具身智能乒乓球回收机器人的设计研究

李梦帆 季弘宇 崔立庚 王艺洁 陈子杨

（湖州学院，浙江 湖州 313000）

摘 要：针对乒乓球多球训练场景下散落球体人工捡拾劳动强度大、占用训练时长、打断训练节奏的现实痛点，本文设计一款具身智能乒乓球回收机器人。该机器人采用毛刷滚轮、导球槽、提升储球一体化捡拾执行机构，融合激光雷达与深度相机多传感器SLAM环境建图、YOLO轻量化视觉目标检测技术，依托ROS机器人操作系统实现场地自主定位、乒乓球目标识别、全局路径规划与动态避障，完成散落乒乓球识别、捡拾、输送存储、高位释球全流程自主作业。样机面向校园场馆、俱乐部等真实训练环境开展测试，可有效降低人工拾球工作量，提升乒乓球训练整体效率，为智慧体育训练装备提供一套低成本、场景适配的智能化解决方案。

关键词：具身智能；乒乓球回收机器人；ROS；视觉检测；自主导航；智慧体育

基金项目：2026年大学生创新创业训练计划项目省级项目（2026cxcy109）

DOI：https://doi.org/10.68249/jstnei.2026.0020

1、引言

本项目以乒乓球训练场景中的多球回收需求为切入点，融合“毛刷滚轮-导球槽-提升储球”一体化机械设计，结合视觉识别、激光雷达与自主导航技术，构建一个具备环境感知、路径规划与协同控制能力的具身智能乒乓球回收机器人系统。该项目旨在通过机器人的自主作业，实现训练场馆内散落乒乓球的自动识别、高效捡拾、集中储存与便捷取用，从而提升训练效率，减轻人工劳动强度。

2、研究目的

在体育强国建设全面推进、全民健身战略深度实施、校园体育与竞技体育协同发展的时代背景下[1]，乒乓球作为我国国球，已成为校园教学、专业训练、大众健身的核心运动项目，各类训练场馆、培训机构、校园球场的数量与频率持续攀升。响应国家“科技助力体育”“教育数字化”“智慧场馆建设”的政策导向，推动体育训练装备向智能化、自动化、轻量化升级，已成为乒乓球训练领域高质量发展的必然要求[3]。多球训练作为乒乓球技术提升的核心模式，单次训练会产生大量散落乒乓球，人工捡拾不仅劳动强度大、占用训练时间，还会打断训练节奏、破坏运动员状态连贯性，拾球耗时占单节训练时长的20%以上，严重制约训练效率与教学质量[2]。

随着具身智能、多模态感知、嵌入式视觉[4]、自主导航等技术快速发展，我国在小型智能服务机器人领域已形成技术领先优势，为球类捡拾机器人的智能化升级提供了坚实技术支撑。相较于网球、高尔夫球等大型球类，乒乓球体积小、易滚动、分布零散，对机器人的感知精度、控制柔性、机构小型化提出更高要求[5]，现有智能拾球技术难以直接迁移适配。而目前面向乒乓球训练场景的全自主、高适配、低成本智能捡拾装备仍处于市场空白阶段，研发相应的乒乓球捡拾机器人，能满足智慧体育训练的实际需求，具有极强的现实必要性与紧迫性[6]。

针对上述问题，本项目拟面向室内乒乓球训练环境，设计一款具备感知、决策与执行协同能力的具身智能乒乓球回收机器人。项目以“毛刷滚轮+导球槽+提升储球”作为核心执行机构，以视觉识别与环境感知作为信息获取手段，以自主导航、路径规划和协同控制作为软件支撑，探索形成一套适配训练场景的智能回收方案，并开发出样机。

作者简介：李梦帆(2005—)，女，本科，研究方向为机器人学；
季弘宇(2006—)，男，本科，研究方向为机器人学；
崔立庚(2006—)，男，本科，研究方向为机器人学；
王艺洁(2006—)，女，本科，研究方向为机器人学；
陈子杨 ，男，硕士，助教，研究方向为乒乓球教学与训练；

