

注：国家重点研发计划（No. 2020YFC1511702）；国家自然科学基金（No. 61971048）；
国家自然科学基金（No. 61771059）

摘要：基于超宽带（Ultra Wide Band, UWB）技术，可以解决无人机的室内定位问题，但定位精度还不够高。针对上述情况，提出了基于无迹卡尔曼滤波（Unscented Kalman Filtering, UKF）的 UWB 定位技术和惯性测量单元（Inertial Measurement Unit, IMU），以及光流传感器相融合的内外环室内定位方法，以基于 IMU 测得的姿态控制为内环，UWB、光流测得的位置控制为外环，利用 UWB 在视距情况下得到的精确位置信息来修正 IMU 的累积误差，同时，在非视距情况下，用 IMU 的短时精确位置信息对 UWB 的定位误差进行补偿，提高定位精度。最后设计了实物仿真平台。实验结果表明，上述室内定位方法实际定位精度小于 10 cm，导航误差为 0.7%，且能快速地进入稳定状态，满足无人机室内定位的需求，同时极大地改善了原有设备的定位精度。

关键词：超宽带；惯性测量单元；无迹卡尔曼滤波；数据融合；室内三维定位

中图分类号：TP391.9

文献标识码：A

文章编号：1006-883X(2022)03-0027-10

收稿日期：2022-01-26

多传感器融合在无人机室内 三维定位中的应用

陈博^{1,2} 李擎^{1,2}

1. 北京信息科技大学自动化学院智能控制研究所，北京 100192；2. 北京信息科技大学高动态导航实验室，北京 100192

0 前言

近年来，人们对基于室内定位的无人机检测探查技术有很大的需求，因此，如何提高室内定位精度是一个热门话题。

最开始，研究人员提出了一些局部定位系统（Local Positioning System, LPS），例如：文献[1]将无线保真（Wireless Fidelity, WiFi）定位技术应用到复杂的室内环境中；文献[2]采用射频识别（Radio Frequency Identification, RFID）标签进行室内定位。尽管基于 WiFi 和 RFID 的 LPS 技术已经在室内环境中广泛使用，但是它们只能提供米级的定位精度。

为了获取更高的定位精度，研究人员把目光投向超宽带（Ultra Wide Band, UWB）技术。文献[3]阐述了超宽带室内定位技术的分析和最新进展；文献[4]

分析比较了基于信号到达时间差的 3 种定位算法，最好的泰勒算法二维平面定位精度能到 10 cm 以内；文献[5]使用了粒子滤波和多路径补偿算法，将三维定位精度提高到了 20 cm，但使用了 16 个基站；文献[6]使用了 8 个基站，在三维空间中精度仍然大于 20 cm。

需要指出的是，单独使用超宽带的定位精度并不能满足室内高精度运行的要求。IMU 是一种常用的机器人姿态估计传感器，具有精度高、更新频率快、体积小等优点，然而，IMU 是通过积分来估计其位置的，存在累积误差，另外，长时间运行后，位置估计会发生漂移。文献[7]中，使用非线性滤波融合 UWB 和 IMU，得到了厘米级的汽车二维位置估计；文献[8]中，UWB 和 IMU 通过改进的 EKF 滤波算法融合得到了更准确的行人姿态估计，在周长 40 m 的封闭轨迹内

实现小于 4% 的全局误差；文献 [9] 中，利用 EKF 和神经网络，将 UWB 和 IMU 融合后得到的非视距误差 0.43 m，视距下为 0.12 m；文献 [10] 中，利用粒子滤波融合 IMU 和 UWB，得到精度 10 cm 的定位效果，其问题主要是粒子滤波计算量大，所需时间过长；文献 [11] 中，在组合定位系统中建立了 INS / UWB 紧耦合模型，实现 0.24 m 以内的定位精度。

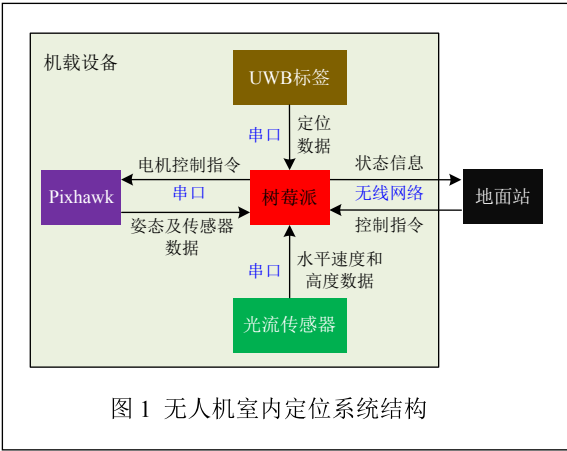
常用的多传感器融合算法包括：扩展卡尔曼滤波（Extended Kalman Filtering，EKF）^[12]、无迹卡尔曼滤波（Unscented Kalman Filtering，UKF）^[13]、粒子滤波（Particle Filtering，PF）^[14] 等，以及文献 [15] 提出的单基站和脚安装的行人轨迹推算系统组合定位关键算法。超宽带定位系统模型和 IMU 模型都是非线性高斯模型。扩展卡尔曼滤波和无迹卡尔曼滤波虽然可以处理非线性高斯模型，但它们的估计精度不同。本文使用姿态角作为状态量，更加减少了滤波过程中的计算量。

因此，本文考虑了超宽带和 IMU 的信息融合概念设计。利用 IMU 对目标进行预测和超宽带定位系统抑制 IMU 积分产生的累积误差，以获得高精度的位置估计。此外，提出了一种基于无迹卡尔曼滤波的超宽带数据的设计方法来获取四旋翼飞行器的位置信息。实验结果表明，本文提出的融合设计方法在四旋翼无人机路径规划中有较高的定位精度，且计算速度快很多。

1 系统结构

本文所使用的室内无人机定位系统由 UWB 定位系统、上位 PC 机、树莓派和无人机组成，通信方式主要使用串口和网络通信，基本结构如图 1 所示。机载飞控 Pixhawk 与机载树莓派之间采用有线串口通信，Pixhawk 将基本的姿态和传感器数据发送给树莓派，树莓派可以通过串口与 UWB 系统标签连接，获取无人机定位数据，完成控制计算后将电机控制指令发送给 Pixhawk，实现四旋翼的基本控制。本文主要研究其中的控制、定位问题。

