

# 复杂环境下基于 SINS/UWB 的 容错组合定位技术研究\*

杨海<sup>1</sup>, 李威<sup>2</sup>, 张禾<sup>1</sup>, 顾亚雄<sup>1</sup>, 范孟豹<sup>2</sup>

(1. 西南石油大学机电工程学院 成都 610500; 2. 中国矿业大学机电工程学院 徐州 221116)

**摘要:**针对超宽带无线定位系统在复杂环境中出现的定位数据丢失以及粗大误差等导致 SINS/UWB 组合系统定位精度下降的问题,提出了一种基于超宽带定位系统容错判断的组合定位方法。首先根据捷联惯导测量值进行基于中值滤波的运动载体静止状态检测,进而利用最小二乘法实现静止状态下捷联惯导量测偏差矫正;然后在建立 SINS/UWB 组合定位模型的基础上,引入决策树容错判断机制,对超宽带定位系统在复杂环境中由于信号干扰以及非视距导致的测量数据丢失以及粗大定位误差进行实时评估,进而应用卡尔曼滤波算法,实现容错组合定位系统的构建。在搭建的 SINS/UWB 组合定位实验平台中进行模型验证,结果表明容错组合定位系统能够有效检测出 UWB 定位系统出现的定位数据丢失以及粗大定位误差,并且在 UWB 粗大误差状态持续 6 s 的情况下,容错组合定位系统仍然能够保持较高的定位精度。

**关键词:**捷联惯导;超宽带定位;复杂环境;容错组合定位;卡尔曼滤波

**中图分类号:** TH-39 TP274+.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 530.10

## Fault tolerant integrated positioning system based on SINS/UWB in complex environment

Yang Hai<sup>1</sup>, Li Wei<sup>2</sup>, Zhang He<sup>1</sup>, Gu Yaxiong<sup>1</sup>, Fan Mengbao<sup>2</sup>

(1. School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Because of the data lost and gross error of ultra wideband (UWB) positioning system in a complex environment, the tracking accuracy of SINS/UWB integrated positioning system is seriously decreased. Aimed at above problem, this paper proposes an SINS/UWB integrated positioning method based on fault tolerant detection for UWB. Firstly, the stationary state detection model is built with measurement of SINS using the Median filter. Moreover, the measured bias of SINS can be calibrated with Least Square algorithm for the stationary state. Secondly, the fault tolerant judgement model is used to detect the UWB, which includes the measured data lost and gross position error caused by None Line of Sight and interference signal. The fault tolerant integrated positioning system can be achieved by Kalman Filter using detected positioning results of UWB. Finally, some experiments are conducted to evaluate the proposed method using experimental platform of SINS/UWB integrated positioning system. The experimental results show the fault tolerant integrated positioning system can effectively detect the data lost and gross error for UWB, meanwhile, the fault tolerant positioning system can guarantee high tracking accuracy for a duration time of 6s for UWB inaccurate state.

**Keywords:** strapdown inertial navigation system; ultra wideband (UWB) positioning system; complex environment; fault tolerant integrated positioning system; Kalman filter

## 0 引言

近年来随着定位导航技术的发展,针对定位技术的相关应用也越来越广泛<sup>[1-2]</sup>。然而针对煤矿井下、大型工厂以及室内等复杂封闭环境下的定位,由于卫星定位系统如 GPS、北斗等信号受到遮蔽,使得其无法进行定位,因此针对该类领域的定位一直是定位导航技术发展的一块短板<sup>[3-4]</sup>。捷联惯性导航系统(strapdown inertial navigation system, SINS)以其无源、自主定位的特点,对运动载体自身的加速度和角速度进行积分解算来获得被定位对象的姿态和位置信息,一般在短时间内具有较高的定位精度,且具有很全面的导航信息以及较高的数据更新频率,适合复杂封闭环境下的定位应用<sup>[5]</sup>。杨海等人<sup>[6]</sup>针对煤矿井下提出了一种基于捷联惯导的采煤机定位方法。然而由于惯性元件测量误差以及积分累积误差使得其长时间定位精度显著下降,严重影响定位效果。

因此有学者提出了采用其他的定位技术对捷联惯导定位误差进行补偿校准,构成组合定位系统<sup>[7-9]</sup>。Zhao S. Y. 等人<sup>[10]</sup>针对封闭环境中移动机器人提出了一种基于视觉辅助的 SINS 定位系统;Chen L. H. 等人<sup>[11]</sup>提出了利用 WIFI 校准 SINS 的思想进行室内环境下行人组合定位模型的构建;Ruiz A. R. J. 等人<sup>[12]</sup>提出了利用有源无线射频(radio frequency identification, RFID)技术与 SINS 构建组合定位系统,并采用扩展卡尔曼对组合定位参数进行滤波求解。由于以上学者提出的无线传感器网络定位技术在复杂环境下容易受到障碍物遮挡,并且容易产生多径效应干扰,无法实现移动目标精确定位。

超宽带(ultra wideband, UWB)技术是一种近几年发展而来,并且有别于传统无线技术的定位新技术<sup>[13-14]</sup>。其主要是通过利用 ns 级以下的极窄脉冲来进行数据的发送和接收的,其带宽能够达到 GHz 量级。并且因其独有的数据传输技术也使其具有较强的抗干扰能力,因此非常适合封闭复杂环境下定位系统的应用<sup>[15]</sup>。Ascher C 等人<sup>[16]</sup>采用 UWB 定位技术与 SINS 进行组合,提出了一种 SINS/UWB 室内组合定位方法。然而在复杂封闭环境下考虑到元器件以及信号传输的稳定性问题,特别是煤矿井下等恶劣环境,UWB 定位传感器容易受到遮挡、外部碰撞以及强磁场干扰等出现的非视距(non line of sight, NLOS)、粗大定位误差甚至定位数据短时失效的情况,使得组合系统定位精度下降,影响系统稳定性。

