

文章编号: 1671-7449(2026)01-0096-09

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(1): 96-104.

面向足球运动的UWB便携式定位技术

薛晓华¹, 张晓明^{2*}, 李 晓^{1,3}, 韩玉香⁴, 吴 剑⁵

(1. 中北大学 电气与控制工程学院, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室, 山西 太原 030051;

3. 中北大学 山西省智能微波光电技术创新中心, 山西 太原 030051;

4. 天津大学 智能传感功能材料全国重点实验室, 天津 300072; 5. 中北大学 体育学院, 山西 太原 030051)

摘 要: 针对足球日常训练和比赛中运动员及球队整体运动参数难以实时精准监测的问题, 提出了基于超宽带无线技术的便携式高精度定位系统, 通过卡尔曼滤波与加权最小二乘法解算测距信息进行定位。在标准足球场环境下, 利用水平精度因子对基站布设方案进行判别选择, 采用加权最小二乘法对标签位置进行解算。在此基础上, 对基站时钟误差模型进行分析, 采用误差补偿算法, 降低人工布设误差和时钟同步间隔, 增加标签容纳量, 降低系统功耗。通过仿真及试验验证, 系统静态定位误差 ≤ 15 cm, 动态定位误差 ≤ 20 cm, 时钟同步间隔可增至2 s, 人员容纳量 ≥ 20 人, 提高了便携式高精度定位系统的可用性和可靠性。

关键词: 超宽带定位; 通导一体化; 智能穿戴设备; 运动监测; 训练优化

中图分类号: TN966.4

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026024

引用格式: 薛晓华, 张晓明, 李晓, 等. 面向足球运动的UWB便携式定位技术[J]. 测试技术学报, 2026, 40(1): 96-104.

XUE Xiaohua, ZHANG Xiaoming, LI Xiao, et al. UWB portable positioning technology for football sports[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(1): 96-104.

UWB Portable Positioning Technology for Football Sports

XUE Xiaohua¹, ZHANG Xiaoming^{2*}, LI Xiao^{1,3}, HAN Yuxiang⁴, WU Jian⁵

(1. School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. State Key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China;

3. Technology Innovation Center of Shanxi Provincial for Intelligent Microwave Photoelectric, North University of China, Taiyuan 030051, China;

4. National Key Laboratory of Intelligent Sensing Functional Materials, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

5. School of Physical Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is difficult to monitor the movement parameters of athletes and the team as a whole in real time and accurately during daily football training and competitions, a portable high-precision positioning system based on UWB wireless technology is proposed. The Kalman filtering and weighted least squares algorithms are used in this system to calculate ranging information for positioning. In the standard football field environment, the horizontal dilution of precision is used to discriminate and select the base station layout scheme, and the weighted least squares method is adopted to calculate the tag position. On this basis,

【收稿日期】2025-06-23

【基金项目】山西省研究生创新项目(2024SJ293); 山西省重点研发计划资助项目(201903D121169)

【作者简介】薛晓华(2001—), 女, 硕士生, 主要从事智能组合导航研究。E-mail: 807644901@qq.com。

*【通信作者】张晓明(1976—), 男, 教授, 博士, 主要从事动态测试与组合导航研究。E-mail: zxm_auto@nuc.edu.cn。

the base station clock error model is analyzed, and error compensation algorithms are used to reduce manual layout errors and clock synchronization intervals, increase tag capacity, and reduce system power consumption. Simulation and experimental verification show that the static positioning error is ≤ 15 cm, the dynamic positioning error is ≤ 20 cm, the clock synchronization interval can be increased to 2 s, and the personnel capacity is ≥ 20 cm. This technology improves the availability and reliability of the portable high-precision positioning system.

Key words: ultra wide band (UWB) positioning; integrated communication and navigation; smart wearable devices; sports monitoring; training optimization

0 引言

在足球、篮球等运动中,运动员的跑动、跑位能力直接影响比赛结果。跑动跑位能力是运动员重要的基本能力素质之一,也是教练员考核球员的一项重要指标^[1-2],因此,对运动员的跑动能力及时机判断的要求越来越高。

然而,现有运动监测技术在足球训练中面临系统无法快速布设、实时反馈不足以及数据精度差的问题,难以精准捕捉并直观分析运动员跑位轨迹与速度变化,导致教练员无法准确判断整体球队技战术执行情况以及运动员的运动状态,严重限制了科学化训练体系的构建与优化^[3-4]。

