 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i6.6048

Research on Running Speed Sensing Method for Treadmill Based on LiDAR

Zhuo Liu Jiwang Zhang

Guangzhou Zhuoyuan Virtual Reality Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 511450, China

Abstrack

With the growing demand for sports health monitoring, traditional treadmills rely on preset speeds to drive users in passive motion, which is difficult to adapt to the real movement rhythm of the human body. This paper proposes a running speed sensing method for treadmills based on LiDAR (Light Detection and Ranging), which realizes an active adaptive motion mode by capturing the dynamic foot movements in real time and using the foot speed to control the operation of the treadmill belt. A multi-step smoothing statistical strategy is introduced to optimize the speed calculation model for the problem of single-step speed fluctuation. Experimental results show that this method can accurately respond to changes in human movement speed, effectively improving exercise comfort and immersion, especially for virtual reality (VR) sports experience devices. It provides an innovative solution for intelligent fitness scenarios.

Keywords

LiDAR; Speed Sensing; Active Adaptive Control; Treadmill

基于激光雷达的跑步机脚步速度感知方法研究

刘卓 张寄望

广州卓远虚拟现实科技股份有限公司，中国 · 广东 广州 511450

摘 要

随着运动健康监测需求日益增长，传统跑步机依赖预设速度驱动用户被动运动的模式，难以适配人体真实运动节奏。本文提出一种基于激光雷达的跑步机跑步速度感知方法，通过实时捕捉人员脚步动态，以脚步速度反控跑步机跑带运转，实现主动自适应运动模式。针对单步速度波动问题，引入多步平滑统计策略优化速度计算模型。实验结果表明，该方法能较为准确地响应人体运动速度变化，有效提升运动舒适性与沉浸感，尤其适用于虚拟现实（VR）运动体验设备，为智能化健身场景提供创新解决方案。

关键词

激光雷达；速度感知；主动自适应控制；跑步机

1 引言

当前主流跑步机普遍采用 “预设速度 - 跑带驱动 - 用户跟随” 的被动运动模式，用户需适应跑步机设定的固定速度进行运动。这种模式存在显著弊端：一方面，当用户实际运动能力与预设速度不匹配时，易引发运动疲劳甚至安全风险；另一方面，无法满足个性化运动需求，限制了运动体验的沉浸感与舒适性。特别是在虚拟现实（VR）运动体验设备中，被动运动模式导致用户身体位移与虚拟场景运动不同步，严重破坏沉浸体验。尽管部分跑步机已尝试采用红外感应人体距离的方式控制速度，向主动感知控制迈出了探索性的一步，但该技术在精度和实时性方面仍存在较大提升空间。红外感应易受环境干扰，且难以精准捕捉人体细微的运动变化，导致跑步机速度调节滞后，无法真正实现与人体运动的无缝适配。

随着 VR 技术在健身领域的应用拓展，构建 “人体运动 - 设备响应” 的主动自适应运动系统成为行业亟待解决的关键问题。激光雷达凭借高精度、实时性强的距离检测优势，为实现人体运动速度的较为准确感知提供了更优的技术路径。本研究旨在通过激光雷达实时捕捉人员脚步运动速度，并以此驱动跑步机跑带动态调节，构建 “人控机” 的主动自适应运动模式，提升 VR 运动设备的交互性与用户体验。

【课题项目】番禺区创新领军团队项目《智能 VR 交互设备关键技术的研发与产业化》（项目编号：2021-R01-5）。

【作者简介】刘卓（1980-），男，中国河北行唐人，博士，从事建模仿真与人工智能研究。

在运动监测领域，激光雷达已逐步应用于人体运动轨迹分析与姿态识别，但将其用于跑步机主动控制的研究尚处于起步阶段。现有的跑步机速度调节技术多依赖用户手动设定或简单的心率反馈控制，缺乏对人体运动状态的直接感知能力。基于视觉传感器的方法易受光照干扰，惯性传感器则存在累计误差问题，而红外感应控制方式又难以满足高精度需求，均难以满足主动自适应运动控制的较高精度需求。因此，探索基于激光雷达的跑步速度感知与主动控制方法，对推动智能健身设备技术革新具有重要意义。

本研究提出的基于激光雷达的跑步速度感知方法，打破了传统跑步机的被动运动模式，实现了运动设备对人体运动的主动适配。通过较为准确地感知脚步速度并同步调节跑带运转，不仅能有效降低运动损伤风险，还能显著提升 VR 运动场景的沉浸感与真实感。研究成果可为智能健身设备、VR 运动平台等领域提供核心技术支撑，推动健身产业向智能化、个性化方向发展。