针对上述情况,本文在构建 SINS/UWB 组合定位系统基础上,提出了一种基于 SINS 量测偏差校准以及 UWB 定位容错判断的组合定位方法。首先,该方法利用 SINS 的测量数据对定位目标进行静止状态的检测,进而构建基于最小二乘算法的 SINS 测量偏差校准模型;然后

根据 SINS 的四元数解算模型,进行 SINS 姿态和位置解算。并且针对 UWB 定位数据特性,建立基于决策树理论的 UWB 定位容错判断模型,进而利用 SINS 和 UWB 的定位结果进行状态空间方程下的卡尔曼滤波模型构建,最终实现基于 SINS/UWB 的容错组合定位系统。

## 1 SINS 误差矫正下的定位解算

在 SINS 的定位解算中,惯性元件的量测偏差将对定位结果产生较大的影响。针对惯性元件量测偏差提出基于静止状态检测的最小二乘偏差矫正算法,并且构建基于四元数的 SINS 姿态和位置解算模型。

### 1.1 SINS 量测偏差校准模型

根据传统惯性理论可知,运动载体在理想静止状态下 SINS 惯性元件所测量 3 个坐标轴方向的加速度矢量和等于重力加速度,并且其所测量的三轴角速度为地球自转角速度,约为  $7.27 \times 10^{-5}$  rad/s,其数量级远小于运动载体在移动过程中的角速度,因此可以认为运动载体在静止状态下其三轴角速度均趋近于 0。根据这一特性,利用惯性测量单元所得到的三轴加速度和三轴角速度进行静止状态的判断。首先根据向量模函数可以求得加速度和角速度矢量的模为:

$$\begin{cases} Q_{acc,i} = \sqrt{(a_{x,i}^b)^2 + (a_{y,i}^b)^2 + (a_{z,i}^b)^2} \\ Q_{gyr,i} = \sqrt{(\omega_{x,i})^2 + (\omega_{y,i})^2 + (\omega_{z,i})^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $a_i^b$  为  $i$  时刻 SINS 载体坐标系下的加速度测量值, $\omega_i$  为 SINS 的角速度测量值。 $Q_{acc,i}$  和  $Q_{gyr,i}$  分别为  $i$  时刻加速度和角速度的向量模。

对  $Q_{acc,i}$  和  $Q_{gyr,i}$  进行静止状态下的阈值判断,当其分别满足各自静止状态下的阈值时, $C_{acc,i}$  和  $C_{gyr,i}$  值为 1,反之不满足则为 0。并且当只有同时满足加速度和角速度的静止阈值判断时,才能够认为该时刻运动载体处于静止状态,表达式为:

$$C_i = C_{acc,i} \& C_{gyr,i} \quad (2)$$

式中: $C_i$  为静止状态判断逻辑变量。然而由于加速度和角速度噪声的影响,使得在进行静止状态判断的逻辑运算时,会出现噪声影响下的误判断。因此本文采用中值滤波算法<sup>[17]</sup>对  $C_i$  进行滤波,进而得到能够稳定判断静止状态的逻辑参数  $C_{m,i}$ 。

$$C_{m,i} = f_{medianfilter}(C_i, l) \quad (3)$$

式中: $l$  为中值滤波器的滤波窗宽度。

在得到 SINS 静止状态后,考虑到实际工程中的操作流程,选取在系统开机后到载体运动前的静止状态进行测量偏差矫正,因此不影响后续的操作工序。

对 SINS 的测量值用线性函数进行简化表征:

$$y_i = bx_i + a \quad (4)$$

式中:  $y_i$  为实际测量值,  $x_i$  为测量值对应的理想值。  $a$  和  $b$  分别为线性函数的系数。根据线性最小二乘法, 将线性函数的系数利用统计关系特性进行最小二乘逼近求解。

$$\begin{cases} b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2} \\ a = \bar{y} - b\bar{x} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  分别表示为  $x$  和  $y$  的平均值。

根据最小二乘法得到测量值的系数进行 SINS 测量加速度和角速度的量测偏差修正, 提高测量精度。

### 1.2 SINS 姿态解算模型

采用四元数算法对 SINS 测量值进行导航解算<sup>[18]</sup>, 经过初始状态设置后, 利用四元数理论构建基于 SINS 姿态参数的四元数参量, 同时根据四元数状态更新公式对 SINS 的量测角速度信息进行迭代计算, 进而实时解算出当前时刻的四元数参量。其中四元数状态更新公式如下:

$$q_{i+1} = \exp\left(\frac{1}{2}\Omega_q T\right)q_i = \frac{2I_{4 \times 4} + \Omega_q T/2}{2I_{4 \times 4} - \Omega_q T/2} \cdot q_i \quad (6)$$

式中:  $q_i$  为捷联惯导解算的四元数参量,  $T$  为系统的采样周期,  $\Omega_q$  为陀螺仪测量角速度组成的反对称矩阵。

$$\Omega_q = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

利用解算的四元数参量中的元素值, 可以实时算出 SINS 的姿态变换矩阵  $C_b^n$ 。进而根据姿态变换矩阵与姿

态角的转换算法, 可得到 SINS 的三轴姿态角, 横滚角  $\theta_i$ 、俯仰角  $\gamma_i$ 、偏航角  $\varphi_i$ 。

根据牛顿第二定律中的加速度、速度与位置的关系理论, 建立基于 SINS 加速度信息以及姿态转换矩阵的位置解算模型如式(8)所示。

$$p_{i+1} = p_i + v_i T + C_b^n a_i^b T^2 / 2 \quad (8)$$

式中:  $C_b^n$  为姿态转换矩阵, 表示为从载体坐标系到导航坐标系的转换;  $v_i$  和  $p_i$  分别为 SINS 解算后的速度和位置向量。进而最终实现 SINS 的位置和姿态的解算。

