

## 基于无迹卡尔曼滤波的iBeacon/INS数据融合定位算法

王守华<sup>\*①②</sup> 陆明炽<sup>①②</sup> 孙希延<sup>①②③</sup> 纪元法<sup>①②③</sup> 胡丁梅<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(桂林电子科技大学广西精密导航技术与应用重点实验室 桂林 541004)

<sup>②</sup>(卫星导航定位与位置服务国家地方联合工程研究中心 桂林 541004)

<sup>③</sup>(桂林电子科技大学广西信息科学实验中心 桂林 541004)

**摘要:** 针对微机电惯性导航系统(MEMS-INS)定位解算存在积累误差及低功耗蓝牙技术iBeacon指纹定位存在跳变误差等问题, 该文提出一种基于无迹卡尔曼滤波器(UKF)的iBeacon/MEMS-INS数据融合定位算法。该算法对iBeacon锚点与定位目标的距离进行解算, 利用加速度计和陀螺仪的数据实现姿态阵和位置解算。将蓝牙锚点位置向量、载体速度误差信息等组成状态量, 将惯性导航定位信息和蓝牙定位距离信息等组成观测量, 设计无迹卡尔曼滤波器, 实现iBeacon/MEMS-INS数据融合定位。实验测试结果表明, 该算法有效解决MEMS-INS存在较大积累误差及iBeacon指纹定位存在跳变误差的问题, 可以实现1.5 m内的定位精度。

**关键词:** 惯性传感器; 蓝牙信标; 无迹卡尔曼滤波器; 信息融合; 行人定位

中图分类号: TN965.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)09-2209-08

DOI: 10.11999/JEIT180748

## IBeacon/INS Data Fusion Location Algorithm Based on Unscented Kalman Filter

WANG Shouhua<sup>①②</sup> LU Mingchi<sup>①②</sup> SUN Xiyang<sup>①②③</sup> JI Yuanfa<sup>①②③</sup>

HU Dingmei<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(Guangxi Key Laboratory of Precision Navigation Technology and Application, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

<sup>②</sup>(Satellite Navigation and Location Service National & Local Joint Engineering Research Center, Guilin 541004, China)

<sup>③</sup>(Guangxi Experiment Center of Information Science, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** In order to overcome the accumulation error in Micro-Electro-Mechanical System-Inertial Navigation System (MEMS-INS) and the jump error in iBeacon fingerprint positioning, an iBeacon/MEMS-INS data fusion location algorithm based on Unscented Kalman Filter (UKF) is proposed. The new algorithm solves the distance between the iBeacon anchor and the locating target. The solution of attitude matrix and position are obtained respectively by using accelerometer and gyroscope data. Bluetooth anchor position vector, the carrier speed error and other information constitute state variables. Inertial navigation location and bluetooth system distance information constitute measure variables. Based on state variables and measure variables, the UKF is designed to realize iBeacon/MEMS-INS data fusion indoor positioning. The experimental results show that the proposed algorithm can effectively solve the problem of the large accumulation error of INS and the jump error of iBeacon fingerprint positioning, and this algorithm can realize 1.5 m positioning accuracy.

收稿日期: 2018-07-23; 改回日期: 2019-02-25; 网络出版: 2019-04-18

\*通信作者: 王守华 hwafly@guet.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0505103), 广西自然科学基金(2018GXNSFAA050123), 广西精密导航技术与应用重点实验室主任基金(DH201803), 广西科技项目(AA17202033), 桂林电子科技大学研究生教育创新计划项目(2018YJCX28)

Foundation Items: The National Key R&D Program of China (2018YFB0505103), The Foundation of Guangxi Natural Science Foundation (2018GXNSFAA050123), The Foundation of Guangxi Key Laboratory of Precision Navigation Technology and Application (DH201803), The Department of Science and Technology of Guangxi Zhuang Autonomous Region (AA17202033), The Innovation Project of Guet Graduate Education (2018YJCX28)

**Key words:** Inertial sensor; Bluetooth beacon; Unscented Kalman Filter (UKF); Information fusion; Pedestrian positioning

## 1 引言

基于全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)的定位系统因为卫星信号受遮挡或多径的影响而无法实现室内行人定位<sup>[1]</sup>,但人们对室内定位的需求日益增加,如在大型室内停车场实现定位而快速找到车位等需求日益凸显<sup>[2]</sup>。为实现室内定位与导航,学者们提出了超宽带(Ultra-Wide-Band, UWB)定位<sup>[3]</sup>、WIFI定位<sup>[4]</sup>等室内定位技术。由于受定位精度、设备复杂性、系统运维成本等因素影响,这些技术尚未得到大规模商业应用。蓝牙定位有着功耗低、仅根据当前时刻的信号观测值实现长时间定位等优点,但应用于大范围的室内目标跟踪时,需要大量的节点,成本较高,且存在定位跳变性误差等问题<sup>[5]</sup>。微机电惯性导航系统(Micro-Electro-Mechanical-System Inertial Navigation System, MEMS-INS)可实现短期的自主定位导航,但是长时间导航解算时存在较大的积累误差。针对单源室内行人导航技术的不足,多源信息组合导航定位得到了广泛关注。文献<sup>[6]</sup>提出,通过GPS/WiFi组合导航实现室内外定位,但在复杂的室内定位环境时无法应用;文献<sup>[7]</sup>提出通过WiFi/MEMS-INS构建紧组合导航模型实现室内行人导航定位;文献<sup>[8, 9]</sup>提出基于行人航迹推算(Pedestrian Dead Reckoning, PDR)和低功耗蓝牙(Bluetooth Low-Energy, BLE)信标的室内行人定位技术。

