

王余珊, 郑建立. 融合毫米波雷达和惯性传感器的行人定位系统研究[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(8): 191-196. DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.240831

融合毫米波雷达和惯性传感器的行人定位系统研究

王余珊, 郑建立

(上海理工大学 健康科学与工程学院, 上海 200093)

摘要: 为老年人在发生紧急情况时可以得到及时救援, 本文对行人惯性导航进行研究, 可以获得行人的实时位置。传统的卫星定位, 定位精度较低且受遮挡物影响, 不能满足现代城市的室内外定位需求。本文设计了融合毫米波雷达和惯性传感器的行人定位系统, 在捷联惯性导航解算基础上采用扩展卡尔曼滤波融合磁力计和毫米波雷达的数据得出最佳估计值。设计了两组不同运动轨迹的测试实验, 验证系统的有效性, 并通过7次不同运动情况下的重复实验验证了系统的稳定性, 该系统在47 m范围内的定位误差在3%以内, 在400 m范围内的定位误差在5%以内, 基本满足定位需求。

关键词: 行人惯性导航; 毫米波雷达; 扩展卡尔曼滤波; 捷联惯性导航

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)08-0191-06

Research on pedestrian positioning system integrating millimeter wave radar and inertial sensors

WANG Yushan, ZHENG Jianli

(School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: To assist the elderly in receiving timely rescue during emergencies, this paper investigates pedestrian inertial navigation to obtain real-time location information of pedestrians. Traditional positioning methods rely on satellite navigation, which has low accuracy and is affected by obstructions, making it inadequate for modern urban indoor and outdoor positioning needs. To address this, the paper designs a pedestrian positioning system that integrates millimeter-wave radar and inertial sensors. By employing an extended Kalman filter to fuse multi-sensor data from inertial sensors and millimeter-wave radar based on strapdown inertial navigation calculations, the system obtains the optimal estimated value. Two sets of test experiments with different motion trajectories were designed to verify the system's effectiveness, and seven repeated experiments under different motion conditions validated the system's stability. The results show that within a range of 47 meters, the positioning error of the system is within 3%, and within a range of 400 meters, the positioning error is within 5%, which basically meets the positioning requirements.

Key words: pedestrian inertial navigation; millimeter-wave radar; extended Kalman filter; strapdown inertial navigation system

0 引言

根据世界卫生组织(WHO)的调查报告, 到2050年60岁以上的人口将由2015年的9亿人增加到20亿人左右, 约占世界总人口的22%, 正因如此, 与老年人健康相关的研究得到了极大的关注^[1-2]。位置信息在老年人的日常监护中发挥着重要的作用, 可在发生紧急情况时发送位置报警^[3-4]。随着人口老龄化的深化, 保护老年人, 提升老年人的生活质量至关重要。融合毫米波雷达和惯性传感器的行

人定位系统能够提供位置信息的实时记录, 对老年人的日常看护具有重要意义。

1 研究现状

基于惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)的行人自主定位方法, 按照定位解算原理可划分为行人航位推算(Pedestrian Dead Reckoning, PDR)和捷联惯性导航系统(Strapdown Inertial Navigation System, SINS)解算。PDR主要根据IMU输出的数据提取步频等特征并计算得到步长值, 其精

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC2005802, 2020-2023)。

作者简介: 王余珊(1999-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 嵌入式技术, 组合导航。

通讯作者: 郑建立(1965-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 医学信息系统与集成技术, 医学仪器嵌入式控制系统。Email: zhengjianli163@163.com

收稿日期: 2024-03-04

度很大程度上依赖于步长模型,准确估计则需要采集行人的身高、性别、行走习惯等才能确定,适用性较差,行走模式也比较单一。SINS 根据 IMU 输出的加速度进行两次积分解算得到位置,适用性更广泛,但仍然存在严重的积分漂移问题,需要进行误差修正获取更高的定位精度。为了应对传感器本身的固有误差以及长时间定位所积累的积分误差问题,需要采取相应的解决方案,文献[5]提出通过增加惯性传感器的数量,提高 SINS 系统的可靠性,但成本也随之增加;文献[6]提出了一种新颖的方法来改善行人惯性导航系统中的累积误差问题,通过设置滑动窗口,将导航过程划分为短时独立的段落,以限制误差的传播速度,然后进行运动轨迹的融合推算;文献[7]将惯性测量单元的数据与先进的拟合算法相结合,充分利用传感器提供的信息,并通过拟合过程对数据进行处理,实现了对行人位置的精准估计;文献[8]提出利用两个时刻的航向角差值检测和磁干扰检测来修正航向,融合气压计抑制了高程发散,在室内外定位场景中取得了良好的修正效果,说明多传感器融合对于提高定位精度效果显著;文献[9]设计了一种基于低成本单芯片毫米波雷达的室内自定位方法,为行人定位技术提供了新的思路,然而毫米波雷达在应用过程中也存在一些局限性,如易受环境干扰和累积误差等问题。