## 2 SINS/UWB 容错组合定位

根据 SINS 定位解算结果并利用 UWB 定位系统进行组合定位系统构建, 考虑到超宽带系统在复杂环境中容易出现的定位粗大误差以及数据丢失等情况, 提出了一种基于决策树容错判断策略的卡尔曼组合定位方法。

### 2.1 容错定位判断策略

根据 UWB 定位系统在室内等封闭环境中的局域网位置解算特性, 针对室内等复杂环境中 UWB 由于干扰破坏导致的传感器信号干扰和信号丢失等情况, 对 UWB 在室内环境中的数据丢失和粗大定位误差情况进行有效性判断。同时将 SINS 的定位信息作为一种参考信号进行基于决策树理论的 UWB 的定位容错判断模型构建。根据判断的最终结果对 UWB 的输出结果进行稳定化处理, 并以此作为组合系统卡尔曼滤波模型的量测值, 来校准 SINS, 使得组合定位系统的定位精度和稳定性得到提高。其中图 1 所示为 UWB 容错判断的决策树模型。

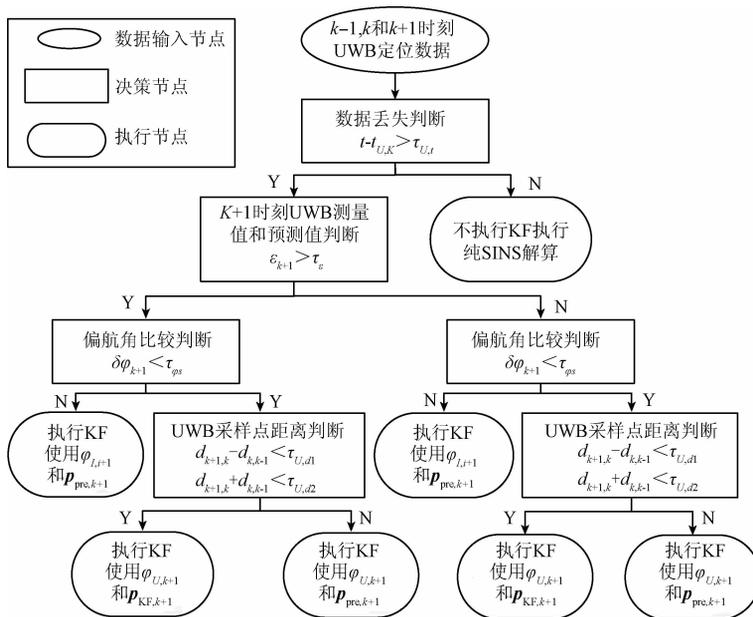


图1 UWB 决策树模型下的定位容错判断流程

Fig. 1 Flow chart of Fault tolerant decision tree mode for UWB

从图1可以看出,在模型开始前将当前时刻以及前后各一时刻的UWB数据作为决策树模型的输入(即 $k-1$ 时刻、 $k$ 时刻以及 $k+1$ 时刻)。首先进入到第1层的判断,判断UWB数据是否丢失,通过判断前后两个数据的时间间隔是否大于其采样周期来进行确定,即:

$$t - t_{U,k} > t_{U,t} \quad (9)$$

式中: $t$ 表示当前时刻, $t_{U,k}$ 表示UWB $k$ 时刻的采样时间, $t_{U,t}$ 则为UWB的采样周期。通过上述的判断,在存在数据丢失情况时,由于缺少UWB的观测量,则不进行卡尔曼滤波,仅用纯SINS进行移动目标位置解算。如果不存在UWB数据丢失情况,则利用其 $k-1$ 和 $k$ 时刻的数据以及SINS所对应时刻的偏航角对UWB下一时刻数据进行预测。预测模型为:

$$\mathbf{p}_{\text{pre},k+1} = \begin{bmatrix} \sin(\varphi_{l,i+1}) \\ \cos(\varphi_{l,i+1}) \end{bmatrix} \left\| \frac{\mathbf{p}_{U,k} - \mathbf{p}_{U,k-1}}{t_{U,k} - t_{U,k-1}} \right\| (t_{U,k+1} - t_{U,k}) + \hat{\mathbf{p}}_k \quad (10)$$

式中: $\mathbf{p}_{\text{pre},k+1}$ 为UWB计算后的预测点, $\varphi_{l,i+1}$ 为SINS经过定位解算后得到的偏航角, $\hat{\mathbf{p}}_k$ 为 $k$ 时刻组合定位系统的位置, $\mathbf{p}_{U,k}$ 为UWB $k$ 时刻UWB的定位测量值。SINS和UWB的时序关系满足 $t_{l,i} < t_{U,k+1} < t_{l,i+1}$ 。

利用正态分布函数求出UWB相邻测量值之间距离的归一化系数,用来评价预测值与测量值之间的偏离程度。预测值与测量值的距离以及正态分布下的位置偏离参数如式(11)~(13)所示。

$$\delta \mathbf{p}_{\text{pre},U,k+1} = \|\mathbf{p}_{U,k+1} - \mathbf{p}_{\text{pre},k+1}\| \quad (11)$$

$$S(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (12)$$

$$\varepsilon_{k+1} = \frac{S(\delta \mathbf{p}_{\text{pre},U,k+1})}{S(0)} \quad (13)$$

