引文格式：庞正辉,庞正芳,张品超,等. 扩展卡尔曼滤波算法在UWB+IMU定位中的应用[J]. 地理空间信息, 2024, 22(11): 95-99. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2024.11.019

# 扩展卡尔曼滤波算法在UWB+IMU定位中的应用

庞正辉[1]，庞正芳[2*]，张品超[3]，吴小串[1]，李金涛[1]，邓廷银[1]，陈永贵[4]
（1. 中工武大设计集团有限公司，湖北 武汉 430070；2. 长江宜昌航道局，湖北 宜昌 443000；
3. 南昌市自然资源和规划局，江西 南昌 330038；4. 河南测绘职业学院，河南 郑州 451464）

**摘　要：**为有效解决超宽带（UWB）+惯性测量单元（IMU）组合定位中的非线性问题，提出了一种基于扩展卡尔曼滤波（EKF）的UWB+IMU组合定位算法。首先详细推导了基于EKF的UWB+IMU组合定位的数学模型；然后在两个场景中分别设置4组对照实验评估算法的可行性。结果表明，基于KF和EKF的UWB+IMU组合定位运动轨迹整体更接近真实运动轨迹，组合定位可以发挥UWB和IMU的优势，定位精度高于单一UWB或IMU定位；与UWB、IMU和基于KF的UWB+IMU组合定位相比，基于EKF的UWB+IMU组合定位精度平均提升了59.99%、67.11%、34.87%；EKF通过融合UWB测距和IMU测量数据，提高了位置与姿态的准确性和稳定性，同时有效抑制了UWB和IMU的噪声误差，说明EKF算法更加适合应用于非线性定位场景中。

**关键词：**UWB；IMU；EKF；组合定位
**中图分类号：**P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）11-0095-05

## Application of Extended Kalman Filtering Algorithm in UWB+IMU Positioning

PANG Zhenghui[1], PANG Zhengfang[2], ZHANG Pinchao[3], WU Xiaochuan[1], LI Jintao[1],
DENG Tingyin[1], CHEN Yonggui[4]
(1. Cewud Group Company Limited, Wuhan 430070, China;
2. Yichang Waterway Administration of Yangtze River, Yichang 443000, China;
3. Nanchang Municipal Bureau of Natural Resources and Planning, Nanchang 330038, China;
4. Henan Collage of Surveying and Mapping, Zhengzhou 451464, China)

**Abstract:** In order to effectively solve the nonlinear problem in ultra-wide band (UWB)+inertial measurement unit (IMU) combined positioning, we proposed a UWB+IMU combined positioning algorithm based on extended Kalman filtering (EKF). Firstly, we derived the mathematical model of UWB+IMU combined positioning based on EKF in detail. And then, we set up four sets of control experiments to evaluate the feasibility of new algorithm in two scenarios. The experimental results show that UWB+IMU combined positioning motion trajectories based on KF and EKF are generally closer to the real motion trajectory, and the combined positioning can leverage the advantages of UWB and IMU, making the positioning accuracy higher than that of a single UWB or IMU positioning. Compared with UWB, IMU and UWB+IMU combination positioning based on KF, the accuracy of UWB+IMU combination positioning based on EKF has improved by an average of 59.99%, 67.11% and 34.87%. EKF improves the accuracy and stability of position and attitude by integrating UWB ranging and IMU measurement data, while effectively suppresses the noise errors of UWB and IMU, confirming that the EKF algorithm is more suitable for nonlinear positioning scenarios than KF algorithm.