可穿戴设备是指可以佩戴在用户身上的智能集成电子设备,与老年人健康管理有关的最常见可穿戴设备如各类手环、手表等,除此之外还有身穿式、头戴式、便携式电子设备。文献[10]提出了智慧养老室内定位与预测,设计并实现了室内定位和预测系统,并将其应用于智能养老;文献[11]调查了养老服务问题以及定位服务需求,设计了基于全球卫星定位技术的智慧养老定位管理系统。当前,针对老年人安全定位监测的应用不仅局限于理论研究,市场上也已经涌现出众多相关设备。现有的智慧养老定位系统在一定程度上解决了老年人安全监测的需求,但仍存在功能不完善、室内外定位精度不足等问题。

为了让老年人使用的穿戴式设备能够提供较好的定位精度,本文选用 SINS 算法作为研究行人定位的算法基础,并融合毫米波雷达进行误差修正,设计相应的硬件结构和软件系统,通过实验对系统进行了测试,验证本文设计的行人定位系统可满足实际应用需求。

2 相关技术

2.1 惯性导航解算

捷联式惯性导航系统不依赖物理平台,只需要

测量载体坐标系下的加速度和角速度,通过计算即可得到导航坐标系下的姿态、速度和位置信息^[12]。在此过程中,需要将载体坐标系下的加速度变换到导航坐标系下,再进行积分,得到速度和位置,捷联惯性导航解算过程如图1所示。

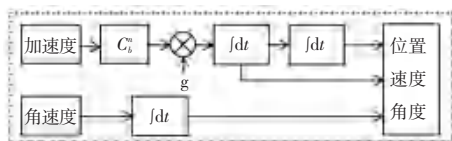


图1 捷联惯性导航解算过程

Fig. 1 Strapdown inertial navigation calculation process

1) 姿态更新

载体需要用姿态更新算法获得每一采样时刻的姿态矩阵,姿态更新是否准确关系到从载体坐标系变换到导航坐标系下的加速度是否准确,对速度和位置的计算产生决定性作用^[13]。常用的姿态更新算法有四元数法和方向余弦法等,本文采用四元数法进行姿态更新。

在捷联惯性导航系统中,四元数微分方程与角速度的关系,如式(1)所示:

$$\dot{q} = \frac{dq}{dt} = \frac{1}{2} \Omega(\omega) q \quad (1)$$

其中, $\omega = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]$ 是由陀螺仪测量输出的原始数据, ω_x 、 ω_y 、 ω_z 分别是人体绕 X、Y、Z 3 个坐标轴旋转的角速率。

$\Omega(\omega)$ 是一个 4×4 阶的反对称矩阵,式(2):

$$\Omega(\omega) = \begin{bmatrix} 0 & \omega_x & \omega_y & \omega_z \\ -\omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ -\omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $\omega \times$ 代表规范的向量交叉乘积,式(3):

$$[\omega \times] = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

采用四阶龙格-库塔算法对离散四元数差分方程进行求解,式(4)为四元数法的姿态更新方程。

$$\begin{cases} \dot{q}(t+T) = q(t) + \frac{T}{6} [K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4] \\ K_1 = f[q(t), w(t)] \\ K_2 = f[q(t) + \frac{K_1}{2}T, w(t + \frac{T}{2})] \\ K_3 = f[q(t) + \frac{K_2}{2}T, w(t + \frac{T}{2})] \\ K_4 = f[q(t) + K_3T, w(t + T)] \end{cases} \quad (4)$$