本文提出一种基于无迹卡尔曼滤波器(Unscented Kalman Filtering, UKF)的iBeacon/MEMS-INS室内定位信息融合行人定位算法。首先对蓝牙iBeacon锚点与定位目标之间的距离进行解算;同时,对加速度计和陀螺仪的数据进行误差处理,并实现姿态解算和位置解算。然后,设计无迹卡尔曼滤波器,将蓝牙锚点的位置信息视为已知量,并与定位目标的姿态误差、速度误差、位置误差、加速度计误差、陀螺仪漂移组成UKF系统状态变量,而利用惯性导航解算位置信息和蓝牙系统距离位置信息构建UKF的测量值。该算法可以解决MEMS-INS存在较大积累误差及iBeacon指纹定位存在跳变误差的问题,实现1.5 m内的室内定位精度。

## 2 惯性数据误差处理模型

MEMS-INS内置陀螺仪和加速度计等惯性器件,分别测量目标载体的3轴角速度和加速度等值。但受安装工艺等因素影响,输出的原始测量值

含有随机误差和系统误差。可使用卡尔曼滤波器(Kalman Filter, KF)对随机误差进行补偿。系统误差包括安装误差、线性误差、零值误差等,可用六位置法对其进行误差因数标识。惯性器件原始测量值的误差方程为式(1)。式(1)中, $f_x^b$ ,  $f_y^b$ 和 $f_z^b$ 分别为传感器3轴上的原始测量值; $K_{x1}$ ,  $K_{y1}$ 和 $K_{z1}$ 分别为传感器3轴上的安装误差因子; $f_{x0}$ ,  $f_{y0}$ 和 $f_{z0}$ 分别为传感器3轴上的零偏因子; $S_x$ ,  $S_y$ 和 $S_z$ 分别为传感器3轴上的刻度因子; $K_{xk3}$ ,  $K_{yk3}$ 和 $K_{zk3}$ 分别为传感器3轴上与2次相关的误差因子; $v_x$ ,  $v_y$ 和 $v_z$ 分别为传感器3轴上随机误差。

$$\begin{bmatrix} f_x^b \\ f_y^b \\ f_z^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{x0} \\ f_{y0} \\ f_{z0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_x & K_{x1} & K_{x2} \\ K_{y1} & S_y & K_{y2} \\ K_{z1} & K_{z2} & S_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{xk3} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yk3} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zk3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x^2 \\ f_y^2 \\ f_z^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

将MEMS-INS模块固定在双轴转台上,按型号规定预热的时间要求,对传感器进行预热,使其工作于稳定状态。待MEMS-INS工作稳定后,开始采集角速度和加速度数据。参看文献<sup>[10]</sup>中具体的数学运算模型,使用六位置法对系统误差进行标识。值得注意的是,标识加速度计的系统误差时,取向分别为地东南、天西南、东北天、西地南、南西地、东天南,待各个位置静止完全后,各轴只输出重力加速值<sup>[10]</sup>。标识陀螺仪的系统误差时,转动的转台提供角速度输入值,为降低随机误差值对标识结果的影响,测量值可取固定时间长度内的平均值。

使用KF对陀螺仪和加速度计的随机误差进行补偿<sup>[11]</sup>,需分别解算角速度和加速度的测量噪声协方差 $R_{ME}$ 和过程噪声协方差 $Q_{ME}$ 。可先解算测量值的协方差,作为测量噪声协方差 $R_{ME}$ 的初始值,然后调整过程噪声协方差 $Q_{ME}$ 使角速度或加速度达到最佳值。

## 3 iBeacon/MEMS-INS数据融合模型

### 3.1 数据融合模型基本架构

数据融合模型的组成架构如图1所示,本文所述的惯性导航坐标系采用东北天坐标系(N系)。由图1可知,UKF信息融合定位算法主要包括MEMS-

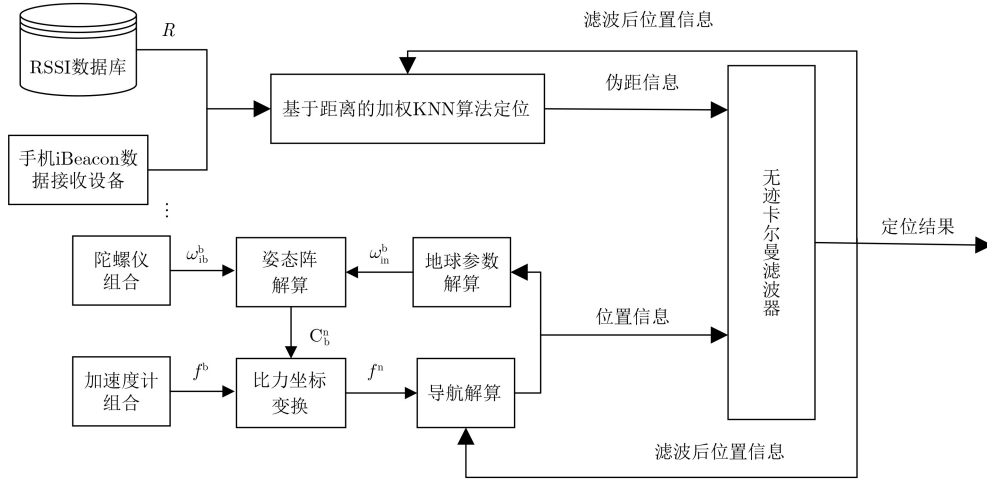


图1 iBeacon/MEMS-INS组合导航算法方案

INS和iBeacon两部分的定位信息。其中，目标载体佩戴惯性测量设备，通过陀螺仪获取角速度信息 $\omega_{ib}^b$ ，通过加速度计获取加速度信息 $f^b$ ；利用地球参数信息 $\omega_{in}^b$ 和角速度信息解算姿态矩阵 $C_b^n$ ；利用 $C_b^n$ 将加速度 $f^b$ 从载体坐标系转换到导航坐标系，进而解算出目标载体的位置、速度和姿态等导航信息<sup>[12]</sup>。通过智能手机获取安装在室内的iBeacon锚点的RSSI等信息 $R_k$ ，同时根据RSSI数据库的信息 $R$ ，使用距离的加权KNN(K-Nearest Neighborhood)定位算法<sup>[13, 14]</sup>，实现蓝牙定位，进而解算载体与蓝牙锚点的伪距值 $d_{i,k}^B$

$$d_{i,k}^B = \sqrt{(P_{E,k}^{iB} - P_{E,k}^{RN_i})^2 + (P_{N,k}^{iB} - P_{N,k}^{RN_i})^2} \quad (2)$$