式中: $\mu$ 和 $\sigma$ 分别为正态分布函数中的均值参量和方差参量, $S(x)$ 表示为正态分布概率密度函数, $\delta \mathbf{p}_{\text{pre},U,k+1}$ 表示为通过向量距离公式得到的UWB预测值与测量值的距离, $\varepsilon_{k+1}$ 为对 $\delta \mathbf{p}_{\text{pre},U,k+1}$ 经过归一化后的位置偏离参数。设定用来判断超宽带测量值是否满足位置条件的偏离参数阈值为 $\tau_\varepsilon$ 。

从上面可以看出,位置偏离参数是对组合定位系统中距离参数上的判断,由于UWB在定位过程中存在满足距离条件,但是在运动方位上出现不符合运动规律的随机变化情况,因此还需要从方向上对UWB定位结果进行有效的判断。两个相邻的UWB测量值能够计算出一个近似的移动目标运动方向,因此再与SINS定位解算得到的偏航角进行比较,设定方位角度差判断阈值进行UWB定位结果方位角的判断。通过UWB量测值计算出的方位角为:

$$\varphi_{U,k+1} = \tan^{-1}\left(\frac{p_{y,U,k+1} - p_{y,U,k}}{p_{x,U,k+1} - p_{x,U,k}}\right) \quad (14)$$

进而得到组合定位系统两者之间的角度差参量为:

$$\delta \varphi_{k+1} = \varphi_{U,k+1} - \varphi_{l,i+1} \quad (15)$$

式中: $\varphi_{l,i+1}$ 为捷联惯导解算的偏航角。

在判断UWB的方位角与SINS偏航角之间的变化阈值之后,为了更好地排除UWB定位过程中出现的定位粗大误差情况,根据移动目标正常运动过程中的运动特性,对UWB自身相邻定位点变化情况进行阈值判断。考虑到UWB的较高采样率,所监测到的移动目标的运动速度在前后采样点中的速度不会突变,且保持在一个合理正常的范围内。因此采用UWB相邻测量点之间的距离和以及距离差来进行测量数据判断。

$$\begin{cases} d_{k+1,k} = \|\mathbf{p}_{U,k+1} - \mathbf{p}_{U,k}\| \\ d_{k+1,k} - d_{k,k-1} < \tau_{U,d1} \\ d_{k+1,k} + d_{k,k-1} < \tau_{U,d2} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $d_{k+1,k}$ 表示UWB相邻时刻测量点的距离, $\tau_{U,d1}$ 和 $\tau_{U,d2}$ 分别为UWB两个相邻测量点距离值之差以及之和的阈值。

如果要确定该UWB测量点的位置信息是准确的,就必须还能够同时满足上式的关系式,然后将其满足上述关系式的UWB测量值用来做为卡尔曼滤波的观测量。计算公式如下:

$$\mathbf{p}_{\text{KF},k+1} = \varepsilon_{k+1} (\mathbf{p}_{U,k+1} - \mathbf{p}_{\text{pre},k+1}) + \mathbf{p}_{\text{pre},k+1} \quad (17)$$

式中: $\mathbf{p}_{\text{KF},k+1}$ 为位置观测量。

如果不满足式(16),则说明该时刻的UWB测量值存在粗大误差,则利用预测点计算公式的计算结果预测值作为卡尔曼滤波模型的量测值,阻止了UWB的粗大测量误差影响组合定位系统整体定位精度的情况。并且式(13)中计算出的位置偏离参数不满足阈值时,同样说明UWB测量值存在粗大误差,也不能将其作为卡尔曼滤波模型的量测值来破坏组合定位系统的定位精度。然而在某一时刻UWB测量数据出现位置偏离系数不满足阈值条件时,需要继续判断式(15)和(16)的条件关系,以避免粗大误差下的UWB定位结果重新定位准确而没有检测到的情况,提高了决策树模型的鲁棒性。最终实现了利用不同参数信息进行UWB量测值的容错判断。

## 2.2 卡尔曼组合定位模型

通过决策树模型进行容错判断后得到稳定的位置观测信息,并结合SINS的解算结果建立基于位置误差和速度误差状态变量的组合定位系统的状态空间方程,如下:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}_{k,k+1} \mathbf{x}_k + \mathbf{G}_k \mathbf{W}_k \\ \mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{V}_k \end{cases} \quad (18)$$

式中: $\mathbf{x}_k = [\delta p_x \quad \delta p_y \quad \delta v_x \quad \delta v_y]^T$ 为系统的状态变量,分别由位置误差和速度误差组成; $\mathbf{z}_k = [\mathbf{p}_{\text{KF},k+1} - \mathbf{p}_{l,i+1}]$ 为系统的观测量; $\mathbf{W}_k$ 和 $\mathbf{V}_k$ 分别为状态方程的系统噪声和量测方程的测量噪声向量; $\mathbf{F}_{k,k+1}$ 为系统的状态变换矩

阵; $H_k$ 为观测量的转换矩阵,分别如下:

$$F_{k,k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, H_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

组合定位系统状态空间方程构建完成之后,根据卡尔曼滤波理论<sup>[19]</sup>,其中预测方程为:

$$\hat{x}_{klk-1} = F_{k,k-1} \hat{x}_{k-1k-1} \quad (20)$$

$$P_{klk-1} = F_{k,k-1} P_{k-1k-1} F_{k,k-1}^T + G_k Q_{k-1} G_k^T \quad (21)$$

式中: $Q_k$ 为系统噪声的协方差矩阵,其初值设定为 $Q_0 = \text{diag}([0.4 \ 0.4 \ 0.04 \ 0.04])$ , $P_{klk-1}$ 为卡尔曼滤波方程组中的后验误差协方差矩阵。