**Key words:** UWB, IMU, EKF, combined positioning

在智能定位领域中，室内和复杂环境下的高精度定位一直是研究的热点和难点[1]。GPS定位等传统定位技术往往由于信号被室内障碍物阻挡而无法正常工作[2]，无法满足室内定位的精确性和实时性要求。因此，学者们开始积极探索新的定位技术和算法，其中超宽带（UWB）定位技术成为一种备受关注的选择。UWB技术作为一种高精度无线定位技术，具备带宽、功耗低、抗多径等优势，被广泛应用于室内、深度封闭环境等特殊场合定位[3-4]。由于成本费用低廉，近年来UWB技术得到了广泛的研究和应用关注，主要包括4个方面：①随着UWB技术的不断发展，相关标准与规范也在逐步建立，如其已获得IEEE 802.15.4a和Wi-

收稿日期：2023-08-31。
项目来源：河南省软科学研究计划资助项目（232400410141）。
第一作者简介：庞正辉（1980—），本科，正高级工程师，主要研究方向为大地测量、工程测量、GNSS数据处理与应用等，E-mail：115821357@qq.com。
通信作者：庞正芳（1989—），硕士，工程师，主要研究方向为大地测量、工程测量等，E-mail：495060439@qq.com。

Media Alliance等组织的标准认可[5]，促进了UWB定位技术的统一规范和商业应用；②UWB定位领域的核心问题是如何利用UWB信号进行定位，学者们提出了距离测量法、时间差测量法、接收信号强度指纹法等众多定位算法，可用于单一UWB设备的定位，也可通过多个UWB设备的组合实现多源定位，学者们还结合IMU[6]、地磁传感器[7]等其他传感器，利用融合算法提高了定位的精度和稳定性；③UWB定位技术面临着诸多挑战，如杨英杰[8]、徐爱功[9]、刘韬[10]等通过实验证实了UWB定位技术受多径效应、非视距传输、随机噪声等因素影响，并提出了多种误差修正和校正方法，同时张园[11]等提出的自适应粒子滤波算法、孙伟[12]等提出的基于机器学习分类器的UWB异常信号识别方法均可有效提高UWB定位精度；④UWB定位技术可应用于室内导航、环境监测、智能家居、智慧城市等领域，一些企业和机构也开始尝试将其商业化，推出了各类UWB定位设备和解决方案，室内定位和导航是目前UWB定位技术商业化最成熟和应用最广泛的领域之一。然而，UWB存在信号穿透性差、易受随机噪声干扰等问题，因此UWB技术的定位精度和稳定性有待提高。为克服UWB技术的局限性，学者们结合惯性测量单元（IMU），提出了UWB+IMU融合定位方法。IMU通过加速度计和陀螺仪等传感器获得物体的加速度和角速度信息，用于估计物体的位置和姿态参数。徐爱功[13]等证实了IMU存在随时间漂移、积分累积误差等问题，导致其难以单独用于高精度和长时间的定位。卡尔曼滤波（KF）作为目前应用最普遍的滤波方法之一，在线性高斯模型中使用效果最优，但处理非线性数据时会产生较大的误差[14-15]。室内定位存在的环境噪声是非线性的，组合室内定位的状态方程是非线性方程，观测方程也是非线性方程，因此KF不适用于室内定位场景。为有效解决UWB+IMU定位中的非线性问题，本文提出了一种基于扩展卡尔曼滤波（EKF）的UWB+IMU组合定位算法。EKF通过线性化非线性模型，将连续时间状态估计问题转化为离散时间状态估计问题，从而实现对状态的递推估计和校正。在UWB+IMU组合定位中，EKF通过融合UWB测距和IMU测量数据，优化了位置与姿态估计的准确性和稳定性，同时有效抑制了UWB和IMU的噪声误差，可进一步提高组合定位精度。

## 1 数学方法

### 1.1 TDOA测距基本原理

TDOA测距的基本原理是测量不同基站接收信号的时间差值，再乘以信号传播速度 $c$ 得到定位标签到基站的距离差，最后求解距离差方程组得到定位标签的位置坐标。TDOA定位至少需要3个基站参与，原理示意见图1。