通讯作者：李梦帆，邮箱：lmf_00002023@qq.com



(a)徒手捡球



(b)捡球工具



(c)使用捡球工具捡球

图 1 常见捡球方式和捡球工具

3、研究内容

本项目旨在针对乒乓球训练中捡球环节效率低下、体力消耗大等核心痛点，设计并实现一款集环境感知、自主导航、高效捡拾与人性化释球于一体的具身智能乒乓球回收机器人。

基于毛刷滚轮与导球槽的高效捡拾机构设计与运动参数优化问题研究。针对传统机械夹爪式捡拾方案效率低、易损球体、控制复杂等问题，研究软质尼龙毛刷滚轮的直径、密度、转速与乒乓球相互作用力的建模，明确毛刷旋转摩擦力与乒乓球弹跳、滚动轨迹的关系，确定最优毛刷参数组合（如滚轮直径 8-10cm、毛刷密度适中）。研究侧边弧形导球槽的几何结构，分析入口宽度、弧度半径、内壁材料对滚动阻力与导向精度的影响，确保球体顺畅导入后方储球或抬升机构。通过优化毛刷电机转速与机器人移动速度的匹配，实现连续稳定的“边行边捡”，最大化单次覆盖路径的捡拾效率。

机器人整体机械结构与多模块集成设计问题研究。在完成核心捡拾模块设计的基础上，研究其与移动底盘、环境感知系统、主控系统的一体化集成。研究模块化、轻量化的整体机械框架设计，合理布局毛刷滚轮、导球槽、储球仓、传感器（深度相机、激光雷达）、嵌入式主控（如 Jetson Nano/树莓派）及电池等组件，确保重心稳定、空间利用高效。研究移动底盘（麦克纳姆轮或普通差速轮）与捡拾机构的安装位置关系，优化结构使毛刷滚轮紧密贴合地面，同时不影响通过性与灵活性。研究整机电路系统，包括电源管理、电机驱动、传感器接口等，确保各设备稳定可靠运行。

基于多模态感知的自主导航与环境感知软件系统设计问题研究。为实现机器人在真实乒乓球训练场景下的自主作业，研究构建环境感知与决策规划软件系统。研究基于深度相机与激光雷达融合的 SLAM 算法，构建环境地图并实现实时定位，设计地图数据的存储与更新机制。研究基于 YOLO 目标检测的乒乓球识别方法，获取球体位置信息，研究检测模型在嵌入式平台上的轻量化部署与推理加速，并结合地图设计全局最优捡拾路径规划算法。研究捡拾过程中的动态避障策略，设计局部路径规划与速度控制算法，确保安全绕开球台、座椅及移动中的人员。

机器人上层决策控制与具身智能协同释球系统设计问题研究。研究机器人上层决策控制软件架构，将全局路径规划、局部避障、捡拾启停、储球状态监测等行为协调统一，实现从“寻找目标球”到“完成捡拾”的全流程自主控制。研究基于储球仓容量检测的智能释球逻辑，设计高位释球的人机交互接口，便于使用者站立取球，并开发移动端或语音控制的人机交互软件。研究捡拾与移动行为的协同控制策略，将环境感知信息与执行机构状态进行闭环反馈，优化动态环境下的作业效率与稳定性，构建完整的具身智能乒乓球回收机器人软件系统。

4、国内外研究现状和发展动态

国外在乒乓球机器人领域呈现出“高端竞技”与“基础功能”并存的格局，其技术探索多集中于提升机器人的交互与对抗能力，难以解决回收乒乓球问题。在学术前沿，麻省理工学院（MIT）开发了专注于高速击球与精准控制的仿生机器人系统，其击球成功率可达 88%，旨在探索动态操控的极限并达到人类竞技水平[7]；索尼人工智能部门则推出了名为 Ace 的机器人，它能够与人类精英选手进行高强度对战，并展现出处理旋转球等复杂技战术的能力[8]。这些研究虽部分提及了“自动捡球”作为系统持续运行的前提，但其核心在于推动通用人工智能与机器人学的发展，设备复杂且成本高昂。在商业化产品方面，市场主要由集成发球与回收功能的一体化系统主导，例如 Newgy 公司的 Robo-Pong 系列和 PONGBOT 等品牌产品，它们通过在球台周围架设大型回收网来实现球的循环使用。这类方案实现了较高程度的自动化，但存在部署繁琐、占用空间大、设备昂贵且移动性差等缺陷，难以灵活适配校园、俱乐部等多变且高频次的日常训练场景。

