

多传感器信息融合理论在无人机相对导航中的应用*

金红新^{1,2}, 杨涛¹, 王小刚³, 周国峰², 姚旺²

(1. 国防科技大学空天科学学院, 湖南长沙 410073;

2. 中国运载火箭技术研究院战术武器事业部, 北京 100076; 3. 哈尔滨工业大学航天学院, 黑龙江哈尔滨 155600)

摘要:为提升无人机的作战效能和作战指标,提升无人机的相对导航精度和导航系统可靠性,以无人机编队的相对导航系统为研究背景,基于容积卡尔曼滤波算法和信息滤波算法,研究容积信息滤波算法。此外,还采用多传感器信息融合理论,利用分布式信息融合结构构建了无人机相对导航滤波器,对来自惯导、视觉和卫星的信息进行融合,获取无人机间的相对位置、速度和姿态信息。该方法提升了无人机相对导航的导航精度、导航可靠性和滤波稳定性,容积信息滤波算法的应用避免了传统滤波算法在高维系统中出现的数值不稳定以及精度降低等问题。数学仿真结果表明,该方法提高了无人机编队之间相对导航的精度和可靠性,证明了算法的有效性。

关键词:无人机;多传感器信息融合;相对导航

中图分类号:V249.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2017)05-090-06

Application of multi-sensor information fusion in UAV relative navigation method

JIN Hongxin^{1,2}, YANG Tao¹, WANG Xiaogang³, ZHOU Guofeng², YAO Wang²

(1. College of Aeronautics and Astronautics, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Tactical Weapons Division, China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China;

3. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 155600, China)

Abstract: In order to improve the operational effectiveness and operational indicators of the UAV (unmanned aerial vehicle), and to enhance the accuracy and reliability of the UAV relative navigation system, a novel relative navigation method was proposed. Under the background of relative navigation system, the cubature information filter based on the cubature Kalman filter and information filter was studied. Moreover, an INS/GPS/VisNav relative navigation filter was designed by making use of the multi-sensor information fusion theory and distributed information fusion structure to fuse the information from INS, VisNav and GPS, and then the relative position, velocity and attitude were obtained. By making use of this algorithm, the accuracy, reliability and stability of the reliability navigation system were all improved. In addition, the accuracy decrease and numerical instability which often occur to traditional filter were avoided by cubature information filter. Mathematical simulation results indicate that the method can improve the accuracy and reliability of the UAV relative navigation system, and the proposed algorithm is verified.

Key words: unmanned aerial vehicle; multi-sensor information fusion; relative navigation

无人机通过协同编队飞行提高无人机的使用效率,降低任务风险。相对导航系统是保证无人机间能够有效进行编队飞行的重要保障^[1-5]。如果无法得到无人机间的相对位置、速度以及姿态等相对导航信息,则难以完成无人机编队的编队保持或者队形重构等任务,与此同时,如若获取的相对导航精度下降,则会导致飞行编队的控制精度变差,任务执行效果也会因此下降甚至出现错误。单一传感器进行导航已经难以满足现代多样

化和复杂的电磁干扰环境条件下的作战任务需求。而传统的以GPS卫星导航系统为主要传感器的相对导航系统信号并不稳定,且容易受到敌方干扰的显著缺点,因而其应用受到了不小的限制。基于特征光点的视觉相对导航系统又存在着远距离时系统精度下降甚至不可用的局限性。而信息滤波理论中的卡尔曼滤波理论只适用于线性系统,而适用于非线性系统的扩展卡尔曼滤波算法,具有截断误差大和雅可比矩阵求导复杂等

* 收稿日期:2016-06-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61304236)

作者简介:金红新(1985—),男,黑龙江宝清人,博士研究生,E-mail:jinhx1979@163.com;

