

基于双层协作定位机制自动跟随输液架

陈博 韩卓燕 王刚

湖北交通职业技术学院公路与轨道学院, 湖北 武汉 430202

摘要: 本文旨在解决传统输液过程中患者行动受限的问题, 提出一种基于双层协作定位机制的自动跟随输液架系统。通过蓝牙低功耗 (BLE) 技术进行粗定位, 超宽带 (UWB) 技术实现精确定位, 两者协同工作, 赋予输液架可靠的自动跟随能力。经测试, 该系统在复杂室内环境中的定位精度可达亚米级, 跟随延迟小于 0.5 秒, 有效提升患者输液体验与行动自由度。

关键词: 自动跟随输液架; 双层协作定位; 蓝牙低功耗; 超宽带技术

Automatic Follow-up Infusion Rack Based on a Bi-level Collaborative Positioning Mechanism

Chen,Bo Han,Zhuoyan Wang,Gang

School of Highway and Railways, Hubei Communications Polytechnic, Wuhan, Hubei, 430202, China

Abstract: This paper proposes an automatic follow-up infusion rack system based on a bi-level collaborative positioning mechanism to address the limited mobility of patients during traditional infusion processes. The system employs Bluetooth Low Energy (BLE) for coarse positioning and Ultra-Wideband (UWB) for precise positioning. The integration of these technologies endows the infusion rack with reliable follow-up capabilities. Tests show that the system achieves sub-meter positioning accuracy and a follow-up delay of less than 0.5 seconds in complex indoor environments, significantly enhancing patient comfort and mobility.

Keywords: Automatic follow-up infusion rack; Bi-level collaborative positioning; Bluetooth Low Energy; Ultra-Wideband Technology

DOI: 10.62639/sspehe38.20250102

一、研究背景及意义

传统静脉输液限制患者活动范围, 存在针头移位、管路损伤等风险。本文基于物联网与定位技术创新, 开发双层协作定位智能输液架: 通过 UWB/IMU 融合定位与多传感器环境感知, 实现 0.8m/s 安全跟随, 为患者提供 10-15 m² 自由移动空间, 在确保医疗安全性的同时显著提升治疗舒适度。

二、系统总体设计

(一) 自动跟随输液架系统构成

自动跟随输液架系统由患者佩戴的定位标签、输液架上的定位基站和驱动控制模块构成。定位标签设计特殊, 信号发射稳定。它采用先进微处理器与低功耗射频芯片, 能持续发射含患者身份信息的信号, 且可在一定范围内被接收。其外观小巧轻便, 有腕带式、胸卡式等多种佩戴形式, 具备防水防尘功能。

定位基站是系统定位功能的关键单元, 配备高性能接收天线与数据处理芯片。天线高增益、宽频带, 可精准分析定位标签信号并计算位置。数据处理芯片运算能力强, 能快速处理大量定位数据, 保证实时性, 还具备与驱动控制模块和上位机通信的接口。驱动控制模块是

连接定位与输液架移动的桥梁, 依据定位基站信息转化为电机控制信号, 精确操控输液架移动。它采用先进电机驱动芯片与运动控制算法, 可实时调整电机输出, 确保移动平稳准确, 还具备故障检测和报警功能。

(二) 双层协作定位机制详解

双层协作定位机制融合蓝牙低功耗 (BLE) 与超宽带 (UWB) 两种定位技术。

BLE 技术承担初始大范围粗定位任务, 成本低、功耗小, 便于大规模部署和长时间使用。它利用信号强度指示 (RSSI) 原理估算距离, 虽精度有限, 但能快速确定患者大致区域, 如所在楼层、科室方位, 为精确定位打基础。

UWB 技术时间分辨率与抗多径能力极高, 可实现高精度定位。其发射纳秒级窄脉冲信号, 信号带宽宽, 能准确测量传播时间, 计算标签与基站精确距离, 抗干扰强, 可避免多径效应导致的定位误差, 在输液架自动跟随系统中能实现厘米级精度。