国内的相关研发更贴近实际应用需求，产品形态多样，但普遍存在智能化深度不足、自主作业能力弱的问题，尚未形成高效、人性化的完整解决方案。在消费市场，主流产品仍以完全依赖人力的手动工具为主，例如双鱼、银河等品牌推出的滚轮式或网兜式捡球器，其功能单一，无法解放使用者的劳动力。部分厂商尝试向半自动化升级，如“庞伯特”系列智能发球机在行业内具有一定影响力，但其配套的回收方案往往局限于定点收集或简单跟随。在学术研究层面，国内高校开展了一些有益的探索，例如西安交通大学团队设计了一款基于 OpenMV 视觉识别和机械臂抓取的智能捡球机器人，验证了自动抓取的技术可行性[9]；亦有研究专注于采用旋转刷条等机构进行拾取的结构设计[10]。然而，这些研究大多处于实验室原型阶段，侧重于单一技术点的验证，普遍缺乏在真实、动态、复杂的训练环境中进行“感知-规划-执行-储释”全流程闭环的系统性集成与工程化落地，导致其捡拾效率、环境适应性及人机交互体验难以满足高强度训练的实际要求。

因此，无论是国外侧重于高端对抗的复杂系统，还是国内仍处于半自动化或实验室阶段的产品与研究，均未能有效解决乒乓球多球训练中“散落范围广、回收耗时长、取用不便”的问题。

5、系统架构设计

本项目将围绕“毛刷滚轮+导球槽”高效捡拾与竖向提升机构这一核心方案，按照四个研究内容有序推进。整体技术路线为：首先完成机械结构设计与优化，然后搭建硬件平台与底层驱动，接着开发感知与决策算法，最后进行系统集成与场景测试，具体如下：

5.1 基于毛刷滚轮与导球槽的高效捡拾机构设计与运动参数优化

为确定最优的毛刷与导球槽参数，实现高效、稳定的捡拾性能，本部分采用“理论建模—参数设计—实验验证”的技术路线，旨在建立毛刷滚轮与乒乓球相互作用的动力学模型，分析滚轮直径（8-10cm）、毛刷密度（毛束间距 5-8mm）、转速与乒乓球运动轨迹的关系。使用 SolidWorks 完成毛刷滚轮与弧形导球槽（入口宽度 12-15cm，内壁为光滑塑料板）的三维建模，并基于模型确定最优参数范围，具体如图 2 所示。另一方面，拟搭建固定式测试平台，通过改变电机 PWM 占空比调节滚轮转速，利用高速摄像机记录乒乓球被扫入导球槽的运动轨迹，分析捡拾成功率。随后将机构安装于机器人底盘，测试在不同行进速度下对散落球、堆积球的捡拾效果，并在多球堆积、不平地面等复杂场景下优化卡球率、漏球率等指标，最终确定最优的转速-速度匹配参数。