杨涛(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:taoy90@163.com

问题^[6-10]。

针对上述问题,本文提出了基于分布式信息融合结构方法和容积信息滤波算法对无人机的惯导、视觉以及卫星导航系统进行信息融合的相对导航状态估计方法。多传感器间信息融合可以将各个传感器取长补短以获得最优的估计效果,传感器间互为冗余配置也大大地提高了系统的可靠性。将惯导设备和GPS的优点与VisNav视觉导航设备的优点结合起来,以提高相对导航系统的性能,利用视觉导航系统的输出信息,对相对导航的惯导系统进行校正,从而估计出无人机之间的相对姿态、相对速度和相对位置。容积卡尔曼滤波(Cubature Kalman Filter,CKF)容积信息滤波方法作为一种新型非线性信息滤波算法,不但解决非线性滤波问题,而且提升了滤波估计精度和滤波稳定性。本文首先对多传感器信息融合分类方法进行比对分析选取分布式信息融合结构,采用CKF进行滤波模型设计,给出了滤波模型结构,最后根据实际工程应用,完成了数学仿真。

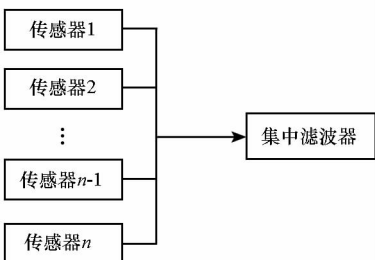
1 多传感器信息融合方法

多传感器信息融合方法的分类方法有多种多样,其中最主要的一种分类方法便是依据结构进行分类,主要有集中式融合结构、层次化分布式融合结构和完全分布式融合结构三种,信息融合结构图见图1。

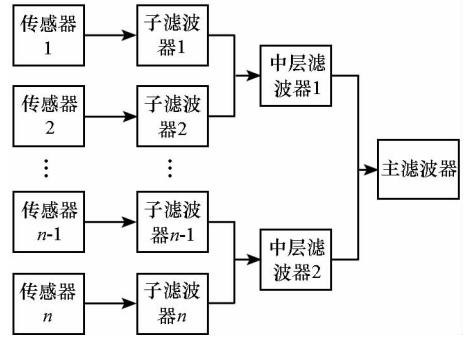
1)集中式融合结构:只利用一个滤波器同时处理来自所有传感器的信息,这种融合方法具有结构简单特点,但是这种算法却存在着状态维数过高、计算量大以及容错性差的缺点,子系统的故障可能导致整个系统不可用。

2)层次化分布式融合结构:将滤波器进行分级,以两级为例,二级滤波器处理来自传感器输出的信息,而一级滤波器则处理来自二级滤波器的信息。

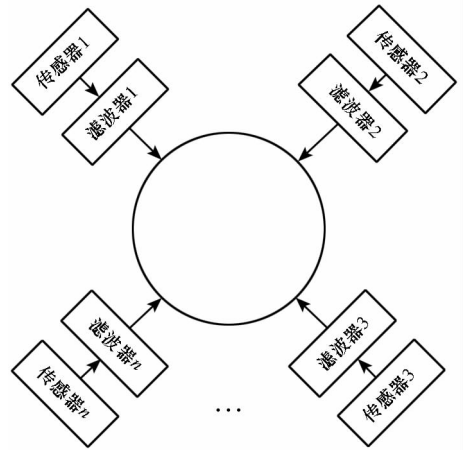
3)完全分布式融合结构:其并没有主滤波器,而是各个滤波器之间相互进行数据交换。



(a) 集中式结构
(a) Centralized Structure



(b) 层次化分布式结构
(b) Hierarchical distributed structures



(c) 完全分布式结构
(c) Completely distributed structures

图1 信息融合结构

Fig.1 Information fusion structure

不管是层次化分布式融合结构还是完全分布式融合结构,都属于分布式融合结构的范畴,因此,分布式融合结构具有设计方便、计算负担小和可靠性高的优点。因此本文选取层次化分布式融合结构。

2 CKF 信息滤波算法设计

考虑非线性离散系统方程^[6-10]为:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_k, \mathbf{v}_k, k) \quad (1)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{h}(\mathbf{x}_k, \mathbf{n}_k) \quad (2)$$

式中, \mathbf{f} 为相对导航系统的状态方程, \mathbf{h} 为相对导航系统的量测方程, $\mathbf{x} \in R^n$ 为 n 维状态向量, $\mathbf{z} \in R^m$ 为 m 维量测向量, \mathbf{v}_k 为系统噪声, \mathbf{n}_k 为量测噪声, \mathbf{u}_k 为控制量, k 表示第 k 时刻。