量测更新方程为:

$$\hat{x}_{klk} = \hat{x}_{klk-1} + K_k [z_k - H_k \hat{x}_{klk-1}] \quad (22)$$

$$P_{klk} = [I - K_k H_k] P_{klk-1} \quad (23)$$

$$K_k = P_{klk-1} H_k^T [H_k P_{klk-1} H_k^T + P_k]^{-1} \quad (24)$$

式中: $K_k$ 为卡尔曼滤波模型中的增益参量; $R_k$ 为卡尔曼滤波方程中的量测噪声协方差矩阵,其初值设定为 $R_0 = \text{diag}([0.01 \ 0.01])$ 。

根据上述的卡尔曼滤波方程利用经过容错判断后的UWB测量值对组合定位系统中的SINS进行融合校正,进而实现UWB与SINS组合下的定位模型构建。

### 3 实验研究

为了验证所提定位模型的正确性,利用SINS和UWB定位系统搭建组合定位实验平台,并对本文所提出的定位模型进行实验验证。

#### 3.1 实验平台搭建

利用SINS和UWB定位系统在室内空间搭建组合定位系统。移动目标选用可远程控制的电动小车,并且将SINS和UWB定位系统的移动标签固定安装在小车上。蓝牙无线数据发射模块通过串口连接SINS,同时蓝牙数据接收模块通过USB转串口线连接到上位机上,从而使得SINS测量数据能够实时的传输到上位机上进行定位解算。安装在移动目标上的UWB移动标签能够实时向外发送UWB定位信号,并且布置在定位区域4个角上的UWB锚节点能够实时检测移动标签发送的UWB无线信号。UWB无线信号通过锚节点进行测量并通过屏蔽网线和交换机将测量结果实时传输到上位机。上位机同时接收到来自UWB的定位信息和SINS的测量信息,并通过组合定位算法实现组合定位系统的导航解算。组合定位实验平台结构框图如图2所示。组合定位系统的现场实验布置如图3所示。实验平台主要系统参数介绍如下。

1)SINS采用的Crossbow IMU800CA是一款六自由度(6 degree of freedom, 6DOF)惯性测量单元,提供精确

的加速度和角速度输出。采用先进的微电机系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)速率陀螺技术,具有优异的可靠性和性能。角速率测量分辨率为 $<0.025 \text{ }^\circ/\text{s}$ ;加速度计测量分辨率为 $<0.5 \text{ mg}$ ;采样频率为100 Hz。

2)UWB定位系统采用Ubisense定位平台来进行实现,系统采用锚节点实时接收定位标签发出的UWB信号,并对无线信号进行测量解算,其定位精度能够达到0.2 m。锚节点之间采用屏蔽网线来进行时间同步,并且利用网络交换机实现锚节点的电源供应。UWB定位系统的定位数据更新周期设定为0.3 s。

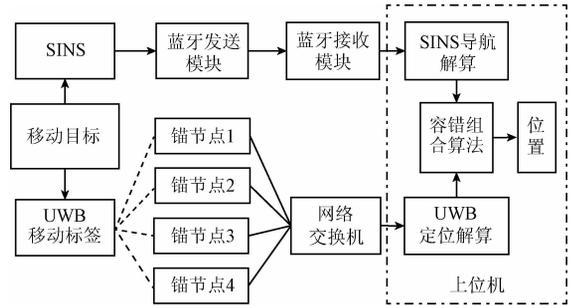


图2 组合定位系统实验平台模块

Fig.2 Structure for the environmental platform of integrated system

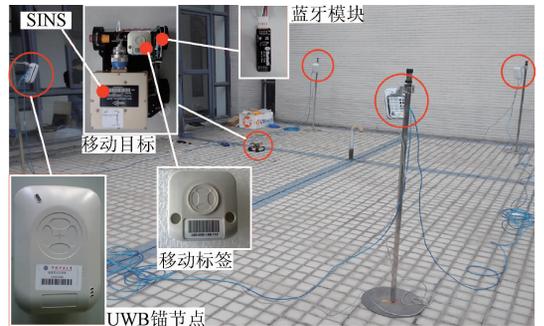


图3 组合定位系统实验现场

Fig.3 Experimental scene of integrated positioning system

#### 3.2 实验结果

对安装SINS和UWB定位标签的移动小车进行手动远程操控,在定位区域中按照设定的轨迹进行运动。定位系统上位机实时接收SINS和UWB的测量信息,进行组合定位解算。首先在正常定位状态下,即UWB定位系统能够稳定输出精确的定位结果,其组合定位系统定位结果如图4所示。整个实验持续时间为21 s。由图中可以看出UWB的测量点能够实时跟踪参考轨迹,同时由于小车转向导致的偏航角变化使得预测点有少量偏离参考轨迹。同时基于决策树模型的容错组合定位系统也能够对参考轨迹进行准确跟踪,其最大定位误差为0.20 m,UWB单独定位下的最大定位误差则为0.21m。

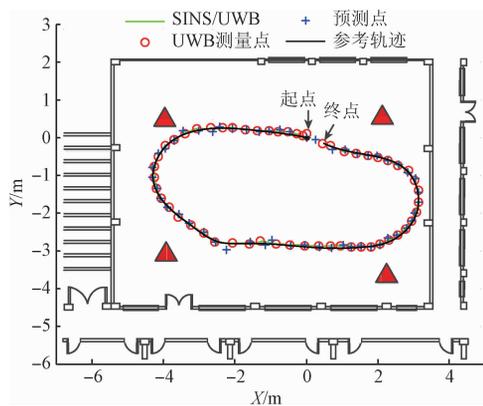


图4 正常状态下定位结果

Fig. 4 Positioning performance for normal condition

为了能够有效地说明决策树模型下的容错组合定位系统的定位性能,分别对定位系统进行传感器损坏下的数据丢失实验验证和非视距信号传播影响下的粗大定位误差实验验证,以此来说明容错组合定位系统的鲁棒性。首先在系统较难跟踪的弯道处人为去掉 UWB 定位系统中 25~27 s 的测量值,其中共有 7 个数据,定位结果如图 5(a) 所示。由图中分析发现,由圆圈表示的 UWB 位置测量值丢失了一段时间。然而基于决策树模型的容错组合定位系统通过成功对 UWB 定位数据丢失的检测判断能够有效的继续跟踪参考轨迹,直到 UWB 定位系统重新恢复测量值的准确稳定输出。在 UWB 数据人为丢失 2 s 的情况下,本文提出的定位系统的最大定位误差为 0.24 m。