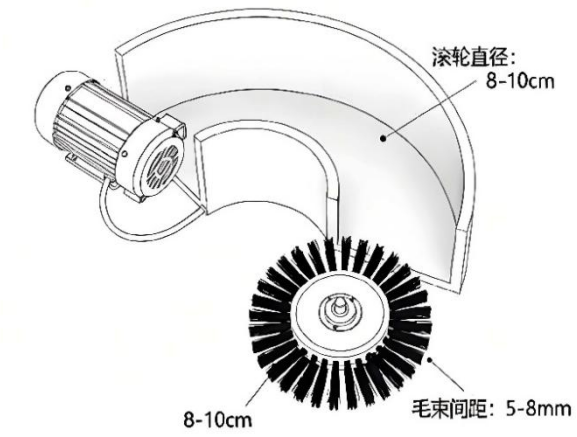


图 2 毛刷滚轮与导球槽结构示意图

5.2 机器人整体机械结构与多模块集成设计研究

为将各功能模块通过标准接口集成为一个结构紧凑、重心稳定、电气可靠的完整机器人平台，本部分采用模块化设计思想，使用全向轮小车 ROS 底盘激光雷达（如图 3（a））， 保证狭窄空间内的全向移动能力。将捡拾模块安装于底盘前端，预留 2-5mm 离地间隙调节空间；将提升机构与储球仓安装于底盘后部上方，通过配重优化防止前倾。将深度相机安装于机器人前方顶部，激光雷达安装于底盘中部，嵌入式主控（如图 3（b））与电池内置于底盘，实现空间高效利用。设计整机电路系统，包括电源分配板（将锂电池电压分配给各电机驱动和主控）、电机驱动模块（驱动底盘、毛刷滚轮、提升机构电机）、传感器接口电路。绘制电路原理图并制作 PCB 板，完成所有电气模块的物理连接、供电分配与信号调试，确保系统稳定可靠运行。



(a) 全向轮小车 ROS 底盘　　(b) X86 架构迷你主机 N150

图 3 系统主要部件

5.3 基于多模态感知的自主导航与环境感知软件系统设计研究

本部分旨在构建适用于真实乒乓球训练场景的自主作业软件系统，实现环境感知、目标识别与智能决策。为实现未知环境中的自主定位与地图构建,研究多传感器融合的 SLAM 算法。采用深度相机(如 Intel RealSense D435）与激光雷达融合方案，利用 RGB 相机提供视觉特征与深度信息，结合激光雷达的高精度测距能力，弥补单一传感器局限性。基于 ROS 系统，选用 Gmapping 或 Cartographer 算法构建场地栅格地图（如图 4），实时估计位姿并更新地图数据。设计地图存储与更新机制，支持多场地切换时的地图加载与复用，快速适应不同场馆环境。

研究基于深度学习的视觉检测算法及其嵌入式部署,以实现散落乒乓球的精准识别与空间定位。基于 YOLOv12 轻量化模型，采集并标注不同光照、角度、背景条件下的乒乓球图像，通过数据增强提升泛化能力，实现实时准确识别。针对嵌入式主控资源限制，采用 TensorFlow Lite 进行推理加速。结合深度相机获取的目标像素坐标与深度信息，解算乒乓球在机器人坐标系下的三维位置，并通过坐标变换映射至全局地图，为路径规划提供精确目标。为实现捡拾任务高效执行与安全运行，研究全局路径规划与局部避障的协同控制策略。基于场地地图与乒乓球位置信息，采用算法计算遍历所有球位点的最短路径，按距离优先原则依次前往目标点，减少无效移动。针对动态障碍物（球台、座椅、移动人员），采用动态窗口法（DWA）进行实时避障，在速度空间采样并结合安全性、方向性等指标选择最优轨迹。最后通过循环测试，记录捡拾成功率、单次任务时间、自主导航成功率等指标并迭代优化，确保软件系统在真实场景下的稳定性与可靠性。