1)初始化

定义信息状态 $\hat{\mathbf{y}}_0$ 和信息矩阵 \mathbf{Y}_0 分别为:

$$\hat{\mathbf{y}}_0 \triangleq \mathbf{P}_{x_0}^{-1} \hat{\mathbf{x}}_0 = \mathbf{Y}_0 \hat{\mathbf{x}}_0 \quad (3)$$

$$\mathbf{Y}_0 \triangleq \mathbf{P}_{x_0}^{-1} \quad (4)$$

式中, \mathbf{P}_{x_0} 为状态 $\hat{\mathbf{x}}_0$ 的误差协方差矩阵。

2) 时间更新^[11]

Cholesky 分解信息矩阵为:

$$\mathbf{Y}_{k|k} = \mathbf{S}_{y,k|k} \mathbf{S}_{y,k|k}^T \quad (5)$$

根据协方差阵与信息矩阵之间的关系,有:

$$\mathbf{P}_{k|k} = \mathbf{Y}_{k|k}^{-1} \quad (6)$$

考虑

$$\mathbf{P}_{k|k} = \mathbf{S}_{k|k} \mathbf{S}_{k|k}^T \quad (7)$$

结合式(5)~(7),有:

$$\mathbf{S}_{k|k} \mathbf{S}_{k|k}^T = (\mathbf{S}_{y,k|k} \mathbf{S}_{y,k|k}^T)^{-1} = \mathbf{S}_{y,k|k}^{-T} \mathbf{S}_{y,k|k}^{-1} \quad (8)$$

从而有:

$$\mathbf{S}_{k|k} = \mathbf{S}_{y,k|k}^{-T} \quad (9)$$

则状态向量预估值为:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \mathbf{P}_{k|k} \hat{\mathbf{y}}_{k|k} = \mathbf{S}_{k|k} \mathbf{S}_{k|k}^T \hat{\mathbf{y}}_{k|k} \quad (10)$$

计算容积点:

$$\tilde{\boldsymbol{\chi}}_{k|k}^{(i)} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k} + \mathbf{S}_{k|k} \boldsymbol{\xi}_i \quad (11)$$

式中: $i=1, 2, \dots, 2n$; $\boldsymbol{\xi}_i = \sqrt{n}[\mathbf{1}]_i$ 。

计算容积点的预测值:

$$\tilde{\boldsymbol{\chi}}_{k+1|k}^{*(i)} = f(\tilde{\boldsymbol{\chi}}_{k|k}^{(i)}) \quad (12)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} = \sum_{i=1}^{2n} \frac{1}{2n} \tilde{\boldsymbol{\chi}}_{k+1|k}^{*(i)} \quad (13)$$

$$\mathbf{P}_{k+1|k} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} \tilde{\boldsymbol{\chi}}_{k+1|k}^{*(i)} (\tilde{\boldsymbol{\chi}}_{k+1|k}^{*(i)})^T - \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}^T + \mathbf{Q}_k \quad (14)$$

$$\mathbf{P}_{k+1|k} = \mathbf{S}_{k+1|k} \mathbf{S}_{k+1|k}^T \quad (15)$$

其中, \mathbf{Q}_k 为系统误差阵, 将状态空间量转化为信息空间量:

$$\mathbf{S}_{y,k+1|k} = \mathbf{S}_{k+1|k}^{-T} \quad (16)$$

$$\hat{\mathbf{y}}_{k+1|k} = \mathbf{Y}_{k+1|k} \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} = \mathbf{S}_{y,k+1|k} \mathbf{S}_{y,k+1|k}^T \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} \quad (17)$$

3) 测量更新^[11-15]

计算用于量测更新的 Cubature 点:

$$\mathbf{P}_{k+1|k} = \mathbf{S}_{k+1|k} \mathbf{S}_{k+1|k}^T \quad (18)$$

$$\tilde{\boldsymbol{\chi}}_{k+1|k}^{(i)} = \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} + \mathbf{S}_{k+1|k} \boldsymbol{\xi}_i \quad (19)$$

式中: $i=1, 2, \dots, 2n$; $\boldsymbol{\xi}_i = \sqrt{n}[\mathbf{1}]_i$ 。

利用量测方程计算容积点的量测预测值:

$$\mathbf{Z}_{k+1|k}^{(i)} = \mathbf{h}(\tilde{\boldsymbol{\chi}}_{k+1|k}^{(i)}) \quad (20)$$