其中， $[P_{E,k}^{RN_i}, P_{N,k}^{RN_i}]$ 为 $k$ 时刻iBeacon锚点 $i$ 位置，下标N, E表示北向和东向距离， $[P_{E,k}^{iB}, P_{N,k}^{iB}]$ 为 $k$ 时刻iBeacon蓝牙对载体目标定位的位置。设计无迹卡尔曼滤波将惯性器件解算的位置信息与蓝牙定位信息进行数据融合，实现组合导航定位的最优估计，并将滤波后的位置信息反馈到iBeacon指纹定位系统和MEMS-INS定位系统。

### 3.2 UKF滤波器设计

在本文所述的捷联式惯性导航系统(Strap-down Inertial Navigation System, SINS)系统误差模型中，将3维速度误差及3维姿态误差角列为导航信息误差，由于惯性器件偏置量的重复性误差对系统精度的影响最大<sup>[15]</sup>，所以将陀螺漂移和加速度计零偏的随机常数部分也列入状态，构成15维导航信息误差，在这个基础上引入蓝牙锚点位置向量。

$$X_k = \left[ \phi_k \quad \delta V_k^n \quad \delta P_k^n \quad \sigma_k^b \quad \zeta_k^b \quad M_1 \quad M_2 \cdots M_m \right]^T \quad (3)$$

其中， $\phi_k$ 是 $k$ 时刻的姿态误差，其中包括俯仰角、横滚角、航向角的误差； $\delta V_k^n$ 表示 $k$ 时刻的导航坐标系中的速度误差； $\delta P_k^n$ 表示 $k$ 时刻的导航坐标系中的位置误差； $\sigma_k^b$ 表示 $k$ 时刻的3个轴向的加速度计误差； $\zeta_k^b$ 表示 $k$ 时刻的3个轴向的陀螺仪漂移； $M_i = \begin{bmatrix} P_E^{RN_i} & P_N^{RN_i} \end{bmatrix}$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ 为蓝牙锚点的位置， $m$ 为可用蓝牙锚点的个数。根据以上各式可列出式(4)

$$F_k^I = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & -I_{3 \times 3} \cdot C_b^n \\ S(f_k^n) & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & -I_{3 \times 3} \cdot C_b^n & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中，

$$S(f_k^n) = \begin{bmatrix} 0 & -f_k^U & f_k^N \\ f_k^U & 0 & -f_k^E \\ -f_k^N & f_k^E & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中， $[f_k^E \quad f_k^N \quad f_k^U]$ 为 $k$ 时刻MEMS-INS解算得到的导航坐标系下的东向、北向和天向3个方向的比力值， $C_b^n$ 为从载体坐标系到导航坐标系的坐标转移矩阵。所以 $k$ 时刻系统的状态方程为

$$\begin{bmatrix} X_{k+1}^I \\ X_{k+1}^M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_k^I & 0_{15 \times 2m} \\ 0_{15 \times 2m} & F_k^M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_k^I \\ X_k^M \end{bmatrix} + \omega_k \quad (6)$$

其中， $X_k^M = [M_1 \quad M_2 \quad \cdots \quad M_m]^T$ 为iBeacon锚点位置坐标向量， $F_k^M = I_{2m \times 2m}$ 。 $\omega_k$ 为系统噪声，是均值为零正态分布，其协方差矩阵为 $R^n$ 。 $F_k^I$ 为 $k$ 时刻MEMS-INS解算误差状态转移矩阵，其表达式为 $F_k^I = I + F_k^I \cdot T$ ，即

$$\mathbf{F}_k^I = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} & -\mathbf{I}_{3 \times 3} \cdot \mathbf{C}_b^n \cdot T \\ \mathbf{S}(> f_k^n) \cdot T & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} & -\mathbf{I}_{3 \times 3} \cdot \mathbf{C}_b^n \cdot T & \mathbf{O}_{3 \times 3} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \cdot T & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中,  $T$ 为系统采样周期。在 $k$ 时刻, 假设第 $i$ 个iBeacon蓝牙锚点与移动目标之间的距离理论值

$$d_{i,k}^t = \sqrt{(P_{E,k}^t - P_{E,k}^{RN_i})^2 + (P_{N,k}^t - P_{N,k}^{RN_i})^2} \quad (8)$$

其中,  $k$ 表示时刻 $k$ ,  $d_{i,k}^t$ 为第 $i$ 个蓝牙锚点与移动目标之间的距离理论值,  $[P_{E,k}^t, P_{N,k}^t]$ 为移动目标的理论位置值,  $[P_{E,k}^{RN_i}, P_{N,k}^{RN_i}]$ 为第 $i$ 个iBeacon蓝牙锚点的位置。

在 $k$ 时刻由MEMS-INS测量值计算得到的移动目标与第 $i$ 个iBeacon蓝牙锚点间的距离 $d_{i,k}^I$ 为

$$d_{i,k}^I = \sqrt{(P_{E,k}^I - P_{E,k}^{RN_i})^2 + (P_{N,k}^I - P_{N,k}^{RN_i})^2} \quad (9)$$