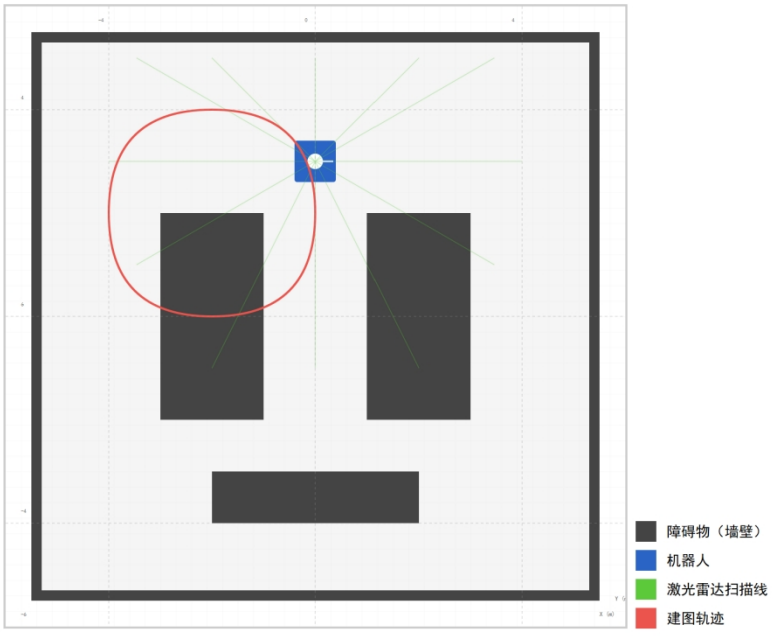


图 4　ROS 系统构建场地栅格地图例图

5.4 基于多模态感知的自主导航与协同控制策略研究

为基于 ROS 系统进行软件开发，实现从环境感知、路径规划到执行机构协同的全流程自主控制。拟搭建 ROS 环境，配置相机与雷达驱动。利用 Gmapping 算法融合激光雷达数据构建场地栅格地图，通过算法进行全局路径规划。基于 YOLOv12 轻量化模型，采集并标注乒乓球图像进行训练，实现实时目标检测，并结合深度相机信息解算乒乓球三维坐标，实现目标定位。使用 DWA 算法进行局部路径规划，实现动态避障。编写顶层决策节点，设计协同控制流程，启动后扫描场地获取所有乒乓球位置，按距离优先依次前往目标点；到达目标点后触发捡拾动作（启动毛刷滚轮），并由底盘微调确保覆盖；捡拾完成后，球经导球槽触发提升机构自动输送至储球仓；重复直至所有球捡拾完毕或储球仓满。进行一定次数的完整捡拾循环测试，记录捡拾成功率、单次任务时间、自主导航成功率等关键指标，进行迭代优化。