常见的运动监测方法包括基于视频分析的多摄像头系统^[5]、可穿戴传感器技术^[6-7]、深度学习与视觉识别技术^[8-9]。Bush 等^[10]提出了 Prozone 3 系统,使用多摄像头追踪系统记录球员的体能和技术指标。吉晓琪^[11]提出基于人工规则与机器学习算法结合的足球事件检测算法,借助球场区域检测等技术采集统计球员运动数据。使用视频等方法可以客观准确地实时记录动作和技术细节,但缺少实时的数据分析,研究人员提出运动员佩戴可穿戴设备能够进行实时运动数据传输,便于实时监测且便携性强^[12]。Pino-ortega 等^[13]提出使用全球卫星定位系统进行数据实时传输,但受卫星信号遮挡、多径效应等影响,定位精度仅为米级,难以满足实时准确监测需求,其设备体积也限制运动员动作灵活性。2011 年,阿迪达斯发布的 Adizero 50 足球鞋,将 mi Coach 速度传感器置于鞋底凹槽处,可提供详细的球员运动状态等信息^[14]。

在足球运动参数解算过程中,现有研究多为提高对视频或摄像方法的定位精度和数据处理效率,提高复杂场景的适用性,但无法有效降低使用成本及定位过程中环境干扰对模型和精度的影响。本文

提出一种基于超宽带(Ultra Wide Band, UWB)技术的优化定位方法,首先对研究方法、定位模型进行说明,利用几何精度因子分析 UWB 定位基站布局对标签定位精度的影响,确定最优布局方案;其次,采用时间同步算法延长同步周期,直接减少了系统进行时钟校准的通信次数,从而显著降低了整体功耗,有效提升了系统的人员容量;最后,将优化后的数据与真实参数对比,显著降低了误差,验证了方案的可靠性和数据的准确性,对小型足球比赛和训练中运动参数智能监测具有一定指导意义。

1 研究方法 with 理论介绍

1.1 研究方法

在足球运动中,冲刺、变向和折返跑等关键动作的监测对战术分析和运动员表现提升至关重要,这些动作要求定位精度达到厘米级,系统更新率达到每秒 20 次以上^[15-16]。UWB 技术拥有厘米级定位精度、毫秒级低延迟传输和强抗干扰能力,能够精准接收标签实时回传的运动信息和生理信息^[17]。通过外围连接的边缘结算中心即可实时解算显示运动状态。本文通过引入水平精度因子(Horizontal Dilution of Precision, HDOP)优化 UWB 传感器阵列布局,并分析基站时钟误差模型,采用时钟同步算法,降低人工布设误差和时钟同步间隔,从而提高定位精度和系统可靠性,如图 1 所示。

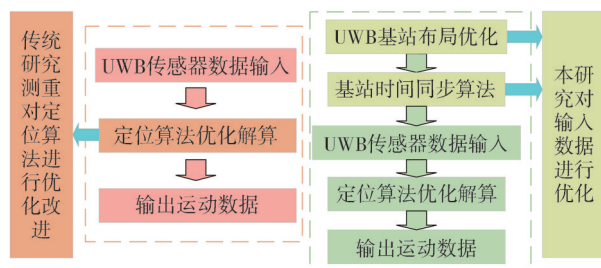


图 1 传统研究侧重点与本文研究侧重点对比

Fig. 1 Comparison of research focus between conventional studies and this work

优化后的系统还能增加标签容纳量、降低功耗,为足球训练和比赛中的实时监测提供高效技术支持,具有重要实际应用价值。

1.2 系统组成

足球运动员定位训练测试系统的硬件架构由超宽带基站、便携式定位标签、无线通信模块、数据处理中心以及移动终端等组成,系统总体示意图如图2所示。测试系统主要利用UWB无线测距和通信功能以及微型生物芯片技术,构建相应的无线实时测试系统。基站之间采用时间同步技术解决初始时间差和时钟漂移问题。智能臂带可以完成对运动参数的采集及传输,通过边缘计算中心将数据传输至云平台。系统包含定位功能和人员健康与位置信息管理,形成实时监测运动状态的分析平台。

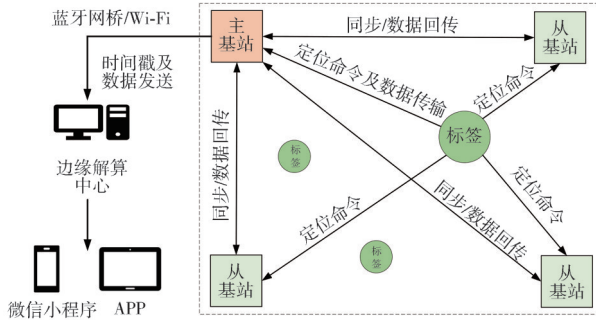


图2 系统总体示意图

Fig. 2 Overall system schematic diagram

1.3 标签定位模型

通过UWB信号的到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)定位方案可以进行二维定位。智能标签直接广播定位脉冲,多个基站记录该信号的到达时间戳^[18-20]。TDOA定位原理如图3所示。

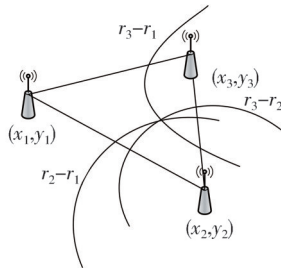


图3 到达时间差定位算法原理图

Fig. 3 Principle of time difference of arrival positioning method

设运动员佩戴的臂带标签的空间坐标为 (x, y) , 基站数量 $n \geq 3$ (二维定位至少需3个基站), 基站坐标为 (x_i, y_i) , $i=1, 2, \dots, n$ 。

