

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905238

四旋翼无人机陀螺阵列数据融合算法*

韩晓微¹, 岳高峰¹, 崔建江², 汤浩泽³

(1. 沈阳大学信息工程学院 沈阳 110044; 2. 东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110004;
3. 印第安泉中学 阿拉巴马州 35648)

摘要:针对目前四旋翼无人机使用单姿态传感器存在的易受噪声干扰、稳定性较差的问题,本文利用陀螺阵列形成多节点、抗干扰、较稳定的多姿态系统,提出基于新型陀螺阵列的四旋翼飞行姿态测量系统,利用多个低精度的微机械电子系统组成测量阵列,提高系统数据的精确性和稳定性,同时文中也提出一种相应的基于邻域搜索的BP网络数据融合算法,解决了BP神经网络传统训练过程需要准确给定输出值的问题,将BP神经网络模型用作陀螺阵列数据的融合处理中。实验结果表明,本文设计的多陀螺阵列系统比单陀螺系统在抗噪声方面有了明显改善,相比传统线性加权融合等算法,本文算法在支持度方面提升9.2%,残差缩减44.2%,实物实验表明文中方法对于提高四旋翼无人机的飞行稳定性具有一定的实际意义。

关键词: 四旋翼无人机;陀螺阵列;邻域搜索;BP神经网络;数据融合

中图分类号: V275、TP301 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520

Gyroscope array data fusion algorithm for four-rotor UAV

Han Xiaowei¹, Yue Gaofeng¹, Cui Jianjiang², Tang Haoze³

(1. School of Information Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, China; 2. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 3. Indian Spring High School, Alabama 35648, USA)

Abstract: Aiming at the problems of susceptibility to noise and low stability of four-rotor UAV with single attitude sensor, the gyroscope array is used to form multi-node, anti-jamming and stable multi-attitude system. A flight attitude measurement system of four-rotor UAV based on the new gyroscope array is proposed. The measurement array is composed of multiple micromechanical electronic systems with low accuracy, which improves the accuracy and stability of the system data. At the same time, a corresponding BP network data fusion algorithm based on neighborhood search is proposed, which solves the problem that the traditional BP neural network requires accurately giving the output value. The BP neural network model was used in the data fusion processing of the gyroscope-array. The experiment results show that the multi-gyroscope array system designed in this paper obviously improves the anti-noise performance compared with the single-gyroscope system. Compared with the traditional linear weighted fusion algorithm, the proposed algorithm increases the support degree by 9.2% and reduces the residual error by 44.2%. The practicality experiment shows that the proposed method has practical significance in improving the flight stability of four-rotor UAV.

Keywords: four-rotor unmanned aerial vehicle; gyroscope array; neighborhood search; BP neural network; data fusion

0 引言

随着通信技术和传感器技术的发展,无人机在军用和民用领域得到广泛的应用^[1]。而无人机本身的非线性和内外扰动的敏感特性导致其在稳定性方面需要依靠姿

态测量传感器完成^[2],这对于采用的传感器在精确度方面有了较高的要求,但是军工级传感器成本较高,不宜在民用无人机中使用。

微机械陀螺在价格和体积方面具有独特的优势^[3],而目前的大多数无人机是采用陀螺仪数据作为参考进行稳定飞行的,但是其缺点就是受制造水平影响造成其精

度较低及抗噪声能力不强,这就导致了大多数无人机控制算法在本质上很难有突破性提升,对于任意时刻数据的准确性一直是国内外研究的热门课题之一,性能优异的姿态解算算法必须依赖于数据源的可靠性^[4]。国内外很多学者对姿态测量的数据来源做了很多研究,为提高微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)的精度, Bayad 等^[5]于2003年首次提出多陀螺融合的概念,也就是根据某种具体结构采用阵列分布,这极大推动传感器数据融合的发展;2010年李伟等^[6]采用加权估计信息融合算法实现了对信号的数据估计,取得了初步的实际使用经验,而该方法建立在经验分布函数之上导致其实用性较差, Cui 等^[7]提出的基于高斯隶属度函数的数据融合算法,结合融合技术对数据进行处理,提高了传感器数据采集的效率和准确性,但是其主要是基于网络进行工作的,对于多旋翼无人机系统并不是非常适用, Shen^[8]于2017年采用自适应 IMM 滤波器,设计了由6个陀螺仪组成的阵列,在不突破硬件的前提下提高了姿态测量数据的精度同时也提高了信号的信噪比,扩展了陀螺阵列的实用性,不足的一点是其算法过于复杂,对硬件的依赖度过高,实时性较差, Esposito 等^[9]设计了一种基于事件的数据融合方法,这种方法更多的依赖于数据源之间的信任度,要求的数据源必须具备匹配度,在物联网的智能采集设备中发挥了极大的作用,而针对无人机所具有的多扰动性,而无法进行有效估计和数据融合。

为了进一步提高姿态测量系统的准确性,更好地保证四旋翼无人机飞行的稳定性,本文采用陀螺阵列的方式代替传统的单陀螺系统,提出一种基于邻域搜索的BP网络数据融合算法,代替了传统的均值、高斯融合算法,算法同时也是对下一时刻的状态估计和滤波,改善传统无人机飞行时进行姿态解算的数据源,以便达到更好的姿态飞行效果,提高了无人机飞行中的鲁棒性。