计算互协方差阵:

$$\hat{\mathbf{z}}_{k|k-1} = \sum_{i=1}^{2n} \frac{1}{2n} \mathbf{Z}_{k|k-1}^{(i)} \quad (21)$$

$$\mathbf{P}_{xz} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} [\boldsymbol{\chi}_{k|k-1}^{(i)} - \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}] [\mathbf{Z}_{k|k-1}^{(i)} - \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}]^T \quad (22)$$

信息贡献向量:

$$\mathbf{i}_{k+1} \triangleq (\mathbf{Y}_{k+1|k} \mathbf{P}_{xz,k+1|k}) \mathbf{R}_{k+1}^{-1} (\mathbf{v}_{k+1} + \mathbf{P}_{xz,k+1|k}^T \hat{\mathbf{y}}_{k+1|k}) \quad (23)$$

信息贡献矩阵:

$$\mathbf{I}_{k+1} \triangleq (\mathbf{Y}_{k+1|k} \mathbf{P}_{xz,k+1|k}) \mathbf{R}_{k+1}^{-1} (\mathbf{Y}_{k+1|k} \mathbf{P}_{xz,k+1|k})^T \quad (24)$$

假设有 N 个传感器, 每个传感器的测量模型为:

$$\mathbf{z}_{i,k} = \mathbf{h}_{i,k}(\mathbf{x}_k, k) + \mathbf{n}_{i,k} \quad i=1, \dots, N \quad (25)$$

式中: $\mathbf{n}_{i,k} \sim \mathbf{N}(0, \mathbf{R}_{i,k})$ 为量测噪声, $\mathbf{n}_k = [\mathbf{n}_{1,k}^T \quad \mathbf{n}_{2,k}^T \quad \dots \quad \mathbf{n}_{N,k}^T]^T$; 量测噪声方差为 $\mathbf{R}_k = \text{diag}([\mathbf{R}_{1,k} \quad \mathbf{R}_{1,k} \quad \dots \quad \mathbf{R}_{1,k}])^T$ 。

定义归一化的信息矢量:

$$d_k^2 \equiv \mathbf{v}_k^T (\mathbf{P}_k^{vv})^{-1} \mathbf{v}_k \quad (26)$$

式中, \mathbf{P}_k^{vv} 为信息协方差矩阵, 并且有:

$$\mathbf{P}_k^{vv} = (\mathbf{Y}_k \mathbf{P}_{xz,k})^T \mathbf{P}_k^- (\mathbf{Y}_k \mathbf{P}_{xz,k}) + \mathbf{R}_k \quad (27)$$

残差 χ^2 检验表示为:

$$\chi^2 = \frac{\mathbf{v}_k^T (\mathbf{P}_k^{vv})^{-1} \mathbf{v}_k}{n_v} \quad (28)$$

式中, n_v 为新息的维数。

故障判断准则为: 若 $\chi^2 > \chi_{\max}^2$, 判断有故障; 若 $\chi^2 \leq \chi_{\max}^2$, 判断无故障。

χ_{\max}^2 是故障判断的门限, 用于判断传感器是否发生故障, 它的选取依赖于经验。

定义, $\mathbf{H}_k = \mathbf{Y}_k \mathbf{P}_{xz,k}$, 信息状态 $\hat{\mathbf{y}}_k^-$ 量测更新为:

$$\hat{\mathbf{y}}_k = \hat{\mathbf{y}}_k^- + \sum_{i=1}^N \mathbf{H}_{i,k}^T \mathbf{R}_{i,k}^{-1} [\mathbf{v}_{i,k} + \mathbf{H}_{i,k} \hat{\mathbf{x}}_k^-] = \hat{\mathbf{y}}_k^- + \mathbf{i}_k \quad (29)$$

信息矩阵 \mathbf{Y}_k^- 量测更新为:

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{Y}_k^- + \sum_{i=1}^N \mathbf{H}_{i,k}^T \mathbf{R}_{i,k}^{-1} \mathbf{H}_{i,k} = \mathbf{Y}_k^- + \mathbf{I}_k \quad (30)$$

