

基于无人机与深度学习的跑步姿态矫正系统

张祖源 陈柯宇 张鑫 王娟

成都信息工程大学 网络空间安全学院 (芯谷产业学院) 成都 610225

摘要: 随着现代生活节奏加快和健康意识提升,跑步因其简单易行、不受场地限制等特点,成为最受欢迎的运动方式之一。然而,错误的跑步姿势容易导致膝关节损伤和足底筋膜炎等运动损伤。传统的运动姿态分析系统虽然精准,但设备昂贵且需要在实验室环境下使用,对普通跑者来说既不经济也不方便。针对以上问题,本文创新性地采用无人机与深度学习相结合的技术方案实现运动姿态矫正。通过搭载视觉传感器的无人机实时采集跑者运动视频,利用 YOLOv8 算法进行人体姿态识别,结合 MediaPipe Pose 模型进行 3D 姿态重构,实现了户外环境下的低成本、便携式运动姿态分析。系统能够自动检测跑姿异常并通过手机 APP 实时提供可视化矫正建议,帮助跑者及时调整姿势,预防运动损伤。相比传统方案,本系统具有部署灵活、使用便捷、成本低廉等优势,可以为大众跑者提供专业的科学跑步指导方案。

关键词: 无人机; 姿态识别; 跑姿分析; 运动姿态矫正

引言

近年来,无人机技术日趋成熟,已在多个领域得到应用,为运动姿态分析带来了新的可能。在人体运动画面捕捉方面,部分体育项目因运动范围大、速度快,传统摄影在高度和移动速度上存在明显局限。而无人机航拍则具备不限高度、可灵活变速变向的优势。目前,多数无人机运动分析系统仍停留在简单的视频记录阶段,缺乏包含实时跟踪、智能分析和即时反馈的完整解决方案。尤其在跑步姿态矫正这一细分领域,尚未形成系统化的技术方案。

针对这一技术空白,本文提出了一套完整的基于无人机与深度学习的运动姿态矫正技术方案。创新性地将无人机自主跟拍、边缘计算和云端智能分析相结合。首先,设计了具有运动补偿功能的视觉跟踪算法,解决无人机拍摄过程中的抖动问题;其次,构建时空特征融合的步态分析模型,实现非结构化环境下的动态姿态评估;最后,开发轻量级客户端与云端协同架构。相比现有方案,本系统在移动性、实时性和分析维度等方面具有显著优势。

1 系统设计方案

1.1 系统框架

本系统采用三层模块化架构设计,由跟拍无人机、客户端 APP 和数据分析服务器组成,实现运动姿态的“采集 - 分析 - 反馈”闭环。1) 数据采集层:由搭载视觉传感器的无人机实现,通过多级 PID (Proportional-Integral-Derivative,

比例 - 积分 - 微分) 控制算法和 YOLOv8 姿态识别完成动态跟拍;2) 交互层:通过手机 APP 提供遥控操作、参数调整和数据可视化功能;3) 分析层:利用服务器端的 MediaPipe Pose 姿态估计模型进行 3D 姿态重构,结合步态知识库和动态时间规整 (Dynamic Time Warping, DTW) 算法生成矫正建议。

1.2 无人机端设计:跟拍收集跑步姿态数据

1.2.1 无人机端硬件设计

①核心飞行组件:选用轻量化碳纤维机架,低噪音三叶桨,2000KV 无刷电机,使用 6s 航模电池供电,持续电流 20A 以上的电子调速器,基于 STM32F4 的飞控,整机设计重量约 1.5kg,单次持续飞行时间在 15 分钟以上。

②知与导航模块:选用 JY901B 姿态传感器,该传感器使用磁场传感器和高动态卡尔曼滤波融合,可长期稳定输出航向角度数据。无人机下方安装激光 TOF (Time of Flight, 飞行时间测距) 传感器实现定高飞行。视觉方面,搭载高清摄像头。