1 无人机飞行控制

随着无人机技术的发展,无人机的稳定性成为研究的热点,无人驾驶飞行器(unmanned aerial vehicle, UAV)是指可通过远程操控或者按照程序实现飞行的装置^[10],本文选取常见的四旋翼无人机进行研究,其结构为X字形,结构和半径相同的4个对称转子分布安装在机体的4个方向上,飞机的姿态和位置是通过调整4个电机的转速来控制的,飞机结构如图1所示。

四旋翼飞机飞行时,相邻两个螺旋桨的旋转方向相反。如图1所示,4个螺旋桨按逆时针方向分别编号为1、2、3和4。第一和第三转子产生与第三和第四转

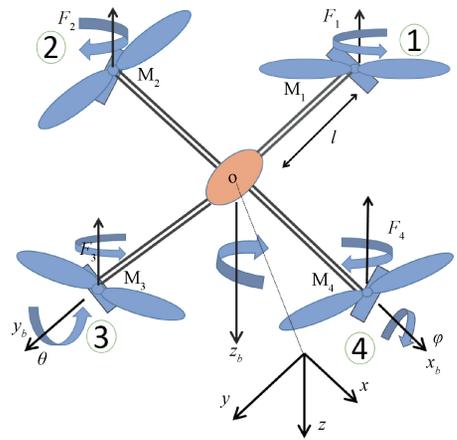


图1 四旋翼无人机结构

Fig.1 Structure diagram of four rotor unmanned aerial vehicle

子相反的扭矩,为了保证飞行的稳定,扭矩值必须相等,四旋翼飞机的姿态控制包括垂直(vertical)控制、俯仰(pitch)控制、翻滚(roll)控制和横摆(yaw)控制^[11],表1所示为四转子无人机相应转速与相应运动形式之间的关系。

表1 无人机四电机转速与相应运动形式关系表

Table 1 Relation table of the rotational speed of four motors vs. corresponding motion form of UAV

移动类型	M1 转子	M2 转子	M3 转子	M3 转子
垂直	+(-)	+(-)	+(-)	+(-)
俯仰	+(-)	=	-(+)	=
翻滚	=	+(-)	=	-(+)
横摆	+(-)	-(+)	+(-)	-(+)

注:“+”表示旋转翼转速增加,“-”表示旋转翼转速减小,“=”表示旋转翼的转速与电机相对应。

4个电机的控制信号即电压值输入方程如式(1)所示。

$$\begin{cases} U_1 = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \\ U_2 = (F_4 - F_2) \times l \\ U_3 = (F_3 - F_1) \times l \\ U_4 = (F_4 + F_2 - F_3 - F_1) \times l \end{cases} \quad (1)$$

式中: l 为电机转子到四旋翼重心之间的距离; $F_i(i=1, 2, 3, 4)$ 为每个电机转动产生的浮力; U_1 代表无人机垂直位移的输入量, U_2 、 U_3 、 U_4 分别为3个欧拉角(即翻滚角、俯仰角、偏航角)的输入量。对无人机的控制可分为两部分,第一部分为位置动力学的外环回路控制,第二部分为姿态动力学的内环回路控制,本文的研究重点为内环路的姿态控制。

2 多姿态测量系统设计

2.1 姿态控制原理

四旋翼无人机是四输入的六自由度的刚体^[12],其动力学数学模型是描述空间姿态和位置的数学模型,矩阵形式如式(2)和(3)所示。

$$\begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}\dot{\psi}(I_{yy} - I_{zz})/I_{xx} + J_r\dot{\theta}\Omega/I_{xx} + (F_2 - F_4)/I_{xx} \\ \dot{\phi}\dot{\psi}(I_{zz} - I_{xx})/I_{yy} + J_r\dot{\theta}\Omega/I_{yy} + (F_1 - F_3)/I_{yy} \\ \dot{\theta}\dot{\phi}(I_{xx} - I_{yy})/I_{zz} + [(-1)i \sum_{i=1}^4 M_i] / I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^4 F_i(\sin\phi \sin\psi + \cos\phi \cos\psi \sin\theta) / m \\ \sum_{i=1}^4 F_i(-\sin\phi \cos\psi + \cos\phi \sin\psi \sin\theta) / m \\ \sum_{i=1}^4 F_i(\cos\phi \cos\theta) / m - g \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: m 为无人机的质量; g 为重力加速度; I 分别为绕 3 轴的转动惯量; Ω 为旋翼速度; M 为反转矩, ϕ 为横滚角; θ 为俯仰角; φ 为偏航角; x, y, z 为空间坐标值。

目前多轴无人机的姿态变化都是由姿态传感器对机体进行姿态测量并将其发送至无人机飞行控制系统,无人机根据数据判断无人机的下一刻行为,由执行机构构成 UAV 姿态调整。由式(2)和(3)可知,四旋翼无人机在飞行过程中其姿态测量的精度严重影响其飞行的稳定性,姿态角及角速度的准确获取对于无人机的自稳系统是关键问题,其原理框图如图 2 所示。

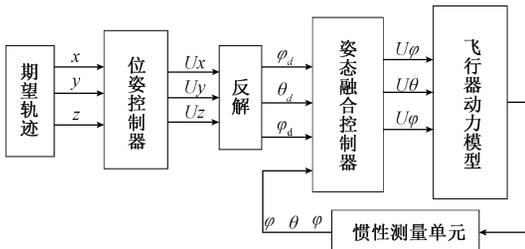


图 2 传统四旋翼姿态系统

Fig.2 Traditional four-rotor attitude system

而传统的单姿态测量单元易受干扰、噪声大,尽管在输出数据上已经采用滤波算法,但是其在稳定性方面还是欠佳,本文提出基于陀螺阵列的无人机姿态测量系统,在每一无人机机臂末端均放置陀螺仪,即得到 4 组传感器数据,结构图如图 3 所示。

