

引文格式: 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, 65.
(XU Aigong, DU Jian, SUI Xin, et al. Application of zero velocity update and integrity monitoring in UWB/MEMS IMU combination [J].
Science of Surveying and Mapping, 2022, 47(12): 1-7, 65.)DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2022.12.001.

零速修正与完备监测在 UWB/ MEMS IMU 组合中的应用

徐爱功, 杜 健, 隋 心, 史政旭, 房 穹

(辽宁工程技术大学 测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要: 针对超宽带(UWB)在室内定位过程中受非视距环境影响易出现粗差以及微机电系统(MEMS)惯性测量单元(IMU)定位误差随时间快速发散的问题, 该文提出了采用自适应卡尔曼滤波的 UWB/MEMS IMU 组合的室内定位方法, 并通过自主完好性监测算法对 UWB 测距异常值进行剔除, 将零速修正算法加入到组合定位系统中, 抑制在 UWB 数据中断情况下 MEMS IMU 误差的发散。实验结果表明, 在 UWB 存在中断的复杂室内环境下, UWB/MEMS IMU 组合定位的平面定位精度在 0.2 m 以内, 自主完好性监测与零速修正能有效地提高组合定位系统的精度与稳定性。

关键词: UWB/MEMS IMU 组合; 室内定位; 自主完好性监测; 零速修正; 自适应卡尔曼滤波

【中图分类号】P228

【文献标志码】A

【文章编号】1009-2307(2022)12-0001-07

Application of zero velocity update and integrity monitoring in UWB/MEMS IMU combination

XU Aigong, DU Jian, SUI Xin, SHI Zhengxu, FANG Qiong

(School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: Aiming at the problem that ultra-wide band (UWB) was prone to gross error in indoor positioning due to the influence of non-line-of-sight environment and the micro-electro-mechanical system (MEMS) inertial measurement unit (IMU) location error diverges with time, a UWB/MEMS IMU combined indoor location method using adaptive Kalman filter was proposed, and the UWB ranging outliers were eliminated by the autonomous integrity monitoring algorithm, and the zero-velocity correction algorithm was added into the combined location system to suppress the error of MEMS IMU in the case of UWB data interruption. The experimental results showed that the planar positioning accuracy of UWB/MEMS IMU combination was less than 0.2 m in complex indoor environment with UWB interruption, which effectively improved the positioning accuracy and stability compared with MEMS IMU or UWB alone.

Keywords: UWB/MEMS IMU combination; indoor positioning; autonomous integrity monitoring; ZUPT; AKF

0 引言

随着科技的进步, 在自动驾驶、移动测量、

基于位置服务(location based services, LBS)等领域对定位的精度、可靠性要求不断提高, 定位的区域也逐渐由室外拓展到室内。目前已有多种室内

作者简介: 徐爱功(1963—), 男, 山东日照人, 教授, 博士, 主要研究方向为全球卫星定位系统、地理信息系统及智能交通系统的集成与应用。

E-mail: xu_ag@126.com

收稿日期: 2021-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(42074012); 辽宁省重点研发计划项目(2020JH2/10100044); 辽宁省“兴辽英才计划”资助项目(XLYC2002101, XLYC2008034); 辽宁省自然科学基金计划指导项目(2019-ZD-0051); 辽宁省教育厅基础科研项目(LJ2020JCL016)

通信作者: 杜健 硕士研究生 E-mail: dujian5698@163.com

定位解决方案,包括视觉定位、激光雷达、磁场匹配、蓝牙、WiFi、超宽带(ultra-wide band, UWB)及微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU),它们都有各自的优缺点及应用场景^[1]。在众多室内定位传感器中,UWB 的优势在于具有高分辨率且抗多路径效果好,这使得在视距(line-of-sight, LOS)条件下,可获得较好的测距精度,同时还具有功耗低、安全性高等优点。UWB 定位在实际应用中经常存在非视距(non-line-of-sight, NLOS)环境,易造成其测距精度降低甚至出现粗差,成为限制 UWB 定位系统性能的主要因素^[2-3]。相比 UWB 系统,MEMS IMU 的定位精度与自身惯性器件精度紧密相关,具有自主性强、不受外界干扰的优点,但其面临定位误差随时间发散、难以长时间独立导航的困难^[4-5]。基于 UWB 和 MEMS IMU 各自的优缺点,UWB/MEMS IMU 组合定位成为较好的室内定位解决方案,其可以充分发挥二者的优势,解决 UWB 系统可能由于外界干扰无法有效定位以及 MEMS IMU 长期定位精度差的问题,使定位系统的连续性、稳定性和可靠性得到增强。

目前,已有很多研究团队针对 UWB/MEMS IMU 组合定位展开研究^[6-7]。文献[8]采用到达角度(angle of arrival, AOA)/到达时间差(time difference of arrival, TDOA)混合定位算法来避免 TOA 严格的时钟同步问题,并结合非完整约束设计 UWB/MEMS IMU 组合定位算法,有效地提高了精度与稳定性。文献[9]提出了一种采用联邦扩展卡尔曼滤波(federated extended Kalman filter, FEKF)的分布式惯性导航系统(inertial navigation system, INS)与 UWB 的紧组合定位方法,将 FEKF 应用到 UWB 无线通信信道中,相比集中式滤波器平均位置误差可降低 10.34% 左右。文献[10]通过非线性扩展卡尔曼滤波算法将 UWB 与行人航位推算(pedestrian dead reckoning, PDR)方法相结合,可提高在室内复杂环境下定位系统的鲁棒性和定位精度。上述研究主要从 UWB 定位算法、UWB 与 MEMS IMU 的组合方式以及组合算法模型的角度出发,缺少对复杂环境下 UWB 数据质量的控制以及对缺失 UWB 定位结果时 MEMS IMU 发散的抑制,因此,本文提出 UWB 系统自主完好性监测(receiver autonomous integrity monitoring, RAIM)算法来实现对 UWB 数据质量的控制,通过零速修正(zero velocity update, ZUPT)算法来抑制 MEMS IMU 在缺失 UWB 定位