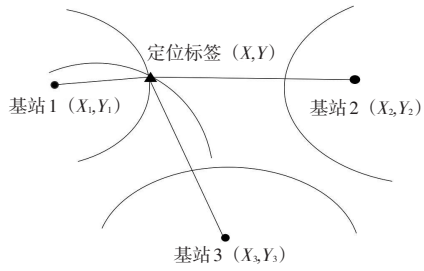



图1 TDOA定位原理图

TDOA二维定位为双曲线模型，假设定位过程中基站的平面坐标分别为 $(x_1,y_1)$ 、$(x_2,y_2)$ 、$(x_3,y_3)$，接收信号的时间分别为 $T_1$、$T_2$、$T_3$，定位标签的平面坐标为 $(X,Y)$，由距离差方程组可得到：

$$\begin{cases}\Delta S_{21}=\left(S_2-S_1\right)=c\left(T_2-T_1\right)\\ \Delta S_{31}=\left(S_3-S_1\right)=c\left(T_3-T_1\right)\end{cases} \tag{1}$$

将其转换为平面坐标表达，即

$$\begin{cases}\Delta S_{21}=\sqrt{\left(x_2-x\right)^2+\left(y_2-y\right)^2}-\sqrt{\left(x_1-x\right)^2+\left(y_1-y\right)^2}\\ \Delta S_{31}=\sqrt{\left(x_3-x\right)^2+\left(y_3-y\right)^2}-\sqrt{\left(x_1-x\right)^2+\left(y_1-y\right)^2}\end{cases} \tag{2}$$

若定位过程中基站的三维坐标为 $(x_i,y_i,z_i)$，$i$ =1，2，3，…，接收信号的时间为 $T_i$，定位标签的三维坐标为 $(X,Y,Z)$，$\Delta S_{i1}$ 为第 $i$ 个基站距离定位标签到第1个基站的差值，即

$$\begin{cases}\Delta S_{21}=\sqrt{\left(x_2-x\right)^2+\left(y_2-y\right)^2+\left(z_2-z\right)^2}-\\ \sqrt{\left(x_1-x\right)^2+\left(y_1-y\right)^2+\left(z_1-z\right)^2}\\ \vdots\\ \Delta S_{n1}=\sqrt{\left(x_n-x\right)^2+\left(y_n-y\right)^2+\left(z_n-z\right)^2}-\\ \sqrt{\left(x_1-x\right)^2+\left(y_1-y\right)^2+\left(z_1-z\right)^2}\end{cases} \tag{3}$$

式（3）中 $n\geqslant 4$，对方程组求解即可得到定位标签在三维空间的位置坐标。

### 1.2 IMU定位基本原理

IMU定位的核心是航位推算算法，对行走每一步产生的位移进行分解，得到不同方向的位移分量，进而对位置进行更新。位置更新原理示意见图2。

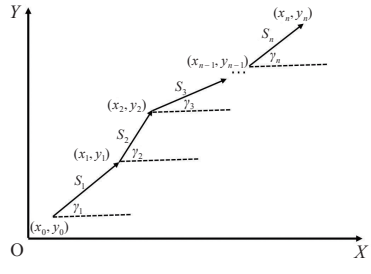



图2 IMU位置更新原理示意图

已知初始坐标 $(x_0, y_0)$，第一步航向角为 $\gamma_1$，第一步步长为 $S_1$，根据几何关系得到 $X$、$Y$ 方向的位移分量，即

$$\begin{cases} x_1 = x_0 + S_1 \cos\gamma_1 \\ y_1 = y_0 + S_1 \sin\gamma_1 \end{cases} \tag{4}$$

则行人步行 $n$ 步之后的最终位置可表达为：

$$\begin{cases} x_n = x_0 + \sum_{i=1}^{n} S_i \cos\gamma_1 \\ y_n = y_0 + \sum_{i=1}^{n} S_i \sin\gamma_1 \end{cases} \tag{5}$$