2 基于激光雷达的脚步速度感知原理

2.1 激光雷达工作机制

激光雷达通过向目标物体发射激光束，并接收反射回来的激光信号，根据激光的飞行时间（Time of Flight，TOF）计算目标物体与雷达之间的距离。其基本公式为：$d=\frac{1}{2}ct$，其中 d 为目标物体与激光雷达的距离，c 为光速，t 为激光从发射到接收的时间。在本文研究中利用激光雷达的这一测距特性，实时获取跑步机上人员脚步与雷达之间的距离信息，为跑步速度感知提供数据基础，以实现较为准确的速度测量。

2.2 跑步运动特征分析

在跑步机跑步过程中，人员脚步运动呈现明显的周期性特征。当脚步向前移动时，其与激光雷达的距离逐渐变近；当脚步落地后，随着跑步机跑带向后运动，落地脚与激光雷达的距离会发生相应变化。通过对激光雷达检测到的距离数据进行分析，可发现距离变化曲线存在明显的拐点，这些拐点对应着脚步落地和抬起的时刻 [1]。基于此，建立跑步速度感知理论模型，通过监测脚步落地位置的变化以及相邻两次落地的时间间隔，结合跑带速度，实现实时脚步速度的准确计算。参见图 1。

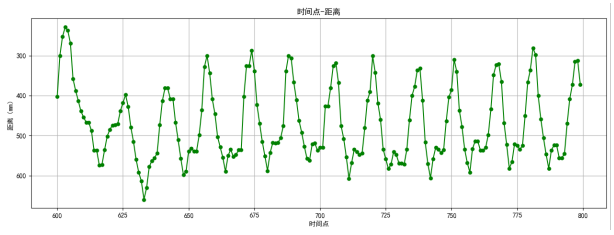


图 1 位置与时间的变化关系

3 跑步速度感知方法设计

3.1 系统架构

基于激光雷达的跑步速度感知系统主要由激光雷达传感器、数据采集模块和数据处理单元组成。激光雷达安装在跑步机前端，与跑带保持合适的高度和角度，确保能够清晰检测到人员脚步的运动。数据采集模块负责实时采集激光雷达输出的距离数据，并将其传输至数据处理单元。数据处理单元对采集到的数据进行分析处理，通过脚步位置检测算法和速度计算模型，实时计算出跑步速度，并可进一步输出行走距离、配速等运动参数，为实现较为准确的速度感知提供系统支持。

3.2 脚步位置检测算法

脚步位置检测是实现跑步速度感知的关键步骤。在跑步过程中，脚步落地时会引起激光雷达检测到的距离数据发生显著变化，通过对距离数据进行滤波处理，去除噪声干扰后，采用阈值判断与曲线拟合相结合的方法识别距离变化曲线的拐点 [2]。具体而言，当距离数据的变化率超过设定阈值时，初步判断可能出现脚步落地事件；然后通过对局部数据进行曲线拟合，确定拐点的准确位置，以此作为脚步落地的时刻和位置，为较为准确地计算跑步速度奠定基础。

3.3 速度计算模型

跑步速度的计算基于相邻两次脚步落地的位置差和时间差，同时考虑跑步机跑带的速度。设第 n 次脚步落地时激光雷达检测到的距离为 d_n，第 $n-1$ 次脚步落地时的距离为 d_{n-1}，两次落地的时间间隔为 Δt，跑步机跑带的实时速度为 v_{belt}。则单步跑步速度 v_n 的计算公式为：

$$v_n = \frac{|d_{n-1} - d_n| + v_{belt}\Delta t}{\Delta t}$$

其中，$|d_{n-1} - d_n|$ 表示两次脚步落地位置在激光雷达检测方向上的距离差，$v_{belt}\Delta t$ 为在时间内跑带向后运动的距离。然而在实际跑步过程中，单步速度受步幅调整、发力不均等因素影响波动较大，直接使用单步速度控制跑步机易导致跑带速度剧烈变化。为提升速度检测稳定性，本研究引入多步平滑统计策略。以左右脚交替 N 次（共 N 步）为一个统计周期，计算该周期内单步速度的算术平均值作为当前输出速度 v_{avg}：

$$v_{avg} = \frac{1}{N}\sum_{i=n-N+1}^{n} v_i$$

此外，还可采用滑动平均滤波、卡尔曼滤波等算法对单步速度序列进行优化处理。以滑动平均滤波为例，通过设置滑动窗口长度 N，对连续 N 个单步速度进行加权平均，有效抑制随机噪声引起的速度波动，使输出速度更符合人体运动的实际变化趋势，为跑步机的主动自适应控制提供较为