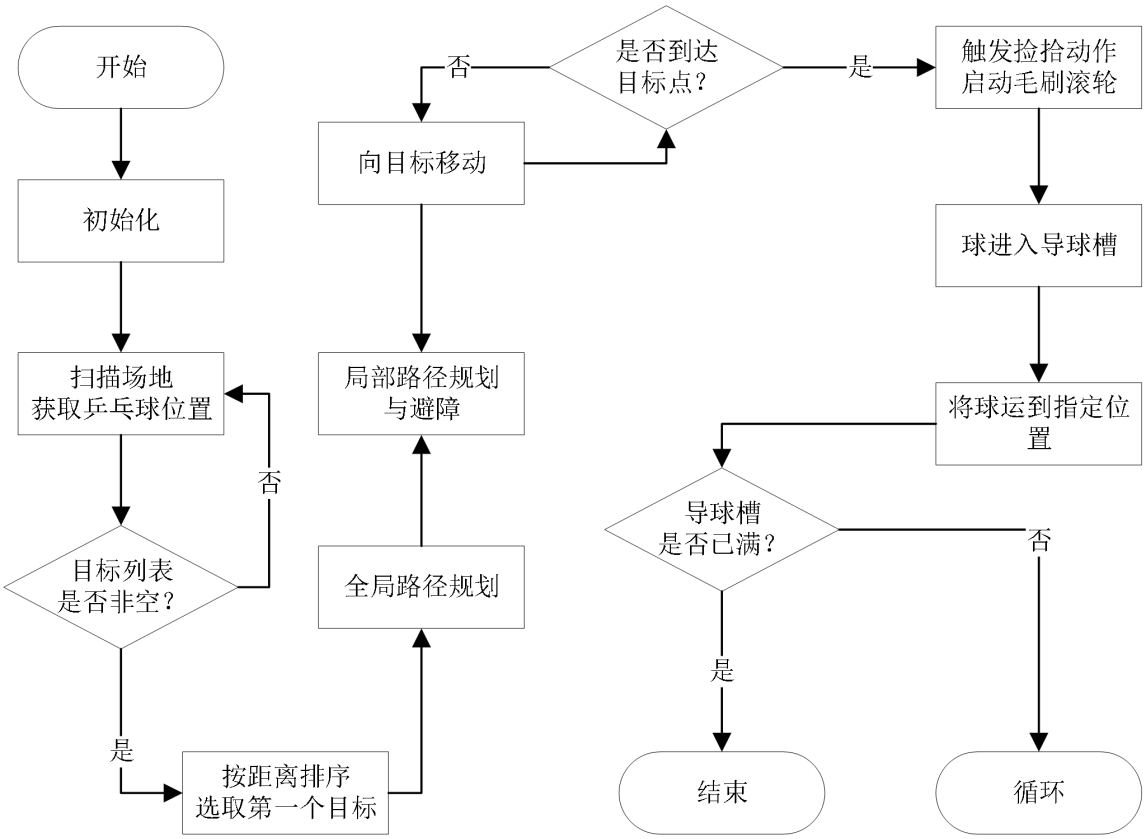


图 5 协同控制流程图

参考文献

[1] The Integration of Intelligent Devices as a Catalyst for Quality Physical Education: Perspectives and Practices in Active Schools in China: A Narrative Review.QBGKY Cheng,KCiaming.DOI:10.0410/cata/df4e9c819ed16e6abd02ac32182cf2a7.2024.01.01.

[2] INTEGRATION OF SMART TECHNOLOGIES INTO THE INFRASTRUCTURE OF MODERN SPORTS STADIUMS.Stanković Milan Misić Viktorija Siotropou Ioanna.2024.12.31.DOI :10.58984/smbic240201325s.SPORTICOPEDIA - SMB

[3] Pickup Strategy based on Table Tennis Pickup Robot.Hongxue Huang 2024.07.16DOI 10.54097/r6vyp537 from: https://doi.org/10.54097/r6vyp537

[4]Applied Sciences, Vol. 13, Pages 3461: Lightweight Tennis Ball Detection Algorithm Based on Robomaster EP.Yuan Zhao,Ling Lu,Wu Yang,Qizheng Li,Xiujie Zhang.from: https://doi.org/10.3390/app13063461

[5] Design and test of a ball picker robot.Péter Szaszkó Pálma Kapitány.2025.11.01.DOI:10.1088/1742-6596/3142/1/012014

[6] Research on the Development of Embodied Intelligence Technology.Menglin Liu,Yuhao,Ding,Xinqiang,MaWang.Li.2025.06.20.DOI:10.1109/PRMVAI65741.2025.11108525 from:https://doi.org/10.1109/PRMVAI65741.2025.11108525

[7] arXiv：2505.01617 [cs.RO] https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.01617

[8] Dürr, P., El Gheche, M., Maeda, G. J., et al. Outplaying elite table tennis players with an autonomous robot. *Nature*652, 886–891 (2026).

[9] 沈京烨，吴桐蹊，曹展越，等.智能捡球机器人设计[J].物联网技术,2024,14(5):71-74,77.DOI:10.16667/j.issn.2095-1302.2024.05.019.

[10] Fan, S., Chen, Z., An, C., & Meng, C. (2024). Structure design of table tennis intelligent picking robot. In *Proceedings of SPIE*(Vol. 13082, Article 130821V). SPIE. https://doi.org/10.1117/12.3026612

Design and Research on a Embodied Intelligent Table Tennis Recycling Robot

Li Mengfan, Ji Hongyu, Cui Ligeng, Wang Yijie Chen Ziyang

Huzhou College, Huzhou Zhejiang*, China*

Abstract：Aiming at the practical pain points in multi-ball table tennis training, such as high labor intensity for manually picking up scattered balls, occupation of training time and interruption of training rhythm, this paper designs an embodied intelligent table tennis ball recycling robot. The robot adopts an integrated picking execution mechanism consisting of brush rollers, ball guide chutes and lifting storage structures. It integrates multi-sensor SLAM environment mapping with LiDAR and depth camera, as well as lightweight YOLO visual object detection technology. Relying on the ROS robot operating system, it realizes site autonomous positioning, table tennis ball target recognition, global path planning and dynamic obstacle avoidance, and completes the full-process autonomous operation including scattered table tennis ball identification, picking, conveying, storage and high-position ball release. The prototype has been tested in real training environments such as campus venues and clubs. It can effectively reduce the workload of manual ball collection and improve the overall efficiency of table tennis training, providing a low-cost and scene-adaptive intelligent solution for smart sports training equipment.

Keywords: embodied intelligence; table tennis ball recycling robot; ROS; visual detection; autonomous navigation; smart sports