### 1.3　基于EKF的UWB+IMU组合定位基本原理

UWB+IMU组合定位的系统状态方程和观测方程可表示为：

$$X(k+1) = f[k, X(k)] + W(k) \tag{6}$$

$$Z(k) = h[k, X(k)] + V(k) \tag{7}$$

式中，$W$ 为系统状态噪声；$V$ 为系统观测噪声。

定位过程中通过IMU可得到加速度和角速度数据，其中位置推算可表示为：

$$\begin{cases} E(k+1) = E(k) + t(k)v_E(k) + \dfrac{t^2(k)}{2} \times \\ \left(a_E(k)\cos\alpha - a_N(k)\sin\alpha\right) \\ N(k+1) = N(k) + t(k)v_N(k) + \dfrac{t^2(k)}{2} \times \\ \left(a_E(k)\sin\alpha - a_N(k)\cos\alpha\right) \\ v_E(k+1) = v_E(k)t(k) \times \left(a_E(k)\cos\alpha - a_N(k)\sin\alpha\right) \\ v_N(k+1) = v_N(k)t(k) \times \left(a_E(k)\sin\alpha - a_N(k)\cos\alpha\right) \end{cases} \tag{8}$$

式中，$E$、$v_E$、$a_E$ 分别为东方向坐标、速度和加速度；$N$、$v_N$、$a_N$ 分别为北方向坐标、速度和加速度；$t$ 为采样间隔；$\alpha$ 为方向角。

将导航坐标系下载体的速度和位置作为状态量，则系统状态方程可表示为：

$$\begin{bmatrix} E(k+1) \\ N(k+1) \\ v_E(k+1) \\ v_N(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t(k) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & t(k) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E(k) \\ N(k) \\ v_E(k) \\ v_N(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_{E,K} \\ W_{N,K} \\ W_{v_E,K} \\ V_{v_N,K} \end{bmatrix} \tag{9}$$

将UWB定位解算的位置坐标以及IMU解算的步长和航向作为观测量，即

$$\begin{cases} E_{\mathrm{UWB}}(k) = E(k) \\ N_{\mathrm{UWB}}(k) = N(k) \\ S_{\mathrm{IMU}}(k) = t(k)\sqrt{v_E(k)^2 + v_N(k)^2} \\ \alpha_{\mathrm{IMU}}(k) = \arctan\dfrac{v_N(k)}{v_E(k)} \end{cases} \tag{10}$$

式中，$E_{\mathrm{UWB}}$、$N_{\mathrm{UWB}}$ 分别为UWB解算的东、北方向坐标；$S_{\mathrm{IMU}}$ 为IMU解算的步长；$\alpha_{\mathrm{IMU}}$ 为IMU解算的航向。

系统的观测方程可表示为：

$$\begin{bmatrix} E_{\mathrm{UWB}}(k) \\ N_{\mathrm{UWB}}(k) \\ S_{\mathrm{IMU}}(k) \\ \alpha_{\mathrm{IMU}}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dfrac{t(k)\times v_E(k)}{\sqrt{v_E(k)^2 + v_N(k)^2}} & \dfrac{t(k)\times v_N(k)}{\sqrt{v_E(k)^2 + v_N(k)^2}} \\ 0 & 0 & \dfrac{-v_N(k)}{v_E(k)^2 + v_N(k)^2} & \dfrac{v_E(k)}{v_E(k)^2 + v_N(k)^2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E(k) \\ N(k) \\ v_E(k) \\ v_N(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{E,k} \\ v_{N,k} \\ v_{S,k} \\ v_{\alpha,k} \end{bmatrix} \tag{11}$$

建立状态和观测方程后，再利用EKF对UWB和IMU定位结果进行融合。具体步骤为：

1）对初始状态即协方差矩阵进行初始化，即

$$X(0) = E[X(0)],\ P(0) = \mathrm{var}[X(0)] \tag{12}$$

2）进行状态预测和观测预测，即

$$\hat{X}((k+1)|k) = f(\hat{X}(k+1|k)),\ \hat{Z}(k+1|k) = h(\hat{X}(k|k)) \tag{13}$$

3）对状态方程和观测方程进行线性化处理，计算状态转移矩阵和观测矩阵，即

$$\boldsymbol{\phi}(k) = \frac{\partial f}{\partial \hat{X}},\ \boldsymbol{H}(k) = \frac{\partial h}{\partial \hat{X}} \tag{14}$$