准确和稳定的数据支持。该参数 N 可根据实际应用场景与实验需求灵活调整，在后续实验验证环节将 N 取值为 6，以评估该策略的有效性。

4 实验设计与结果分析

4.1 实验设置

为验证基于激光雷达的跑步速度感知方法的有效性，搭建实验平台。实验选用的激光传感器芯片为 vl53l5cx，该芯片采用 FlightSense™ 2.0 技术，具备高精度、低功耗的特性，测量距离 0mm - 6m，线性短距离低至 10 mm，在所有亮度等级下对所有目标的远程测距性能有重大改进，18° 视野（FoV）。设置其为 4×4 扫描模式，扫描频率为 40 Hz，能够快速、准确地获取跑步机上人脚与雷达之间的距离信息。控制卡核心芯片采用 stm32F407vgt6，其基于 Cortex-M4 内核，主频高达 168MHz，具备丰富的外设接口，包括 ADC、SPI、I²C 等，可高效处理激光雷达采集的数据，并实现与跑步机控制系统的实时通信。

实验在不同跑步速度（2km/h、5km/h、10km/h、13.5km/h）下进行跑步实验，同时使用传统跑步机速度监测系统作为对比。相关程序开发基于 C 语言实现，充分利用 C 语言高效、灵活的特点，完成数据采集、处理算法以及与硬件交互逻辑的编写，确保系统的实时性和稳定性。

4.2 数据处理

在实验过程中，激光雷达以 40 Hz 的频率采集检测的距离数据，数据采集模块将采集到的数据传输至控制卡。首先利用控制卡中 stm32F407vgt6 芯片内置的 ADC 模块对原始数据进行模数转换，再采用中值滤波和滑动平均滤波相结合的方法，去除随机噪声和异常值；然后通过基于 C 语言编写的脚步位置检测算法识别脚步落地时刻和位置，提取相邻两次落地的距离和时间数据，代入单步速度计算公式得到每一步的速度 [3]。在此基础上，应用多步平滑统计策略，将参数 N 取值为 6，通过算术平均法、滑动平均滤波法等对单步速度序列进行处理，获取较为准确和稳定的输出速度。

4.3 结果验证

将基于激光雷达的多步平滑统计后脚步速度感知方法得到的结果与跑步机设定的速度测量结果进行对比，结果如图 2 所示。其中最右侧部分直接归 0，是在跑步机设定为停止的减速状态时不再进行检测计算。图 2 直观展示了多步平滑统计策略在提升速度检测稳定性方面的显著效果，有效避免了速度剧烈波动，为跑步机的较为准确控制提供了可靠保障。同时也验证了采用的硬件设备与方法在本实验条件下，能够满足跑步速度感知的准确性与实时性要求。

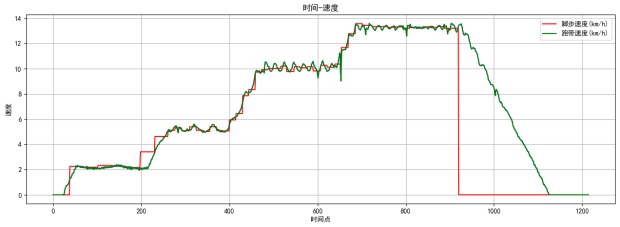


图 2 速度测量结果对比

5 结论与展望

本文提出的基于激光雷达的跑步速度感知方法，结合多步平滑统计策略，成功实现了跑步机从被动驱动到主动自适应控制的转变，有效提升了运动过程中的人机交互性能与速度检测稳定性。实验验证表明，该方法能够较为准确地捕捉人体运动速度，并同步调节跑步机跑带运转，在 VR 运动体验场景中展现出良好的应用潜力。

进一步的，本文提出的方法仍存在优化空间：一是在复杂运动姿态（如变速跑、折返跑）下，系统的响应速度与控制准确性有待进一步提升；二是需加强与 VR 设备的深度融合，探索更丰富的交互模式；三是可进一步优化多步平滑统计策略，研究不同滤波算法在动态运动场景下的适用性，包括参数 N 的最优取值范围以及激光雷达检测周期的优化选择 。未来研究将聚焦算法优化与系统集成，推动主动自适应跑步机技术在智能健身、虚拟现实等领域的广泛应用。

参考文献

[1] 王建明, 钟建春, 于亚光. 采用激光测距数据估计短跑步态和参数的方法[J]. 北京师范大学学报 (自然科学版), 2020, 56(4): 514-521.

[2] 刘锦, 郭帅, 郑俐, 等. 基于下肢康复机器人的激光雷达步态测量系统[J]. 中国医疗器械杂志, 2022, 46(2): 137-140,151.

[3] 陈福仕, 沈尧, 周池春, 等. 无监督学习步态识别综述[J]. Journal of Frontiers of Computer Science & Technology, 2024, 18(8).