3 相对导航滤波器设计

3.1 分布式信息滤波算法

前面已经对层次化分布式融合结构的定义进行了阐述, 其核心便是滤波器分级, 低级滤波器处理传感器信息, 而高级别的滤波器则处理来自下一级滤波器处理后的信息。因此, 本节采用信息滤波的方法设计按层次化分布的多传感器融合结构^[11-15]。

根据层次化分布式融和结构的基本定义, 得出第 i 个子滤波器在第 k 时刻的时间更新为:

$$\mathbf{Y}_{i,k} = \mathbf{Y}_{i,k}^- + \mathbf{H}_{i,k}^T \mathbf{R}_{i,k}^{-1} \mathbf{H}_{i,k} \quad (31)$$

$$\hat{\mathbf{y}}_{i,k} = \hat{\mathbf{y}}_{i,k}^- + \mathbf{H}_{i,k}^T \mathbf{R}_{i,k}^{-1} [\mathbf{v}_{i,k} + \mathbf{H}_{i,k} \hat{\mathbf{x}}_{i,k}^-] \quad (32)$$

变换上述两式得:

$$\mathbf{H}_{i,k}^T \mathbf{R}_{i,k}^{-1} \mathbf{H}_{i,k} = \mathbf{Y}_{i,k} - \mathbf{Y}_{i,k}^- \quad (33)$$

$$\mathbf{H}_{i,k}^T \mathbf{R}_{i,k}^{-1} [\mathbf{v}_{i,k} + \mathbf{H}_{i,k} \hat{\mathbf{x}}_{i,k}^-] = \hat{\mathbf{y}}_{i,k} - \hat{\mathbf{y}}_{i,k}^- \quad (34)$$

分布式信息融合结构示意图如图 2 所示。假设有 N 个子滤波器, 层次化分布式多传感器信息

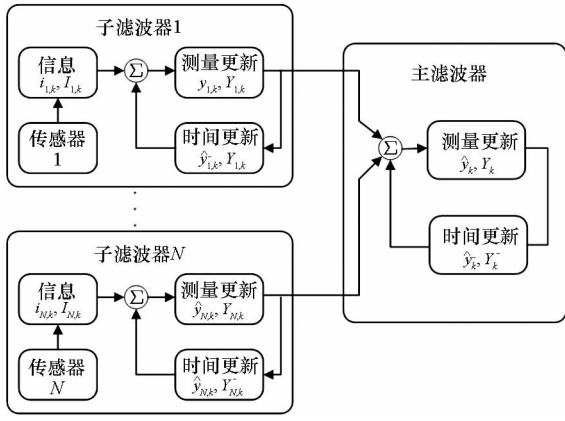


图2 分布式信息融合结构示意图

Fig.2 Diagram of distributed information fusion structure

融合结构的全局信息状态估计 \hat{y}_k 和信息矩阵 Y_k 分别为:

$$\hat{y}_k = \hat{y}_k^- + \sum_{i=1}^N (\hat{y}_{i,k} - \hat{y}_{i,k}^-) \quad (35)$$

$$Y_k = Y_k^- + \sum_{i=1}^N [Y_{i,k} - Y_{i,k}^-] \quad (36)$$

全局状态估计 \hat{x}_k 为:

$$\hat{x}_k = P_k \{ (P_k^-)^{-1} \hat{x}_k^- + \sum_{i=1}^N [P_{i,k}^{-1} \hat{x}_{i,k} - (P_{i,k}^-)^{-1} \hat{x}_{i,k}^-] \} \quad (37)$$

误差协方差矩阵 P_k 为:

$$P_k^{-1} = (P_k^-)^{-1} + \sum_{i=1}^N [P_{i,k}^{-1} - (P_{i,k}^-)^{-1}] \quad (38)$$

3.2 相对导航滤波器结构

图3给出了惯导/视觉/卫星相对导航系统的层次化分布式信息融合结构示意图,本系统设计方法如下:其一为惯导/视觉(Inertial navigation system/Vison navigation, IV)融合子滤波器,其二为惯导/卫星(Inertial navigation system/GPS, IG)融合子滤波器,其三为惯导/卫星/视觉(Inertial