在只有 4 个定位基站的前提下，三维定



位的精度（主要是高度上的精度）较差，且 UWB 本身定位效果受到非视距误差的影响非常大，因此，本文所用无人机上还安装了光流传感器和惯性测量单元 IMU。系统控制流程框图如图 2 所示。首先，利用光流传感器输出的高度值修正 UWB 测得的高度值，得到较好的三维位置信息，在视距场景时，使用三维位姿信息修正 IMU 的积累误差，在非视距场景时，使用 IMU 惯性测量单元短时间内所得精确位姿信息弥补 UWB 测得的位置信息，通过多传感器数据的融合互补，得到任何场景下精确的三维位置信息，提供给无人机进行后续一系列任务。

2 无人机数学模型

具体建模方法可参考文献 [16]，本章只简单介绍建模过程中使用的公式和实验系统的实际参数。

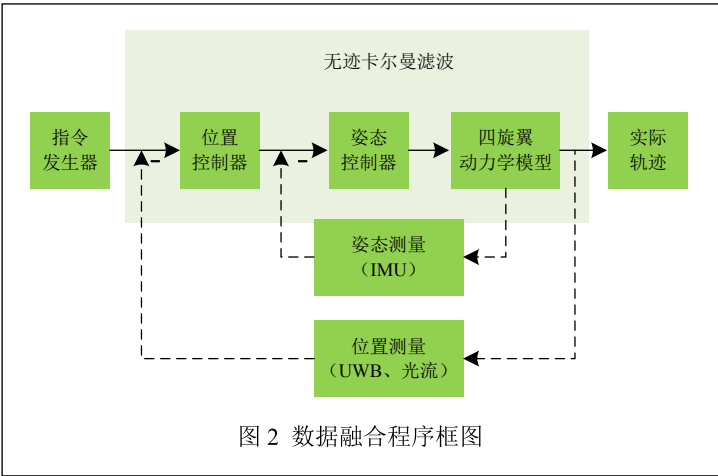


图 2 数据融合程序框图

本实验中, 无人机机体坐标系定义 X 为飞机中心水平向前, Y 为垂直 X 轴水平向右, Z 轴为垂直 XY 平面竖直向下。电机定义与旋转方向如图 3 所示, 1 号和 2 号电机逆时针旋转, 3 号和 4 号电机顺时针旋转。

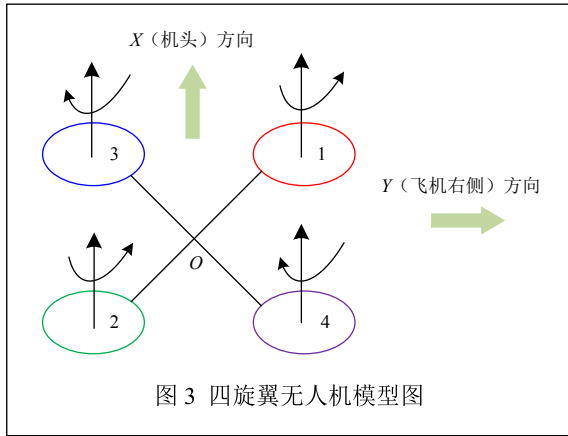


图 3 四旋翼无人机模型图

四旋翼无人机的动力学系统模型为:

$$\tilde{\omega} = \frac{1}{T_m s + 1} (C_R \sigma + \tilde{\omega}_b) \quad (1)$$

其中, $\tilde{\omega}$ ——电机的转速;

σ ——油门信号 ($0 < \sigma < 1$);

T_m 、 C_R 、 $\tilde{\omega}_b$ ——常参数 (具体数值见表 1)。

电机控制效率模型为:

$$f = c_T (\tilde{\omega}_1^2 + \tilde{\omega}_2^2 + \tilde{\omega}_3^2 + \tilde{\omega}_4^2) \quad (2)$$

其中, f ——4 个螺旋桨拉力的合力;

$\tilde{\omega}_1 \sim \tilde{\omega}_4$ ——4 个电机的转速;

c_T ——拉力系数, 为常参数 (具体数值见表 1)。

$$\begin{cases} \tau_x = d c_T \left(-\frac{\sqrt{2}}{2} \tilde{\omega}_1^2 + \frac{\sqrt{2}}{2} \tilde{\omega}_2^2 + \frac{\sqrt{2}}{2} \tilde{\omega}_3^2 - \frac{\sqrt{2}}{2} \tilde{\omega}_4^2 \right) \\ \tau_y = d c_T \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \tilde{\omega}_1^2 - \frac{\sqrt{2}}{2} \tilde{\omega}_2^2 + \frac{\sqrt{2}}{2} \tilde{\omega}_3^2 - \frac{\sqrt{2}}{2} \tilde{\omega}_4^2 \right) \\ \tau_z = c_M (\tilde{\omega}_1^2 + \tilde{\omega}_2^2 - \tilde{\omega}_3^2 - \tilde{\omega}_4^2) \end{cases} \quad (3)$$

其中, τ_x 、 τ_y —— X 和 Y 轴的力矩;

τ_z —— Z 轴的反扭矩;

d ——无人机中心到任一电机旋转轴的距离,

为常参数;

c_M ——扭矩系数, 为常参数 (具体数值见表 1)。

机体姿态与位置的运动和动力学模型为:

$${}^e \dot{p} = {}^e v \quad (4)$$

其中, ${}^e p$ ——惯性系下的位置;

${}^e v$ ——惯性系下的速度。

$$\dot{q}_e^b = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -{}^b \omega^T \\ {}^b \omega & -[{}^b \omega]_{\times} \end{bmatrix} q_e^b \quad (5)$$

其中, q_e^b ——四元数;

${}^b \omega$ ——机体角速度。

$$\begin{cases} \dot{b} v = -{}^b \omega \times b v + \frac{f_b}{m} \\ f_b = m g R^T e_3 - f e_3 - \frac{1}{2} C_d b v^T \cdot \text{abs}(b v) \\ e v = R \cdot b v \end{cases} \quad (6)$$