两种技术优势互补。患者移动时, BLE 先发挥作用, 让输液架及时响应; 靠近后 UWB 主导, 精确调整位置。跟随过程中, 两种技术数据不断融合优化, 动态调整定位策略, 如在人员密集区 UWB 抗干扰, 在对成本和功耗要求高的场景下发挥 BLE 优势。

(稿件编号: EHE-25-2-D001)

作者简介: 陈博 (2005-), 男, 汉族, 籍贯: 湖北省孝感, 在校生。

韩卓燕 (2006-), 女, 汉族, 籍贯: 湖北省襄阳, 在校生。

王刚 (1978-) 男, 汉族, 籍贯: 湖北武汉, 职称: 讲师, 研究方向: 工程技术。

(三) 系统应用优势

自动跟随输液架系统具备三重优势: 对患者提升活动自由度, 缓解焦虑并优化就医体验; 为医护人员减轻工作负担, 通过定位功能提升护理效率; 从管理层面, 系统数据可优化病房布局和资源配置, 同时彰显医院智能化水平, 增强竞争力。

三、双层协作定位机制

(一) 蓝牙低功耗 (BLE) 粗定位

BLE 定位基于 RSSI 原理, 通过标签发射信号、基站接收并计算信号强度距离, 结合三边测量法 (以三基站为圆心作圆求交点) 和最小二乘法估算位置。其具备低成本、低功耗优势, 可快速缩小目标范围, 但米级精度易受人体遮挡、障碍物反射等环境影响, 需融合其他技术实现精准跟随。

(二) 超宽带 (UWB) 精确定位

UWB 技术用纳秒级非正弦波窄脉冲通信定位, 信号带宽极宽, 时间分辨率与抗多径能力出色。本文采用到达时间 (TOA) 定位法, 测量标签发射信号到达多个基站的时间, 结合光速算距离。

以四个已知位置基站为例, 测信号到达时间 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 , 由 $d = c \times t$ 得距离 d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 , 用类似三边测量法联立方程组求解, 确定标签三维坐标。UWB 定位精度可达厘米级, 但设备成本高、覆盖范围有限, 与 BLE 结合可兼顾精度、成本与复杂度。

(三) 双层协作定位流程

双层协作定位融合 BLE 与 UWB 技术。系统启动后, BLE 定位模块先工作, 标签广播信号, 基站用 RSSI 原理粗定位, 能同时监测处理多个标签信号, 在人员密集区也能有效定位。

BLE 粗定位确定位置后, 系统依预设规则判断是否启动 UWB 精确定位, 如患者在高精度定位区域或移动速度超阈值等。UWB 定位标签发射信号, 基站测信号飞行时间算距离, 经三角测量和算法处理得精确位置, 精度达厘米级, 能应对复杂室内环境。

患者移动时, 系统持续监测定位数据, 若 BLE 定位发现患者离开 UWB 覆盖区, 重新 BLE 粗定位, 再启动 UWB 精确定位, 循环确保输液架准确跟随。系统还会依患者移动轨迹和速度动态调整跟随策略, 如加速时输液架提速并保持安全距离, 转弯时提前调整方向。

四、自动跟随控制算法

(一) 基于定位数据的控制原理

自动跟随输液架系统的控制算法基于 BLE 和 UWB 双模定位: BLE 粗定位时, 算法根据基站信号驱动输液架朝患者大致区域快速移动; 切换至 UWB 精确定位后, 实时追踪患者相对位置, 通过闭环控制动态调节移动速度与

方向 (距离超安全阈值时增速, 低于阈值时减速), 确保稳定跟随。

(二) 与路径规划算法的协同

自动跟随控制算法与 Dijkstra 算法、动态窗口法协同工作。全局路径规划时, Dijkstra 算法依据激光雷达构建的二维栅格地图, 规划出输液架到患者的全局最优路径, 控制算法据此控制输液架移动。