设标签发射信号, 基站1和基站2接收信号。

信号到达时间分别为 t_1 和 t_2 , 传播时间为 $\tau_1 = \frac{d_1}{c}$ 、 $\tau_2 = \frac{d_2}{c}$ (c 为光速)。各基站存在时钟偏差 δt_1 和 δt_2 , 则实际到达时间为

$$t_1^{\text{obs}} = t_0 + \tau_1 + \delta t_1 + \epsilon_1, \quad (1)$$

$$t_2^{\text{obs}} = t_0 + \tau_2 + \delta t_2 + \epsilon_2, \quad (2)$$

式中: t_1^{obs} 为基站1观测到的信号到达时间(含时钟误差和噪声); t_0 为标签发射信号的绝对时间; ϵ_1 , ϵ_2 为测量噪声(如高斯白噪声)。

两基站时间差为

$$\Delta t = t_2^{\text{obs}} - t_1^{\text{obs}} =$$

$$(\tau_2 - \tau_1) + (\delta t_2 - \delta t_1) + (\epsilon_2 - \epsilon_1), \quad (3)$$

$$\Delta d = c \cdot \Delta t =$$

$$(d_2 - d_1) + c(\delta t_2 - \delta t_1) + c(\epsilon_2 - \epsilon_1), \quad (4)$$

式中: $\delta t_2 - \delta t_1$ 为相对时钟偏差; $\epsilon_2 - \epsilon_1$ 为差分测量噪声。

基站通过时间同步协议校准后, 剩余时钟偏差为 $\delta t_i - \delta t_1 \sim \mathcal{N}(0, \sigma_i^2)$ 。

基站坐标与臂带标签的测距误差服从零均值高斯分布, 标准差为 σ , 根据定位原理, 无时间误差测距值表示为

$$d_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}, \quad (5)$$

式中: x_i 和 y_i 分别为基站的横纵坐标; d_i 为臂带标签与各基站之间的测距值。

依据TDOA定位理论, 辅助基站 i 与主基站0到目标标签的径向距离差表示为

$$\Delta d_{i1} = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2}, \quad (6)$$

式中: Δd_{i1} 为目标标签到主基站1与到第 i 个辅助基站的径向距离差值。

对标签初始估计进行一阶近似为

$$\Delta d = G \Delta x, \quad (7)$$

式中: $\Delta d = [\Delta d_{21}, \Delta d_{31}, \dots, \Delta d_{n1}]^T$ 为TDOA残差向量; $\Delta x = [\Delta x, \Delta y]^T$ 为位置修正量, 方向余弦矩阵 G 为

$$G = \begin{bmatrix} a_2 - a_1 & b_2 - b_1 \\ a_3 - a_1 & b_3 - b_1 \\ \vdots & \vdots \\ a_n - a_1 & b_n - b_1 \end{bmatrix}, \quad \begin{cases} a_i = \frac{x_0 - x_i}{d_i^{(0)}} \\ b_i = \frac{y_0 - y_i}{d_i^{(0)}} \end{cases}. \quad (8)$$

加权最小二乘解中目标函数最小化表示为

$$J(\Delta x) = (\Delta d - G \Delta x)^T Q^{-1} (\Delta d - G \Delta x), \quad (9)$$

解得

$$\Delta x = (G^T Q^{-1} G)^{-1} G^T Q^{-1} \Delta d, \quad (10)$$

式中: Q 为观测数据的协方差矩阵, 各基站测距误差独立且方差为 σ^2 , 若 $i=j$, $Q=\sigma^2$; 若 $i \neq j$, $Q=2\sigma^2$ 。通过坐标增量修正方法, 令更新后的位置估计值为 $x''=x'+\Delta x$, $y''=y'+\Delta y$, 以此迭代优化终端坐标。当位置修正量的绝对值之和满足收敛条件 $|\Delta x|+|\Delta y|<\eta$ 时, 终止迭代过程, 即可得到标签位置。

1.4 水平精度因子

定位参数估计精度受观测数据质量、定位算

$$G^T R^{-1} G = \begin{bmatrix} \sum (a_i - a_1)^2 & \sum (a_i - a_1)(b_i - b_1) \\ \sum (a_i - a_1)(b_i - b_1) & \sum (b_i - b_1)^2 \end{bmatrix},$$

$$(G^T R^{-1} G)^{-1} = \frac{1}{\det} \begin{bmatrix} \sum (b_i - b_1)^2 & -\sum (a_i - a_1)(b_i - b_1) \\ -\sum (a_i - a_1)(b_i - b_1) & \sum (a_i - a_1)^2 \end{bmatrix}.$$