其中,  $[P_{E,k}^I, P_{N,k}^I]$ 为INS推导的移动目标位置向量。式(8)、式(9)等式两边相加, 并整理得

$$\begin{aligned} & \left[ (P_{E,k}^I - P_{E,k}^{RN_i})^2 + (P_{N,k}^I - P_{N,k}^{RN_i})^2 \right] + [d_{i,k}^t]^2 \\ &= \left[ (P_{E,k}^I - P_{E,k}^{RN_i})^2 + (P_{N,k}^I - P_{N,k}^{RN_i})^2 \right] \\ & \quad - \left[ (P_{E,k}^t - P_{E,k}^{RN_i})^2 + (P_{N,k}^t - P_{N,k}^{RN_i})^2 \right] \quad (10) \end{aligned}$$

在 $k$ 时刻, MEMS-INS系统解算的移动目标位置 $[P_{E,k}^I, P_{N,k}^I]$ 与移动目标位置的理论值 $[P_{E,k}^t, P_{N,k}^t]$ 之间存在的误差为 $[\delta P_{E,k}^I, \delta P_{N,k}^I]$ , 其关系如式(11)

$$\left. \begin{aligned} P_{E,k}^I &= P_{E,k}^I + \delta P_{E,k}^I \\ P_{N,k}^I &= P_{N,k}^I + \delta P_{N,k}^I \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)并整理得

$$\begin{aligned} & \left[ (P_{E,k}^I)^2 + (P_{N,k}^I)^2 \right] - [d_{E,k}^t]^2 = \\ & 2 \left( P_{E,k}^I - P_{E,k}^{RN_i} \right) \delta P_{E,k}^I + 2 \left( P_{N,k}^I - P_{N,k}^{RN_i} \right) \delta P_{N,k}^I \\ & \quad - \left[ (\delta P_{E,k}^I)^2 + (\delta P_{N,k}^I)^2 \right] \\ & \quad + 2 \left[ P_{N,k}^I P_{N,k}^{RN_i} + P_{E,k}^I P_{E,k}^{RN_i} \right] \\ & \quad - \left[ (P_{E,k}^{RN_i})^2 + (P_{N,k}^{RN_i})^2 \right] \quad (12) \end{aligned}$$

用iBeacon信标测量的距离值 $d_{i,k}^{iB}$ 代替 $d_{i,k}^t$ , 式(12)左边部分, 则可描述为

$$\begin{aligned} & \left[ (P_{E,k}^I)^2 + (P_{N,k}^I)^2 \right] - [d_{i,k}^{iB} - \varepsilon]^2 = \\ & \left[ (P_{E,k}^I)^2 + (P_{N,k}^I)^2 \right] - \left[ (d_{i,k}^{iB})^2 - 2d_{i,k}^{iB}\varepsilon + \varepsilon^2 \right] \quad (13) \end{aligned}$$

其中,  $\varepsilon$ 为测量噪声。整理式(12)和式(13)得

$$\begin{aligned} & \left[ (P_{E,k}^I)^2 + (P_{N,k}^I)^2 \right] - [d_{i,k}^{iB}]^2 = \\ & 2 \left( P_{E,k}^I - P_{E,k}^{RN_i} \right) \delta P_{E,k}^I + 2 \left( P_{N,k}^I - P_{N,k}^{RN_i} \right) \delta P_{N,k}^I \\ & \quad - \left[ (\delta P_{E,k}^I)^2 + (\delta P_{N,k}^I)^2 \right] \\ & \quad + 2 \left[ P_{N,k}^I P_{N,k}^{RN_i} + P_{E,k}^I P_{E,k}^{RN_i} \right] \\ & \quad - \left[ (P_{E,k}^{RN_i})^2 + (P_{N,k}^{RN_i})^2 \right] - 2d_{i,k}^{iB}\varepsilon + \varepsilon^2 \quad (14) \end{aligned}$$

由多组式(14)的iBeacon/MEMS-INS的观测量构成系统的观测方程为

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} (P_{E,k}^I)^2 + (P_{N,k}^I)^2 - (d_{1,k}^{iB})^2 \\ (P_{E,k}^I)^2 + (P_{N,k}^I)^2 - (d_{2,k}^{iB})^2 \\ \vdots \\ (P_{E,k}^I)^2 + (P_{N,k}^I)^2 - (d_{m,k}^{iB})^2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} h_1(X_k) \\ h_2(X_k) \\ \vdots \\ h_m(X_k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1(d_{1,k}^{iB}, \varepsilon) \\ v_2(d_{2,k}^{iB}, \varepsilon) \\ \vdots \\ v_m(d_{m,k}^{iB}, \varepsilon) \end{bmatrix} \quad (15) \end{aligned}$$

其中,

$$\begin{aligned} h_i(X_k) &= 2 \left( P_{E,k}^I - P_{E,k}^{RN_i} \right) \delta P_{E,k}^I \\ & \quad + 2 \left( P_{N,k}^I - P_{N,k}^{RN_i} \right) \delta P_{N,k}^I \\ & \quad - \left[ (\delta P_{E,k}^I)^2 + (\delta P_{N,k}^I)^2 \right] \\ & \quad + 2 \left[ P_{N,k}^I P_{N,k}^{RN_i} + P_{E,k}^I P_{E,k}^{RN_i} \right] \\ & \quad - \left[ (P_{E,k}^{RN_i})^2 + (P_{N,k}^{RN_i})^2 \right] \quad (16) \end{aligned}$$

$$v_i(d_{iB}^{iB}, \varepsilon) = -2d_{iB}^{iB}\varepsilon + \varepsilon^2 \quad (17)$$

其中,  $[P_{E,k}^I, P_{N,k}^I]$ 为MEMS-INS系统解算的移动目标位置, 可以视为已知值, 而与状态量 $X_k$ 有着直接的联系的是 $[P_{E,k}^{RN_i}, P_{N,k}^{RN_i}]$ 和 $[\delta P_{E,k}^I, \delta P_{N,k}^I]$ ;  $\mathbf{V}_k$ 为系统的观测噪声矩阵, 其方差矩阵为 $\mathbf{R}^v$ 。