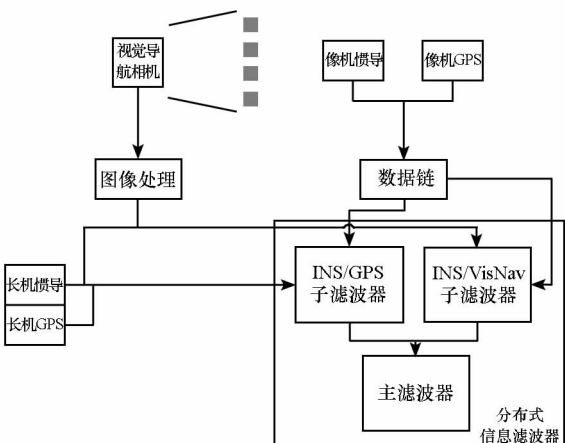


图3 INS/VisNav/GPS相对导航滤波器

Fig.3 Relative navigation filter of INS/VisNav/GPS

navigation system/GPS/Vison navigation, IGV) 融合子滤波器输出的主滤波器。每个滤波器均采用CKF进行滤波处理^[16-17]。

4 数学仿真

4.1 仿真场景及条件

本文以无人机编队保持阶段为仿真场景,利用惯导与VisNav以及GPS的组合导航方式进行相对导航系统设计,项目中的传感器精度如下:

- ①加速度的常值漂移为 250 μg ,
- ②随机噪声的方差为 50 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{h}}$;
- ③陀螺仪的常值漂移为 0.1($^\circ$)/h,
- ④白噪声方差为 0.08($^\circ$)/ $\sqrt{\text{h}}$;
- ⑤卫星导航定位误差为 5 m,速度误差为 1 m/s;

⑥视觉导航系统量测噪声为 3500 μrad ,焦距为 1 m。

4.2 仿真结果及分析

仿真结果见图4~9。图4~6给出了采用层次化分布式信息滤波算法搭建的惯导/卫星/视觉相对导航滤波器估计出的相对位置、相对速度以及相对姿态的误差变化曲线;图7~8则给出了使用惯导/卫星、惯导/视觉以及惯导/卫星/视觉这三种方法的估计精度对比图,图9对比了使用惯导/视觉、惯导/卫星/视觉两种方法估计相对姿态的估计精度。仿真结果表明,在质心运动估计上采用三种传感器的相对导航系统估计精度最高,其次则是惯导/视觉相对导航系统,而惯导/卫星的组合方式估计精度最低,这是由于卫星的传感器精度较低所导致的。而在姿态估计精度上,惯导/卫星/视觉与惯导/视觉估计精度相当,这是由于卫星系统无法提供无人机的姿态信息所导致的。