则 HDOP 计算公式为

$$HDOP = \sqrt{\frac{\sum (a_i - a_1)^2 + \sum (b_i - b_1)^2}{\det(G^T R^{-1} G)}}. \quad (12)$$

水平定位误差标准差为

$$\sigma_{\text{pos}} = \sigma \cdot HDOP, \quad (13)$$

式中: σ 为 UWB 测距误差标准差。HDOP 仅由基站几何布局决定, 与测距误差无关。HDOP 是评估 UWB 定位精度的关键指标, 量化了基站布局对误差的放大效应。

1.5 时间同步算法

在 UWB 定位系统中, 基站非同步上电会导致时间戳计数起点不一致, 引发绝对时间轴偏差。同时, 基站时钟受环境等因素影响存在频率漂移, 二者耦合加剧定位解算误差。基于卡尔曼滤波算法构建系统状态空间模型, 动态建模从基站时钟偏移, 利用其最优估计特性滤除干扰, 实现无线时钟偏移精确补偿, 提升 UWB 系统时间同步与定位解算精度。

在 $(n+1)T$ 时刻, 相邻时钟同步周期内时钟偏差与时钟漂移的关系式为

$$\theta_{n+1} = \theta_n + dt \cdot \gamma_n + \omega_{\theta,n}, \quad (14)$$

$$\gamma_{n+1} = \gamma_n + \omega_{\gamma,n}, \quad (15)$$

式中: dt 为主基站当前时刻发送时钟校验包与上一周期发送时钟校验包的时间间隔; θ_n 、 γ_n 分别为 nT 时刻从基站的最优估算时钟校验包接收时间值和时钟漂移值; θ_{n+1} 和 γ_{n+1} 分别为 $(n+1)T$ 时刻从基站修正前的预测时钟校验包接收时间和时钟偏移值; $\omega_{\theta,n}$ 为时钟偏差干扰; $\omega_{\gamma,n}$ 为时钟漂移干扰。

法及空间几何构型影响。几何精度因子可量化几何构型对定位结果的影响, 与定位精度成反比, 选用水平精度因子量化基站布局与定位精度的关系, 描述观测误差在基站几何布局下对定位解算的放大效应, 反映基站布点对测距误差的传播特性。系统观测误差包括 UWB 测距误差、基站坐标标定误差、时钟同步误差及环境扰动等。

水平定位误差的放大因子为

$$HDOP = \sqrt{\text{tr}[(G^T R^{-1} G)^{-1}]}, \quad (11)$$

式中:

通过建立状态方程、观测方程, 利用上一个状态的最优值 θ_n 、 γ_n 估算当前状态值和状态协方差, 并结合观测值 θ_{n+1} 、 γ_{n+1} 得出现在的最优值 θ_{n+1}^{Δ} 、 γ_{n+1}^{Δ} , 而后更新协方差, 循环迭代即可对偏差和漂移进行补偿, 从而保证主从基站的时钟同步。

输入为每次从基站接收的标准时间协议(Canonical Time Protocol, CCP)时间戳和主基站发送 CCP 的间隔; 输出为估计的从基站接收的 CCP 时间戳和时钟漂移率。从基站时钟模型假设为频率不变的线性模型,

$$t_s = t_{m0} + f_s(t_s - t_{m0}), \quad (16)$$

式中: t_s 为从基站时钟时间; t_{m0} 为系统初始同步时间; f_s 为系统时钟的频率。

系统方程为

$$\hat{X}_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1} + \Gamma_{k-1} W_{k-1}. \quad (17)$$

量测方程为

$$t_s = [1 \ 0] \begin{bmatrix} t_s \\ f_s \end{bmatrix} + r. \quad (18)$$

状态一步预测为

$$\hat{X}_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1}. \quad (19)$$

状态一步预测均方误差阵为

$$P_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k-1} Q_{k-1} \Gamma_{k-1}^T. \quad (20)$$

滤波增益阵为

$$K_k = P_{k,k-1} H_k^T (H_k P_{k,k-1} H_k^T + R_k)^{-1}. \quad (21)$$

状态估计为

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k,k-1} + K_k (Z_k - H_k \hat{X}_{k,k-1}). \quad (22)$$