4）对协方差矩阵进行预测，即

$$P(k+1|k) = \boldsymbol{\phi}(k+1|k)P(k|k)\boldsymbol{\phi}^{\mathrm{T}}(k+1|k) + Q(k+1) \tag{15}$$

5）计算KF增益，即

$$K(k+1) = P(k+1|k)\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}(k+1) \times \left[\boldsymbol{H}(k+1)P(k+1|k)\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}(k+1) + R(k+1)\right]^{-1} \tag{16}$$

6）对状态进行更新，即

$$\hat{X}(k+1|k+1) = \hat{X}(k+1|k) + K(k+1) \times \left[Z(k+1) - h(\hat{X}(k+1|k))\right] \tag{17}$$

7）对协方差进行更新，即

$$P(k+1) = \left[I - K(K+1)\boldsymbol{H}(K+1)P(k+1|k)\right] \tag{18}$$

## 2　实验设备和实验设计

### 2.1　实验设备

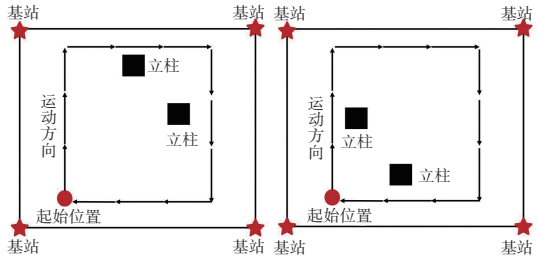
实验采用深圳空循环科技有限公司生产的Link-Track P型UWB设备采集UWB数据，频率为200 Hz，最远距离为1 500 m；采用无锡北微传感科技有限公司生产的BW-IMU500C型IMU设备采集IMU数据，参数信息见表1。

表1 实验设备参数

| 设备 | 参数信息 | 参数指标 |
|---|---|---|
| UWB | 频率 | 200 Hz |
| | 重量 | 950 g |
| | 标称精度 | 10 cm |
| | 最远距离 | 1 500 m |
| IMU | 频率 | 100 Hz |
| | 量程 | ±400°/s |
| | 零偏稳定性 | 7.5 mg |
| | 分辨率 | 0.001° |

### 2.2 实验设计

为验证本文算法的可靠性，选取空旷地下停车场的一部分作为实验场地（图3），图中黑色箭头为运动方向，黑色正方形为停车场立柱，代表障碍物体。本文同时设计两种场景下的4组对照实验来验证基于EKF的UWB+IMU组合定位算法的可靠性，实验设计见表2。




a 实验场景1 b 实验场景2

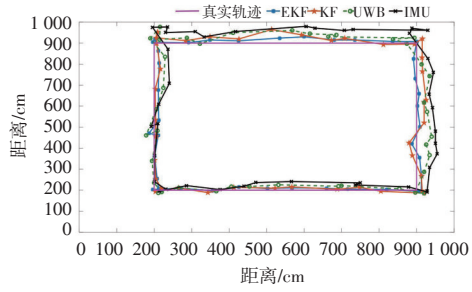
图3 实验场地

表2 实验设计

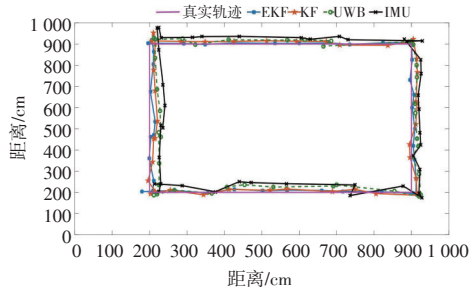
| 编号 | 数据类型 | 组合算法 |
|---|---|---|
| 实验1 | UWB | – |
| 实验2 | IMU | – |
| 实验3 | UWB+IMU | KF |
| 实验4 | UWB+IMU | EKF |