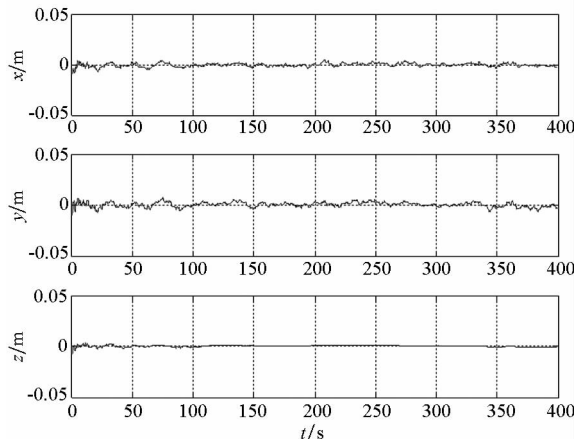


图4 相对导航位置估计误差

Fig.4 Position estimated error of relative navigation

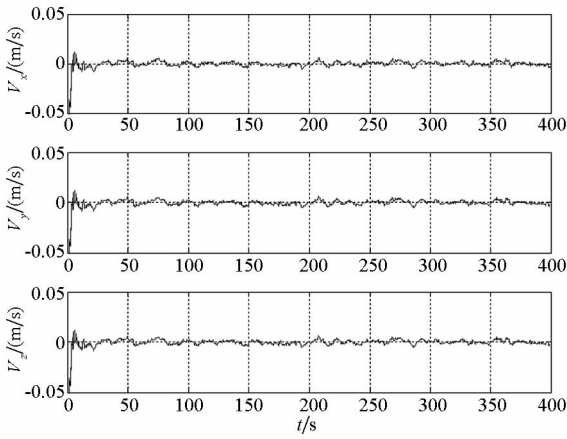


图 5 相对导航速度估计误差

Fig. 5 Velocity estimated error of relative navigation

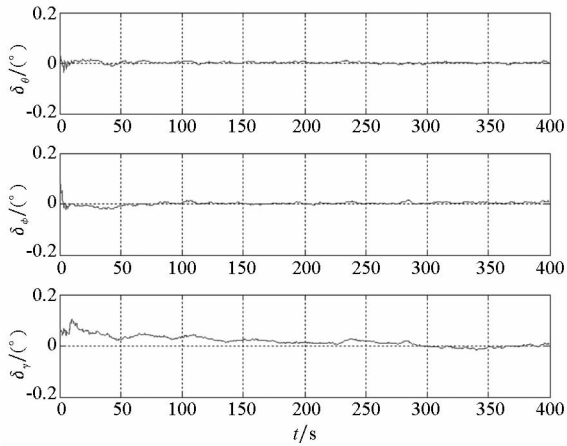


图 6 相对导航姿态估计误差

Fig. 6 Attitude estimated error of relative navigation

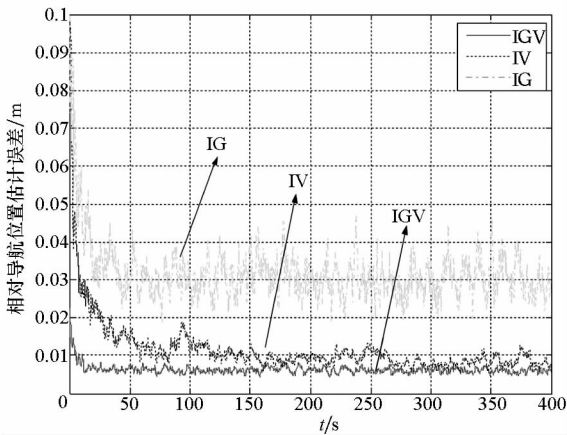


图 7 相对导航位置估计精度对比

Fig. 7 Comparison of position estimated accuracy of relative navigation

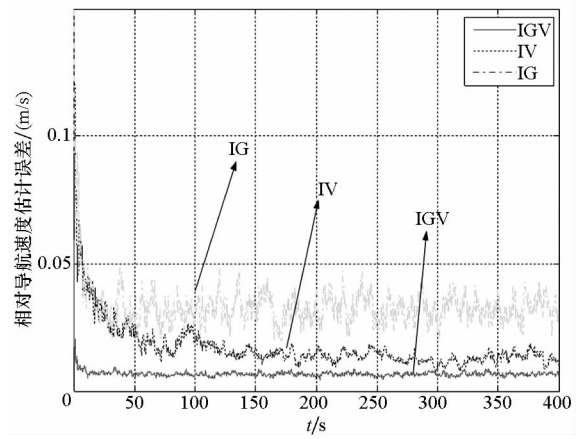


图 8 相对导航速度估计精度对比

Fig. 8 Comparison of velocity estimated accuracy of relative navigation

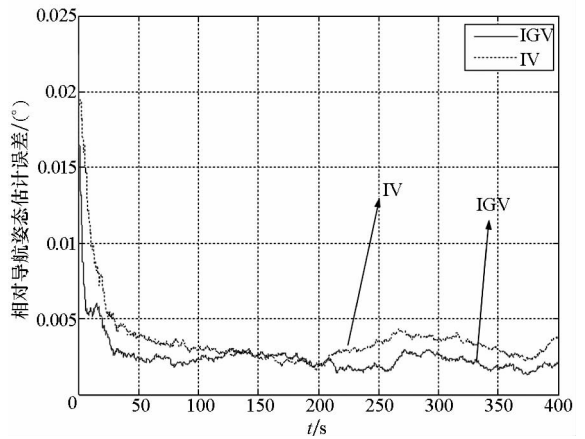


图 9 相对导航姿态估计精度对比

Fig. 9 Comparison of attitude estimated accuracy of relative navigation

果表明,在质心运动估计上采用三种传感器的相对导航系统估计精度最高,而在姿态估计精度上,惯导/卫星/视觉与惯导/视觉估计精度相当,这是由于卫星系统无法提供无人机的姿态信息所导致的。仿真结果表明,该方法满足无人机编队之间的高精度、高可靠性的相对导航的要求。