### 3.3 UKF数据融合算法

为了避免非系统线性化误差, 获得更为准确的系统状态量均值和协方差估计, 本文选用无迹卡尔曼滤波器来完成iBeacon/MEMS-INS的组合导航系统数据融合滤波, 以提高对目标行人导航信息的预估精度。非线性系统状态方程和测量方程描述为

$$\mathbf{X}_{k+1} = F(\mathbf{X}_k, \mathbf{u}_k, \boldsymbol{\omega}_k) \quad (18)$$

$$\mathbf{Y}_k = H(\mathbf{X}_k, \mathbf{V}_k) \quad (19)$$

其中,  $\mathbf{X}_k$ 为 $15+2m$ 维的系统状态向量,  $\mathbf{Y}_k$ 为 $m$ 维的系统观测向量,  $m$ 为可用蓝牙锚点的个数, 对于 $k \in \{1, 2, \dots, \infty\}$ , 设系统的初值为

$$\hat{\mathbf{X}}_0 = E[\mathbf{X}_0] \quad (20)$$

则UKF算法可描述为

$$\mathbf{P}_0 = E[(\mathbf{X}_0 - \hat{\mathbf{X}}_0)(\mathbf{X}_0 - \hat{\mathbf{X}}_0)^T] \quad (21)$$

计算 $\mathbf{X}_k$ 对应的Sigma点

$$\chi_{k-1} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{X}}_{k-1} & \hat{\mathbf{X}}_{k-1} + \gamma\sqrt{\mathbf{P}_{k-1}} & \hat{\mathbf{X}}_{k-1} - \gamma\sqrt{\mathbf{P}_{k-1}} \end{bmatrix} \quad (22)$$

其中,  $\gamma = \sqrt{(L+\lambda)}$ 是比例因子,  $L$ 是状态量的维数。

时间更新

$$\chi_{k/k-1} = F[\chi_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}] \quad (23)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_k^- = \sum_{i=0}^{2L} W_i^m \chi_{i,k|k-1} \quad (24)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_k^- = \sum_{i=0}^{2L} W_i^c [\chi_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{X}}_k^-][\chi_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{X}}_k^-]^T + \mathbf{R}^n \quad (25)$$

$$\mathbf{Y}_{k/k-1} = H[\chi_{k/k-1}] \quad (26)$$

$$\hat{\mathbf{Y}}_k^- = \sum_{i=0}^{2L} W_i^m \mathbf{Y}_{i,k|k-1} \quad (27)$$

测量更新

$$\mathbf{P}_{\bar{y}_k, \bar{y}_k} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^c [\mathbf{Y}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{Y}}_k^-] \cdot [\mathbf{Y}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{Y}}_k^-]^T + \mathbf{R}^v \quad (28)$$

$$\mathbf{P}_{x_k, y_k} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^c [\chi_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{X}}_k^-][\mathbf{Y}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{Y}}_k^-]^T \quad (29)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{x_k, y_k} \mathbf{P}_{\bar{y}_k, \bar{y}_k}^{-1} \quad (30)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{Y}_k - \hat{\mathbf{Y}}_k^-) \quad (31)$$

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_k^- - \mathbf{K}_k \mathbf{P}_{\bar{y}_k, \bar{y}_k} \mathbf{K}_k^T \quad (32)$$

其中,  $\mathbf{R}^n$ 是系统的噪声方差阵,  $\mathbf{R}^v$ 是观测噪声方差阵,  $W_i$ 是Sigma点对应的权值。

利用UKF实现iBeacon/MEMS-INS数据融合定位算法的流程图, 如图2所示。

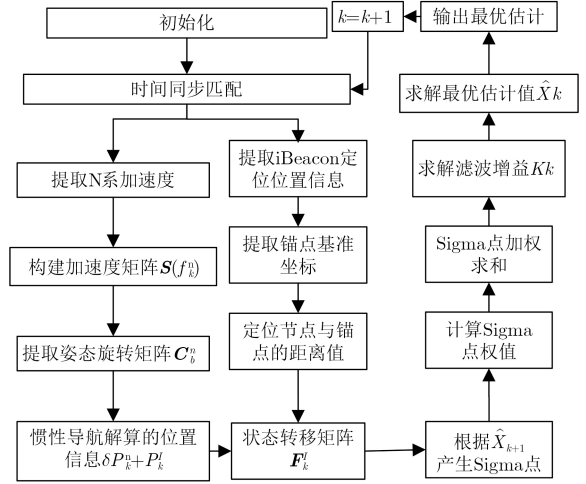


图2 UKF数据融合定位算法流程图

具体实现步骤如下:

步骤1 系统参数初始化, 获取MEMS-INS与iBeacon的实时数据。由于MEMS-INS采样频率是iBeacon采样频率10倍, 并且根据定位连续性, 通过对采集数据序列进行分、秒时间比对, 完成对MEMS-INS与iBeacon系统数据的时间同步匹配;

步骤2 获取N系加速度, 构建加速度矩阵 $\mathbf{S}(f_k^a)$ ;

步骤3 解算惯性导航位置信息量和获取上一时刻UKF对位置误差的估计值, 并相加, 即 $\delta P_k^n + P_k^I$ ;

步骤4 解算iBeacon定位位置, 提取蓝牙锚点位置信息, 解算定位点与锚点的距离值 $d_{i,k}^B$ ;

步骤5 构建状态转移矩阵 $\mathbf{F}_k^I$ ;