其中, $b v$ ——无人机在机体系下的速度;

${}^b \omega$ ——无人机在机体系下的角速度;

f_b ——无人机在机体系下的合力;

m ——无人机质量, 为常参数;

g ——重力加速度, 为常参数;

R ——从惯性系到机体系的旋转矩阵;

e_3 ——惯性系的 z 轴矢量 $[0 \ 0 \ 1]^T$;

f ——4 个电机的拉力;

C_d ——无人机的阻力系数, 为常参数 (具体数值见表 1)。

$$\begin{cases} J \cdot {}^b \dot{\omega} = -{}^b \omega \times (J \cdot {}^b \omega) = G_a + \tau \\ G_a = J_{RP} ({}^b \omega \times e_3) \left(\sum_{i=1}^4 K_i \tilde{\omega}_i \right) \end{cases} \quad (7)$$

其中, J ——无人机的转动惯量矩阵, 为常参数;

G_a ——陀螺力矩;

τ ——螺旋桨在机体轴上的力矩;

J_{RP} ——螺旋桨的转动惯量, 为常参数;

K_i ——螺旋桨的旋转在机体系下的方向, 与电机旋转方向和机体坐标系定义有关, 在本系统中,

$K_1 = K_2 = -1$, $K_3 = K_4 = 1$ 。

其余参数数值见表 1。

3 UWB 定位模型

UWB 定位系统本质上是一种通信过程, 由基站向带有标签的目标物体发送信号, 记录下信号飞行时间,

表 1 常参数值

名称	参数值
T_m	0.0914
C_R	881.44
$\tilde{\omega}_b$	205.55
d	0.1875
c_T	0.938*10-5
c_M	1.497*10-7
m	1.5
g	9.8
J	对角矩阵, $\text{diag}([J_{xx} \ J_{yy} \ J_{zz}])$, $J_{xx}=0.021029, J_{yy}=0.021633, J_{zz}=0.039424$
J_{RP}	0.0000819
C_d	0.0746

根据 ToF 测距原理, 测得基站到目标 (标签) 的距离, 再根据空间中已知的基站坐标和测得的各个基站到目标的距离, 通过最小二乘法计算出目标相对于定位系统的坐标信息, 从而实现定位效果。

在实验室环境下建立如图 4 所示的 UWB 定位系统。其中, A_0 、 A_1 、 A_2 、 A_3 位于同一水平高度的矩形平面上, 且分别代表定位基站, T 代表标签位置, 标签放置在无人机上。 d_0 、 d_1 、 d_2 、 d_3 分别代表标签距各个基站的距离。

因此可以建立坐标系, 并以 A_0 为原点, $\overline{A_0A_1}$ 为 x 轴, $\overline{A_0A_3}$ 为 y 轴, 过 A_0 且垂直 xoy 平面为 z 轴, 且向上为正方向。为方便与 IMU 数据融合, 根据右手定则, 将坐标系排列成东 - 北 - 天 ($E-N-U$)。 x 轴正方向为东方向, y 轴正方向为北方向, z 轴正方向为天空方向。

设 T 的坐标为 (x, y, z) , A_0 坐标为 (x_0, y_0, z_0) , A_1 坐标为 (x_1, y_1, z_1) , A_2 坐标为 (x_2, y_2, z_2) , A_3 坐

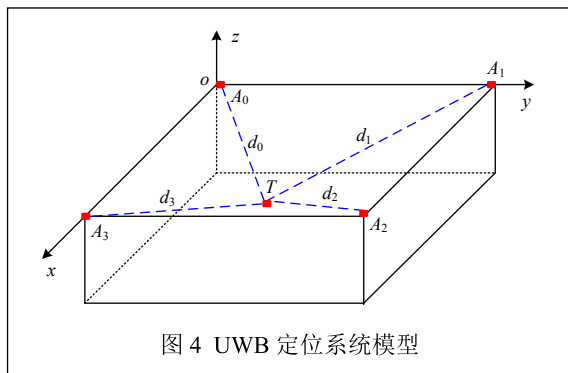


图 4 UWB 定位系统模型

标为 (x_3, y_3, z_3) , A_0 、 A_1 、 A_2 、 A_3 坐标已知, 则根据图 4 的定位模型可以得到:

$$\begin{cases} (x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2=d_0^2 \\ (x-x_1)^2+(y-y_1)^2+(z-z_1)^2=d_1^2 \\ (x-x_2)^2+(y-y_2)^2+(z-z_2)^2=d_2^2 \\ (x-x_3)^2+(y-y_3)^2+(z-z_3)^2=d_3^2 \end{cases} \quad (8)$$

将 (8) 展开可得:

$$\begin{cases} x^2+x_0^2-2xx_0+y^2+y_0^2-2yy_0+z^2+z_0^2-2zz_0=d_0^2 \\ x^2+x_1^2-2xx_1+y^2+y_1^2-2yy_1+z^2+z_1^2-2zz_1=d_1^2 \\ x^2+x_2^2-2xx_2+y^2+y_2^2-2yy_2+z^2+z_2^2-2zz_2=d_2^2 \\ x^2+x_3^2-2xx_3+y^2+y_3^2-2yy_3+z^2+z_3^2-2zz_3=d_3^2 \end{cases} \quad (9)$$

用第一行分别减去后面三行可得:

$$\begin{cases} 2(x_0-x_1)x+2(y_0-y_1)y+2(z_0-z_1)z=\eta_1 \\ 2(x_0-x_2)x+2(y_0-y_2)y+2(z_0-z_2)z=\eta_2 \\ 2(x_0-x_3)x+2(y_0-y_3)y+2(z_0-z_3)z=\eta_3 \end{cases} \quad (10)$$

其中:

$$\begin{cases} \eta_1=d_1^2-d_0^2-x_1^2+x_0^2-y_1^2+y_0^2-z_1^2+z_0^2 \\ \eta_2=d_2^2-d_0^2-x_2^2+x_0^2-y_2^2+y_0^2-z_2^2+z_0^2 \\ \eta_3=d_3^2-d_0^2-x_3^2+x_0^2-y_3^2+y_0^2-z_3^2+z_0^2 \end{cases} \quad (11)$$