状态估计均方误差阵为

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{k,k-1}. \quad (23)$$

每次从基站接收CCP后,将接收时间戳作为 s 输入方程,将最近的主基站发送CCP的时间戳计算 dt 代入矩阵 A 输入。执行整个循环得到新一轮估计值 Y 作为输出。 Y 包含两个关键值:一是从基站接收的CCP时间戳的估计值 θ ,二是估计的时钟漂移率 y 。当信标信号被接收时,记录当前时间戳 t ,从基站最近一次接收的CCP时间戳 T_s 和相应主基站发送CCP的时间戳 T_m 。与主基站同步的时间戳可表示为

$$\left[\frac{(t - T_s)}{y} \right] + T_m \quad (24)$$

表1 基站分布坐标

Tab.1 Coordinates of positioning base station

单位: m

方案	基站0	基站1	基站2	基站3	基站4	基站5	基站6	基站7
1	(0,0)	(110,35)	(110,-35)	—	—	—	—	—
2	(20,-35)	(20,35)	(90,35)	(90,-35)	—	—	—	—
3	(0,-35)	(0,35)	(110,35)	(110,-35)	—	—	—	—
4	(0,0)	(30,35)	(80,35)	(110,0)	(55,-35)	—	—	—
5	(0,0)	(28,35)	(82,35)	(110,0)	(82,-35)	(28,-35)	—	—
6	(0,0)	(28,35)	(55,35)	(82,35)	(110,0)	(82,-35)	(55,-35)	(28,-35)

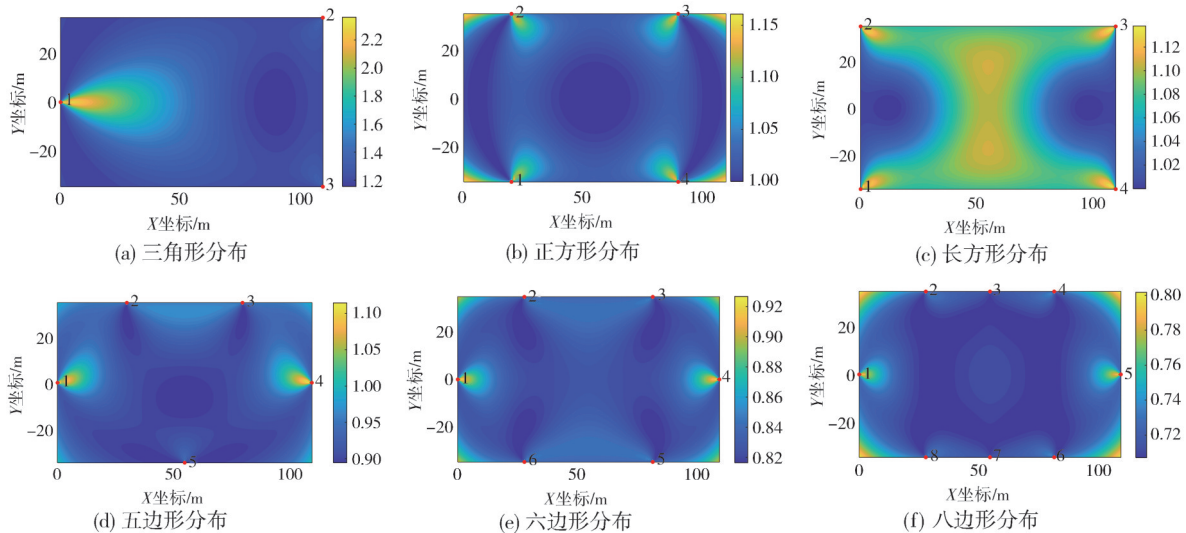


图4 基站分布仿真分析

Fig. 4 Simulation analysis of base station distribution station layout

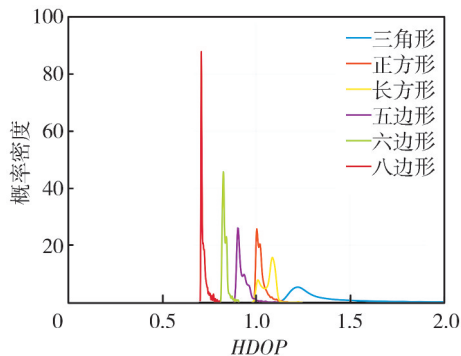


图5 基站布局HDOP值分析

Fig. 5 Analysis of HDOP values for base

2 仿真结果与分析

选用HDOP进行基站布局与定位精度关系的量化表征。11人制标准足球场地为长105 m,宽68 m的长方形,基站布设位置在场地外围,故选择在长110 m,宽70 m的区域进行试验。考虑实际足球运动的范围,对6种基站分布情况进行分析比较,基站情况如表1所示。通过MATLAB分析得出各种情况下坐标定位精度,如图4和图5所示。

通过对不同基站布局的HDOP值以及概率密度情况分析,正方形、长方形和五边形布设情况下,HDOP值小于1.15,运动员定位精度在可接受范围内,六边形、八边形基站布设情况下,HDOP值小于1,考虑到实际应用时项目成本问题,选用六边形基站布局即满足数据精度要求。