## 3 实验结果分析

按照设计内容进行实验，将两种场景下4组实验得到的行走轨迹与真实轨迹进行对比，结果见图4，可以看出，两种实验场景的结果较一致，基于KF和EKF的UWB+IMU组合定位运动轨迹整体更接近真实运动轨迹，说明基于KF和EKF的UWB+IMU组合定位可以发挥UWB和IMU的优势，组合定位精度优于单一数据定位精度。总体来看，受实验场地中立柱影响，与基于KF的UWB+IMU组合定位相比，基于EKF的UWB+IMU组合定位精度更高、抑制路径偏移效果更好。将两种场景下4组实验得到的行走轨迹与真实轨迹的偏差作为精度因子进行统计分析，结果见表3，可以看出，在实验场景1中，与UWB、IMU和基于KF的UWB+IMU组合定位相比，基于EKF的UWB+IMU组合定位精度平均提升了59.11%、68.27%、36.61%；在实验场景2中，与UWB、IMU和基于KF的UWB+IMU组合定位相比，基于EKF的UWB+IMU组合定位精度平均提升了60.86%、65.94%、33.43%。上述结果进一步证实了基于KF和EKF的UWB+IMU组合定位精度高于单一UWB定位或IMU定位，且基于EKF的组合定位算法比基于KF的组合定位算法在抑制路径偏移方面表现更优，说明基于EKF的组合定位算法更加适合应用于非线性定位场景中。




a 实验场景1




b 实验场景2

图4 不同实验方案的行走轨迹

表3 不同数据类型定位精度/cm

| 实验场景 | 数据类型 | 最大偏差 | 最小偏差 | 平均偏差 | 中误差 |
|---|---|---|---|---|---|
| 实验场景1 | UWB | 98.88 | 7.66 | 42.85 | 23.78 |
| | IMU | 151.39 | 9.58 | 55.23 | 32.97 |
| | KF（UWB+IMU） | 76.15 | 7.38 | 27.51 | 15.82 |
| | EKF（UWB+IMU） | 59.50 | 3.00 | 17.52 | 13.43 |
| 实验场景2 | UWB | 95.49 | 8.20 | 41.20 | 22.58 |
| | IMU | 153.66 | 15.20 | 47.34 | 30.93 |
| | KF（UWB+IMU） | 73.60 | 7.65 | 24.22 | 15.16 |
| | EKF（UWB+IMU） | 58.88 | 3.00 | 16.12 | 13.20 |

## 4 结 语

针对室内定位存在的环境噪声是非线性的，KF不适用于室内定位场景的问题，本文提出了一种基于EKF的UWB+IMU组合定位算法。EKF通过线性化非线性模型，将连续时间状态估计问题转化为离散时间状态估计问题，从而实现对状态的递推估计和校正。两种场景下的实验数据表明，与UWB、IMU和基于

KF的UWB+IMU组合定位相比，基于EKF的UWB+IMU组合定位精度平均提升了59.99%、67.11%、34.87%，证实了基于EKF的UWB+IMU组合定位算法可提高位置与姿态估计的准确性和稳定性，同时有效抑制UWB和IMU的噪声误差，进一步提高组合定位精度。

## 参考文献


[1] 张帅. 顾及行人活动的智能手机多传感器室内定位方法研究[J]. 测绘学报,2023,52(4):693

[2] 谢翔,荆昊,郭际明. 室内环境下手机GPS定位精度研究[J]. 测绘通报,2012(8):95-98

[3] 任东宇,任东旭,张元. 基于UWB和Skyline的室内三维实时定位技术研究[J]. 地理空间信息,2017,15(8):113-115

[4] 王生亮. GNSS/UWB/DBA/移动蜂窝网络多源融合定位算法研究[D]. 武汉:中国科学院大学(中国科学院精密测量科学与技术创新研究院),2021

[5] 解武,曹家年,刘世航,等. IEEE802. 15. 4a信道对UWB功率谱影响分析[J]. 深圳大学学报(理工版),2010,27(1):43-48

[6] 王鹏,侯忠生. UWB与IMU融合的室内动态定位算法[J]. 电子测量技术,2023,46(10):76-83

[7] 张增超,李强,孙红雨,等. 基于地磁传感器和UWB技术的停车位车辆检测方法与实现[J]. 传感技术学报,2019,32(12):1 917-1 922

[8] 杨英杰,王晓峰,曲朝阳,等. UWB多径信道调制方式的误码率分析[J]. 华南师范大学学报(自然科学版),2015,47(5):23-27

[9] 徐爱功,王鹏语,隋心,等. 非视距环境下基于PSO-SVM和RAIM的UWB定位方法[J]. 测绘科学,2023,48(4):1-9

[10] 刘韬,徐爱功,隋心,等. 新息向量的抗差Kalman滤波方法及其在UWB室内导航中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2019,44(2):233-239