步骤6 根据 $\hat{\mathbf{X}}_{k-1}$ 产生对应的Sigma点, 并计算其权值。其中,

$$\chi_{k-1} = [\hat{\mathbf{X}}_{k-1} \quad \hat{\mathbf{X}}_{k-1} + \gamma\sqrt{\mathbf{P}_{k-1}} \quad \hat{\mathbf{X}}_{k-1} - \gamma\sqrt{\mathbf{P}_{k-1}}];$$

步骤7 时间更新, 利用Sigma点和对应的权值进行加权求和;

步骤8 测量更新, 求解滤波增益 $\mathbf{K}_k$ 和最优估计值 $\hat{\mathbf{X}}_k$ ;

步骤9 输出定位结果最优估计, 并判断是否进入新一轮循环。

## 4 测试分析

### 4.1 室内测试环境

为验证本文提出的数据融合定位算法的性能, 可利用iBeacon指纹定位系统和MEMS-INS系统进



行组合导航测试。iBeacon指纹定位系统由4个iBeacon蓝牙锚点及蓝牙接收终端(智能手机)组成。蓝牙锚点选用智石科技公司的Max Beacon信标,其内含蓝牙芯片是nRF51822III;蓝牙接收终端选用华为荣耀7i智能手机,自行开发蓝牙数据接收APP及制作RSSI指纹数据库,蓝牙数据接收速率为10 Hz。MEMS-INS定位系统采用3DM-S10A模块,内含集成了陀螺仪、加速度计等惯性器件,分别用于采集东北天3轴加速度和角速度信息,采样速率为100 Hz。3DM-S10A模块与蓝牙接收终端放置在同一个载体上以保证两个定位系统同步移动,并分别通过USB传送到导航计算机。在导航计算机实现导航定位解算。

表1为3DM-S10A惯导模块的加速度计、陀螺仪的器件的性能指标表。

表1 3DM模块各项指标

	加速度计	陀螺仪	磁力计
轴数	3	3	3
量程	$\pm 8\text{ g}$	$\pm 1.700\text{ }^\circ/\text{s}$	$\pm 1/104\text{ 特斯拉(T)}$
数据更新频率	100 Hz	100 Hz	100 Hz

图3为本实验平台基本架构图。

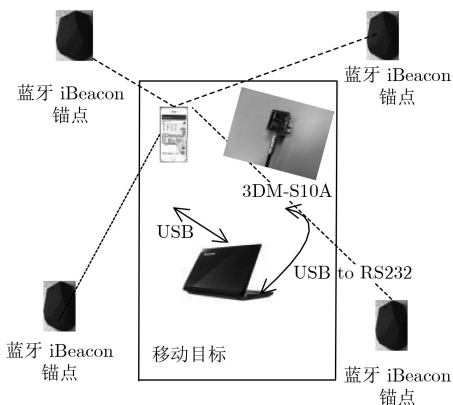


图3 实验平台基本架构

图4为iBeacon锚点布置在测试室平面示意图,4个锚点按编号顺序安装测试室内,每个iBeacon锚点间隔10 m,形成一个10 m  $\times$  10 m的正方形。4个iBeacon锚点坐标分别为A1(0, 0), A2(0, 10), A3(10, 0), A4(10, 10)。

同一个平面定位场所, iBeacon锚点数越多,相对定位精度越高,但同时会增大指纹库聚类算法的复杂度。实际应用中,根据现场情况布设锚点数量,各个锚点相邻间距不要超过10 m。为了平衡定位精度和聚类算法复杂度之间关系,可以适当调整指纹库采点的数量。

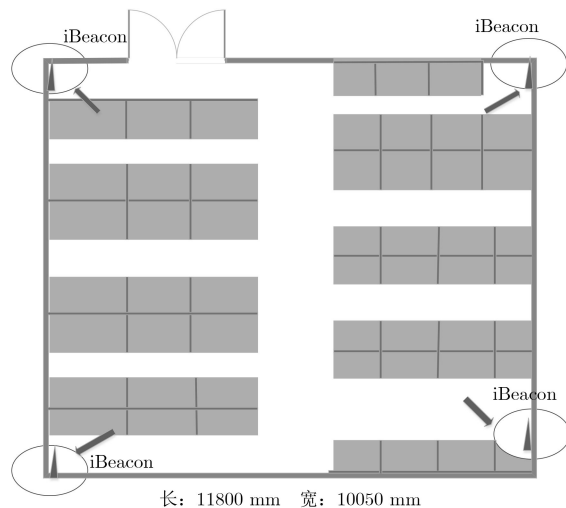


图4 iBeacon信标布置平面示意图

#### 4.2 原始数据误差处理测试分析

将3DM\_S10A模块按要求固定在转台上并进行预热。工作稳定后,按六位置法的取向要求分别采集加速度计和陀螺仪的观测数据,并利用六位置法标定系统误差,利用KF消除随机误差的影响。