结果时误差的发散,提高了组合定位系统的精度与稳定性。

1 UWB 系统自主完好性监测

1.1 UWB 定位模式

UWB 主要利用超宽带无载波通信实现基准站与流动站间的通信,通过测量流动站与基准站之间的距离值来解算流动站的空间坐标,目前常用的 UWB 定位方法有基于接收信号强度法(received signal strength indication, RSSI)、基于到达角度(angle of arrival, AOA)法、基于到达时间(time of arrival, TOA)法、基于到达时间差(time difference of arrival, TDOA)法和基于信号双向传播时间(tow-way time of flight, TW-TOF)等方法^[11],本文选用 TW-TOF 模式进行 UWB 定位,该方法具有所需基站较少,无须基站间严格的时间同步等优点,可以很大程度上节约设备成本。TW-TOF 测距原理如图 1 所示。

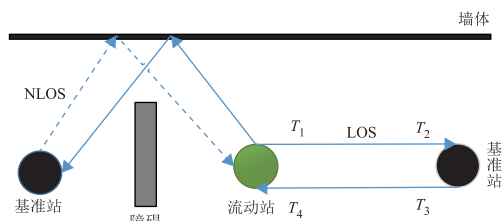


图 1 TW-TOF 测距原理

Fig. 1 TW-TOF Ranging Principle

TW-TOF 模式下的测距模型见式(1)。

$$d = \frac{c}{2} [(T_4 - T_1) - (T_3 - T_2)] + n \quad (1)$$

式中: T_1 为流动站发出脉冲时刻;基准站在 T_2 时接收并在 T_3 时发射出响应脉冲; T_4 时流动站接收到响应脉冲完成 1 次测距; d 为流动站和基准站间距离; c 为光速; $T_4 - T_1$ 为信号在流动站和基准站之间的往返时间差; $T_3 - T_2$ 为基准站接收 UWB 信号到发出响应信号的标准时间偏差; n 为量测噪声。

1.2 UWB 系统自主完好性监测模型

在复杂的室内环境下,通常存在较多的遮挡与多路径的影响,这使得在 TW-TOF 模式下的 UWB 测距值容易出现粗差,如果将存在粗差的测距值进行 UWB 定位解算,将导致错误的 UWB 定位结果参与组合导航解算,会使整个组合定位系统精度降低。针对这一问题,本文提出了采用自主完好性监测算法^[12]对 UWB 测距值的数据质量进行监测,以此来保障 UWB 定位结果的可靠性。自主完好性监测算法首先通过全局检验来判断 UWB 的当前历元是否存在故障,若存在故障则进行故障定位,找到故障历元内具体某个存在故障

的测距值, 即认为该测距值为 UWB 测距粗差, 下面对算法具体流程进行说明。

首先进行全局检验, 由最小二乘定位原理可求解位置 $\hat{\mathbf{X}}$, 见式(2)。

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{H}_1^T \mathbf{W} \mathbf{H}_1)^{-1} \mathbf{H}_1^T \mathbf{W} \mathbf{y} \quad (2)$$

式中: \mathbf{W} 为权阵; \mathbf{H}_1 为量测矩阵; \mathbf{y} 为由 n 个 UWB 测距值构成的观测向量。则根据最小二乘位置解计算得到 UWB 测距值残差向量 \mathbf{v} , 见式(3)。

$$\mathbf{v} = \mathbf{y} - \mathbf{H}_1 \hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{W}^{-1} - \mathbf{H}_1 (\mathbf{H}_1^T \mathbf{W} \mathbf{H}_1)^{-1} \mathbf{H}_1^T \mathbf{W}) \mathbf{y} = \mathbf{A} \mathbf{y} \quad (3)$$

式中: \mathbf{A} 矩阵的协因数矩阵 $\mathbf{Q} = \mathbf{W}^{-1} - \mathbf{H}_1 (\mathbf{H}_1^T \mathbf{W} \mathbf{H}_1)^{-1} \mathbf{H}_1^T$ 。残差平方和记为 S , 见式(4)。

$$S = \mathbf{v}^T \mathbf{v} \quad (4)$$

假设 UWB 系统的观测噪声服从正态分布, 则 S 服从自由度为 $n-2$ 的 χ^2 分布, n 为一个 UWB 历元内测距值的个数, 根据假设检验理论和 χ^2 分布概率密度函数, 给定误警概率 P_{FA} , 可求得卡方检验临界值 t_{LS} , 见式(5)。

$$P_r(S > t_{LS}) = \int_{t_{LS}}^{\infty} f_{\chi^2(n-2)}(x) dx = P_{FA} \quad (5)$$

将卡方检验临界值 t_{LS} 代入式 $T_{1LS} = \sqrt{t_{LS}/(n-2)}$ 计算得到检验门限 T_{1LS} 。根据残差平方 S 和测距值个数 n 计算检测统计量 $T_{LS} = \sqrt{S/(n-2)}$ 。若 $T_{LS} > T_{1LS}$ 则认为当前 UWB 历元存在故障。

对存在故障的历元进行故障定位, 目的是找出存在故障的历元内有问题的测距值, 故障定位流程与全局检验流程相似, 首先通过 UWB 测距值残差矢量 \mathbf{v} 与协因数矩阵 \mathbf{Q} 构建检验统计量, 见式(6)。

$$d_i = \frac{v_i}{\sqrt{Q_{ii}}} \quad (6)$$

式中: d_i 为第 i 个测距值的检验统计量; v_i 为第 i 个测距值残差; Q_{ii} 为矩阵 \mathbf{Q} 的第 i 行第 i 列; $d_i \sim N(0,1)$, 根据给定的误警概率 P_{FA} 以及历元内 UWB 测距值个数 n 计算检验阈值 $T_{LS\epsilon}$, 见式(7)。

$$P_r(d_i > T_{LS\epsilon}) = \int_{T_{LS\epsilon}}^{\infty} f_{N(0,1)}(x) dx = P_{FA}/n \quad (7)$$