[11] 张园,谭兴龙,赵长胜,等. 顾及有色噪声的自适应粒子滤波UWB定位算法[J]. 测绘通报,2019(8):30-33

[12] 孙伟,孙沛伦. 一种基于机器学习分类器的UWB异常信号识别方法[J]. 测绘科学,2023,48(5):1-8

[13] 徐爱功,杜健,隋心,等. 零速修正与完备监测在UWB/MEMS IMU组合中的应用[J]. 测绘科学,2022,47(12):1-7

[14] 景仙林,魏永虎. 自回归的卡尔曼滤波算法在UWB定位中的应用[J]. 地理空间信息,2023,21(5):117-119

[15] 刘韬,徐爱功,隋心. 自适应抗差KF-UKF的超宽带导航定位方法[J]. 测绘科学,2017,42(12):104-111


(上接第94页)

管理的精细化、智能化水平不断提升。

## 参考文献


[1] 徐洪秀,杨玉忠,王赫,等. 三维地籍测绘研究及其标准化探索[J]. 测绘通报,2024(1):136-140

[2] 江文源,杨如军,刘琦,等. 基于实景三维技术的广西自然资源三维立体“一张图”应用研究[J]. 自然资源信息化,2022(2):80-86

[3] 韩昕熠. 基于Cesium的多维动态可视化技术研究[D]. 西安:西安科技大学,2019

[4] 牛永力,贾宝,邓超,等. 基于SuperMap的居民小区三维管理分析系统建设研究[J]. 地理空间信息,2024,22(2):76-78

[5] 郭美卉. 基于Unity3D的虚拟鹫峰漫游展示设计[D]. 北京:北京林业大学,2013

[6] 高建岗,唐相桢. Unreal Engine引擎支持下的三维规划审批关键技术研究[J]. 测绘通报,2022(增刊2):264-267

[7] 刘刚,陈根深,陈麒玉,等. 基于Web的大规模三维空间模型高效可视化关键技术[J]. 地理空间信息,2023,21(12):8-13

[8] 王芮,严立,陆文雨. 融合实景三维信息的三维地籍空间模型构建与应用探索[J]. 测绘通报,2021(增刊1):6-9

[9] 李德重,姚娜,薛永军,等. 内蒙古自治区自然资源调查监测高精度实景三维建设方法与实践[J]. 测绘通报,2023(11):158-162

[10] 王宇,邢希凯,赵胜楠. 基于无人机倾斜摄影三维模型构建及网页发布[J]. 地理空间信息,2022,20(6):17-19

[11] 周保兴,王兵,张航钒,等. 融合多源空间数据的复杂场景真三维模型构建方法[J]. 测绘通报,2024(4):13-17

[12] 倪荣梅,张建伟,谭诗瀚. 飞行模拟视景中海洋仿真渲染技术研究[J]. 现代计算机,2021(7):117-120

[13] 张琛,贺彪,郭仁忠,等. 倾斜摄影三维模型Unreal Engine 4渲染的数据转换方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2023,48(4):514-524

[14] 吴敏亚,陶岚,韩剑姿. 广州地下市政基础设施一张图可视化表达浅析[J]. 地理空间信息,2024,22(4):85-87

[15] 汪永强,曹晓辉,胡佳宁. 海量倾斜实景三维数据管理系统设计与实现[J]. 测绘与空间地理信息,2023,46(增刊1):112-115

[16] 李伟,姚文举,王道顺,等. 三维建模技术在河流自然资源确权登记中的应用[J]. 地理空间信息,2023,21(11):59-62