参考文献 (References)

- [1] Ezequiel C A F, Cua M, Libatique N C, et al. UAV aerial imaging applications for post-disaster assessment, environmental management and infrastructure development[C]//Proceedings of International Conference on Unmanned Aircraft Systems, 2014.
- [2] Wise R A, Rysdyk R T. UAV coordination for autonomous target tracking [C]//Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2006.
- [3] Ambrosia V, Wegener S, Brass J, et al. The UAV western states fire mission: concepts, plans and developmental

5 结论

本文对多传感器信息融合结构的无人机相对导航方法进行研究,设计了三传感器层次化分布式信息融合滤波器,并进行了数学仿真,结

- advancements[C]//Proceedings of AIAA 3rd "Unmanned Unlimited" Technical Conference, Workshop and Exhibit, 2004.
- [4] 樊琼剑, 杨忠, 方挺, 等. 多无人机协同编队飞行控制的研究现状[J]. 航空学报, 2009, 30(4): 683-691.
FAN Qiongjian, YANG Zhong, FANG Ting, et al. Research status of coordinated formation flight control for multi-UAVs[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(4): 683-691. (in Chinese)
- [5] 朱战霞, 袁建平. 无人机编队飞行问题初探[J]. 飞行力学, 2003, 21(2): 5-7.
ZHU Zhanxia, YUAN Jianping. Discuss on formation flight of UAV[J]. Flight Dynamics, 2003, 21(2): 5-7. (in Chinese)
- [6] 宋文尧, 张牙. 卡尔曼滤波[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
SONG Wenyao, ZHANG Ya. Kalman filtering[M]. Beijing: Science Press, 1991. (in Chinese)
- [7] 周东华, 席裕庚, 张钟俊. 非线性系统带次优渐消因子的扩展卡尔曼滤波[J]. 控制与决策, 1990(5): 1-6.
ZHOU Donghua, XI Yugeng, ZHANG Zhongjun. Suboptimal fading extended Kalman filtering for nonlinear systems[J]. Control and Decision, 1990(5): 1-6. (in Chinese)
- [8] 张文明, 周一宇, 姜文利. 基于扩展卡尔曼滤波的GPS多径抑制技术[J]. 宇航学报, 2003, 24(1): 53-56.
ZHANG Wenming, ZHOU Yiyu, JIANG Wenli. GPS multipath rejection through EKF[J]. Journal of Astronautics, 2003, 24(1): 53-56. (in Chinese)
- [9] 刘晓辉, 陈小平. 基于扩展卡尔曼滤波的主动视觉跟踪技术[J]. 计算机辅助工程, 2007, 16(2): 32-37.
LIU Xiaohui, CHEN Xiaoping. Tracking technique for active vision based on extended Kalman filter[J]. Computer Aided Engineering, 2007, 16(2): 32-37. (in Chinese)
- [10] Wang Y B, Papageorgiou M, Messmer A. Real-time freeway traffic state estimation based on extended Kalman filter: a case study[J]. Transportation Science, 2007, 41(2): 167-181.
- [11] Wang X G, Fei L U, Cui N G. Huber-based filter and its application to relative navigation[J]. Control & Decision, 2010(2): 287-290.
- [12] Li W, Liu M H, Duan D P. Adaptive Huber-based Kalman filtering for spacecraft attitude estimation[J]. Transactions of the Institute of Measurement & Control, 2014, 36(6): 828-836.
- [13] Zhang Y, Wu J H, Wan G J, et al. Unscented Kalman filter[C]//Proceedings of 13th International Conference on ICONIP, 2006: 560-567.
- [14] van der Merwe R, Wan E A. The square-root unscented Kalman filter for state and parameter-estimation [C]//Proceedings of Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2001: 3461-3464.
- [15] Li W, Liu M H, Gong D P, et al. Huber-based divided difference filter with application to relative navigation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G Journal of Aerospace Engineering, 2013, 228(9): 1475-1486.
- [16] Hoshiya M, Saito E. Structural identification by extended Kalman filter[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1984, 110(12): 1757-1770.
- [17] Arasaratnam I, Haykin S. Cubature Kalman filters[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(6): 1254-1269.