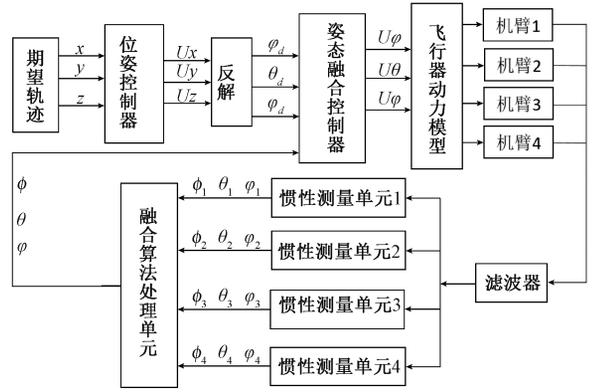


图 3 本文四旋翼姿态飞行系统

Fig.3 The four-rotor attitude flight system proposed in this article

2.2 多姿态系统设计

该系统中采用 MPU6500 作为姿态传感器,融合器的硬件采用 M4 核 ARM 芯片的 STM32F427 的控制器,主要作为协处理器,本文引入了 FreeRTOS 操作系统,目的是将四路数据通过不干扰模式引入,形成基于操作系统的嵌入式系统,通过该操作系统 (FreeRTOS) 的任务机制,每个任务核通过 UART 读取一路数据并经过卡尔曼滤波算法处理,最后通过设计的算法将其融合成姿态数据发送至飞行控制系统(主处理器),飞行控制系统通过四元数对传感器数据进行结算并形成控制流数据。

多传感器系统的重要意义是利用多个信号的信息记录,相互之间进行时间域和空间域的互补,输出较为完整、可靠、精确的信息,相比单传感器数据信息在可信度方面有了一定的提高,输出评价性较高的状态估计值,形成可持续状态过程的冗余测量。

3 融合算法设计

3.1 EKF 算法

在很多实际应用的控制过程中,如无人机飞行过程中,往往受到外界不确定因素的干扰,传感器数据带有随机噪声,在这种状态下,利用相关滤波算法对当前线性系统进行修正是必不可少的环节。

扩展卡尔曼滤波器 (extended kalman filter, EKF) 是一种具有自回归特性的高效滤波器^[13],用 EKF 修正实时返回的测量值,进行实时递推滤波,更重要的是 EKF 作为一种最优估计方法,可以对下一个状态做出预测,这样对于算法处理的迟滞性有较好地补偿,原理如下。

$$h(x') \rightarrow Hx', H_j \rightarrow H \quad (4)$$

$$x' = f(x, u) \rightarrow x' = Fx + u, F_j \rightarrow F$$

式中: $f(x, u), h(x')$ 为线性化作用后产生的非线性函

数,主要为了得到更为精准的状态预测值,映射后的测量值 H_j, F_j 计算如式(5)所示。

$$H_j = \frac{\partial h(x')}{\partial x}, F_j = \frac{\partial f(x, u)}{\partial x} \quad (5)$$

经过上述处理,可以实时得到各个传感器经过 EKF 预处理后的数据,解决了部分状态量不准确的问题,保证后续的计算处理精度。

3.2 融合算法设计

数据融合是在传统单一数据基础上发展起来的强鲁棒性的信息技术,目前对处理层、决策层属性的融合技术研究较为广泛^[14],多模型融合相比单模型融合具有明显的提升^[15],并且实际中由于各个数据流在时间、方位、更新等方面表现各异,如何设计高效、高准确度的融合算法对于陀螺阵列融合系统至关重要。

BP 神经网络作为智能算法的一种,能够得到数据信息的重要特征,得到各个数据间的密切关系。标准 BP 神经网络连接权值通过误差函数梯度的反方向误差来修正^[16-17]。当输入数据 $x(n)$ 时,数据通过网络传输, j 神经元输出层的输出为:

$$v_j^i(n) = f(u_j^i(n)) \quad (6)$$

式中: $u_j^i(n) = \sum_{i=1}^I \omega_{ij}(n)v_i^i(n)$, $v_i^i(n) = \sum_{m=1}^M \omega_{mi}(n)x_m^m(n)$ 。 $\omega_{mi}(n)$ 代表输入层到隐藏层的权值; $\omega_{ij}(n)$ 代表隐藏层到输出层的权值,且 $v_i^i(n)$, $u_j^i(n)$ 分别为隐藏层的输入和输出; $f(\cdot)$ 为激活函数,对于 j 神经元输出层的误差可写为:

$$e_j(n) = y_j(n) - v_j^i(n) \quad (7)$$

该 BP 神经网络的总误差如下:

$$e(n) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^J e_j^2(n) \quad (8)$$

式中: $y_j(n)$ 作为网络的期望输出。

当误差沿着网络进行反向传播时,根据梯度下降法计算 ω_{ij} 梯度方向的误差,将误差信号沿原来的连接通路返回,相应修改隐藏层和输出层的连接权重 ω_{ij} ,使得误差信号最小,令梯度为 $\frac{\partial e(n)}{\omega_{ij}(n)}$,修正连接权重的方程见式(9)。

$$\Delta \omega_{ij}(n) = \eta e_j(n) v_i^i(n) \quad (9)$$

当误差向前传播时,在输入层和隐藏层之间的权重 ω_{mi} 被调节:

$$\Delta \omega_{mi}(n) = \eta \delta_i^i(n) x(n) \quad (10)$$

式中: η 为学习速率, δ 为局部梯度。

在 BP 神经网络,数据通过隐藏层从输入层传输到输出层,当连接网络的权重被训练时,网络通过隐藏层沿误差传递方向从输入层修正到输出层,随着学习的不断深入,误差逐渐减少到预定的请求,或迭代数字达到预定