本文将基站按照六边形的布局进行布设,构建局部坐标系。

假设主基站坐标为 $(0,0,z)$,从基站坐标为 (x_n,y_n,z) , $n=0,1,2,\dots,n$ 。如图6所示。

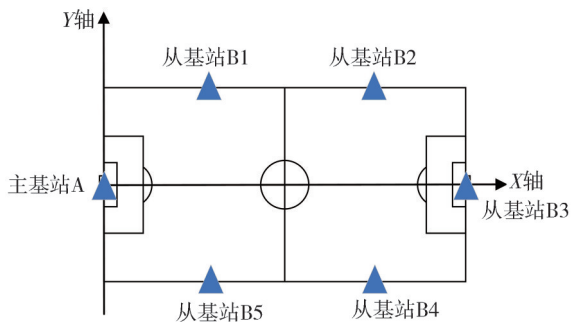


图6 坐标系及基站位置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of coordinate system and location of base station

3 实验验证

以六边形基站阵列设计实验。试验场地为标准 11 人制足球场(105 m×68 m)。测试环境布局与实验装置配置见图 7 所示。如图 8 所示,该定位终端采用轻量化臂带设计(重量<50 g,臂带≤40 mm×40 mm×15 mm),经生物力学测试验证,其在运动过程中的惯性影响可忽略不计,完全符合竞技体育训练监测的穿戴要求。



图7 基站安置及实验环境图

Fig. 7 Base station placement and experimental environment



图8 臂带佩戴图

Fig. 8 Base station placement and experimental environment

3.1 时钟同步实验

为验证误差补偿算法的有效性,对UWB主基站

与单个从基站间的发送、接收时间戳实施采集操作。将主基站程序设定为以 150 ms 为周期发送时钟同步信号。采用时间同步算法,计算经算法处理前后的实际偏移量差值,并完成时钟漂移量的解算工作。时钟偏移与时钟漂移的测试结果见图 9 和图 10。

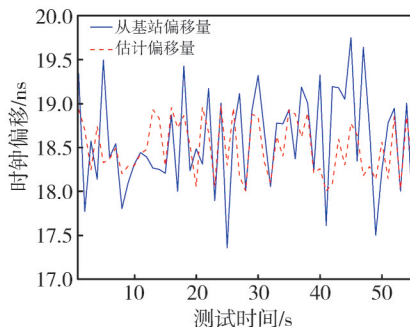


图9 时钟同步算法验证对比图

Fig. 9 Verification and comparison diagram of clock synchronization algorithm

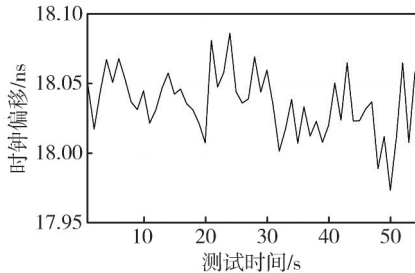


图10 改进后的时钟偏移量

Fig. 10 Improved clock offset

实验结果分析可知,系统的时钟同步性能经过优化后得到提升。从图 9 的实验数据可以看出,未经处理的从基站时钟偏移量分布在 17~20 ns 之间,而经过卡尔曼滤波算法处理后,时钟偏移量的波动范围缩小至 18~19 ns 间。图 10 的实验结果进一步验证了改进算法的有效性。当将时钟同步周期从传统的 1 s 延长至 2 s 后,系统仍能维持较小的同步误差波动幅度。同步周期的延长直接减少了系统进行时钟校准的通信次数,从而显著降低了整体功耗。系统资源的优化配置使得在相同硬件条件下可以支持更多的定位终端接入,有效提升了系统的人员容量。实验数据充分证明了该算法在保证同步精度的同时,实现了系统性能的全面优化。

3.2 定位实验

运动员佩戴臂带,在训练跑动时基站实时记录臂带的位置。各个基站将数据汇总到边缘计算中心进行算法求解,边缘计算中心将求解进行存储。

为了评估静止状态下携带标签运动员的定位准确性,在图 11 所示的圆形标记点进行了标签静态定位实验。根据足球比赛中常见点位以及 HDOP 规律进行测试点选取。

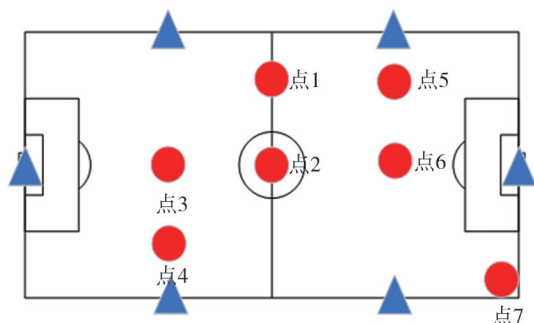


图 11 单标签静态定位示意图

Fig. 11 Single tag static positioning diagram

如表 2 所示,实验结果表明,实际定位点与理论定位点之间的偏差不超过 0.15 m。

表 2 全站仪测量位置及标签定位坐标数据表

Tab. 2 Total station measured coordinates vs. tag localization data

序号	全站仪测量坐标/m	标签定位坐标/m	定位误差/m
1	(52.33, 17.7)	(52.39, 17.76)	0.09
2	(52.12, -0.01)	(52.17, 0.05)	0.08
3	(26.72, 0.05)	(26.77, 0.10)	0.07
4	(26.70, -15.53)	(26.73, -15.50)	0.04
5	(79.98, 16.68)	(80.02, 16.72)	0.06
6	(80.25, 0.58)	(80.21, 0.64)	0.07
7	(103.8, -33.98)	(103.67, -33.97)	0.13