式中 T 表示采样间隔。

一般认为 $\|q\|_2 = 1$, 因此也可以得出姿态角

与四元数的关系, 如式(5)所示:

$$\begin{cases} \phi = \arctan\left(\frac{2(q_0q_1 + q_2q_3)}{q_0^2 + q_3^2 - q_1^2 - q_2^2}\right) \\ \theta = -\arcsin(2(q_1q_3 - q_0q_2)) \\ \psi = \arctan\left(\frac{2(q_1q_2 + q_0q_3)}{q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2}\right) \end{cases} \quad (5)$$

2) 速度和位置更新

速度更新是指根据速度微分方程, 推导当前时刻速度与前一时刻速度之间的递推关系。基于中值法的速度更新方程如式(6)所示:

$$v_t = v_{t-1} + \left(\frac{C_b^n a_t + C_b^n a_{t-1}}{2} - g\right) \Delta t \quad (6)$$

其中, v_{t-1} 和 v_t 分别是 $t-1$ 时刻、 t 时刻的速度; a_{t-1} 和 a_t 是 $t-1$ 时刻、 t 时刻由加速度计测量输出的原始加速度数据; C_b^n 为载体坐标系转导航坐标系的旋转矩阵; g 是重力加速度, $g \approx 9.80665$; Δt 是 $t-1$ 时刻到 t 时刻的时间间隔。

基于中值法的位置更新方程如式(7)所示:

$$r_t = r_{t-1} + v_{t-1} \Delta t + \frac{1}{2} \left(\frac{C_b^n a_t + C_b^n a_{t-1}}{2} - g\right) \Delta t^2 \quad (7)$$

其中, r_{t-1} 和 r_t 分别是 $t-1$ 时刻、 t 时刻的位置。

要注意的是, 得到的位置信息并不是绝对位置, 而是相对位置。在每次定位开始之前, 需要先确定一个初始位置, 位置更新得到的是相对于初始位置的位置信息。

2.2 多普勒测速原理

毫米波雷达利用多普勒原理测速。当目标物体相对于雷达发射源运动时, 目标反射的线性调频脉冲的频率将发生变化^[14]。通过计算这个频率变化, 可以确定目标的速度。在处理毫米波雷达数据时, 对每个线性调频脉冲进行快速傅里叶变换 (FFT), 将在相同位置获得具有不同相位的峰值, 这些峰值对应于目标反射的线性调频脉冲的频率变化, 从而可以推算出目标的速度^[15]。毫米波雷达测速原理如图 2 所示。

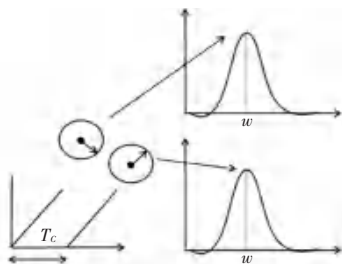


图 2 毫米波雷达测速原理

Fig. 2 Principle of millimeter-wave radar velocity estimation

两个连续线性调频测量的相位差可用于估计物

体的速度, 如式(8)所示:

$$v = \frac{\lambda w}{4\pi T_c} \quad (8)$$

其中, w 是传输两个由 T_c 分隔的线性调频脉冲测量的相位差。

3 算法设计

3.1 算法设计框架

由于捷联惯性导航系统 (SINS) 重力分解造成的积分误差无法用传统滤波方式完全解决, 因此引入毫米波雷达进行辅助测速, 修正 SINS 中的重力分解问题, 故本文使用加速度计+陀螺仪+磁力计+毫米波雷达的传感器组合进行数据采集。加速度计和陀螺仪能够提供关键的运动信息, 而磁力计则有助于纠正航向误差, 毫米波雷达则可用于修正测量速度误差。整合这些传感器能够提供更为全面准确的数据, 从而提高系统对航向和加速度误差的校正精度。本文多传感器融合的行人定位方法框图如图 3 所示, 采用 200 Hz 的频率采集加速度和角速度、磁场强度, 10 Hz 频率采集毫米波雷达的速度数据, 用于惯性导航解算获得对载体姿态、空间运动速度以及位置的初步估计; 使用扩展卡尔曼滤波对惯性导航系统的误差进行估计, 从而得到最优的运动轨迹。

