑战: 一是背包难以紧密贴合昆虫的身体表面; 二是背包重量可能对昆虫的活动造成干扰。开发一款既能够紧密贴合昆虫表面、又能无线控制昆虫运动的系统变得尤为迫切。本研究利用柔性印刷电路板(FPCB)技术, 开发了新型的无线运动控制系统。该系统体积小, 重量轻, 柔性化设计不影响昆虫运动能力, 具有较高的运动控制精度。但在能量供应等方面, 尚存在一定的局限性。今后将致力于研发自维持昆虫运动控制系统, 为半机械昆虫机器人技术的发展开辟新的方向。不仅能够提高其灵活性和自主性, 还能推动其在搜索救援、环境监测和农业领域的广泛应用, 为人类社会带来更多益处。

关键词

电路设计; 半机械昆虫机器人; 无线控制背包; 越障实验

1 引言

半机械昆虫机器人是一种创新的混合系统, 它将活体昆虫的生物特性与微型电子设备的功能相结合。这种混合机器人具有优越的运动能力, 特别适用于复杂动态地形中的运动。当前研究已经展示了通过单片机微控制系统和电刺激技术, 能够引导蟑螂进行直线行走, 尽管目前仅限于较短距离。

【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。

此外, 电刺激肌肉系统已被证实是一种有效的控制方法, 能够调节昆虫的运动模式。据报道, 刺激一只巨型甲虫的腿和飞行肌肉可以调节其陆地和飞行运动。随着昆虫运动控制技术的发展, 半机械昆虫系统在陆生物种中实现了更高级的导航。传统背包设计中存在的一个问题是, 相对于昆虫的载荷能力, 背包的质量过大, 在蟑螂的自然运动时, 蟑螂的腹部会改变形状, 外骨骼的部分会重叠^[1]。这不仅使背包微型化设计难度加大, 还影响了昆虫的运动能力和控制精度。本研究旨在对半机械昆虫机器人携带的电子背包进行轻量化设计, 以最大程度减少对昆虫自然运动的干扰, 使背包与昆虫结合更为紧密。

2 半机械昆虫机器人运动调控

2.1 半机械昆虫的生理结构

马达加斯加发声蟑螂具有独特的生理结构, 包括头部、

胸部和腹部。胸部由三节组成，腹部则由八节组成^[2]。蟑螂的腹部末端有一对尾须作为感知感觉器官。此外，蟑螂的胸部有两对翅膀和三对腿，使其具有出色的运动能力。蟑螂的眼睛可以捕捉到微弱的光线和快速的运动，使得它们在黑暗中也能看清周围的情况，保持警惕。例如，它们可以在一秒钟内跑过 50 倍身长的距离，而且平衡能力极强，可以在崎岖不平的地面上迅速移动^[3]。蟑螂体积小、重量轻，拥有爬行、转向、跨越障碍等多种运动模式。同时，蟑螂适应性强，经过特殊处理后能够适应背负电子设备，并能在复杂环境中工作。

2.2 昆虫运动调控的刺激方式

研究发现，通过精确刺激昆虫的特定生理部位，可以有效地调控其运动行为。马达加斯加发声蟑螂的尾须被确定为主要刺激位点。实验采用了电刺激作为主要的调控手段。实验中所用的刺激信号是一个方波信号，参数设置为 3.3V 的峰值电压、50Hz 的频率和 50% 的占空比，每个脉冲持续时间为 1s，这样的信号能够有效地激活蟑螂的神经系统，从而控制其运动行为。此外，本研究实现了通过无线通信控制蟑螂运动的创新方法，外部服务器上的开关被打开时，刺激电路会产生矩形输出电压，并通过无线模块传输给蟑螂体内的接收电路。无线运动控制模块采用蓝牙无线通信技术，由外部服务器远程传输信号进行精确控制。

3 越障实验研究

3.1 实验设计

设计实验观察蟑螂在不同障碍上的行为，记录形态、弯曲角度和腹节弯曲情况。基于数据设计可模拟蟑螂运动的负载平台，需适应不同障碍并承受负载。选择轻质柔性材料减少影响，设计贴合蟑螂背部且可自由移动的结构，易安装和拆卸。控制机制采用电刺激引导蟑螂移动。

3.2 实验过程

研究采用了系统化的方法，在挑选固定监测位置的过程中，对蟑螂在爬行和越障过程中的躯体形态变化进行了细致研究。目标在于识别出在这些活动中形态变化最小的区域，以便将其作为固定监测点，这对于后续实验分析和潜在的仿生学应用至关重要。