若 $d_i > T_{LS\epsilon}$ 则认为第 i 个测距值存在故障, 舍弃历元内该 UWB 测距值并将剩余无故障测距值参与定位解算。

2 UWB/MEMS IMU 组合定位算法模型

2.1 UWB/MEMS IMU 状态方程与量测方程

通过 UWB 系统自主完好性监测剔除粗差后, 将得到的 UWB 定位结果与 MEMS IMU 推算的位置以松组合方式进行组合定位, 采用 15 维状态向

量和 3 维量测向量设计卡尔曼(Kalman)滤波模型, 此模型的优点在于松组合易于实现且稳定性好, 状态向量维数低且计算量小。状态向量选取 MEMS IMU 的位置误差 $\delta \mathbf{r}^n$ 、速度误差 $\delta \mathbf{v}^n$ 、失准角 $\boldsymbol{\phi}$ 、陀螺零偏 \mathbf{b}_g^b 、加表零偏 \mathbf{b}_a^b , 见式(8)。

$$\mathbf{X} = [\delta \mathbf{r}^{nT} \quad \delta \mathbf{v}^{nT} \quad \boldsymbol{\phi}^T \quad \mathbf{b}_g^{bT} \quad \mathbf{b}_a^{bT}]^T \quad (8)$$

由于 MEMS 陀螺仪精度低, 不敏感地球自转, 可对其误差微分方程大幅简化, 捷联惯导完整详细的误差微分方程可参考文献 [13], 简化结果见式(9)。

$$\left. \begin{aligned} \dot{\delta \mathbf{r}}^n &= \delta \mathbf{v}^n \\ \dot{\delta \mathbf{v}}^n &= \mathbf{C}_b^n \mathbf{f}^b \times \boldsymbol{\phi} + \mathbf{C}_b^n (\mathbf{b}_a^b + \mathbf{w}_{ab}) \\ \dot{\boldsymbol{\phi}} &= -\mathbf{C}_b^n (\mathbf{b}_g^b + \mathbf{w}_{gb}) \\ \dot{\mathbf{b}}_g &= \mathbf{0} \\ \dot{\mathbf{b}}_a &= \mathbf{0} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: \mathbf{C}_b^n 为姿态矩阵; \mathbf{f}^b 为比力; \mathbf{w}_{gb} 与 \mathbf{w}_{ab} 分别为陀螺测量白噪声和加速度计测量白噪声, 结合误差微分方程可得系统状态转移矩阵, 见式(10)。

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{C}_b^n \mathbf{f}^b \times & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{C}_b^n \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & -\mathbf{C}_b^n & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (10)$$

量测方程采用位置量测, 根据 MEMS IMU 推算 UWB 的位置 \mathbf{r}_{IMU}^n 与 UWB 解算的位置 \mathbf{r}_{UWB}^n 之差构建量测向量, 见式(11)。

$$\mathbf{Z} = \mathbf{r}_{IMU}^n - \mathbf{C}_q^n \mathbf{r}_{UWB}^n \quad (11)$$

式中: \mathbf{C}_q^n 为导航系到独立切平面坐标系的过渡矩阵, 量测矩阵见式(12)。

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & (\mathbf{C}_q^n \mathbf{l}^b \times) & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: \mathbf{l}^b 为 MEMS IMU 与 UWB 之间的杆臂向量。

2.2 自适应 Kalman 滤波

2.2.1 量测自适应 Kalman 滤波

在使用标准 Kalman 滤波算法时, 通常将量测噪声方差阵 \mathbf{R}_k 设为常值, 但由于 UWB 在室内定位过程中信号受环境影响较大, 方差阵 \mathbf{R}_k 不能较准确地给出, 此时采用量测噪声方差阵自适应算法^[14], 进行状态估计的同时对 \mathbf{R}_k 进行计算, 对提高系统稳定性有一定帮助, \mathbf{R}_k 的计算过程见式(13)。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{X}_k &= \boldsymbol{\Phi}_{k/k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \boldsymbol{\Gamma}_{k-1} \mathbf{W}_{k-1} \\ \mathbf{Z}_k &= \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式(13)为标准 Kalman 滤波模型的状态方程与量测方程, $\boldsymbol{\Phi}_{k/k-1}$ 和 $\boldsymbol{\Gamma}_{k-1}$ 为离散化的系统状态转移矩阵和系统噪声分配矩阵; \mathbf{W}_{k-1} 和 \mathbf{V}_k 为系统噪声

和量测噪声, 则新息的表达式(14)。

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{Z}}_{k/k-1} &= \mathbf{Z}_k - \hat{\mathbf{Z}}_{k/k-1} = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k - \\ &\quad \mathbf{H}_k \mathbf{X}_{k/k-1} = \mathbf{H}_k \tilde{\mathbf{X}}_{k/k-1} + \mathbf{V}_k\end{aligned}\quad (14)$$

对式(14)两边同时求方差并移项, 得到量测噪声方差阵的表达式(15)。

$$\mathbf{R}_k = E[\tilde{\mathbf{Z}}_{k/k-1} \tilde{\mathbf{Z}}_{k/k-1}^T] - \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T \quad (15)$$