的学习次数。整体 BP 网络数据融合结构如图 4 所示,本文中 m (输入量的个数) 值为 4,设计的 BP 神经网络为三层网络结构,其输入量为各个陀螺姿态传感器时刻采集到的数据值,中间隐藏层由 4 个神经元构成,输出为最终无人机飞行需要的姿态数据值,BP 神经网络的学习能力较强,可以较好地解决多维函数映射的问题。

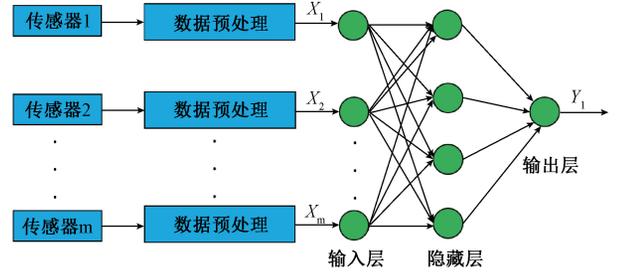


图4 BP网络数据融合结构

Fig.4 BP network data fusion architecture

BP 神经网络在解决滤波和估算方面具有良好的性能,但是在模型训练中,姿态系统中很难确定其精确的训练目标值,这将是面临的最大问题,因此本文提出基于邻域搜索的 BP 神经网络算法去解决这个问题。搜索原理广泛应用于工程实际^[18-19],即在一个目标群体中寻找具有代表性的潜在最优解^[20],搜索群体在时空域上具有一定的相关性,可通过一定的搜索规则使具备一定的感知性^[21-22],其原理结构如下:

$$Y_{i,j}^t = F(|X_{i,j}^{t+1} - X_{i,j}^t|, |X_{i,j}^t - X_{i,j}^{t-1}|) \quad (11)$$

式中: $X_{i,j}^t$ 代表 BP 网络输入数据集的矩阵; t 代表时间刻度; $F(\cdot)$ 代表最小值取值函数; i, j 分别为输入矩阵的大小, i 在物理含义上代表传感器数量, j 在物理含义上代表某 t 时刻传感器的某项数据值。如此便可以得到训练集的误差矩阵 $Y_{i,j}^t$, 对误差矩阵进行领域搜索,如下:

$$\Delta e_{i,j}^t = [|Y_{1,j}^t|, |Y_{2,j}^t - Y_{1,j}^t|, |Y_{3,j}^t - Y_{1,j}^t|, |Y_{4,j}^t - Y_{1,j}^t|] \quad (12)$$

这里 ΔE_j^t 代表某 t 时刻相邻传感器得到误差数据比较值,为了进行矩阵,需要将其进行转置并进行最小值比较,即:

$$\Delta E_i^t = F[\Delta e_{i,j}^t]^T \quad (13)$$

在上述基础上,得到了在 4 个姿态传感器相邻三时刻邻域数据中(即 12 个数据)某两值相减的最小误差值,对其进行反搜索解算,如下:

$$v_i^t = a \times X_{i,j}^{t-1} + b \times X_{i,j}^t + c \times X_{i,j}^{t+1} \quad (14)$$

式中: a, b, c 为线性加权值,随着实验的效果可以进行调整, v_i^t 即为进行 BP 神经网络训练时的目标值。

为了使搜索算法具有一定的普适性,提高其精度,可将式(14)进行改进,如下:

$$v_i^t = s_{t-k} X_{i,j}^{t-k} + \dots + s_{t+k} X_{i,j}^{t+k}, k = 1, 2, \dots \quad (15)$$

式中: k 代表搜索域的大小,领域大小的变化在一定程度上影响搜索算法的性能。通过该搜索方法的优化,使 BP 神经网络具备一定的自繁殖能力,对融合算法形成较强的自主性,在任意时刻进行搜索更新即可完成算法训练,本文设计的基于领域搜索的 BP 网络融合算法基本结构如图 5 所示。

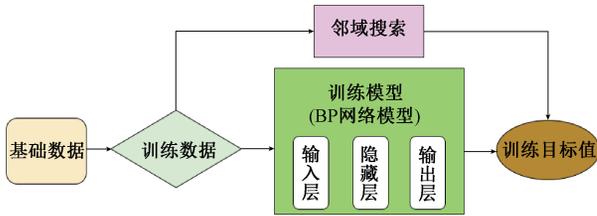


图 5 融合算法结构层次

Fig.5 Hierarchical diagram of the fusion algorithm

4 实验和分析

4.1 模拟实验设计

本文实验平台为自行搭建的模拟平台系统,所使用的计算机处理器为 Intel(R) Xeon CPU E5- 2680 v2 @ 2.80 GHz,128 G 内存,显卡为 NVIDIA Gefore GTX1080,操作系统为 Windows 10 专业版,开发环境为 MATLAB 2016b,所使用传感器为一个高精度 MPU9250 陀螺仪、4 个中等精度 MPU6500 陀螺仪,使用 MATLA 语言进行编程,实验数据采集平台如图 6 所示,通过 5 路串口可对四旋翼无人机飞行的姿态数据进行采集。