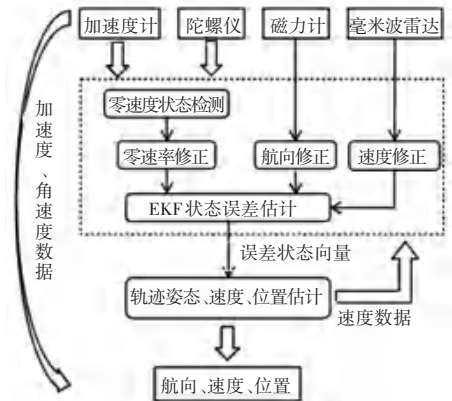


图 3 多传感器融合的行人定位方法框图

Fig. 3 Block diagram of the pedestrian positioning method based on multi-sensor fusion

3.2 零速检测

利用加速度和角速度的模值和标准差对运动数据的零速区间进行检测^[16], 加速度的模值 $|a_i|$ 和标准差 $\sigma_{|a_i|}$ 求解公式(9):

$$\begin{cases} |a_i| = \sqrt{a_{xi}^2 + a_{yi}^2 + a_{zi}^2} \\ \sigma_{|a_i|} = \sqrt{\frac{\sum_{j=i-n}^{i+n} (|a_j| - |\bar{a}_i|)^2}{2n + 1}} \end{cases} \quad (9)$$

其中, $a_i = [a_{xi} \ a_{yi} \ a_{zi}]$ 为 i 时刻的加速度数据; a_{xi} 、 a_{yi} 、 a_{zi} 分别是人体沿传感器 X 、 Y 、 Z 3 个坐标轴运动的加速度; n 为采集到的加速度数据量。

角速度的模值 $|\omega_i|$ 和标准差 $\sigma_{|\omega_i|}$ 求解公式(10):

$$\begin{cases} |\omega_i| = \sqrt{\omega_{xi}^2 + \omega_{yi}^2 + \omega_{zi}^2} \\ \sigma_{|\omega_i|} = \sqrt{\frac{\sum_{j=i-n}^{i+n} (|\omega_j| - |\omega_i|)^2}{2n + 1}} \end{cases} \quad (10)$$

其中, $\omega_i = [\omega_{xi} \ \omega_{yi} \ \omega_{zi}]$ 为 i 时刻的角速度数据; ω_{xi} 、 ω_{yi} 、 ω_{zi} 分别是人体沿传感器 X 、 Y 、 Z 3 个坐标轴运动的角速度; n 为采集到的角速度数据量。

当 i 时刻的加速度模值、加速度标准差、角速度模值和角速度标准差的值满足公式(11) 时, 判定 i 时刻为行人的运动状态为零速状态。

$$\begin{cases} |a|_{\min} < |a_i| < |a|_{\max} \\ \sigma_{|a_i|} < \sigma_{|a|} \\ |\omega_i| < |\omega| \\ \sigma_{|\omega_i|} < \sigma_{|\omega|} \end{cases} \quad (11)$$

其中, $|a|_{\min}$ 和 $|a|_{\max}$ 为加速度模值的阈值上下限; $\sigma_{|a_i|}$ 为加速度模值标准差的阈值; $|\omega|$ 为角速度模值的阈值; $\sigma_{|\omega_i|}$ 为角速度模值标准差的阈值。

3.3 航向修正

将磁力计测量的数据从载体坐标系转换到导航坐标系下, 转换公式(12):

$$\begin{bmatrix} \hat{M}_x^m \\ \hat{M}_y^m \\ \hat{M}_z^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{e} \cos \theta & \sin \theta \sin \phi & \sin \theta \cos \phi \\ \hat{e} & 0 & \cos \phi \\ \hat{e} - \sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{M}_x^b \\ \hat{M}_y^b \\ \hat{M}_z^b \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中, M_x^b 、 M_y^b 、 M_z^b 为磁力计各轴的测量分量。

计算出导航坐标系下的磁场强度即可计算出偏航角^[17]:

$$\psi = -\arctan\left(\frac{M_y^n}{M_x^n}\right) + \psi_0 \quad (13)$$

其中, ψ_0 为当地磁偏角。

3.4 扩展卡尔曼滤波估计过程建模

扩展卡尔曼滤波(EKF)的基本原理是通过一阶泰勒级数展开方法对非线性系统进行线性化, 从而得到近似线性系统并进行卡尔曼滤波^[18-19]。通过求解状态转移函数和观测函数的偏导数获取其雅可比矩阵, 替换之前线性系统中的状态转移矩阵与观测矩阵^[20]。扩展卡尔曼滤波线性化后的状态方程和观测方程如式(14)和式(15)所示:

$$X(t+1) = F(t+1|t)X(t) + G(t)W(t) \quad (14)$$

$$Z(t) = H(t)X(t) + V(t) \quad (15)$$

其中, X 为状态值; F 为状态转移矩阵; G 为噪声驱动矩阵; W 为过程噪声; Z 为观测值; H 为观测矩阵; V 为观测噪声。

对线性化后的系统进行扩展卡尔曼滤波递推, 流程如下:

(1) 初始化状态初值和方差矩阵初值:

$$\begin{cases} X(0) = E[X(0)] \\ P(0) = E[(X(0) - E[X(0)])(X(0) - E[X(0)])^T] \end{cases} \quad (16)$$

(2) 时间更新方程, 传递状态向量估计值和误差协方差矩阵:

$$\begin{cases} X(t+1|t) = f(X(t)) \\ P(t+1|t) = F(t+1|t)P(t|t)F^T(t+1|t) + Q \end{cases} \quad (17)$$

(3) 计算卡尔曼滤波增益矩阵:

$$K(t+1) = P(t+1|t)H^T(t+1)[H(t+1)P(t+1|t)H^T(t+1) + R]^{-1} \quad (18)$$

(4) 更新状态估计值, 式(19):

$$X(t+1|t+1) = X(t+1|t) + K(t+1)[Z(t+1) - h(X(t+1|t))] \quad (19)$$

(5) 更新误差协方差矩阵:

$$P(t+1|t+1) = [I - K(t)H(t)]P(t+1|t)[I - K(t)H(t)]^T + K(t)RK(t)^T \quad (20)$$

其中, Q 和 R 分别为系统噪声和量测噪声。

扩展卡尔曼滤波器会对 SINS 的输出与真实状态的误差值进行估计, 并估算出新的 SINS 的误差, 定义系统的状态误差向量如式(21)所示:

$$X_k = [\delta\phi \ \delta v \ \delta p \ \delta\omega \ \delta a] \quad (21)$$

其中, $\delta\phi$ 为姿态误差; δv 和 δp 分别为导航坐标系下的速度误差和位置误差; $\delta\omega$ 和 δa 分别为载体坐标系下的角速度误差和加速度误差。

假设陀螺误差仅为零偏误差时, 姿态误差受角速度误差影响, 可得到关系式(22):

$$\dot{\delta\phi} = C_b^n \delta\omega \quad (22)$$

速度误差主要源于姿态和加速度, 卡尔曼滤波器中的速度误差状态方程(23):

$$\dot{\delta v}^n = a^n \times \phi + \delta a^n \quad (23)$$

由于位置的时间导数就是速度, 因此可得位置误差状态方程(24):

$$\dot{\delta r}^n = \delta v^n \quad (24)$$

同时本文假设测量得到的加速度和角速度的零偏误差不随时间而发生变化, 故加速度和角速度的

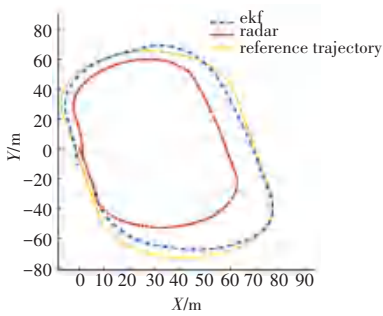


图6 环形跑道行走轨迹图

Fig. 6 Circular runway walking trajectory map

由图5和图6可见,融合加速度计和雷达测得的速度可以有效降低仅使用雷达进行测速的误差。

在实验一的测试环境下,分7种不同的运动情况进行轨迹测试实验,数据统计见表1,算法轨迹误差基本在3%以内。在测试环境中取4个测试点进行十组测试点定位重复实验,计算每一组测试点的坐标与实际坐标之间距离的均值误差与标准差,数据统计见表2,误差距离不超过1.0 m,且大部分在0.5 m的范围内波动,表明本文定位系统基本满足行人定位需求。

表1 针对不同运动情况的测试结果

Table 1 Test results for different sports situations

	参考轨迹长/m	实测轨迹长度/m	轨迹误差/%
快速	47	47.93	1.97
慢速	47	47.32	0.68
先快速后慢速	47	46.02	2.08
先慢速后快速	47	47.28	0.59
快速+中间停顿	47	46.70	0.64
慢速+中间停顿	47	47.50	1.06
变速+中间停顿	47	48.28	2.72