再以时间平均代替集总平均, 得到自适应算法中 $\hat{\mathbf{R}}_k$ 矩阵的最终表达, 见式(16)、式(17)。

$$\hat{\mathbf{R}}_k = (1 - \beta_k) \hat{\mathbf{R}}_{k-1} + \beta_k (\tilde{\mathbf{Z}}_{k/k-1} \tilde{\mathbf{Z}}_{k/k-1}^T - \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T) \quad (16)$$

$$\beta_k = \frac{\beta_{k-1}}{\beta_{k-1} + b} \quad (17)$$

式中: β_k 的初值为 1, $0 < b < 1$ 为渐消因子。在实际应用中, 本文将 b 设为 0.9, 随着递推次数 k 的不断增大, $\beta_k \approx 1 - b = 0.1$ 将不会随着时间的推移而继续减小, 从而使新的 UWB 量测信息始终占有 0.1 的权重, 让系统始终保持一定的自适应能力。

2.2.2 量测更新序贯处理

实际应用中, 通常将 $\hat{\mathbf{R}}_k$ 设置为对角阵, 文中的 $\hat{\mathbf{R}}_k$ 为 3 维对角阵, 对角线元素反映了 UWB 位置观测的误差水平。若 UWB 实际的量测噪声与理论值偏小或者初始噪声设置过大, 都容易使 $\tilde{\mathbf{Z}}_{k/k-1} \tilde{\mathbf{Z}}_{k/k-1}^T - \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T < 0$ 而导致 $\hat{\mathbf{R}}_k$ 失去正定, 导致滤波无法继续进行, 因此采用序贯处理的方法对 $\hat{\mathbf{R}}_k$ 的每个对角线元素进行限制, 既有效降低了计算量, 又能保持 $\hat{\mathbf{R}}_k$ 为正定矩阵, 将量测方程写为式(18)的标量形式。

$$\mathbf{Z}_k^{(i)} = \mathbf{H}_k^{(i)} \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k^{(i)} \quad (18)$$

式中: $\mathbf{Z}_k^{(i)}$ 为量测向量中的第 i 个元素; $\mathbf{H}_k^{(i)}$ 和 $\mathbf{V}_k^{(i)}$ 分别为量测矩阵和量测噪声向量中相应位置上的元素。将 $\mathbf{Z}_k^{(i)}$ 代入式(15)得到 \mathbf{R}_k 的第 i 个对角线元素, 见式(19)。

$$\rho_k^{(i)} = (\tilde{\mathbf{Z}}_{k/k-1}^{(i)})^2 - \mathbf{H}_k^{(i)} \mathbf{P}_{k/k-1}^{(i)} (\mathbf{H}_k^{(i)})^T \quad (19)$$

根据 UWB 系统的位置观测精度水平, 对计算得到的 $\rho_k^{(i)}$ 设置最大值与最小值, 将 $\rho_k^{(i)}$ 与最大最小值进行对比并代入式(20), 使 $\hat{\mathbf{R}}_k$ 的每个对角线元素限制在 $[\mathbf{R}_{\min}^{(i)}, \mathbf{R}_{\max}^{(i)}]$, 从而保持正定, $\hat{\mathbf{R}}_k^{(i)}$ 的最终计算见式(20)。

$$\hat{\mathbf{R}}_k^{(i)} = \begin{cases} (1 - \beta_k) \hat{\mathbf{R}}_{k-1}^{(i)} + \beta_k \mathbf{R}_{\min}^{(i)}, & \rho_k^{(i)} < \mathbf{R}_{\min}^{(i)} \\ \mathbf{R}_{\max}^{(i)}, & \rho_k^{(i)} > \mathbf{R}_{\max}^{(i)} \\ (1 - \beta_k) \hat{\mathbf{R}}_{k-1}^{(i)} + \beta_k \rho_k^{(i)}, & \text{others} \end{cases} \quad (20)$$

2.3 零速修正算法

传统零速修正算法中当零速检测为零速条件时, 每有一次惯导输出就进行一次零速修正计算,

这更适用于行人导航且计算量大的情况。另外, MEMS IMU 精度低、零偏重复性大, 使用不同的零速检测方法的阈值选取也较为困难, 需根据零速状态的判断原则和大量的实验进行选取^[15-16]。本文针对轮式移动载体提出以 UWB 更新时间间隔为零速检测时长, 在 UWB 更新时刻处进行零速修正。当检测到零速且同时存在 UWB 观测值时, 按式(22)计算, 当检测到零速且缺失 UWB 观测值时, 按式(23)计算。此方案只需采用 MEMS IMU 初始静止十几秒的陀螺输出均值作为检测阈值即可, 由于检测阈值的设置较为粗略以及受传感器噪声的影响, 会出现漏判、误判的情况。针对这一问题, 可设置一个计数阈值, 将一个零速检测区间内判定为零速的次数总和与计数阈值进行比较, 大于计数阈值即视为零速。由于误判数量毕竟为少数, 计数阈值可根据 UWB 与 MEMS IMU 的更新频率大致设置即可。此算法的优势在于对漏判、误判有较高的容错率, 实用性较强, 虽然增大检测区间使系统机动性略受一些限制, 但可以节省大量零速阈值测试的工作量, 采用的角速度阈值检测见式(21)。

$$\mathbf{A}_\omega = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{k=i}^{i+N-1} (\|\boldsymbol{\omega}_k\|)^2 < \text{threshold}_\omega, & 1 \\ \text{others}, & 0 \end{cases} \quad (21)$$

当存在 UWB 观测值时, 零速修正 Kalman 滤波观测方程见式(22)。

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{\text{IMU}}^n - \mathbf{C}_r^n \mathbf{r}_{\text{WB}}^n \\ \mathbf{v}_{\text{IMU}}^n - \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & (\mathbf{C}_r^n \mathbf{I}^b \times) & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \mathbf{r}^n \\ \delta \mathbf{v}^n \\ \boldsymbol{\varphi} \\ \mathbf{b}_g \\ \mathbf{b}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{w}_r^n \\ \mathbf{w}_v^n \end{bmatrix} \quad (22)$$