此时, 可以把问题转化为矩阵相乘, 将式 (10)

写成矩阵形式, 得:

$$\begin{bmatrix} 2(x_0-x_1) & 2(y_0-y_1) & 2(z_0-z_1) \\ 2(x_0-x_2) & 2(y_0-y_2) & 2(z_0-z_2) \\ 2(x_0-x_3) & 2(y_0-y_3) & 2(z_0-z_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

根据矩阵除法, 求得:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 2(x_0-x_1) & 2(y_0-y_1) & 2(z_0-z_1) \\ 2(x_0-x_2) & 2(y_0-y_2) & 2(z_0-z_2) \\ 2(x_0-x_3) & 2(y_0-y_3) & 2(z_0-z_3) \end{bmatrix}^{-1} \quad (13)$$

4 IMU 姿态解算和误差分析

本文选取东 - 北 - 天 ($E-N-U$) 为导航坐标系, 记为 n 系; $X-Y-Z$ 为载体坐标系, 记为 b 系。

图 5 给出了导航系与载体系的关系。设 $OXYZ$ 为导航坐标系, $O_bX_bY_bZ_b$ 代表载体坐标系, 其中 O_b 为载体质心。假设, IMU 和 UWB 标签分别安装在载体上

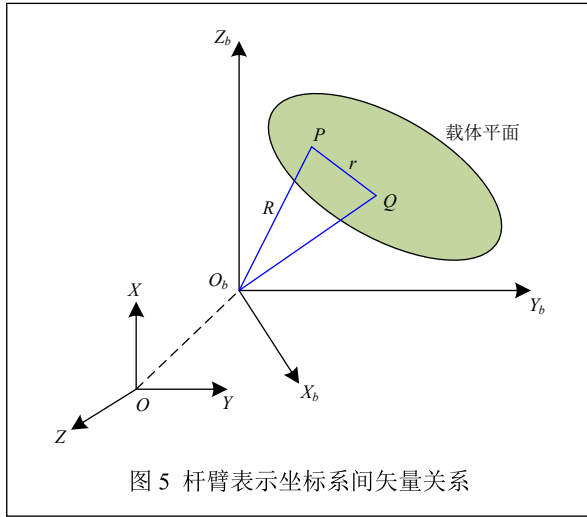


图5 杆臂表示坐标系间矢量关系

的 P 点和 Q 点, 这里 R 表示 IMU 与飞机质心之间的距离, r 为 IMU 与 UWB 标签之间的偏移量, 因此, R 被认为是一个不确定的杠杆臂, 而 r 是一个确定的杠杆臂 (一个偏移量)。

假设在点 P 处输出的比力写为:

$$f_p^b = f_{O_b}^b + \left(\frac{d^2 L_p}{dt^2}\right)i \quad (14)$$

$$\left(\frac{dL_p}{dt}\right)i = \left(\frac{dL_p}{dt}\right)b + k_{ib}^b \times L_p \quad (15)$$

其中, f_p^b ——在点 P 处输出的比力;

$f_{O_b}^b$ ——在飞机质心处输出的比力;

k_{ib}^b ——机身框架相对于惯性框架的转角速率;

下标 i ——相对于惯性系的导数;

下标 b ——相对于身体架的导数。

从方程 (14) 可以得到:

$$f_p^b = f_p^b + \dot{k}_{ib}^b \times L_p + k_{ib}^b \times (k_{ib}^b \times L_p) \quad (16)$$

其中:

$$\delta f^b = f_p^b - f_b^b \quad (17)$$

则式 (16) 可以写为:

$$\delta f^b = \dot{k}_{ib}^b \times L_p + k_{ib}^b \times (k_{ib}^b \times L_p) \quad (18)$$

公式 (17) 右侧的第一项是切线加速度, 右侧的第二项是向心加速度。根据公式 (17), δf^b 向东北地坐标系变换如下:

$$\delta f^n = C_b^n \delta f^b \quad (19)$$

其中, C_b^n ——从载体坐标系到导航坐标系的变换矩阵。

$$C_b^n = \begin{bmatrix} \cos j \cos \theta & \cos j \sin \theta \sin V - \sin j \cos V & \cos j \sin \theta \cos V + \sin j \sin V \\ \sin j \cos \theta & \sin j \sin \theta \sin V + \cos j \cos V & \sin j \sin \theta \cos V - \cos j \sin V \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin V & \cos \theta \cos V \end{bmatrix} \quad (20)$$

其中, j 、 θ 、 V ——方位角、俯仰角和滚动角。

$$\dot{C}_b^n = C_b^n \Omega_{nb}^n \quad (21)$$

其中, Ω_{nb}^n ——反对称矩阵, 为:

$$\Omega_{nb}^n = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{nbz}^b & \omega_{nbz}^b \\ \omega_{nbz}^b & 0 & \omega_{nbz}^b \\ \omega_{nbz}^b & \omega_{nbz}^b & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

输出速度可表示为:

$$\dot{v}^n = C_b^n f^b - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times v^n + g^n \quad (23)$$

其中, f^b ——加速度计输出的比力;

ω_{ie} ——地球自转角速度;

ω_{en} ——位置角速度;

g ——地球重力加速度。

经度、纬度和高度的变化率分别为 $\dot{j}$ 、 $\dot{w}$ 、 $\dot{h}$:

$$\dot{j} = \frac{v_E}{(R_n + h) \cos W} \quad (24)$$

$$\dot{w} = \frac{v_N}{R_m + h} \quad (25)$$

$$\dot{h} = v_U^U \quad (26)$$

其中, j 、 w 、 h ——经度、纬度和高度;

v_E 、 v_N 、 v_U ——东-北-天 ($E-N-U$) 方向上的速度;