为了使实验验证更具有可行性,人为延长了 UWB 定位系统的数据丢失持续时间,将 UWB 定位系统数据丢失的持续时间设置为 4 s,则有 14 个 UWB 数据丢失,并且将 UWB 数据丢失时间设置为 6 s,则有 20 个 UWB 数据丢失,对上面两种时间进行定位实验的结果分别如图 5(b) 和(c) 所示。在图 5(b) 中可以看出,容错定位系统在弯道处由于 SINS 定位系统的积分解算导致的累积误差影响在整体的定位趋势仍然能够继续跟踪参考轨迹的情况下出现了小幅度的偏离参考轨迹的情况。分析发现在 UWB 定位数据丢失持续 4 s 的情况下,容错组合定位系统能够保持在 0.67 m 以内的定位误差。由图 5(c) 可以看出,在 UWB 数据丢失持续 6 s 时,在数据丢失阶段容错组合定位的轨迹仍然能够跟踪参考轨迹的运动趋势情况下,由于 SINS 累积误差持续影响,导致组合定位系统相对于参考轨迹的定位误差逐渐增大,其最大的定位误差为 0.95 m。因此该容错组合定位系统能够在数据丢失时间持续 6 s 情况下,定位误差保持在 1 m 以内。

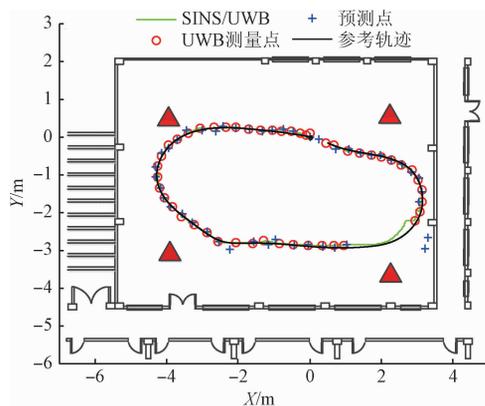
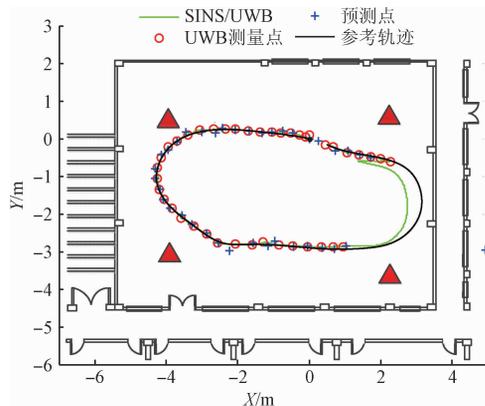
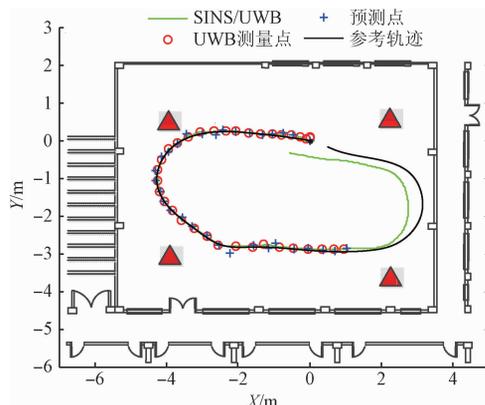
(a) 数据丢失持续 2.0 s  
(a) The data loss period lasts 2.0 s(b) 数据丢失持续 4.0 s  
(b) The data loss period lasts 4.0 s(c) 数据丢失持续 6.0 s  
(c) The data loss period lasts 6.0 s

图5 UWB 不同数据丢失时间下定位结果

Fig. 5 Positioning performance for data loss of UWB

在对 UWB 数据丢失这种失效状态进行实验验证后,还需要针对 NLOS 引起的 UWB 粗大定位误差情况进行验证。为了能够和前面的数据丢失情况进行一个对比,同样选择在实验进行到第 15 s 的时候将均方差为 1.1 m 高斯随机噪声人为添加到 UWB 的定位结果中,以此来说明其定位粗大误差。测试粗大误差持续时间同样选择

2、4 和 6 s,其定位结果分别如图 6(a)、(b)和(c)所示。由图 6(a)可以看出由于粗大误差的影响,UWB 的定位测量值严重偏离参考轨迹,并且其粗大定位误差分布不规则。然而根据 SINS 偏航角进行计算的预测点能够继续跟踪参考轨迹,并且由于决策树模型的判断使得 UWB 定位系统从粗大误差状态回复到正常窗台也能够进行正常的定位跟踪。在 UWB 粗大测量误差持续 2 s 的情况下,组合定位系统保持在 0.20 m 以内的定位误差。