式中: \mathbf{w}_r^n 和 \mathbf{w}_v^n 分别表示位置观测噪声和速度观测噪声, 当缺失 UWB 观测值时, 零速修正 Kalman 滤波观测方程见式(23)。

$$\mathbf{Z} = [\mathbf{v}_{\text{IMU}}^n - \mathbf{0}] = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \mathbf{r}^n \\ \delta \mathbf{v}^n \\ \boldsymbol{\varphi} \\ \mathbf{b}_g \\ \mathbf{b}_a \end{bmatrix} + [\mathbf{w}_v^n] \quad (23)$$

UWB/MEMS IMU 组合定位算法流程如图 2 所示。

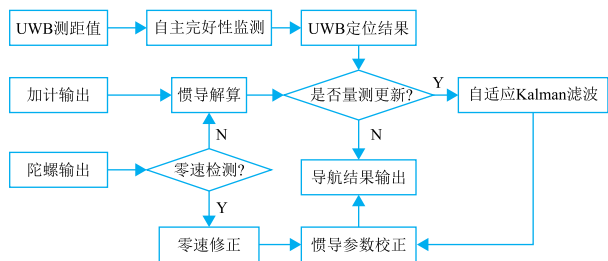


图 2 UWB/MEMS IMU 组合定位流程

Fig. 2 UWB/MEMS IMU Integrated Positioning Process

3 实测实验及分析

为了分析 UWB/MEMS IMU 组合算法的性能与定位精度, 通过搭载 MEMS IMU 及 UWB 的轮式小车进行室内定位实验, 小车同时搭载陀螺精度为 0.1 deg/h 的高精度光纤惯导, 将其与 UWB 组合定位结果作为参考值。MEMS IMU 中的陀螺精度为 10 deg/h , UWB 在良好视距环境下测距精度为 15 cm 。实验过程中惯导采样频率为 200 Hz , UWB 为 2 Hz 。在地下停车场选择长约 35 m 、宽 30 m 范围内进行实验, 将 UWB 基准站模块置于三脚架上, 共设立 5 个基准站, 因地下停车场存在较多的遮挡, 可使小车在遮挡物间穿插行进, 来构造复杂的室内运动情景。实验全程约 3 min , 其中 $0 \sim 310 \text{ s}$ 为小车静止时段, 实验小车移动定位时段为 $310 \sim 435 \text{ s}$ 。图 3 为室内定位实验场景, 图 4 为 UWB/MEMS IMU 组合定位小车。

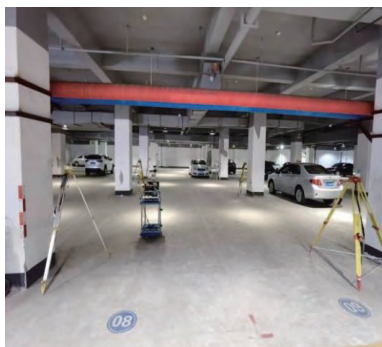


图 3 实验场景

Fig. 3 The Test Scene

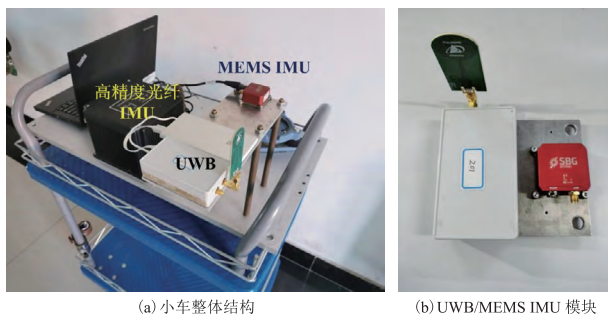


图 4 UWB/MEMS IMU 组合定位小车

Fig. 4 UWB/MEMS IMU Integrated Positioning Cart

小车全程运行轨迹以及 UWB 基准站布设情况如图 5 所示。

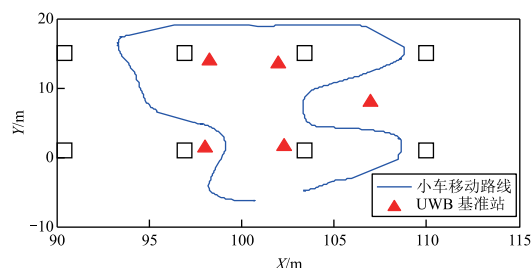


图 5 实验路径

Fig. 5 The Test Path

图 5 中 8 个黑色正方形为地下停车场中承重柱所在位置, 任取小车行进过程中的两个 UWB 基站的测距值为例, 对 RAIM 算法探测到的测距值粗差进行标记, 图 6 为两个基站的故障定位结果。

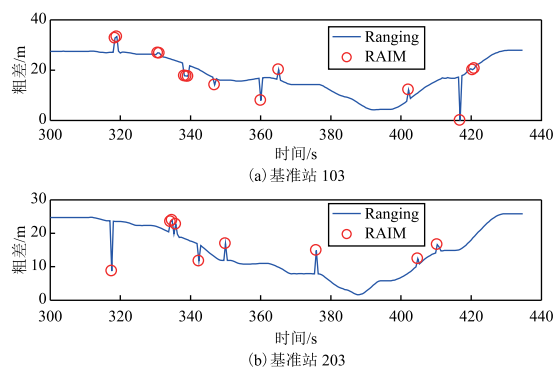


图 6 RAIM 结果

Fig. 6 RAIM Result

图 6 中基准站 103 在 416.8 s 处存在测距值丢数, 丢失的测距值记为 0, 因为 0 测距值无法参与 UWB 定位与 RAIM 计算, 本文将其视为粗差并标记。将故障定位探测到的测距值与参考测距值对比, 其中, 较大的粗差在 15 m 左右, 较小的粗差在 $0.5 \sim 2 \text{ m}$ 。结果表明, RAIM 算法对数值较小的粗差也有较好的探测能力。