图 6 数据采集平台

Fig.6 Data acquisition platform

4.2 模拟实验分析

本文第一组实验主要进行的是单姿态测量系统(精度较高的 MPU9250)和多姿态系统传感器(低精度的 MPU6500)输出数据对比,主要由 x 、 y 、 z 三轴加速度及俯仰角、翻滚角、横摆角 6 项构成。

通过领域搜索方法,通过误差寻找相邻三时刻数据的最优期望值并对 BP 网络进行训练,将训练好的网络模型用于所搭建的数据采集平台,将 4 个陀螺传感器采集到的 6 路无人机姿态数据进行算法融合,数据部分采集到的部分真实实验数据和算法融合后的数据如表 2 所示,无人机陀螺阵列系统及其融合算法处理后的结果如图 7 和 8 所示。

表 2 传感器 x 轴加速度输出值
Table 2 Sensor X-axis acceleration output

序号	陀螺仪 1	陀螺仪 2	陀螺仪 3	陀螺仪 4	算法处理结果
1	6.89	6.59	6.53	6.53	6.59
2	5.43	6.04	5.85	6.28	5.43
3	3.35	3.54	3.47	3.08	5.24
4	4.15	4.21	4.39	5.42	4.15
5	3.66	4.02	4.27	3.47	4.88
6	1.09	0.54	0.7	4.88	2.38
7	1.40	0.97	1.03	2.38	1.40
8	0.61	0.30	0.06	0.61	1.28
9	3.05	2.93	2.6	2.88	2.14
10	2.32	2.14	1.95	2.11	1.70
...

从图 7(a)、(b)、(c)中可以看到本文算法的姿态曲线围绕在单姿态的震荡曲线中央,在任意相邻时刻本文算法处理的结果一直保持在单姿态传感器的最大值和最小值之间,足以证明利用陀螺阵列形成的多姿态系统在性能方面明显优于单姿态测量系统。主要是由于无人机在飞行过程中往往存在着各种随机干扰作用以及对测量仪器的磁力干扰,单个传感器所获得的值具有一定的局限性,本文的陀螺阵列测量系统使多个传感器之间性能互补、信息冗余并且利用 BP 网络算法进行数据融合输出,结果表明本文算法对噪声有着明显的抑制作用,不存在急促的局部震荡效应,具有较好的状态估计效果,得到了较为稳定的传感器状态值。

图 7(d)、(e)、(f)所示分别为无振动、微振动以及强振动 3 种情况下欧拉角的实际输出值,为了清晰化,将波形进行放大选取,在无振动情况下本文算法效果不太明显,但随着晃动频率的增加,利用本文设计的算法得到的系统输出值稳定在单姿态震荡曲线中心,本文算法表现出较为良好的鲁棒性。

为了量化描述图 8(a)、(b)、(c)中本文算法性能优良,采用绝对误差指标进行性能评估^[23],绝对误差值所反映的为传感器数据对自身数据的支持程度,也就是

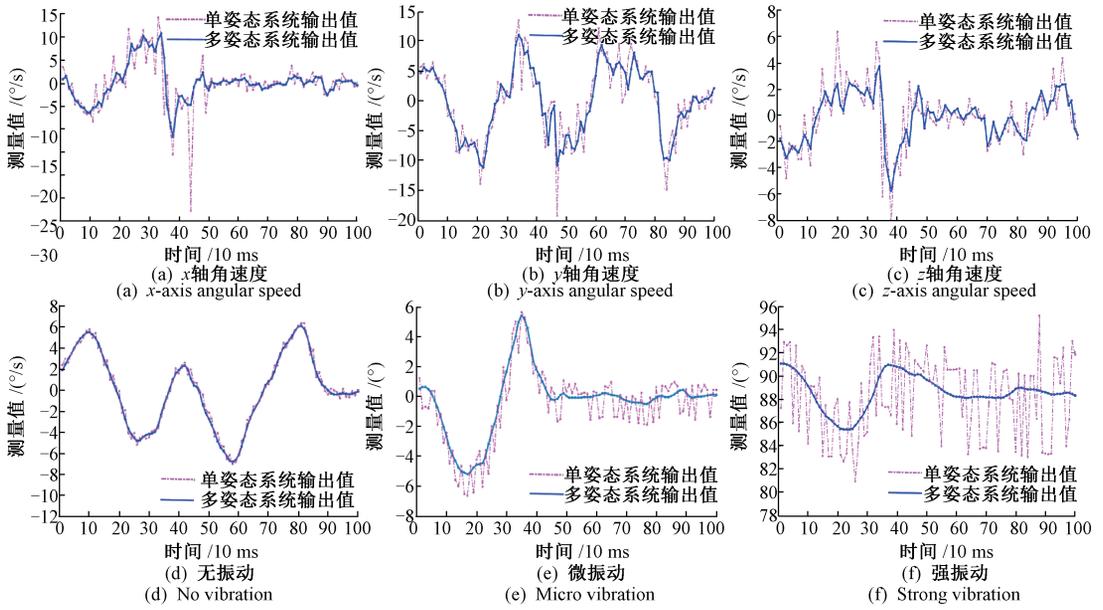


图7 单姿态与多姿态系统性能比较

Fig.7 Performance comparison diagrams of single-attitude and multi-attitude systems