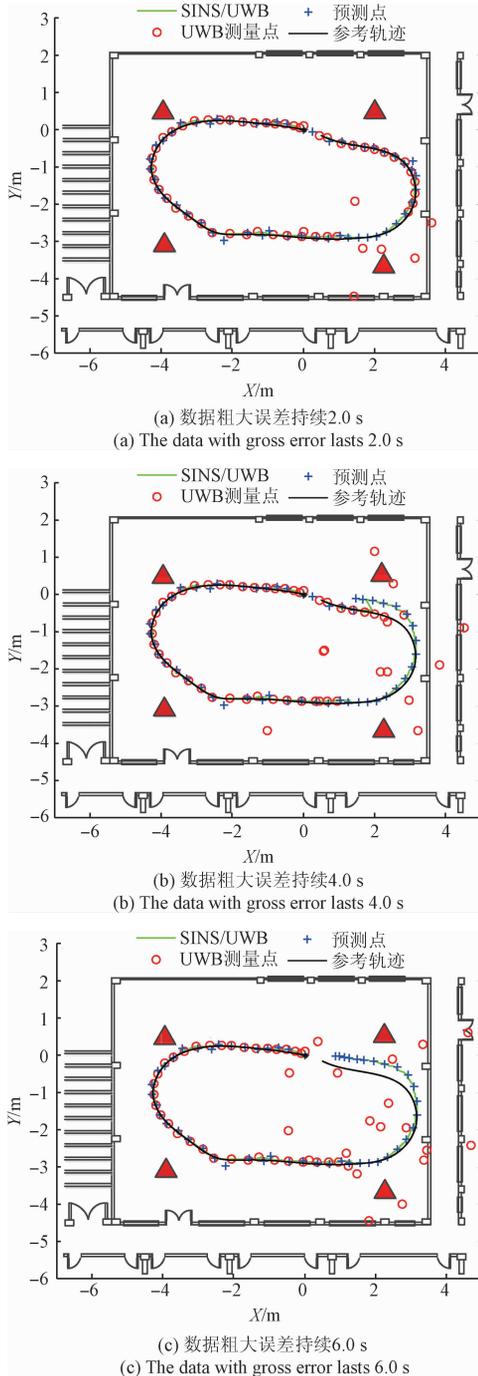


图6 UWB 粗大误差不同时间下的定位结果

Fig.6 Positioning performance for gross error of UWB

当继续增加 UWB 测量粗大误差的时间到 4 s 的情况下,在定位的前期,组合定位系统在前期仍然能够跟踪参考轨迹,并且随着单 SINS 工作的时间推移,由于 UWB 偏航角计算误差和 SINS 积分累计误差的双重影响,使得组合定位轨迹相对于参考轨迹出现了一定的偏差。因此在 UWB 由于 NLOS 影响产生的粗大定位误差持续 4 s 时,的最大定位误差为 0.35 m。最后在对 UWB 测量粗大误差设置为持续 6 s,组合定位系统的定位结果能够继续跟踪参考轨迹,然而其定位误差依然出现增加的情况,其定位误差最大值为 0.58 m。因此在 UWB 出现由于 NLOS 引起的粗大定位误差情况下,本文提出的组合定位系统能够避免 UWB 的粗大误差影响组合定位系统的定位效果。因此其定位精度优于 UWB 的测量精度,具有较好的鲁棒性。在考虑了人为制造错误状态下的定位特性后,为了更好地验证容错组合定位系统在长时间的测量中定位特性,控制移动小车在定位区域中沿着参考轨迹运动 4 圈,实验持续时间为 88 s。实验测量的 UWB 定位点以及容错组合定位系统的定位结果如图 7 所示。由图 7 可以看出,由于实验环境的影响,UWB 测量点在定位过程中出现了定位结果偏离参考轨迹的情况,并且这种偏离误差也呈现连续变化特性,其偏离的最大定位误差为 1.85 m。组合定位系统通过容错判断模型能够有效识别 UWB 定位过程中出现的定位误差,并结合 SINS 的定位特性即时调整组合定位轨迹沿着正确的参考轨迹进行跟踪。容错组合定位系统在误差段的具体跟踪细节由图 7 中右下角的子图可以看出,定位系统预测点和 SINS/UWB 组合定位轨迹并没有沿着 UWB 定位结果偏离参考轨迹,并且在经过了 UWB 的测量偏差点后能够较好的和后面准确的 UWB 测量点进行衔接,其组合定位系统的最大定位误差为 0.58 m。因此 SINS/UWB 容错组合定位系统在本次实验中其定位精度优于纯 UWB 定位系统 68.6%。

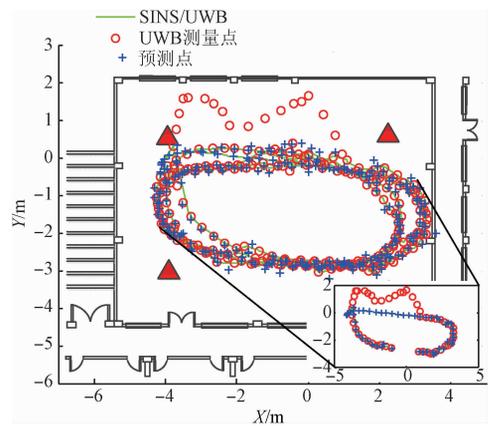


图7 长时间实验下的组合定位结果

Fig.7 Positioning performance of integrated system for long term test

## 4 结 论

针对 UWB 定位系统在复杂环境中产生数据丢失以及粗大定位误差,进而导致 SINS/UWB 组合定位系统失效的问题,本文提出了一种基于 SINS 测量偏差矫正以及 UWB 定位结果容错判断的组合定位系统。利用 SINS 和 UWB 无线定位系统搭建容错组合定位实验平台,并根据 UWB 不同的定位错误状态进行实验验证。首先针对 UWB 定位数据丢失情况下,短时间内组合定位系统能够较好地跟踪参考轨迹,并且在数据丢失时间持续 6 s 的情况下,其最大定位误差为 0.95 m。然后在对 UWB 粗大定位误差的判断中,容错组合定位系统能够准确检测错误并避免 UWB 误差对组合定位结果的影响,能够较好地跟踪参考轨迹,并且在粗大定位误差持续 6 s 的情况下,组合定位系统最大定位误差为 0.58 m。最后对组合定位系统进行长时间实验,并且针对实验过程中 UWB 系统出现连续变化定位误差的情况,容错组合定位系统仍然能够对其进行有效的检测判断,其组合定位系统的最大定位误差为 0.58 m,其定位精度优于纯 UWB 定位系统精度 68.6%。