当同时存在零速和 UWB 定位结果时, 零速修正的误差抑制效果不明显, 为验证零速修正算法的有效性, 人为将 UWB 中断, 并在中断区间随机将小车停止约 1 s 后继续行进, 本次实验共进行 4 次 UWB 中断, 每次中断时间约 10 s , UWB 中断区间设置为 $329 \sim 343 \text{ s}$ 、 $353 \sim 360 \text{ s}$ 、 $370 \sim 390 \text{ s}$ 、 $395 \sim 408 \text{ s}$ 。将高精度光纤惯导与 UWB 定位结果的组合定位结果作为参考值 (Reference), 为保证参考值的较高精度, 计算过程不对 UWB 进行中断处理, 并通过事后反向平滑提高精度。

图 7 为 UWB/MEMS IMU 组合定位结果, 图 7(a) 为 UWB/MEMS IMU 组合、UWB 系统和参考系

统的全程定位结果，图 7(b)为局部轨迹放大效果并增加了不带有零速修正算法的 UWB/MEMS IMU 组合定位结果。

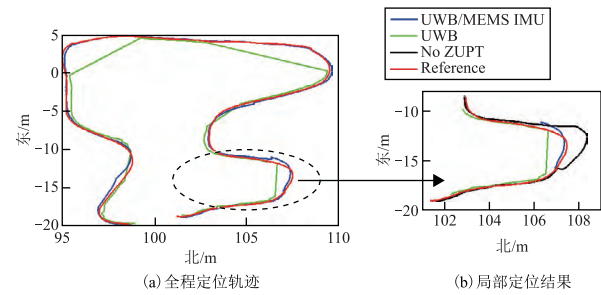


图 7 UWB/MEMS IMU 定位结果
Fig. 7 UWB/MEMS IMU Positioning Result

图 7 中的两幅小图转弯处 UWB 轨迹呈直线部分为缺失 UWB 测距值的 UWB 中断区间，由图 7(b)可以看出，在 UWB 缺失的时段内，未添加零速修正算法的方案，其定位轨迹明显偏离参考轨迹，其原因是没有零速修正对 MEMS IMU 的误差进行抑制并且 MEMS IMU 精度较低，导致出现误差累积较快而使定位结果变差，直到有 UWB 数据时导航参数才得到修正。而增加零速修正算法的方案，定位结果在每次 UWB 中断条件下都能有较好的定位精度。通过将 UWB/MEMS IMU 组合解算得到的各个导航参数与对应的参考值做差进行导航精度分析，将差值绘制成误差曲线，如图 8~图 10 所示，选取“北-东-地(N-E-D)”为导航解算坐标系，并分别计算各导航误差的均值(Mean)、均方根(root-mean-square, RMS)和最大偏差(Max)，如表 1 所示。

由位置误差曲线图可以看出，在 UWB 中断区间内误差会有明显增大趋势，这是因为在每一个 UWB 中断区间内只做了一次随机停止，这导致在零速修正时间点之后的 MEMS IMU 误差仍会有发散的趋势，以第一个中断区间(329~343 s)为例，在 329~338 s 内误差波动较小，说明零速修正起到抑制效果，但在 338~343 s 零速修正之后，MEMS IMU 单独解算过程中定位误差逐渐增大，直到 343 s 获得 UWB 定位结果时误差得到明显抑制。

表 1 均值、均方根和最大偏差统计

Tab. 1 Mean, Root Mean Square and Max Deviation Statistics

	位置误差/m		速度误差/(m/s)			姿态误差/(°)			
	北向	东向	垂向	北向	东向	垂向	横滚	俯仰	航向
Mean	0.176	0.139	0.242	0.036	0.032	0.027	0.171	0.115	2.097
RMS	0.184	0.170	0.267	0.050	0.043	0.033	0.181	0.122	2.574
Max	0.619	0.475	0.565	0.207	0.209	0.224	0.419	0.201	5.819