R_n 、 R_m ——地球横向、纵向曲率半径。

惯性测量单元的误差模型为:

$$\begin{aligned} \delta \dot{v}^n &= f^n \times \psi - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \delta v^n \\ &\quad - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times v^n - \delta g^n + C_b^n \delta f^b \end{aligned} \quad (27)$$

$$\delta \dot{j} = \delta v_E^n \sec[w / (R_E + h)] + \delta L \delta g \cdot v_E^n \tan w \cdot \sec[w / (R_E + h)] \quad (28)$$

$$\delta \dot{w} = \delta v_N^n / (R_N + h) \quad (29)$$

$$\delta \dot{h} = \delta v_U^n \quad (30)$$

$$\dot{\psi} = -\psi \times \omega_{in}^n + \delta \omega_{in}^n - C_b^n \delta \omega_{ib}^b \quad (31)$$

其中, f^n ——惯性导航系统承受的比力;

ω_{ie}^n ——地球自转角速度在导航坐标系的投影;

ω_{en}^n ——系统坐标系相对地球坐标系的转动角速度在导航坐

标系下的投影:

$\delta\omega_{ib}^b$ ——陀螺仪输出的角速度误差。

上述误差模型忽略哥氏项误差和重力矢量误差,

可以简化为:

$$\delta\dot{v}^n = [f^n \times] \psi + C_b^n \delta f^b \quad (32)$$

$$\delta\dot{p}^n = \delta v \quad (33)$$

$$\dot{\psi} = -C_b^n \delta\omega_{ib}^b \quad (34)$$

其中, δv^n ——速度误差;

δp^n ——位置误差;

ψ ——姿态误差。

具体的 IMU 解算过程可参考文献 [17]。

5 无迹卡尔曼滤波

与扩展卡尔曼滤波 (EKF) 不同, 无迹卡尔曼滤波 (UKF) 并不对非线性方程 f 和 h 在估计点处做线性化逼近, 而是利用无迹变换在估计点附近确定采样, 用这些样本点表示高斯密度近似状态的概率密度函数。这种近似实质是一种统计近似而且求解, 从而不会引入线性化带来的误差, 滤波效果更好。因此, 本文选用的融合方法为无迹卡尔曼滤波。

5.1 系统建模

设系统的状态方程和观测方程为:

$$X(k) = f_{k-1}(X(k-1)) + w(k-1) \quad (35)$$

$$z(k) = h_k(X(k)) + v(k) \quad (36)$$

其中, $X(k)$ ——系统 k 时刻的状态量;

$f_{k-1}(X(k-1))$ ——上一时刻系统状态到这一时刻系统状态的非线性关系;

$w(k-1)$ —— $k-1$ 时刻的系统噪声, 对应的协方差矩阵为 Q_k ;

$z(k)$ —— k 时刻系统的观测量;

$h_k(X(k))$ —— k 时刻状态量被观测的非线性关系;

$v(k)$ —— k 时刻的观测噪声, 对应的协方差矩阵为 R_k 。

本文选取的状态量为 11 维, 如下公式所示, 其中, ζP 、 ζv 、 $\zeta \Psi$ 为位置误差、速度误差、姿态误差在导航坐标系 ($E-N-U$ 坐标系) 上的三维分量 (其中, 姿态 Ψ 包括航向角 α 、姿态角 β 、滚转角 λ); b_a 为加速度

计的偏置矢量; b_g 为陀螺仪的偏置矢量。

$$X_k = [\zeta P_E, \zeta P_N, \zeta P_U, \zeta v_E, \zeta v_N, \zeta v_U, \zeta \alpha, \zeta \beta, \zeta \lambda, b_a, b_g]^T \quad (37)$$

根据惯导原理, 可得状态转换关系为:

$$\dot{\zeta P}_E = \zeta P_E + \Delta t \zeta v_E \quad (38)$$

$$\dot{\zeta P}_N = \zeta P_N + \Delta t \zeta v_N \quad (39)$$

$$\dot{\zeta P}_U = \zeta P_U + \Delta t \zeta v_U \quad (40)$$

$$\dot{\zeta v}_E = \zeta v_E + \Delta t [f^n \times] \cdot \zeta \alpha \quad (41)$$

$$\dot{\zeta v}_N = \zeta v_N + \Delta t [f^n \times] \cdot \zeta \beta \quad (42)$$

$$\dot{\zeta v}_U = \zeta v_U + \Delta t [f^n \times] \cdot \zeta \lambda \quad (43)$$

$$\dot{\zeta \alpha} = \zeta \alpha \quad (44)$$

$$\dot{\zeta \beta} = \zeta \beta \quad (45)$$

$$\dot{\zeta \lambda} = \zeta \lambda \quad (46)$$

其中, $\dot{\zeta P}_E$ 表示 ζP_E 下一时刻的值, 其他状态含义相同, 这里就不一一赘述。

对于观测模型, 根据图 4 所示的 UWB 定位系统的几何关系可以很容易地得到:

$$\begin{bmatrix} d_0(k) \\ d_1(k) \\ d_2(k) \\ d_3(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{(x_k - x_0)^2 + (y_k - y_0)^2 + (z_k - z_0)^2} \\ \sqrt{(x_k - x_1)^2 + (y_k - y_1)^2 + (z_k - z_1)^2} \\ \sqrt{(x_k - x_2)^2 + (y_k - y_2)^2 + (z_k - z_2)^2} \\ \sqrt{(x_k - x_3)^2 + (y_k - y_3)^2 + (z_k - z_3)^2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_0(k) \\ n_1(k) \\ n_2(k) \\ n_3(k) \end{bmatrix} \quad (47)$$

其中, (x_k, y_k, z_k) ——标签在 k 时刻所对应系统坐标系的坐标;

$n_0(k)$ 、 $n_1(k)$ 、 $n_2(k)$ 、 $n_3(k)$ ——标签到 4 个基站距离的测量噪声。

5.2 数据融合

无迹卡尔曼滤波算法如下:

第一步, 初始化状态量。对于位置状态量 ζP , 在静止状态下, 取 100 个 UWB 输出的标签到基站的距离, 取均值算出坐标后作为 ζP 的初值; 静止状态时, ζv 为