表2 测试点定位测试结果

Table 2 Test points localization test results

	实际定位坐标/m	误差距离/m
测试点1	(0.00, -3.50)	0.445±0.189
测试点2	(7.50, -8.50)	1.026±0.421
测试点3	(15.0, -3.50)	0.547±0.226
测试点4	(9.50, 0.00)	0.625±0.404

5 结束语

本文利用加速度计、陀螺仪、磁力计和毫米波雷达相结合的传感器组合,通过自行设计的穿戴式物联网终端设备采集传感器数据,并利用扩展卡尔曼滤波对数据进行融合定位,相较于传统的捷联惯性导航定位方法,本文提出的方法提高了定位的稳定性和准确性。该方法仍然存在一些局限性,例如在地面不平、下雨天等复杂场景下,毫米波雷达的性能可能会受到影响,导致定位精度下降,后续可以通过

将定位信息与地图数据融合进一步优化定位算法,以提升定位准确度。

参考文献

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国2023年国民经济和社会发展统计公报[J]. 中国统计, 2024(3): 4-21.
- [2] GU D, ANDREEV K, DUPRE M E. Major trends in population growth around the world[J]. China CDC Weekly, 2021, 3(28): 604.
- [3] 房博文. 上海社区居家养老智慧服务模式的内在逻辑研究[J]. Aging Research, 2023, 10: 855.
- [4] CRANDALL M, DUNCAN T, MALLAT A, et al. Prevention of fall-related injuries in the elderly: An eastern association for the surgery of trauma practice management guideline[J]. Journal of Trauma and Acute Care Surgery, 2016, 81(1): 196-206.
- [5] ZHAI X, REN Y, WANG L, et al. A review of redundant inertial navigation technology [C]//Proceedings of 2021 International Conference on Computer, Control and Robotics (ICCCR). IEEE, 2021: 272-278.
- [6] 赵辉, 陈文彬, 苏中, 等. 一种滑窗积分推算的行人惯性定位算法[J]. 中国惯性技术学报, 2023, 31(3): 228-236.
- [7] 全闻捷, 周绍磊, 姜旭, 等. 基于加速度和速度建模的行人导航位置估计算法研究[J]. 仪表技术, 2020(11): 29-35.
- [8] 李冬阳, 赵忠华, 晏懿琳, 等. 基于智能手机的室内外行人定位算法[J]. 计算机工程与设计, 2021, 42(10): 2808-2815.
- [9] 柳景斌, 王泽民, 吕非凡, 等. 低成本毫米波雷达的室内自定位方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(9): 1399-1408.
- [10] LIU Y, FANG X, LU F, et al. Indoor positioning and prediction in smart elderly care: model, system and applications[C]//Proceedings of Algorithms and Architectures for Parallel Processing: 20th International Conference. NY, USA: IEEE, 2020: 537-548.
- [11] GUO Q. Design of a smart elderly positioning management system based on gps technology [C]//Proceedings of International Conference on Cognitive based Information Processing and Applications (CIPA 2021). Cham: Springer, 2022: 694-701.
- [12] 杜海龙, 张荣辉, 刘平, 等. 捷联惯导系统姿态解算模块的实现[J]. 光学精密工程, 2008, 16(10): 1956-1962.
- [13] 刘传浩. 穿戴式消防员导航定位系统设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [14] BROOKER G M. Understanding millimetre wave FMCW radars [C]// Proceedings of the 1st International Conference on Sensing Technology. IEEE, 2005: 1.
- [15] RAO S. Introduction to mmWave sensing: FMCW radars[J]. Texas Instruments (TI) mmWave Training Series, 2017: 1-11.
- [16] 戴洪德, 张笑宇, 郑百东, 等. 基于零速修正与姿态自观测的惯性行人导航算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 48(7): 1135-1144.
- [17] 米刚, 田增山, 金悦, 等. 基于MIMU和磁力计的姿态更新算法研究[J]. 传感技术学报, 2015, 28(1): 6.
- [18] WAN E A, NELSON A T. Dual extended Kalman filter methods [M]. Wiley, 2001: 123-173.
- [19] YANG S, BAUM M. Extended Kalman filter for extended object tracking [C]//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2017: 4386-4390.
- [20] 格鲁夫. GNSS与惯性及多传感器组合导航系统原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.