由表 1 可知，位置误差最大偏差不超过 0.7 m，根据均方根统计值估计平面定位精度不超过 0.2 m。

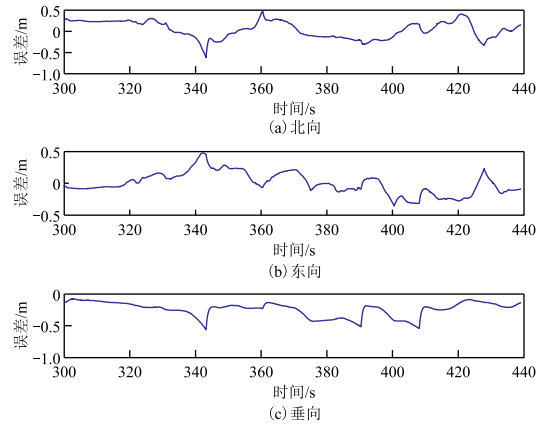


图 8 位置误差曲线
Fig. 8 Position Error Curve

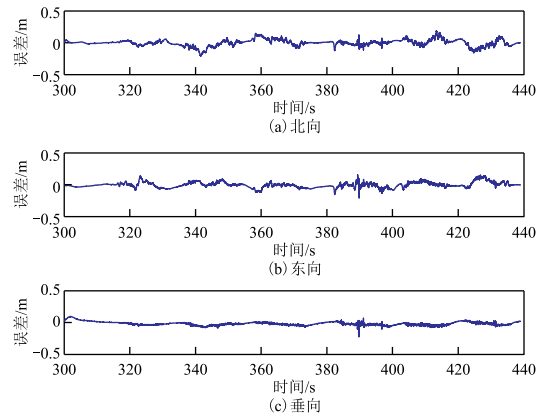


图 9 速度误差曲线
Fig. 9 Velocity Error Curve

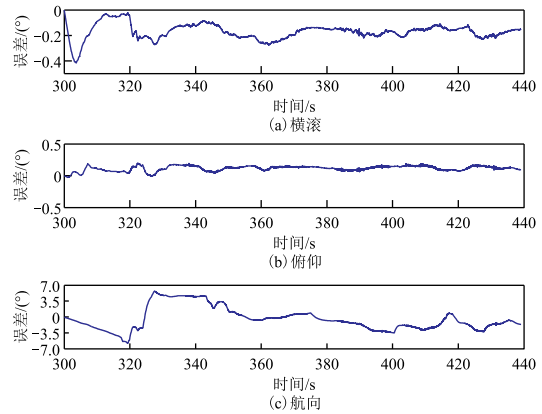


图 10 姿态误差曲线
Fig. 10 Attitude Error Curve

图 11(a)为 3 种不同方案平面定位结果与参考值的差值得到的误差曲线，3 种方案中均通过 RAIM 算

法将 UWB 粗差剔除, UWB 误差曲线不连续部分为 UWB 中断区间, 不进行误差曲线绘制, 图 11(b)与图 11(c)为北向和东向分量形式。

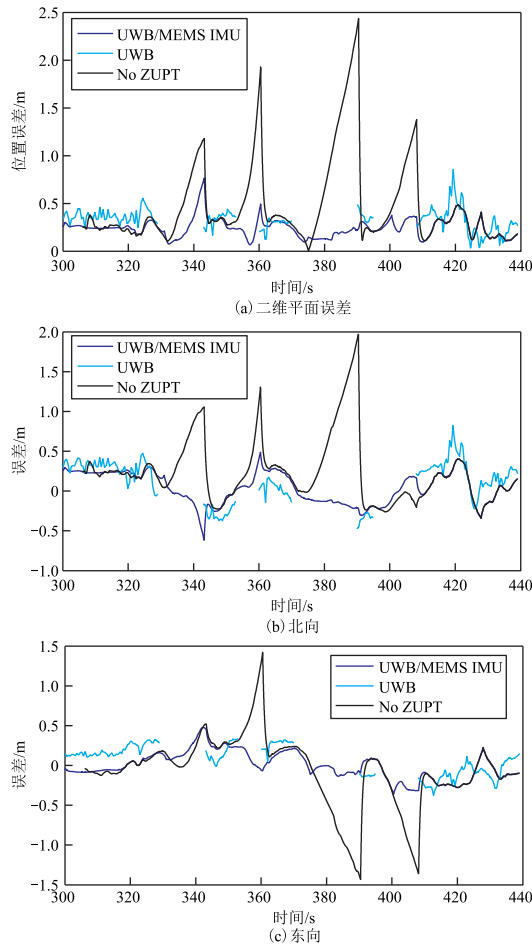


图 11 平面位置误差

Fig. 11 Plan Position Error

综上所述, 不采用零速修正算法的方案其定位误差在 4 处 UWB 中断区间存在明显的发散, 本文提出的组合定位方法除在 UWB 中断区间误差存在波动, 总体而言定位结果比单独 UWB 定位更稳定。通过室内定位实验结果与参考值对比分析, 以均方根误差为精度评定指标, 平面上两个方向的位置误差均在 0.2 m 以内, 速度精度在 0.05 m/s 以内, 横滚角、俯仰角的精度均在 0.2° 以内, 航向角精度在 3° 以内, 整个室内定位过程中各个导航参数的最大偏差与均方根误差相差较小, 表明该组合定位系统稳定性较好。

4 结束语

本文将 MEMS IMU 与 UWB 组合进行室内导航定位, 设计了 15 维量测自适应 Kalman 滤波组合算法, 通过 UWB 系统自主完好性监测对 UWB 测距粗差进行剔除, 从而保证 UWB 定位的准确

性, 并结合零速修正算法来解决 MEMS IMU 独立导航发散快的问题。移动小车室内定位实验结果表明, 在存在非视距误差和缺失 UWB 观测值的复杂室内环境下, 本文设计的 UWB/MEMS IMU 组合定位方法平面定位精度在 0.2 m 以内, 可以较好地完成室内定位的任务。由于实验所用移动小车采用万向轮运动, 这导致非完整约束并不适用, 并且由于 MEMS IMU 发散较快, 若在长时间缺失 UWB 的情况下, 依赖零速修正将大大限制小车的机动性。若遇到遮挡较严重的区域, 稀少的 UWB 测距值使 UWB 的定位与质量控制难度大幅提升。针对上述问题如何增加合适的约束算法并结合紧组合方案将是下一步的研究方向。

参考文献

- [1] 裴凌, 刘东辉, 钱久超. 室内定位技术与应用综述[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(3): 1-10. (PEI Ling, LIU Donghui, QIAN Jiuchao. A survey of indoor positioning technology and application[J]. Navigation Positioning and Timing, 2017, 4(3): 1-10.)
- [2] STEFANO M, WESLEY M, GIFFORDI, et al. NLOS identification and mitigation for localization based on UWB experimental data[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010, 28(7): 1026-1035.
- [3] 王长强, 徐爱功, 隋心. UWB 测距的 NLOS 误差削弱方法[J]. 导航定位学报, 2017, 5(3): 24-27, 32. (WANG Changqiang, XU Aigong, SUI Xin. A method of NLOS error inhibition for UWB ranging [J]. Journal of Navigation and Positioning, 2017, 5(3): 24-27, 32.)
- [4] 李荣冰, 刘建业, 曾庆化, 等. 基于 MEMS 技术的微型惯性导航系统的发展现状[J]. 中国惯性技术学报, 2004(6): 90-96. (LI Rongbing, LIU Jianye, ZENG Qinghua, et al. Evolution of MEMS based micro inertial navigation systems [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2004(6): 90-96.)
- [5] 李博文, 姚丹亚. 低成本车载 MEMS 惯导导航定位方法[J]. 中国惯性技术学报, 2014, 22(6): 719-723. (LI Bowen, YAO Danya. Low-cost MEMS IMU navigation positioning method for land vehicle [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2014, 22(6): 719-723.)
- [6] 刘韬, 徐爱功, 隋心. 超宽带与惯性导航组合的室内导航定位[J]. 测绘科学, 2016, 41(12): 162-166. (LIU Tao, XU Aigong, SUI Xin. Application of UWB/INS combination in indoor navigation and positioning [J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, 41(12): 162-166.)
- [7] WANG Changqiang, XU Aigong, KUANG Jian, et al. A high-accuracy indoor localization system and applications based on tightly coupled UWB/INS/floor map integration [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(16): 18166-18177.