图5为加速度计静止时3轴输出的原始加速度和误差处理后加速度的对比图。

由图5可看出,即使3DM\_S10A模块静止不

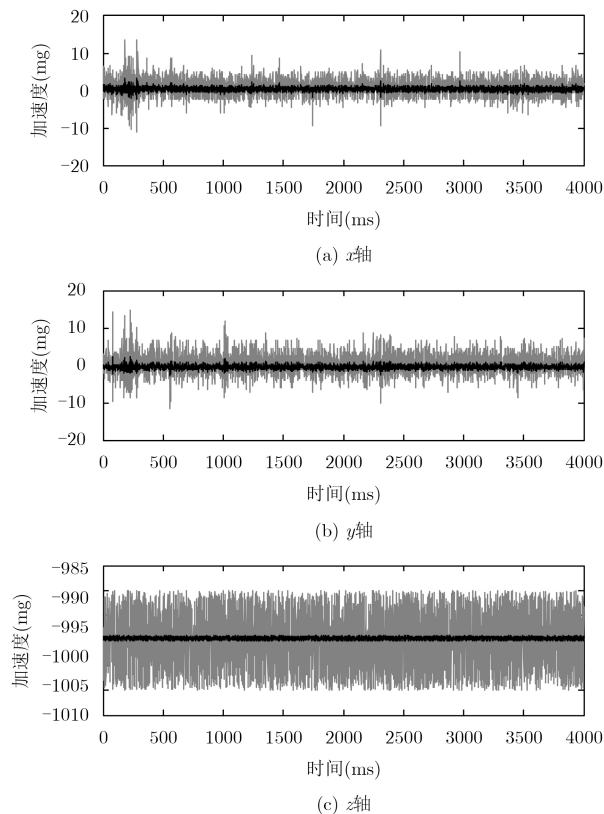


图5 加速度对比

动，其3轴上的加速度计输出的原始观测值也存在一定范围内的误差。该误差在30 mg的范围内波动，而整体趋势上随着时间的推移不断偏离理论值，即沿着某个方向漂移。利用本文提出的误差方案对原始观测数据的系统误差和随机误差进行误差处理后，加速度数据误差波动范围在8 mg内，且基本回归理论值附近，即x轴和y轴的加速度在0值附近波动，z的加速度在-1000 mg附近波动。由该实验测试可验证，本文采用的误差处理模型能有效减少加速度计和陀螺仪输出的原始观测数据的误差。

### 4.3 算法性能测试分析

对加速度和加速度进行误差处理后，根据时间同步标签，对iBeacon和惯导数据数据进行时间同步处理，并在导航计算机上利用文献[14]蓝牙定位算法实现iBeacon指纹定位，利用文献[13]惯性导航相关算法实现惯性导航解算，分别获得其运动轨迹；同时利用本文设计的UKF模型对iBeacon/MEMS-INS进行数据融合组合导航定位，得到其运动轨迹。iBeacon指纹定位、MEMS-INS和iBeacon/MEMS-INS组合导航定位的轨迹如图6所示。

在图6中，真实移动轨迹为从B点开始沿东向行走4 m，然后向南走8 m，再向东行走4 m到达E点。从图6可以看出，iBeacon指纹定位算法结算的轨迹存在不规律的跳变误差，这是因为RSSI不稳定而产生的抖动现象；MEMS-INS定位解算的轨迹明显存在漂移现象，时间越靠后，误差越大，这是因为解算的误差积累而形成的。相比于前两种定位，本文提出的基于UKF的iBeacon/MEMS-INS组合导航定位算法的轨迹，虽然也存在一定的误差，但较为接近真实轨迹的定位结果，能有效抑制MEMS-INS的积累误差和RSSI的不规律抖动误差。

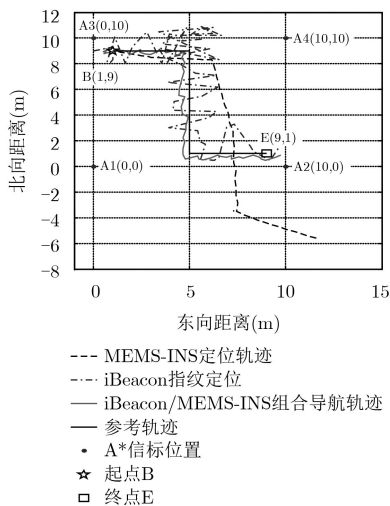


图6 3种方法的定位轨迹

图7为iBeacon指纹定位，MEMS-INS定位和iBeacon/MEMS-INS组合定位的误差累计分布函数，可以看出，本文提出的iBeacon/MEMS-INS组合定位的定位误差在CDF相同的情况下最小，定位精度存在明显的优势。

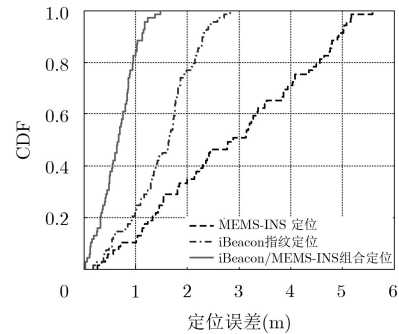


图7 定位误差CDF

为对比和验证算法的性能指标，现采用文献[15]的室内BLE/MEMS跨楼层融合定位算法做对比，同时，在同一环境下进行多次测量分析，以消除数据定位结果的偶然性。表2为MEMS-INS, iBeacon, BLE/MEMS跨楼层和iBeacon/MEMS-INS组合导航4种方法的性能比较表，可以看出iBeacon/MEMS-INS的平均绝对位置误差为1.315 m，分别优于MEMS-INS和iBeacon单独定位的6.758 m和3.523 m，而与BLE/MEMS跨楼层定位算法的1.545 m相比，也提高了14.89%的平均绝对位置误差性能。但是iBeacon/MEMS-INS组合导航全过程解算运行时间是4种方法中最长的，意味着其运算的复杂性增加了。

表2 多种方法的性能比较

方法	平均绝对位置误差(m)	运行时间(ms)
MEMS-INS	6.758	0.054
iBeacon	3.523	0.023
BLE/MEMS跨楼层	1.545	0.407
iBeacon/MEMS-INS	1.315	0.468

## 5 结束语

针对MEMS-INS存在较大积累误差和iBeacon指纹定位存在跳变误差等问题，本文提出了一种基于UKF的iBeacon/MEMS-INS室内组合导航数据融合定位算法。实验测试结果表明，本文提出的算法能有效解决MEMS-INS定位解算存在较大积累误差及iBeacon指纹定位存在跳变误差的问题，可以实现误差在1.5 m内的定位精度。实际应用在大型商场或室内停车场时，还需要涉及算法复杂度的问题，平衡定位精度和聚类算法复杂度之间关系。