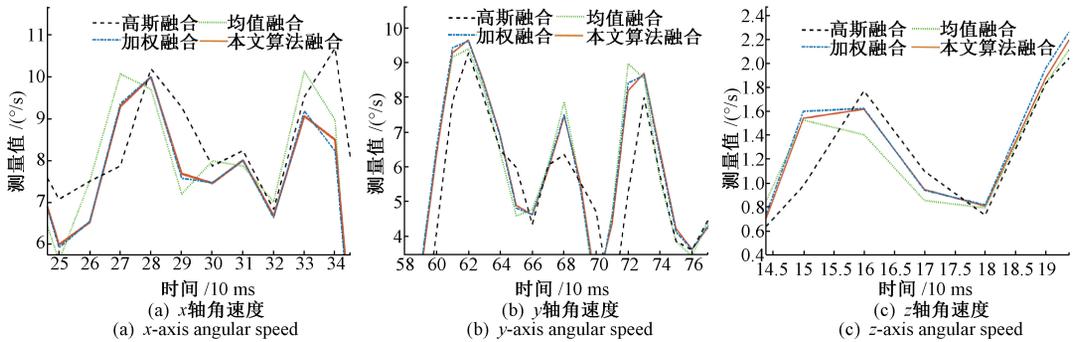


图8 本文算法和其他算法性能比较

Fig.8 Performance comparison diagrams between the proposed algorithm and other algorithms

其单姿态系统产生的实际值和多姿态系统融合处理后的输出值之差的绝对值,其峰值越大代表某点具有较强干扰且本文处理后的效果较好,抗干扰能力更强,体现了其算法在一定时间内的稳定程度,也是从数据层、特征层及属性层反应出的数据信息质量,通过将绝对误差值和单姿态系统产生的实际值进行相比并将其多个时刻数据结果取均值,重新定义为数据支持度,如式(16)所示,即对数据的可靠性定量描述。

$$\text{支持度} = \left[\left(\sum_{i=1}^m \frac{\text{绝对误差值}}{\text{单姿态输出值}} \right) / m \right] \times 100\% \quad (16)$$

通过图9(a)、(b)、(c)所示3种情况的计算得到本文算法的数据支持度为84.5%,相比线性加权融合算法,本文算法在支持度方面提升9.2%,定义融合数据残差值 ν_i 即本文多姿态系统融合输出值 χ_i 与均值融合输出值

$E(\chi_i)$ 相减,如式(17)所示。

$$\nu_i = \chi_i - E(\chi_i) \quad (17)$$

文中方法对于提高四旋翼无人机的飞行稳定性具有重要的实际意义,图9(a)、(b)、(c)中本文算法的残差误差曲线,平均残差值缩减44.2%,较好地保留了数据的原始特性。

为了验证本文数据融合算法的有效性和可行性,将本文算法和均值融合算法、高斯融合算法、加权融合算法做性能比较,选取4种算法处理后序列数据的平均方差值 σ^2 以及支持度作为评价指标^[24],得到如表3所示的结果。

可以看到本文算法能较好地保持数据的真实性且一直保持均匀收敛状态,通过方差数据可以看到本文算法对于干扰有着明显效果,相比较传感器的精确值,本文

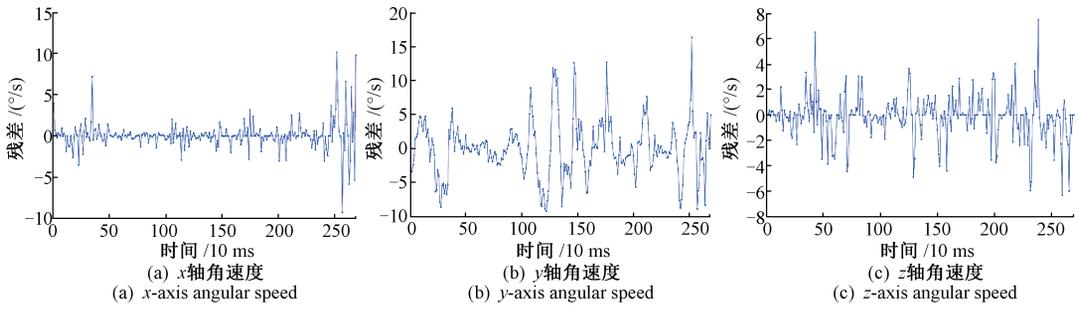


图 9 本文算法定性分析

Fig.9 Qualitative analysis of the proposed algorithm

表 3 4 种算法性能比较

Table 3 Performance comparison of four algorithms

项目	均值融合 算法	高斯融合 算法	加权融合 算法	本文算法
方差(σ^2)	1.216	1.781	0.980	0.547
支持度/%	70.9	62.7	75.3	84.5

算法在支持度上面占明显优势,可以达到实际应用的需

求^[25],本文的研究方法可以保证四旋翼无人机在飞行过程的实时性姿态测量要求。

4.3 实物实验及分析

为了验证系统和算法的可行性及性能,本文特设计了一组实物实验,四旋翼无人机为自主搭建,飞行控制系统采用开源 Pixhawk,使用 I²C 总线搭载 4 个外置陀螺仪 (MPU6500)并替代内置陀螺仪,在 Mission Planner 平台进行设置并编译,飞行测试视频序列如图 10 所示。



图 10 四旋翼无人机飞行序列

Fig.10 Flight sequence diagram of four-rotor UAV

飞行试验表明,基于陀螺阵列的融合算法能够完成既定飞行任务,飞行稳定性良好。将其原始飞行姿态数据(图中绿色线条,编号 IMU2)和经过本文系统和算法处理过的飞行姿态数据图中红色线条,编号 IMU)进行比较输出,得到如图 11 所示的结果。实物实验表明无人机悬停飞行控制下基于陀螺阵列数据融合算法具有较强的