为实现目标，首先构建了精确的实验框架。这包括创建一个模仿自然环境的实验室，以确保蟑螂能够展现其本能行为。接着，挑选健康且活跃的蟑螂，以保证数据的广泛性和准确性。在障碍物设计上，设置了多种形状和尺寸，以全面评估蟑螂的运动能力，并模拟它们在自然环境中可能遇到的障碍。

采用了高速摄像机和先进图像分析软件，详尽记录了蟑螂在障碍物上爬行和越障时的体态变化，尤其是腹部各节的弯曲角度。观察结果表明，蟑螂腹部的弯曲会根据障碍物的形状进行相应调整。传统硬质电路板可能限制这种弯曲，本研究设计的柔性印刷电路板（FPCB）有效解决了这一问

题^[4]。为了验证发现，还进行了一系列的重复实验，并在选定的固定监测位置进行了明确标记，以便于进行更深入的观察和系统性分析。

通过这种方法，期望能够精确地确定蟑螂在运动过程中最为稳定的部分，这将有助于更好地理解其运动机制，并为未来的研究和应用打下坚实的基础。

蟑螂的越障实验见图 1。

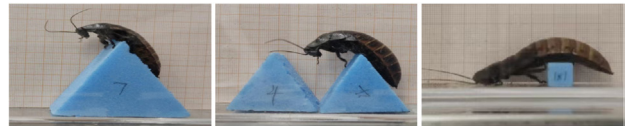


图 1 蟑螂的越障实验

4 半机械昆虫电子背包设计

电子背包电路主要是由主控芯片 STM32F05，高精度 DAC 输出模块 LTC2609，蓝牙通信模块 DA14580，低压差线性稳压器芯片 TPS79333。

4.1 主控芯片

STM32F05 微控制器，搭载 32 位 ARM Cortex-M0 核心，被用作本研究的主控单元。STM32F051，作为 STM32 系列微控制器的一员，集成了多种功能，适用于广泛的应用场景。该芯片采用 ARM Cortex-M0 处理器核心，旨在实现高性能与低功耗的优化平衡。STM32F051 芯片内部集成了闪存和静态随机存储器。其闪存用于存储程序代码和数据，SRAM 用于存储临时数据和变量。STM32F051 芯片还具有丰富的外设接口，包括通用输入/输出（GPIO）端口、串行通信接口、定时器、模拟数字转换器（ADC）以及脉冲宽度调制（PWM）输出等。这些接口使得 STM32F051 可以与各种外部设备和传感器进行通信和控制。STM32F051 芯片支持包括待机、休眠和停机在内的多种低功耗模式。在需要长时间运行和电池供电的实验设置中，这些低功耗模式显著降低了系统的整体能耗。

主控芯片和蓝牙通信电路示意图见图 2。

4.2 蓝牙通信模块

DA14580 系统级芯片，专为低功耗蓝牙应用而设计，提供了一种高度集成的技术解决方案。该芯片融合了先进的低功耗技术，确保在蓝牙通信过程中实现能效的最大化，适合于长时间运行且对功耗有严格要求的应用场景，这对于保障实验的连续性和稳定性至关重要。集成了许多功能模块，包括蓝牙无线通信、射频（RF）收发器、微控制器、闪存（Flash）存储器、电源管理以及安全特性。使得 DA14580 在保持小巧体积和低成本的同时，提供了强大的功能性和灵活性。此外，DA14580 支持蓝牙 4.2 标准，确保了通信的稳定性和可靠性，能够以中心设备或外围设备进行通信，并支持多种蓝牙配置模式，为低功耗蓝牙应用提供了广泛的灵活性和适应性。