0; 静止状态取 100 组加速度计数据, 根据公式计算出航向角 α 、姿态角 β 、滚转角 λ 作为状态量初值:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{-A_x}{\sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}}\right) \quad (48)$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{-A_y}{\cos\theta\sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}}\right) \quad (49)$$

$$\lambda = -\arctan\left(\frac{H_y \cos\beta - H_z \sin\beta}{H_x \cos\alpha + H_y \sin\alpha \sin\beta + H_z \sin\alpha \cos\beta}\right) \quad (50)$$

其中, A_x 、 A_y 、 A_z ——加速度计的 x 轴、 y 轴、 z 轴的加速度值;

H_x 、 H_y 、 H_z ——磁力计 3 个轴的测量值。

初始协方差矩阵可以设为单位阵。

第二步, 计算 σ 点的 $\xi_{k-1|k-1}^i$ 。 σ 为采样点。依据 $x_{k-1|k-1}$ 和 $p_{k-1|k-1}$ 生成 $2n+1$ 个 σ 点 $\xi_{k-1|k-1}^i$, $i=0,1,\dots,2n$, n 为状态量的维数, 本文 n 为 11。无迹变换时, 取尺度参数 $\alpha=0.01$, $\kappa=0$, $\beta=2$ 。根据公式计算采样点的权重:

$$\begin{cases} \omega_0^m = \frac{\lambda}{n+\lambda} \\ \omega_0^c = \frac{\lambda}{n+\lambda} + (1-\alpha^2+\beta) \\ \omega_i^c = \omega_i^m = \frac{\lambda}{2(n+\lambda)}, i=1:2n \end{cases} \quad (51)$$

其中, $\lambda=\alpha^2(n+\kappa)-n$ 。

第三步, 根据公式计算 σ 点的 $\xi_{k|k}^i$:

$$\begin{cases} \xi_{k|k}^i = f_k(\xi_{k-1|k-1}^i), i=0:2n \\ \hat{x}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} \omega_i^m \xi_{k|k}^i \\ P_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} \omega_i^c (\xi_{k|k}^i - \hat{x}_{k|k-1})(\xi_{k|k}^i - \hat{x}_{k|k-1})^T + Q_{k-1} \end{cases} \quad (52)$$

第四步, 根据公式计算 σ 点 $\hat{x}_{k|k-1}$ 和 $P_{k|k-1}$ 通过量测方程对 x_k 的传播:

$$\begin{cases} \eta_k^0 = \hat{x}_{k|k-1} \\ \eta_k^i = \hat{x}_{k|k-1} + (\sqrt{(n+\lambda)P_{k|k-1}})_i, i=1:n \\ \eta_k^i = \hat{x}_{k|k-1} - (\sqrt{(n+\lambda)P_{k|k-1}})_{i-1}, i=n+1:2n \end{cases} \quad (53)$$

第五步, 根据公式计算输出的一步提前预测:

$$\begin{cases} \zeta_k^i = h_k(\eta_k^i), i=0:2n \\ \hat{z}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} \omega_i^m \zeta_k^i \\ P_{\hat{z}_k} = \sum_{i=0}^{2n} \omega_i^c (\zeta_k^i - \hat{z}_{k|k-1})(\zeta_k^i - \hat{z}_{k|k-1})^T + R_k \\ P_{\hat{x}_k \hat{z}_k} = \sum_{i=0}^{2n} \omega_i^c (\eta_k^i - \hat{x}_{k|k-1})(\zeta_k^i - \hat{z}_{k|k-1})^T \end{cases} \quad (54)$$

第六步, 获得新的量测值后, 进行滤波更新:

$$\begin{cases} \hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k(z_k - \hat{z}_{k|k-1}) \\ K_k = P_{\hat{x}_k \hat{z}_k} P_{\hat{z}_k}^{-1} \\ P_{k|k} = P_{k|k-1} - P_{\hat{x}_k \hat{z}_k} P_{\hat{z}_k}^{-1} (P_{\hat{x}_k \hat{z}_k})^T \end{cases} \quad (55)$$

更新完成后的状态量与协方差矩阵可以直接带入到下一轮的迭代过程中, 完成无迹卡尔曼滤波过程。

6 实验与分析

6.1 环境搭建

为验证本文所提出的室内三维定位方法在实际中的定位效果与精确性, 设计了实验进行验证, 实验地点为学校内高动态导航实验室 (5 m×4 m×3 m), 如图 6 所示。实验所选设备如图 7 所示。

其中, UWB 定位系统采用 Nooploop 公司研发的 LinkTrack 系列产品, 基站选用的是 LinkTrack S 型号,



图 6 实验场地

标签选用的是 LinkTrack SS 型号，厂家手册所标二维精度为 20 cm，三维精度在 30 cm 左右。4 个基站固定好后，分别用 USB 连接到一起，接入 PC 端即可。无人机选用的是北京灵思创奇科技有限公司的成品无人机，飞控使用的是 Pixhawk 和树莓派，修改了部分控制器程序，改用内外环控制方法，使其能在实验室场地内平稳飞行。光流传感器选用的是匿名科技下的产品，可输出根据摄像头计算后的高度信息。还有机载飞控中的 IMU 惯性测量单元，可输出无人机的位置、姿态信息。

6.2 实验设计

实验方案设计：对无人机设定倾斜向上的封闭圆形轨迹，并让无人机沿着设定轨迹飞行 3 圈再落地。设计了 2 组实验，分别采用纯 UWB 定位和普通滤波

函数处理后得到的飞行路线，以及采用 EKF 融合多传感器得到飞行路线，用不同定位方式比较定位效果。

第一组：利用纯 UWB 进行定位飞行，结果如图 8 所示。图中黑色轨迹为设定路线，蓝色轨迹为 UWB 测定的路径，红色轨迹为将 UWB 测得数据进行普通卡尔曼滤波平滑处理后的轨迹。

从图 8 中可以明显看出，纯 UWB 定位的误差较大，且波动较大，不稳定，经过普通滤波处理后，轨迹虽然平滑了许多，但还是与设定轨迹有一定程度上的偏差，这主要是由于 UWB 信号在角落处发生非视距传播导致的。图 9 为纯 UWB 在 x、y 平面定位效果图。图 10 为纯 UWB 在 x、y、z 轴上的定位效果图。可以看出，在 UWB 单独定位时，误差在 25 cm 左右，与商家提供的产品手册中精度一致。