## 参考文献

- [1] XU Yuan, CHEN Xiyuan, and LI Qinghua. Autonomous integrated navigation for indoor robots utilizing on-line iterated extended Rauch-Tung-striebel smoothing[J]. *Sensors*, 2013, 13(12): 15937–15953. doi: [10.3390/s131215937](https://doi.org/10.3390/s131215937).
- [2] WIN M Z, DARDARI D, MOLISCH A F, *et al.* History and applications of UWB[scanning the issue][J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(2): 198–204. doi: [10.1109/JPROC.2008.2008762](https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.2008762).
- [3] CHAN E C L, BACIU G, and MAK S C. Using Wi-Fi signal strength to localize in wireless sensor networks[C]. Proceedings of 2009 WRI International Conference on Communications and Mobile Computing, Yunnan, China, 2009: 538–542.
- [4] CASTILLO-CARA M, LOVON-MELGAREJO J, BRAVORROCCA G, *et al.* An empirical study of the transmission power setting for Bluetooth-based indoor localization mechanisms[J]. *Sensors (Basel)*, 2017, 17(6): 1318–1340. doi: [10.3390/s17061318](https://doi.org/10.3390/s17061318).
- [5] CHENG Jiantong, YANG Ling, LI Yong, *et al.* Seamless outdoor/indoor navigation with WIFI/GPS aided low cost Inertial Navigation System[J]. *Physical Communication*, 2014, 13: 31–43. doi: [10.1016/j.phycom.2013.12.003](https://doi.org/10.1016/j.phycom.2013.12.003).
- [6] ZHUANG Yuan and EL-SHEIMY N. Tightly-coupled integration of WiFi and MEMS sensors on handheld devices for indoor pedestrian navigation[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(1): 224–234. doi: [10.1109/JSEN.2015.2477444](https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2477444).
- [7] LIAO J K, CHIANG K W, and ZHOU Zhiming. The performance analysis of smartphone-based pedestrian dead reckoning and wireless locating technology for indoor navigation application[J]. *Inventions*, 2016, 1(4): 25–44. doi: [10.3390/inventions1040025](https://doi.org/10.3390/inventions1040025).
- [8] WALTER C S, SEIFFERT S, VINCENT F, *et al.* Indoor navigation assistant for visually impaired by pedestrian dead reckoning and position estimative of correction for patterns recognition[J]. *IFAC PapersOnLine*, 2016, 49(30): 167–170. doi: [10.1016/j.ifacol.2016.11.149](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.149).
- [9] 宋丽君, 秦永元. MEMS加速度计的六位置测试法[J]. 测控技术, 2009, 28(7): 11–13. doi: [10.3969/j.issn.1000-8829.2009.07.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-8829.2009.07.004).
- SONG Lijun and QIN Yongyuan. Six-position testing of MEMS accelerometer[J]. *Measurement & Control Technology*, 2009, 28(7): 11–13. doi: [10.3969/j.issn.1000-8829.2009.07.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-8829.2009.07.004).
- [10] CORREA A, DIAZ E M, AHMED D B, *et al.* Advanced pedestrian positioning system to smartphones and smartwatches[J]. *Sensors*, 2016, 16(11): 1903–1921. doi: [10.3390/s16111903](https://doi.org/10.3390/s16111903).
- [11] NETO P, MENDES N, and MOREIRA A P. Kalman filter-based yaw angle estimation by fusing inertial and magnetic sensing: A case study using low cost sensors[J]. *Sensor Review*, 2015, 35(3): 244–250. doi: [10.1108/SR-10-2014-0723](https://doi.org/10.1108/SR-10-2014-0723).
- [12] 杨东勇, 顾东袁, 傅晓婕. 一种基于RSSI相似度的室内定位算法[J]. 传感技术学报, 2009, 22(2): 264–268. doi: [10.3969/j.issn.1004-1699.2009.02.025](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-1699.2009.02.025).
- YANG Dongyong, GU Dongyuan, and FU Xiaojie. An indoor location algorithm base on RSSI-similarity degree[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2009, 22(2): 264–268. doi: [10.3969/j.issn.1004-1699.2009.02.025](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-1699.2009.02.025).
- [13] PEI Ling, CHEN Ruizhi, LIU Jingbin, *et al.* Using inquiry-based Bluetooth RSSI probability distributions for indoor positioning[J]. *Journal of Global Positioning Systems*, 2010, 9(2): 122–130.
- [14] 李荣冰, 刘建业, 孙永荣. MEMS-IMU构型设计及惯性器件安装误差标定方法[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(5): 526–529, 563. doi: [10.3969/j.issn.1005-6734.2007.05.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-6734.2007.05.005).
- LI Rongbing, LIU Jianye, and SUN Yongrong. MEMS-IMU configuration and its inertial sensors' calibration for installation errors[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2007, 15(5): 526–529, 563. doi: [10.3969/j.issn.1005-6734.2007.05.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-6734.2007.05.005).
- [15] 周牧, 王斌, 田增山, 等. 室内BLE/MEMS跨楼层融合定位算法[J]. 通信学报, 2017, 38(5): 1–10. doi: [10.3969/j.issn.1001-2400.2017.05.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2017.05.001).
- ZHOU Mu, WANG Bin, TIAN Zengshan, *et al.* Indoor BLE and MEMS based multi-floor fusion positioning algorithm[J]. *Journal on Communications*, 2017, 38(5): 1–10. doi: [10.3969/j.issn.1001-2400.2017.05.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2017.05.001).
- 王守华: 男, 1975年生, 副教授, 研究方向为信号处理、卫星导航。
- 陆明炽: 男, 1990年生, 硕士生, 研究方向为室内导航、深度学习。
- 孙希延: 女, 1973年生, 博士, 研究方向为卫星导航和电子对抗。
- 纪元法: 男, 1975年生, 博士, 研究方向为卫星通信、卫星导航和数字信号处理。
- 胡丁梅: 女, 1995年生, 硕士生, 研究方向为室内导航、数据融合。