(下转第 65 页)

- elimination[C]. Singapore: Springer, 2022.
- [19] DAI Wujiao, HUANG Dawei, CAI Changsheng. Multipath mitigation via component analysis methods for GPS dynamic deformation monitoring[J]. GPS Solutions, 2014, 18(3): 417-428.
- [20] YEH J R, SHIEH J S, HUANG N E. Complementary ensemble empirical mode decomposition: a novel noise enhanced data analysis method [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2010, 2(2): 135-156.
- [21] 贾瑞生, 赵同彬, 孙红梅, 等. 基于经验模态分解及独立成分分析的微震信号降噪方法[J]. 地球物理学报, 2015, 58(3): 1013-1023. (JIA Ruisheng, ZHAO Tongbin, SUN Hongmei, et al. Micro-seismic signal denoising method based on empirical mode decomposition and independent component analysis[J]. Chinese Journal of Geophysics(in Chinese), 2015, 58(3): 1013-1023.)
- [22] HUANG S, WANG X, LI C, et al. Data decomposition method combining permutation entropy and spectral substitution with ensemble empirical mode decomposition [J]. Journal of the International Measurement Confederation, 2019, 139: 438-453.
- [23] 南阳, 张双成, 戴凯阳, 等. 基于 TRACK 模块的 GPS 静态定位精度分析[J]. 工程勘察, 2016, 44(4): 51-54+62. (NAN Yang, ZHANG Suangcheng, DAI Kaiyang, et al. Analysis of GPS static positioning precision based on the TRACK software[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2016, 44(4): 51-54+62.)
- [24] 陈孜, 黄观文, 白正伟, 等. 基于低成本毫米级 GNSS 技术的膨胀土边坡现场监测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 214-224. (CHEN Zi, HUANG Guanwen, BAI Zhengwei, et al. Field monitoring of expansive soil slope based on low-cost millimeter sized GNSS technology[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(1): 214-224.)
- [25] 许强, 曾裕平, 钱江澎, 等. 一种改进的切线角及对应的滑坡预警判据[J]. 地质通报, 2009, 28(4): 501-505. (XU Qiang, ZENG Yuping, QIAN Jiangpeng, et al. Study on a improved tangential angle and the corresponding landslide pre-warning criteria[J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(4): 501-505.)

(责任编辑: 路素军)

(上接第7页)

- [8] 郁嘉宇, 赵忠, 李凡, 等. 基于 MEMS/UWB 组合的室内定位方法[J]. 导航定位与授时, 2018, 5(6): 73-81. (YU Jiayu, ZHAO Zhong, LI Fan, et al. Indoor positioning method based on MEMS/UWB combination [J]. Navigation Positioning and Timing, 2018, 5(6): 73-81.)
- [9] 徐元, 陈熙源, 崔冰波, 等. 一种采用联邦 EKF 的分布式 INS/UWB 人员无偏紧组合定位方法(英文)[J]. 中国惯性技术学报, 2017, 25(1): 81-85. (XU Yuan, CHEN Xiyuan, CUI Bingbo, et al. Distributed unbiased tightly-coupled INS/UWB human localization via federated EKF[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2017, 25(1): 81-85.)
- [10] 仪玉杰, 黄智刚, 苏雨. 一种 UWB 与 PDR 融合的行人室内定位方法[J]. 导航定位学报, 2019, 7(3): 38-43, 50. (YI Yujie, HUANG Zhigang, SU Yu. A method of pedestrian indoor positioning combined UWB with PDR [J]. Journal of Navigation and Positioning, 2019, 7(3): 38-43, 50.)
- [11] ALARIFI A, AL-SALMAN A, ALSALEH M, et al. Ultra wideband indoor positioning technologies: analysis and recent advances[J]. Sensors, 2016, 16(5): 707.
- [12] 葛君霞, 胡永辉, 侯雷, 等. 多星座组合 RAIM 算法研究[J]. 时间频率学报, 2014, 37(3): 181-189. (GE Junxia, HU Yonghui, HOU Lei, et al. Study of multi-constellation RAIM algorithm[J]. Journal of Time and Frequency, 2014, 37(3): 181-189.)
- [13] 秦永元. 惯性导航[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 356-361. (QIN Yongyuan. Inertial navigation [M]. Beijing: Science Press, 2006: 356-361.)
- [14] 严恭敏, 邓瑀. 传统组合导航中的实用 Kalman 滤波技术评述[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(2): 50-64. (YAN Gongmin, DENG Yu. Review on practical Kalman filtering techniques in traditional integrated navigation system[J]. Navigation Positioning and Timing, 2020, 7(2): 50-64.)
- [15] 高钟毓, 王进, 董景新, 等. 惯性测量系统零速修正的几种估计方法[J]. 中国惯性技术学报, 1995, (2): 24-29, 39. (GAO Zhongyu, WANG Jin, DONG Jingxin, et al. A comparison of ZUPT estimation methods for inertial survey systems[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 1995, (2): 24-29, 39.)
- [16] 张金亮, 秦永元, 梅春波. 基于 MEMS 惯性技术的鞋式个人导航系统[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(3): 253-256. (ZHANG Jinliang, QIN Yongyuan, MEI Chunbo. Shoe-mounted personal navigation system based on MEMS inertial technology[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(3): 253-256.)

(责任编辑: 程锦)