试验结果表明测试系统定位精度在 0.2 m 以内,在标签静止时,定位精度可达 0.15 m,同时定位精度的分布规律验证了 HDOP 值变化规律。针对点 (26.70 m, -15.53 m) 进行静态定位误差分布箱体图分析,如图 12 所示。

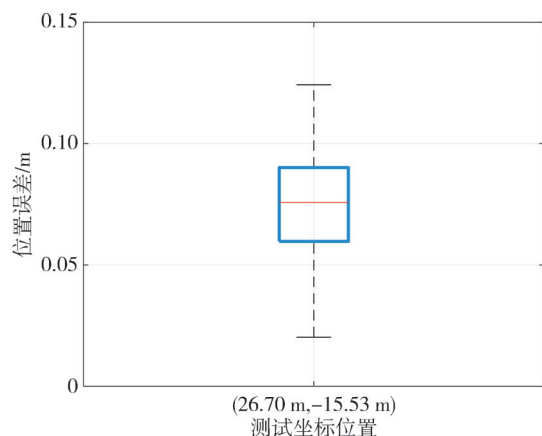


图 12 静态定位误差分布图

Fig. 12 Distribution of static positioning errors

由 HDOP 分析可知,该位置处 DOP 值为 0.84,理论分析可得定位误差为 0.084 m,由箱体

图分析可知,实际测量值的下四分数~上四分数区间为 $[0.066, 0.089]$ m,与实测结果和理论分析大致相似,同时验证了时间同步后对定位精度没有产生误差影响。

测试人员将可穿戴定位终端固定于受试者上肢中部(大臂位置),沿足球场中线轴向进行跑动测试。数据采集系统以 30 Hz 的采样频率记录定位信息,并通过上位机软件实时存储实验数据。定位性能测试结果如图 13 所示,实验数据表明该系统对运动状态下的人体目标具有稳定的追踪能力,实测定位准确度达到 15 cm 以内。

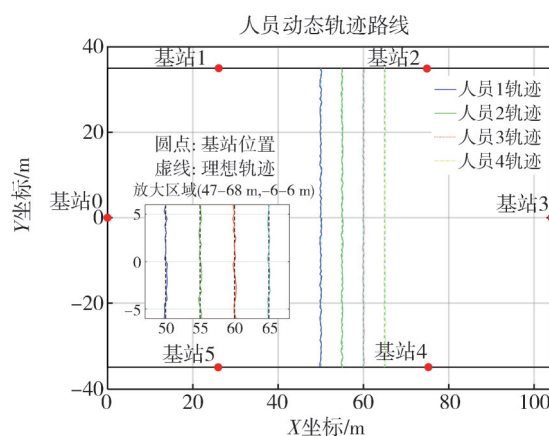


图 13 标签动态定位解算图

Fig. 13 Schematic diagram of dynamic positioning of labels

根据实验数据分析可得,在静态坐标标定和动态轨迹追踪测试中,系统实测位置数据与全站仪基准坐标的最大偏差量保持在 11 cm 以内。在测试中,如图 14 所示,精度评估需考虑可穿戴终端在肢体的安装位置偏差、全站仪控制点的布设位置差异以及人体运动过程中的肢体摆动效应。



图 14 标签动态定位现场实验图

Fig. 14 Field test of tag dynamic localization

针对本实验采用的智能臂带,其安装位置可能因测试人员体态差异产生偏差,且人员移动过程中肢体的自然运动也会进一步导致位置数据的波动。在这些约束条件下,系统展现出的定位精度具有一定的工程实用价值。

4 结 论

针对足球训练中运动员跑位追踪监测的难题,提出了一种基于UWB和多模态传感融合的智能穿戴系统。将微型标签固定在运动员臂部,系统实现高精度的实时定位和运动参数的动态采集,有效解决了传统视频监测视野受限、GNSS定位漂移等问题。系统采用六边形网络基站布局和时间同步算法,突破了复杂运动场景下低功耗提高人员容纳量的问题。实验结果表明,该系统定位精度优于 20 cm,人员容纳量达到 25 人。本技术不仅可以提升训练的科学性,也可以改善运动员的训练效果和比赛表现,为足球训练和体育运动领域带来了变革性的进步。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