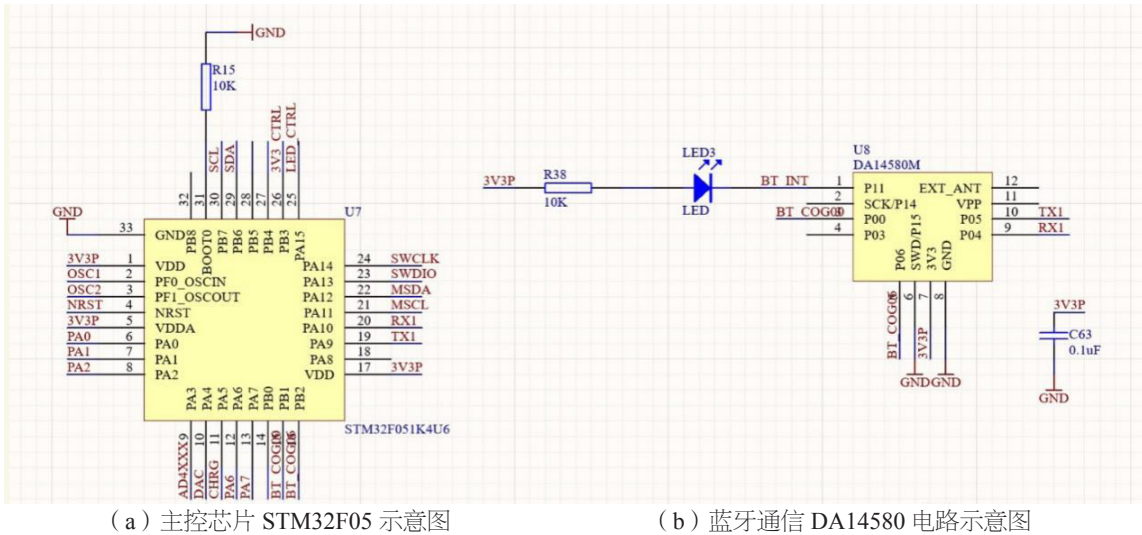


图2 主控芯片和蓝牙通信电路示意图

这种整合了多项先进技术的芯片，不仅优化了功耗表现，还通过其多功能集成，满足了现代无线通信设备对于小型化、成本效益和高效能的需求，特别适用于本实验中的长时间运行和电池供电条件，展现了其在低功耗蓝牙应用领域的卓越性能和广泛应用潜力。

4.3 柔性电路的优势

研究中采用了柔性电路技术，该技术采用柔性基材代替传统刚性材料制造电路板，带来了一系列显著优势。柔性电路板以其出色的弯曲和折叠能力，能够适应多样的曲面和复杂形状，特别适合于追求紧凑、轻薄和高度集成的设计，如本实验中的电子背包设计，能够紧密贴合蟑螂背部，确保实验顺利进行。由于采用了轻质柔性材料，与传统刚性板相比，柔性电路板在重量和体积上更具优势，极大地减小了对实验对象的影响。柔性电路板还具备优秀的抗震动和抗振动特性，由于缺少焊点和连接线，使其在恶劣环境下的可靠性和稳定性得到了显著提升。此外，其布线设计灵活，可根据具体需求调整形状，从而在本实验中实现了高密度电路布局，满足了实验的特定要求。

5 创新点

运用高精度摄像技术捕捉了蟑螂在越过不同障碍物时的躯体形态变化以及其腹节弯曲情况，确保了所得数据的精确性和完整性。通过先进的图像处理与分析技术，对蟑螂运动中各腹节的弯曲角度进行了精确测量，为设计负载平台提供了重要参数。基于测量所得的数据，设计了一款能够贴合蟑螂背部曲线的负载平台，该平台能够适应其在运动过程中的多样化体态变化。

越障实验完成后，对收集的实验数据进行了深入分析与综合处理，开发出一款与马达加斯加蟑螂身体紧密贴合的柔性电路板，该设计在不干扰蟑螂自然运动的前提下，成功构建了一种新型无线运动控制系统。该系统在电路设计上追求精简，同时保留了高精度数字模拟转换器（DAC）的输出功能，确保了运动控制的精确度。

6 结语

论文深入探讨了半机械昆虫运动控制系统的设计与创新，专注于为马达加斯加发声蟑螂开发一种高效能的无线控制背包。利用柔性印刷电路板技术，成功解决了贴合性和重量问题，开发出一款与昆虫身体紧密贴合且重量轻的控制背包。越障实验结果证实，该系统能够高效地控制蟑螂在复杂地形中运动，将对昆虫自然行为的干扰降至最低，为实现精确控制提供了坚实的基础。未来计划将昆虫运动产生的微小振动能量与压电材料相结合，开发出自供电装置，以实现自供电的昆虫运动控制系统，并进一步拓展昆虫机器人技术的应用范围，期待这些研究成果为社会带来益处并实现技术领域的突破。

参考文献

- [1] 张佳欣. 可充电遥控半机械“小强”现身[N]. 科技日报, 2022-09-06(004).
- [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] 王福山, 徐柏林. 蟑螂的生物信息防制[J]. 口岸卫生控制, 2002(1): 19-21.
- [4] 齐亮. 基于石墨烯薄膜的触觉传感器及其电子皮肤研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.