第二组：利用无迹卡尔曼滤波融合 UWB 和 IMU 的测量值，在无遮挡、信号好时，利用 UWB 的精确位置修正 IMU 由于时间长带来的累积误差，在角落 UWB 信号不佳时，用 IMU 的短期准确导航信息来弥补 UWB 由于非视距带来的误差，并结合光流传感器进行高度修正，结果如图 11 所示，蓝色为设定路线，红色为实际路线。

可以看出，定位的精度和准确性有明显提高，具有更高的可靠性。图 12 为 UKF 后在 x、y 轴上的定位图。图 13 为 UKF 数据融合后在 x、y、z 轴上的定位效果图。可以看出，在与 IMU 融合定位后，在角落原本 UWB 测得数据偏差大的位置处，已经达到与设定位置十分精确的位置，总体精度达到了 10 cm，导航误差为 0.7%。在该定位方法下，室内定位精度得到了显著提升，且具有较强的鲁棒性。

7 结束语

通过实物仿真实验验证，本文提出的基于无迹卡尔曼滤波的多传感器数据融合内外环控制室内定位方法具有较好的定位精度，能使无人机系统快速达到稳定且拥有较强的鲁棒性，定位精度从原先的 25 cm 提高到了 10 cm 以内，导航误差为总路程的 0.7%，相比纯 UWB 定位误差 12.4%，误差减小了 11.7%；相比 UWB 和普通卡尔曼滤波数据平滑处理定位误差 7.1%，