## 参考文献

- [1] 姚团结,魏东岩,袁洪,等. 基于反馈校正的 WLAN 与 PDR 融合定位方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(2):446-453.  
YAO T J, WEI D Y, YUAN H, et al. Research on the feedback correction-based fusing method for WLAN and PDR positioning [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37 (2):446-453.
- [2] 贺晶晶,姜平,冯晓荣. 基于 UWB 的无人运输车的导航定位算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(11):1743-1749.  
HE J J, JIANG P, FENG X R. Research on navigation and positioning algorithm for unmanned vehicle based on UWB [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(11):1743-1749.
- [3] KOK M, HOL J D, SCHON T B. Indoor positioning using ultrawideband and inertial measurements [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(4):1293-1303.
- [4] 丁琳,管小卫,朱霞. 基于 RSSI 的集群实时定位系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(12):69-73.  
DING L, GUAN X W, ZHU X. Cluster real-time positioning system design based on RSSI [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014, 33 (12): 69-73.
- [5] SANG S B, ZHAI R Y, ZHANG W D, et al. A self-

developed indoor three-dimensional pedestrian localization platform based on MEMS sensors [J]. Sensor Review, 2015, 35(2):157-167.

- [6] 杨海,李威,罗成名,等. 基于捷联惯导的采煤机定位定姿技术实验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(12): 2550-2556.  
YANG H, LI W, LUO CH M, et al. Experimental study on position and attitude technique for shearer using SINS measurement[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(12): 2550-2556.
- [7] YANG H, LI W, LUO C M. Fuzzy adaptive Kalman filter for indoor mobile target positioning with INS/WSN integrated method [J]. Journal of Central South University, 2015, 22(4): 1324-1333.
- [8] 于永军,徐锦法,张梁,等. 惯导/双目视觉位姿估计算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(10):2170-2176.  
YU Y J, XU J F, ZHANG L, et al. Research on SINS / binocular vision integrated position and attitude estimation algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35 (10): 2170-2176.
- [9] 刘健,孔雨晨. 使用线性卡尔曼滤波进行 WiFi-惯导的融合定位[J]. 电子测量技术, 2017, 40(4):1-4.  
LIU J, KONG Y CH. WiFi/Inertial fusion positioning using linear Kalman filter [J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(4):1-4.
- [10] ZHAO S Y, LIN F, PENG K M, et al. Vision-aided estimation of attitude, velocity, and inertial measurement bias for uav stabilization [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2016, 81(3-4):531-549.
- [11] CHEN L H, WU E H, JIN M H, et al. Intelligent fusion of Wi-Fi and inertial sensor-based positioning systems for indoor pedestrian navigation [J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(11): 4034-4042.
- [12] RUIZ A R J, GRANJA F S, HONORATO J C P. Accurate pedestrian indoor navigation by tightly coupling foot-mounted IMU and RFID measurements [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(1):178-188.
- [13] 张浩,刘兴, GULLIVER T A, 等. 基于单基站天线阵列的超宽带定位 AOA 估计方法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(8):2024-2028.  
ZHANG H, LIU X, GULLIVER T A, et al. AOA Estimation for UWB positioning using a mono-station antenna array [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(8): 2024-2028.
- [14] GUO K X, QIU Z R, MIAO C X, et al. Ultra-Wideband-Based Localization for Quadcopter Navigation [J]. Unmanned Systems, 2016, 4(1):23-34.

- [15] BHARADWAJ R, PARINI C, ALOMAINY A. Experimental investigation of 3-D human body localization using wearable ultra-wideband antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(11):5035-5044.
- [16] ASCHER C, ZWIRELLO L, ZWICK T, et al. Integrity monitoring for UWB/INS tightly coupled pedestrian indoor scenarios [C]. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2011:21-23.
- [17] ERKAN U, KILICMAN A. Two new methods for removing salt-and-pepper noise from digital images [J]. Scienceasia, 2016, 42(1):28-32.
- [18] 毛玉良, 陈家斌, 宋春雷, 等. 捷联惯导姿态误差模型分析[J]. 中国惯性技术学报, 2013, 21(2):182-185.  
MAO Y L, CHEN J B, SONG CH L, et al. Analysis of attitude error models of strapdown inertial navigation system [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2013, 21(2): 182-185.
- [19] CHUNG H Y, HOU C C, CHEN Y S. Indoor intelligent mobile robot localization using fuzzy compensation and kalman filter to fuse the data of gyroscope and magnetometer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(10):6436-6447.

## 作者简介



**杨海**, 分别在2011年和2016年于中国矿业大学获得学士学位和博士学位, 现为西南石油大学讲师, 主要研究方向为组合导航与机电自动化。

E-mail: yanghaiswpu@163.com

**Yang Hai** received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from China University of Mining and Technology in 2011 and 2016, respectively. Now he is a lecturer in Southwest Petroleum University. His main research interests include integrated navigation and electromechanical automation.



**李威**(通讯作者), 2004年于中国矿业大学获得博士学位, 现为中国矿业大学教授, 主要研究方向为机电系统智能控制、智能检测与信息处理、微机电系统设计及应用。

E-mail: liweicumt@163.com

**Li Wei** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from China University of Mining and Technology in 2004. Now he is a professor in China University of Mining and Technology. His main research interests include intelligent control of electromechanical system, intelligent detection and information processing, MEMS design and application.