鲁棒性,X、Y 轴加速度值稳定在 0 值附近,整体走向趋势跟原始飞行姿态数据一致,Z 轴加速度值因为跟原始姿态陀螺仪不在一个水平面,造成其二值有差值。总体性能高于单陀螺仪姿态,数据变化平稳,保留了原始数据特性,实物实验证明本文方法能够对四旋翼无人机的稳定飞行提供准确的姿态数据测量。

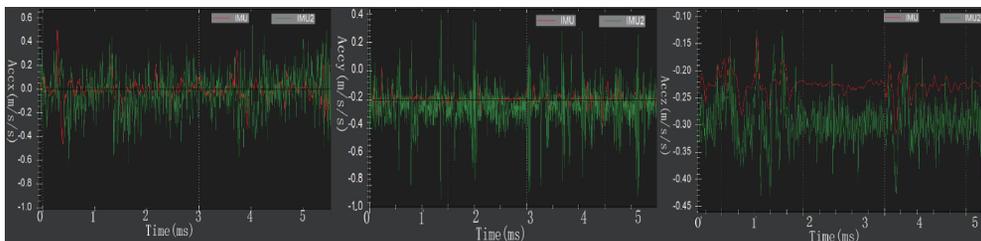


图 11 飞行姿态测量数据对比

Fig.11 Comparison diagram of flight attitude measurement data

5 结 论

本文在分析了大量现有无人机飞行姿态测量系统及

数据融合算法之后,针对目前多旋翼无人机使用单姿态传感器存在的精确度低、噪声大、稳定性较差的问题,提出了基于陀螺阵列的多姿态测量系统和相应的数据融合算法。

利用陀螺阵列形成多级别、多层次、多方面的多姿态系统,设计了一种与传统无人机姿态测量模型不同的新型无人机飞行姿态测量系统,解决了现有传感器精度不足的问题,增加了四旋翼无人机飞行的鲁棒性;同时本文也提出一种基于邻域搜索的BP网络融合算法,解决了BP神经网络传统训练过程需要准确给定输出值的问题,该方法具有处理不确定源和不同源数据的能力,保证了输出数据具有较好的预测效果。最后实验结果表明,配合本文提出的基于领域搜索的BP网络融合算法,所设计的多陀螺阵列姿态系统输出结果相对稳定,抗干扰能力较强,想比传统姿态系统在性能方面有了明显提升,且在实验中测得算法的支持度稳定在84.5%,通过实物实验,证明本文方法能够满足四旋翼无人机正常飞行的实际需求,本文所设计的陀螺阵列方式和数据融合算法对于四旋翼无人机的稳定飞行具有重要意义。

参考文献

- [1] 王瑶. 基于Bebop Drone四旋翼无人机的飞行控制和轨迹生成研究[D]. 南京:东南大学,2018.
WANG Y. Research on flight control and trajectory generation of Bebob Drone Four-rotor UAV[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [2] 宋亚飞,王晓丹,雷蕾,等. 基于证据理论和混淆矩阵的传感器可靠性评估[J]. 控制与决策,2015,30(6): 1111-1115.
SONG Y F, WANG X D, LEI L, et al. Sensor reliability evaluation based on evidence theory and confusion matrix[J]. Control and Decision, 2015, 30(6): 1111-1115.
- [3] 柯熙政,张伟志,刘娟花. 多MEMS陀螺数据融合系统的设计和实现[J]. 仪器仪表学报,2017,38(8): 2062-2070.
KE X ZH, ZHANG W ZH, LIU J H. Design and implementation of data fusion system for multi-MEMS gyroscopes[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8): 2062-2070.
- [4] 李瑞涵,王耀南,谭建豪. Nesterov加速梯度无人机姿态融合算法[J]. 机器人,2018,40(6):852-859.
LI R H, WANG Y N, TAN J H. Nesterov accelerated gradient UAV attitude fusion algorithms [J]. Robot, 2018, 40(6): 852-859.
- [5] 胡琨,张树有,赵昕玥,等. 基于Contourlet变换的阴影恢复形貌方法及产品表面缺陷检测应用[J]. 机械工程学报,2018,54(6):102-109.
HU K, ZHANG S Y, ZHAO X Y, et al. Defect detection based on contourlet-based shape from shading[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(6):102-109.
- [6] XU J T, LUO N, FU B SH, et al. Checking unscented

information fusion algorithm for autonomous navigation vehicles[J]. Optik, 2019,179: 1140-1151.