- [1] WALKER S, TURNER A. A one-day field test battery for the assessment of aerobic capacity, anaerobic capacity, speed, and agility of soccer players [J]. *Strength & Conditioning Journal*, 2009, 31 (6): 52-60.
- [2] 张慧珍, 包金玉, 李鹏飞. 国民体质监测指标用于监控运动员训练的意义[J]. *文体用品与科技*, 2020 (9): 180-181.
ZHANG Huizhen, BAO Jinyu, LI Pengfei. Significance of national physical fitness monitoring indicators in monitoring athletes' training [J]. *Science & Technology of Stationery & Sporting Goods*, 2020 (9): 180-181. (in Chinese)
- [3] NIRMALA P, RAMESH S, TAMILSELVI M, et al. An artificial intelligence enabled smart industrial automation system based on Internet of Things assistance [C]//2022 International Conference on Advances in Computing, Communication and Applied Informatics (ACCAI), 2022: 1-6.
- [4] RECHE-SOTO P, CARDONA D, DÍAZ A, et al. Tactical demands of small-sided games in football: influence of tracking technology [J]. *International Journal of Medicine & Science of Physical Activity & Sport/Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y del Deporte*, 2019, 19(76): 729.
- [5] 刘阳, 罗安平. 基于足球比赛事件检测的视频分析方法[J]. *沈阳工业大学学报*, 2018, 40(4): 415-419.
- LIU Yang, LUO Anping. Video analysis method based on football game event detection [J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2018, 40 (4): 415-419. (in Chinese)
- [6] SESHADRI D R, LI R T, VOOS J E, et al. Wearable sensors for monitoring the physiological and biochemical profile of the athlete [J]. *NPJ Digital Medicine*, 2019, 2: 72.
- [7] 刘博涵, 钱坤. 科技在足球训练中的应用研究[J]. *科技资讯*, 2022, 20(11): 245-247.
LIU Bohan, QIAN Kun. Research on the application of science and technology in football training [J]. *Science & Technology Information*, 2022, 20(11): 245-247. (in Chinese)
- [8] SHAO Y, HE Z. VAR-YOLOv8s: IoT-based automatic foul detection in soccer matches [J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2025, 111: 555-565.
- [9] 王泽军, 游松辉. 大数据背景下基于位置数据的足球战术分析方法及发展趋势[J]. *上海体育学院学报*, 2021, 45(9): 60-69.
WANG Zejun, YOU Songhui. Soccer tactical analysis methods and development tendency based on positional data under the background of big data [J]. *Journal of Shanghai University of Sport*, 2021, 45 (9): 60-69. (in Chinese)
- [10] BUSH M D, ARCHER D T, HOGG R, et al. Factors influencing physical and technical variability in the English Premier League [J]. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2015, 10 (7): 865-872.
- [11] 吉晓琪. 足球比赛视频球员运动数据分析方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- [12] 苏炳添, 李健良, 徐慧华, 等. 科学训练辅助: 柔性可穿戴传感器运动监测应用[J]. *中国科学: 信息科学*, 2022, 52(1): 54-74.
SU Bingtian, LI Jianliang, XU Huihua, et al. Scientific athletics training: flexible sensors and wearable devices for kineses monitoring applications [J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2022, 52 (1): 54-74. (in Chinese)
- [13] PINO-ORTEGA J, RECHE-SOTO P, GARCÍA-DE-ALCARAZ A. Comparative analysis of recording system for collecting kinematic data in beach volleyball [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 2024. DOI: 10.1177/17543371241229526.
- [14] 黄光亮. 高科技在现代足球运动发展中的应用情况

- 研究[J]. 科教文汇, 2016(33): 66-67.
- HUANG Guangliang. Research on the application of high technology to contemporary football development [J]. The Science Education Article Collects, 2016 (33): 66-67. (in Chinese)
- [15] ROJAS JARAMILLO A, KREIDER R B, PETRO J L, et al. Velocity-based training in soccer: a brief narrative review with practical recommendations[J]. Journal of Functional Morphology and Kinesiology, 2025, 10(2): 106.
- [16] ZHOU X, WEN S. Monitoring and analysis of physical exercise effects based on multisensor information fusion[J]. Journal of Sensors, 2022(1): 4199985.
- [17] 童基均, 金利剑, 赵英杰, 等. 基于自适应卡尔曼滤波的超宽带室内定位系统[J]. 测试技术学报, 2018, 32(2): 93-99.
- TONG Jijun, JIN Lijian, ZHAO Yingjie, et al. The UWB indoor positioning system based on adaptive Kalman filtering [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2018, 32(2): 93-99. (in Chinese)
- [18] HAN Y, ZHANG X, LAI Z, et al. TOF-based fast self-positioning algorithm for UWB mobile base stations[J]. Sensors, 2021, 21(19): 6359.
- [19] 何成文, 袁运斌, 谭冰峰. 一种基于UWB TDOA定位模式的迭代最小二乘算法[J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(8): 806-809.
- HE Chengwen, YUAN Yunbin, TAN Bingfeng. An iterative least squares algorithm based on UWB TDOA positioning model[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(8): 806-809. (in Chinese)
- [20] LI J, WU D, HAN Y. A PSO microseismic positioning method based on group wave time difference information [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2016, 7(3): 241-246.