③树莓派:边缘计算设备,提供网络服务与目标跟踪所需算力。

1.2.2 无人机控制算法

底层姿态控制采用串级 PID 结构,外环角度环输出目标角速率至内环角速率环,通过姿态传感器实时反馈实现闭环调节;中层位置控制同样基于串级 PID 设计,外环位置

环接收上层视觉跟随指令的期望位置,结合单目测距反馈生成期望速度指令至内环速度环,后者通过积分处理姿态传感器测量的三轴加速度实现速度闭环控制。

上层人体跟随控制器基于边缘计算设备部署的 YOLOv8 模型实现目标检测与姿态估计。无人机在跟拍过程中产生的运动可分为目标跟踪所需的主动运动和环境扰动引起的被动运动,二者的叠加会导致视频帧间运动失真。为此,系统首先对原始视频流进行相机运动补偿以消除背景畸变,随后通过姿态识别模型提取目标关键点信息。基于目标在图像平面的 2D 坐标及尺寸信息,计算无人机与目标的相对距离及中心位置偏差,并将该偏差量输入中层位置控制器以实现目标中心与摄像头光轴的对齐。同时,通过分析目标肩膀连线的空间方位角,解算其偏转角度并生成航向控制指令,使无人机实时调整朝向以保持对运动目标的持续跟踪。

1.2.3 网络通信

无人机的通信系统基于树莓派平台实现,采用 Wi-Fi 直连方式与手机建立物理层及数据链路层连接。在应用层设计中,系统通过 MAVLink (Micro Air Vehicle Link, 微型飞行器通信协议) 封装飞行控制指令及状态数据,同时基于 RTP (Real-time Transport Protocol, 实时传输协议) 实现低延迟视频流传输,以满足实时遥控与视频传输的双重需求。

1.3 客户端设计

客户端采用手机 APP 形式实现,以简洁清晰的交互设计为核心,为用户提供良好的使用体验。APP 主要包含四大功能模块:无人机遥控、参数整定、运动姿态数据可视化分析以及用户中心管理。

1.3.1 无人机遥控模块

该移动终端控制模块实现手机对无人机的近程遥控与实时视频监控功能。人机交互界面采用分层化设计,遵循直观性、安全性与功能优先级原则。主界面以实时图传画面为核心,叠加飞行参数信息。顶部状态栏实时显示关键飞行数据,两侧配置双虚拟摇杆控制模块:左侧摇杆调节油门与偏航角,右侧控制俯仰与横滚姿态。底部功能区集成一键返航、悬停及影像采集等快捷操作按钮,确保紧急功能可快速触发。

1.3.2 无人机参数整定模块

无人机参数配置界面提供飞行控制系统的关键参数整定功能,主要包括 PID 控制器参数、跟随距离、高度及角度等核心参数的设置。该界面采用交互式滑条组件与功能按钮

相结合的输入方式,各参数组均配备详细的功能说明标签。为提升参数调节效率,系统支持扩展视图显示功能,包含参数作用说明、调参经验指导及历史参数记录等辅助信息。

1.3.3 可视化运动姿态数据分析模块

跑姿分析可视化界面采用结构化设计,通过多模态数据呈现方式展示处理后的运动分析结果。界面采用纵向可滑动布局,包含以下功能模块:顶部固定导航栏、动态骨骼动画渲染区、核心运动参数卡、关节角度时序曲线与姿态对比热力图分析区,以及底部固定显示的运动改进建议模块。该设计实现了从实时动作重现到量化指标分析的全流程可视化。

1.3.4 用户中心模块

该模块提供用户账号管理功能,包括注册/登录认证、个人信息维护、历史数据查询及系统设置。首次使用需完成登录验证,否则强制跳转至认证流程。个人信息支持头像、昵称、性别及身体数据等字段的编辑。历史数据以列表形式呈现分析时间与跑姿问题摘要,点击条目可跳转至可视化分析界面查看详情。系统设置包含账号管理、通知权限配置等功能。

1.4 服务器端设计: 数据分析

1.4.1 人体姿态骨架识别与 3D 重构

服务器端使用 Media Pipe Pose 人体骨架姿态模型,检测 33 个解剖学关键点,输出每个点在图像中的 2D 坐标 (x, y) 和相对深度 z。3D 重构首先利用预先确定的人体比例模型,通过单目深度估计和骨骼长度约束,将 2D 像素坐标反投影到 3D 空间,设定髋部中心为坐标系原点,Z 轴指向摄像头方向。最后将世界坐标系下的 3D 点云和骨骼连线渲染为 3D 图形。

1.4.2 步态分析与关键参数提取

首先,通过时间序列对齐和卡尔曼滤波对原始 3D 关节点坐标进行平滑去噪,消除运动捕捉中的抖动误差;其次,利用踝关节垂直位移的极值点检测步态关键事件,划分为着地期、推进期和摆动期,将连续运动分割为单个步态周期并进行时空归一化处理。在参数提取阶段,从三个维度计算关键指标:时空参数,关节动力学参数以及对称性指标。其中时空参数包括步频、步幅、和触地时间;关节动力学参数包括膝关节屈曲角度、骨盆倾斜角度和踝关节屈曲角度等。