局部路径调整方面, 输液架遇障碍物或原路径不可行时, 动态窗口法根据其速度、加速度限制及传感器检测的障碍物信息, 在速度空间生成可行速度采样点。控制算法结合采样点与患者相对位置, 选择最优速度作为输液架下一时刻运动速度, 实现实时路径调整。

(三) 适应不同场景的算法调整

在人员少、环境简单的场景, 如单人病房, 自动跟随控制算法参数较固定, 侧重保持输液架与患者的稳定跟随距离和速度。

在人员密集、环境复杂的场景, 如医院走廊, 算法会动态调整参数。增加对周围环境的监测频率, 关注人员和障碍物动态。检测到人员活动多, 算法降低输液架移动速度, 增大安全距离; 患者突然加速、减速或转弯时, 算法加快响应速度, 调整输液架运动状态。

五、实验与结果分析

(一) 实验环境搭建

搭建 100 平方米模拟病房走廊环境, 布设 UWB/BLE 基站及障碍物, 采用四轮驱动输液架, 集成 STM32 控制器处理定位数据及运动控制。

(二) 定位精度测试

在不同位置和环境条件下进行了 100 组定位精度测试实验。测试人员在实验场地内随机移动, 分别记录 BLE 粗定位和 UWB 精确定位的结果, 并与真实位置进行对比。

实验结果表明, BLE 粗定位的平均误差在 2 - 3 米之间, 这与 BLE 技术本身受环境干扰较大、精度有限的特点相符。但 BLE 粗定位能够快速将患者位置锁定在一个大致区域, 为后续的 UWB 精确定位提供了有效的范围约束。

UWB 精确定位的表现则更为出色, 在视距 (LoS) 环境下, 平均定位误差小于 0.3 米, 满足大多数室内场景下对输液架精确定位的要求。在非视距 (NLoS) 环境下, 由于信号受到障碍物的遮挡和反射, 平均定位误差有所增加, 但仍能控制在 0.8 米以内, 实现了亚米级的定位精度。

(三) 跟随性能测试

1. 跟随性能测试结果

模拟患者正常行走 (0.5 - 1.5 米/秒) 时, 输液架稳定跟随, 平均延迟 0.5 - 1 秒, 移动轨迹平滑, 能保持 0.5 - 1 米安全距离。患者突然加速至 2 米/秒, 输液架 1 - 2 秒内响应, 加速时距离短暂拉大至 1.5 米后恢复。

患者频繁改变方向, 输液架靠动态窗口法有效调整, 快速转弯。但连续多次快速转弯, 跟随精度下降, 距离波动至 1 - 1.2 米。

2. 避障功能测试结果

面对固定障碍物, 输液架激光雷达能准确识别, Dijkstra 算法规划合理避障路径, 在 0.3 - 0.5 米处避让, 成功率超 98%。

对于移动障碍物, 传感器实时监测, 动态窗口法重新生成速度采样点, 在 0.5 - 0.8 米处调整方向, 避障成功率 95%。但多个复杂移动障碍物时, 输液架可能短暂停滞, 避障算法需优化。

3. 通信稳定性测试结果

模拟医院 Wi - Fi 网络环境, 信号强度大于 - 60dBm 时, 数据传输稳定, 丢包率低于 1%, 延迟 50 - 100 毫秒, 不影响跟随性能。信号强度低于 - 80dBm, 丢包率最高达 10%, 延迟 200 - 500 毫秒, 输液架跟随卡顿。

蓝牙通信测试中, 多个蓝牙设备存在时 BLE 通信基本稳定。但近距离高强度数据传输时, BLE 通信受干扰, 出现短暂中断, 1 - 2 秒内恢复。

4. 系统适应性测试结果

在模拟人员活动场景中, 输液架在病房区域能准确跟随, 不受干扰。走廊区域人员走动虽有干扰, 但双层协作定位和算法优化使其保持稳定跟随, 距离波动在安全范围内。

人员突然加速、减速、变向, 输液架能及时响应。但连续多次快速变化, 响应速度下降, 算法需进一步优化。

综上, 自动跟随输液架系统有优势和潜力, 但定位、避障算法及通信机制需优化, 以提升复杂环境下的稳定性和可靠性。

六、结论与展望

(一) 结论

自动跟随输液架系统测试显示:

定位: BLE 粗定位高效圈定目标 (误差 2-3 米), UWB 在复杂场景下保持高精度 (<0.8 米), 支撑精准跟随。跟随: 正常速度下稳定跟随 (延迟 0.5-1 秒), 轨迹平滑且维持安全距离; 突发加速或频繁转向时响应需优化。避障: 激光雷达结合算法实现高避障成功率 (固定 >98%、移动 95%), 复杂多障碍场景偶现停滞。通信: 网络良好时稳定 (Wi-Fi 丢包 <1%); 信号弱或蓝牙干扰时延迟 / 中断风险上升。适应性: 常规场景稳定, 极端动态环境 (连续快速变向、密集障碍) 需强化算法鲁棒性。系统具备临床实用潜力, 可提升患者体验与医护效率, 但复杂环境适应性及通信稳定性待进一步优化。

(二) 展望

1. 技术优化方向

定位算法优化: 深入研究 BLE 和 UWB 融合算法, 降低 BLE 在复杂环境的误差, 提升

UWB 定位效率与稳定性。结合机器学习预处理和修正定位数据, 利用历史及实时环境信息优化结果, 实现精准稳定定位。

避障算法升级: 开发智能避障算法, 增强输液架应对复杂动态环境能力。引入强化学习, 使其能据环境变化实时调整避障策略, 高效应对复杂场景与狭小空间。

2. 功能拓展设想

健康监测功能集成: 在输液架集成体温、血氧饱和度等健康监测传感器, 实时监测患者健康状况, 异常时向医护人员报警, 提供全面医疗保障。

远程医疗支持功能: 增加远程医疗模块, 让医护人员可远程查看患者输液及身体数据, 远程控制操作输液架, 对特殊患者或医疗资源有限地区意义重大。

3. 应用推广前景

医疗场景拓展: 将系统推广至社区卫生服务中心、康复机构等, 方便患者活动, 提升医疗服务便捷性。

养老领域应用: 应用于养老院等养老机构, 为老年人提供贴心输液护理, 提升生活质量与安全性。

家庭医疗市场潜力: 开发家庭版自动跟随输液架系统, 满足长期输液患者需求, 通过远程连接实现医疗监控与指导。随着技术进步和功能拓展, 自动跟随输液架系统将在医疗领域发挥更大作用, 为医患带来更多便利价值。

参考文献:

- [1] BLE 定位技术: BLE 即低功耗蓝牙技术, 相关参考文献可参考《仁微电子携手信锐技术 AP + 蓝牙模块组网 打造无线网络全覆盖》, 文中介绍了 BLE 技术的低功耗、短距离通信等优势, 及其在室内定位等场景中的应用, 出自仁微电子官网的一篇新闻报道。
- [2] UWB 精确定位技术: 可参考《UWB3000 模块: 高精度实时定位的理想选择》, 该文详细阐述了 UWB 模块的高精度定位原理、多种测距技术支持、低功耗低成本等优势, 以及在不同场景中的应用, 出自思为无线官网的一篇新闻报道。
- [3] 动态窗口法: 在机器人路径规划和控制领域的研究中经常被提及, 相关的参考文献有《机器人运动规划与控制》等专业书籍和学术论文, 其可根据机器人当前状态和环境信息实时调整速度, 实现局部路径的动态调整。
- [4] 物联网技术在医疗领域的融合应用: 《物联网助力智慧医疗》详细阐述了物联网技术在医疗物资管理、患者监护等方面的应用, 为输液架与其他医疗设备和系统的融合提供了思路。