- [7] CUI Y F, MA Y K, ZHAO ZH Y, et al. Research on data fusion algorithm and anti-collision algorithm based on internet of things [J]. Future Generation Computer Systems, 2018, 85:107-115.
- [8] SHEN Q, LIU J Y, HUANG H, et al. Kurtosis-based IMM filter for multiple MEMS gyroscopes fusion [J]. Sensor Review, 2017, 37(3):237-246.
- [9] ESPOSITO C, CASTIGLIONE A, PALMIERI F, et al. Event-based sensor data exchange and fusion in the Internet of Things environments[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2018, 118(2):328-343.
- [10] 张垚,鲜斌,于琰平,等.四旋翼无人机可视化半实物仿真平台研究[J]. 仪器仪表学报,2012,33(11): 2572-2578.
ZHANG B, XIAN B, YU Y P, et al. Research on visual hardware-in-the-loop simulation platform for four-rotor UAV [J]. Chinese Journal of Scientific Instruments, 2012, 33(11): 2572-2578.
- [11] RAZMI H, AFSHINFAR S. Neural network-based adaptive sliding mode control design for position and attitude control of a quadrotor UAV [J]. Aerospace Science and Technology, 2019,91:12-27.
- [12] 彭孝东,张铁民,李继宇,等.基于传感器校正与融合的农用小型无人机姿态估计算法[J]. 自动化学报,2015, 41(4):854-860.
PENG X D, ZHANG T M, LI J Y, et al. Attitude estimation algorithm for small agricultural UAV based on sensor calibration and fusion [J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(4): 854-860.
- [13] 刘华山,李生,王保相.带扩展卡尔曼滤波的柔性关节机器人虚拟分解控制[J]. 控制理论与应用,2018, 35(6):850-858.
LIU H SH, LI SH, WANG B X. Virtual decomposition control of flexible joint robots with extended Kalman filter[J]. Control Theory and Applications, 2018, 35(6): 850-858.
- [14] 周杰,蔡世清,朱伟娜.多传感器数据融合的多准则决策模型[J]. 控制与决策,2016,31(8):1354-1362.
ZHOU J, CAI SH Q, ZHU W N. Multi-criteria decision-making model for multi-sensor data fusion [J]. Control and Decision, 2016, 31(8): 1354-1362.
- [15] FRIKHA A, MOALLA H. Analytic hierarchy process for multi-sensor data fusion based on belief function theory[J]. European Journal of Operational Research, 2015,241(1):133-147.
- [16] ZHANG B CH, LIN J Q, CHANG ZH CH, et al. The

- application of multi sensor data fusion based on the improved BP neural network algorithm[C]. 28th Chinese Control and Decision Conference, 2016;1150-1154.
- [17] LI SH, LIU M Y, XIA L. WSN data fusion approach based on improved BP algorithm and clustering protocol[C]. 27th Chinese Control and Decision Conference, 2015;1457-1461.
- [18] ALI M, AHN C W. An optimal image watermarking approach through cuckoo search algorithm in wavelet domain[J]. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2018, 9(3):602-611.
- [19] SHOBERG A G, SAI S V, SHOBERG K A. The transform performing algorithm for frequency domain search[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 803(1):012147.
- [20] MAIO F D, BANDINI A, ZIO E, et al. An approach based on support vector machines and a K-D tree search algorithm for identification of the failure domain and safest operating conditions in nuclear systems[J]. Progress in Nuclear Energy, 2016, 88:297-309.
- [21] WEI M Y, QI M Y, WU T, et al. Distance and matching-induced search algorithm for the multi-level lot-sizing problem with substitutable bill of materials[J]. European Journal of Operational Research, 2019, 277(2):521-541.
- [22] HAFIZ F, SWAIN A, MENDES E M. Orthogonal floating search algorithms: from the perspective of nonlinear system identification[J]. Neurocomputing, 2019, 350:221-236.
- [23] 张冬梅,茹安狄,程善.通信受限下网络化多传感器系统序贯卡尔曼滤波加权融合[J].控制与决策,2017,32(12):2162-2168.
ZHANG D M, RU AN D, CHENG SH. Sequential Kalman filter weighted fusion for networked multi-sensor systems under communication constraints[J]. Control and Decision, 2017, 32(12):2162-2168.
- [24] 田明明,叶继华,王仕民,等.一种复杂环境下多传感器数据融合方法[J].山东大学学报(工学版),2019,49(3):32-38.
TIAN M M, YE J H, WANG SH M, et al. A multi-sensor data fusion method in complex environment[J].

Journal of Shandong University (Engineering Science), 2019,49(3):32-38.

- [25] 孙凌逸,黄先祥,蔡伟,等.基于神经网络的无线传感器网络数据融合算法[J].传感技术学报,2011,24(1):122-127.
SUN L Y, HUANG X X, CAI W, et al. Data fusion algorithms for wireless sensor networks based on neural networks[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011,24(1):122-127.

作者简介



韩晓微,1991年于大连理工大学获得学士学位,1997年于东北大学获得硕士学位,2005年于东北大学获得博士学位,2005年10月至2007年9月于北京大学从事博士后研究工作,现为沈阳大学教授,主要研究方向为人工智能、机器人。

E-mail: hwx69@163.com

Han Xiaowei received his B.Sc. degree from Dalian University of Technology in 1991, and received his M.Sc. and Ph.D. degrees both from Northeastern University in 1997 and 2005, respectively. He was also a post doctoral fellow at Peking University from October 2005 to September 2007. Now, he is a professor in Shenyang University. His main research interest includes artificial intelligence and robots.



岳高峰(通信作者),2017年于沈阳大学获得学士学位,现为沈阳大学硕士研究生,主要研究方向为无人机鲁棒控制、嵌入式系统设计。

E-mail: 643375731@qq.com

Yue Gaofeng (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Shenyang University in 2017. Now, he is a M.Sc. candidate in Shenyang University. His main research direction is UAV robustness control and embedded system design.



崔建江,2006年于东北大学获得博士学位,现为东北大学副教授,主要研究方向为深度学习、模式识别。

E-mail: jianjiang_c@163.com

Cui Jianjiang received Ph.D. from Northeastern University in 2006. He is an associate professor in Northeastern University now. His main research direction is deep learning and pattern recognition.