图 7 实验设备

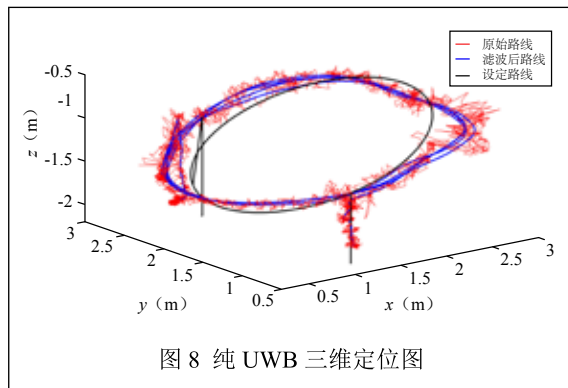


图8 纯UWB三维定位图

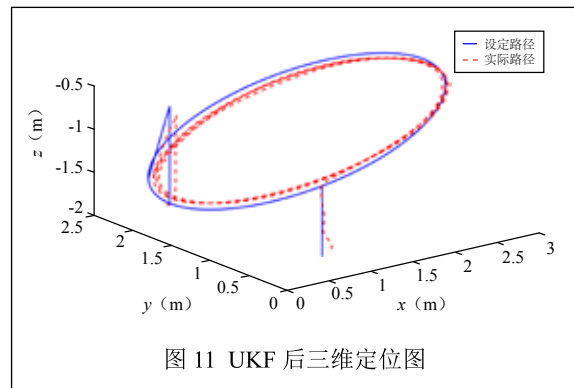


图11 UKF后三维定位图

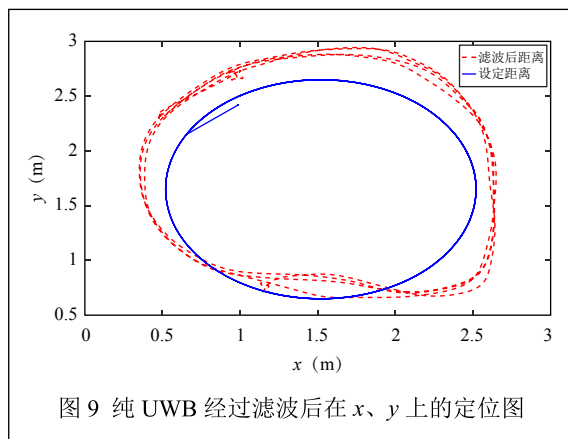


图9 纯UWB经过滤波后在x、y上的定位图

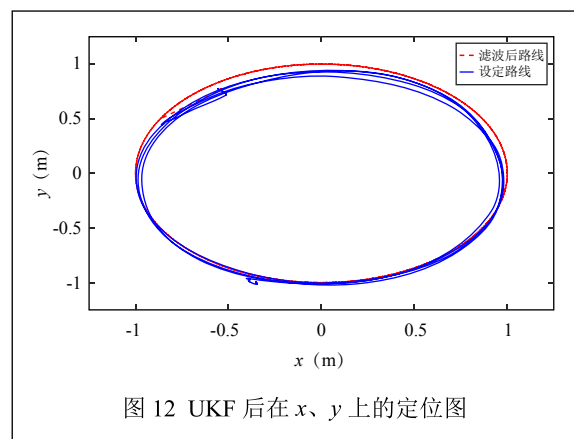


图12 UKF后在x、y上的定位图

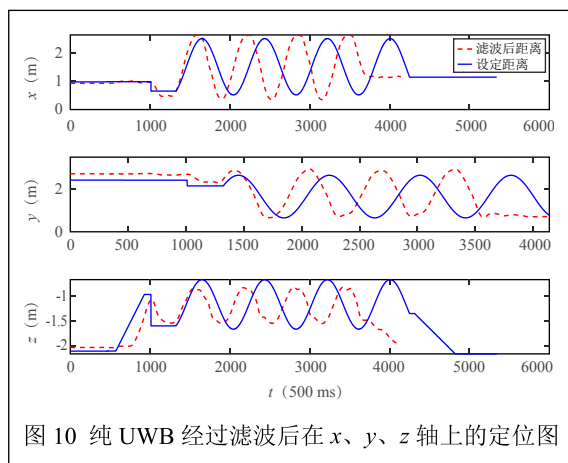


图10 纯UWB经过滤波后在x、y、z轴上的定位图

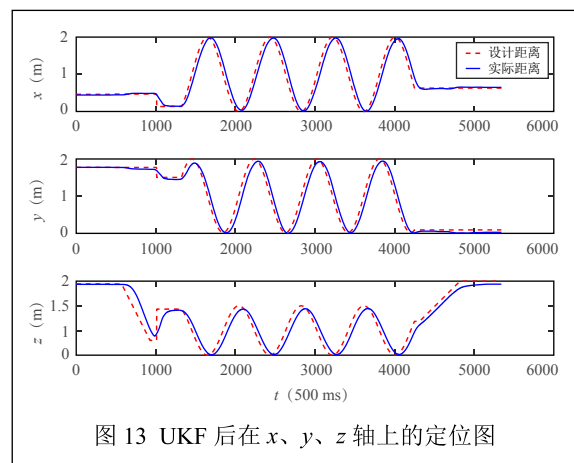


图13 UKF后在x、y、z轴上的定位图

误差减小了6.4%。该方法具有良好的导航精度，极大改善了原有设备的定位精度，使其能够满足四旋翼无人机在室内进行相关任务时的定位需求。

参考文献

[1] ALHADRAMI S, SALMAN A, KHALIFA H A. Ultra Wideband Positioning: An Analytical Study of

Emerging Technologies[C]//IEEE(Institute of Electrical and Electronic Engineers)Computer Society. Proceeding of International Conference Sensor Technologies and Applications(SENSORCOMM). Washington DC: IEEE, 2014: 1-9.

[2] POULOSE A, EYOBU O S, HAN D S. An Indoor Position Estimation Algorithm Using Smartphone IMU Sensor Data[J]. IEEE Access, 2019, 7(8): 11165-11177.

- [3] ALARIFI A, AL-SALMAN A, MANSOUR A, et al. Ultra Wideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances[J]. *Sensors*, 2016, 16(5): 707.
- [4] CHENG Y, ZHOU T. UWB Indoor Positioning Algorithm Based on TDOA Technology[C]// 2019 10th International Conference on Information Technology in Medicine and Education (ITME), 2019.
- [5] HYUN J, OH T, LIM H, et al. UWB-based Indoor Localization Using Ray-tracing Algorithm[C]// 2019 16th International Conference on Ubiquitous Robots (UR), 2019.
- [6] TIEMANN J, SCHWEIKOWSKI F, WIETFIELD C. Design of an UWB Indoor-Positioning System for UAV Navigation in GNSS-Denied Environments[C]// International Conference on Indoor Positioning & Indoor Navigation. IEEE, 2015.
- [7] KULIKOV R S. Integrated UWB/IMU System for High Rate Indoor Navigation with Cm-Level Accuracy[C]// 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). IEEE, 2018: 1-4.
- [8] Benzerrouk H, Nebylov A V. Robust IMU/UWB Integration for Indoor Pedestrian Navigation[C]// 2018:1-5.
- [9] 高鹏举. 基于 UWB/IMU 融合的室内移动机器人定位 [D]. 东南大学, 2019.
- [10] KHALAF-ALLAH M. Particle Filtering for Three-Dimensional TDoA-Based Positioning Using Four Anchor Nodes[J]. *Sensors*, 2020, 20(16): 4516-4542.
- [11] FAN Q, SUN B, SUN Y, et al. Data Fusion for Indoor Mobile Robot Positioning Based on Tightly Coupled INS/UWB[J]. *The Journal of Navigation*, 2017(5): 1079-1097.
- [12] MOURIKIS A, TRAWNY N, ROUMELIOTIS S, et al. Vision-Aided Inertial Navigation for Spacecraft Entry, Descent, and Landing[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2009, 25(2): 264-280.
- [13] ZHOU W, HOU J. A New Adaptive Robust Unscented Kalman Filter for Improving the Accuracy of Target Tracking[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 77476-77489.
- [14] WON S P, MELEK W W, GOLNARAGHI F. A Kalman/Particle Filter-Based Position and Orientation Estimation Method Using a Position Sensor/Inertial Measurement Unit Hybrid System[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57(5): 1787-1798.
- [15] 欧阳高. 基于 UWB/IMU 融合的室内定位与导航技术研究 [D]. 中国科学院大学, 2017.
- [16] 全权. 多旋翼飞行器设计与控制 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2018: 64-125.
- [17] 杨洋, 李擎. UWB 与 SINS 融合的行人导航方法 [J]. *系统仿真学报*, 2019, 31(12): 82-88.

Application of Multi-sensor Data Fusion in UAV Indoor 3D Positioning

CHEN Bo^{1,2}, LI Qing^{1,2}

(1. *Beijing Information Science and Technology University, Automation College, Beijing 100192, China*; 2. *Beijing Information Science and Technology University, Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, Beijing 100192, China*)

Abstract: Based on ultra-wideband (UWB) technology, the indoor positioning problem of UAVs can be solved, but the positioning accuracy is not high enough. In response to the above situation, the traceless Kalman filter (UKF)-based UWB localization technology and the inertial measurement unit (IMU) and optical flow sensors are proposed to fuse the inner and outer loop indoor localization method, with the attitude control based on the IMU measurement as the inner loop and the position control measured by UWB and optical flow as the outer loop, using the accurate position information obtained by UWB in the line-of-sight case to correct the accumulated error of IMU. At the same time, the short-time accurate position information of IMU is used to compensate for the positioning error of UWB in the non-line-of-sight case to improve the positioning accuracy. Finally, a physical simulation platform is designed. The experimental results show that the actual positioning accuracy of the above indoor positioning method is less than 10 cm, and the navigation error is 0.7%, and it can enter the stable state quickly. It meets the demand of indoor positioning of UAVs and greatly improves the positioning accuracy of the original equipment at the same time.

Key words: ultra wide band (UWB); inertial measurement unit (IMU); unscented kalman filter; data fusion; indoor 3D localization

作者简介

陈博: 北京信息科技大学自动化学院智能控制研究所, 硕士研究生, 研究方向为导航与控制。

通信地址: 北京市海淀区北京信息科技大学小营校区

邮编: 100192

邮箱: 15650779858@163.com

李擎: 北京信息科技大学自动化学院智能控制研究所, 教授、博导、硕导, 研究方向为智能导航与控制。