1.4.3 步态特征知识库

建立基于步态相位时间片分析的知识库,使用 DTW 算

法对齐不同用户的步态周期,并依据关键生物力学事件将每个周期划分为着地期、推进期和摆动期三个主阶段,进而细分为 15~20 个时间片。每个时间片内提取三类特征:步态时空参数、关节运动学和对称性指标,将流式数据与知识库中对应时间片的多维度特征模板进行相似度计算,最终匹配异常跑姿模式。将分析结果、步态时空参数和关节运动参数输入大语言模型生成个性化的运动矫正建议。

1.5 数据库设计

本系统基于 MySQL 关系型数据库构建,其架构设计主要包含四个功能模块:1) 用户管理模块实现账户认证与权限控制;2) 无人机管理模块存储设备参数及飞行日志;3) 数据采集模块记录视频元数据与运动姿态时序信息;4) 结果分析模块管理步态特征指标及异常模式数据。

1.5.1 用户管理模块

用户管理模块的数据库设计包含用户信息表 and 用户资料表两张表,采用“基础信息+扩展信息”的拆分模式,既保证核心账户数据的简洁性,又能灵活存储用户个性化信息。

1.5.2 无人机管理模块

无人机管理模块的数据库设计包含无人机设备表和无人机配置表两张表,分别用于管理无人机设备基础信息和个性化配置参数,实现设备全生命周期管理与灵活控制。

1.5.3 数据采集模块

数据采集模块的数据库设计,聚焦于无人机录制流程里的各类数据,构建录制会话表、视频记录表和人体姿态数据表,达成采集数据的结构化存储目标。其中,录制会话表用于记录一次完整的无人机录制任务的宏观信息;视频记录表用于存储单一会话中生成的视频文件元信息;人体姿态数据表用于存储视频流经姿态检测模型和预处理输出的关节点坐标。

1.5.4 结果分析模块

结果分析模块的数据库设计围绕步态分析任务、指标数据和异常问题展开,通过 3 张核心表实现对姿态分析结果

的结构化存储。步态分析任务表记录单次步态分析任务的元信息,作为分析结果的主容器;步态指标表存储步态分析中计算出的各类量化指标;步态问题表记录分析过程中识别出的异常或建议,为用户提供矫正依据。

1.6 网络通信设计

APP 与服务器采用分层通信架构:基础控制指令 and 用户认证通过超文本传输安全协议 (Hypertext Transfer Protocol Secure, HTTPS) 实现;视频等大文件数据采用分块上传机制,支持断点续传和后台任务管理,保障大文件在移动网络环境下的稳定传输;实时数据通过 WebSocket (WebSocket Protocol, 网络套接字协议) 长连接推送,实现状态同步。

2 小结

本设计提出了一种基于无人机与深度学习的运动姿态矫正系统技术方案,通过无人机自主跟踪拍摄、手机客户端实时接收和服务器端智能分析的三层架构,实现了户外环境下的运动姿态采集、分析和反馈闭环。系统创新性地结合了多级 PID 控制算法和视觉运动补偿技术确保拍摄稳定性,采用 Media Pipe Pose 模型进行 3D 姿态重构,并设计分层通信协议保障数据传输效率,为解决传统运动分析系统在移动性、实时性和适用性方面的局限提供了可行方案。

参考文献:

- [1] 于冰融. 基于姿态识别的 Android 健身纠姿 APP 的设计与实现 [D]. 华东师范大学, 2023.
- [2] 吴倩. 跑步疲劳进程中人体下肢动作模式变化特征研究 [D]. 武汉体育学院, 2024.
- [3] 庄丽萍. 人体姿态估计与动作比对方法研究 [D]. 福建理工大学, 2024.
- [4] 王文昭. 不同着地模式对侧切动作下肢生物力学影响的研究 [D]. 牡丹江师范学院, 2024.

基金项目: 本文受到成都信息工程大学本科教育教学研究与改革项目暨本科教学工程项目 No. JYJG2022135, No. JYJG2024169, 大学生创新训练项目“基于无人机与深度学习的运动姿态矫正系统 (No.X202510621266)”支持。