

GPS/SINS/偏振光组合导航的模糊控制算法研究

任彩鸣¹, 李 沅¹, 边宇峰¹, 李怡纲¹, 张朝锋²

(1. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 太原 030051; 2. 晋中云时代技术有限公司, 山西 晋中 030600)

摘要: 针对在组合导航中扩展卡尔曼滤波器 (EKF) 会发散的问题, 采用了一种基于模糊控制的自适应卡尔曼滤波算法 (FAKF) 方法, 通过模糊控制器来计算指数加权因子, 实时对量测噪声的大小进行调整, 保证滤波精度, 有效抑制滤波过程的发散问题; 针对 GPS 无法提供姿态角进行组合解算的情况, 使用偏振光与 SINS 的组合进行姿态解算; 通过对 GPS/SINS/偏振光组合导航系统进行仿真, 将基于模糊控制的自适应卡尔曼滤波算法 (FAKF) 和扩展卡尔曼滤波算法 (EKF) 进行对比验证, 东、北、天向位置上分别提升精度 56.81%、65.17%、45.99%, 东、北、天向速度上分别提升精度 46.99%、54.01%、43.82%, 俯仰角、航向角分别提升精度 58.01%、53.58%, 验证了该方法的优势。

关键词: 模糊控制; 自适应卡尔曼滤波; 指数加权因子; 偏振光; 组合导航

Research on Fuzzy Control Algorithm for GPS/SINS/Polarized Light Combined Navigation

REN Caiming¹, Li Yuan¹, BIAN Yufeng¹, LI Yigang¹, ZHANG Chaofeng²

(1. State Key Laboratory of Electronic Testing Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Jinzhong Cloud Age Technology Co., Jinzhong 030600, China)

Abstract: Aimed at the problem that extended Kalman filter (EKF) will diverge in combined navigation, an fuzzy control-based adaptive Kalman filter algorithm (FAKF) is studied, which calculates the exponential weighting factor through a fuzzy controller to adjust the size of the measurement noise in real time to ensure the filtering accuracy, and effectively suppress the filtering divergence. Aimed at the situation that GPS cannot provide the attitude angle for combined solution, the combination of polarized light and SINS is used for the attitude solution. In this paper, the fuzzy control-based FAKF and EKF algorithms are compared and verified by simulating the GPS/SINS/polarized light combined navigation system, the positional accuracy of the system increases by 56.81%, 65.17%, and 45.99% in the east, north, and heading, respectively, the velocity accuracy by 46.99%, 54.01%, and 43.82%, and the pitch angle and heading angle by 58.01% and 53.58%, respectively, which proves the advantages of the method.

Keywords: fuzzy control; adaptive Kalman filtering; polarized light

0 引言

随着科技文明的进步和人类活动范围的扩大, 从飞机、火箭、卫星到汽车、船舶、潜艇等不同的载体, 它们都依赖于精准的导航算法来确定位置、确定航向和规划路径。

导航工具的出现和持续发展使得人们能够更加准确地定位自身位置, 并且能够在复杂的环境中找到最优的路径。这对于交通运输、军事作战、资源勘探、灾害救援等各个领域都至关重要。随着导航技术的发展, 导航工具的算法也在不断完善。在使用导航工具时, 每种工具都有其独特的优势和劣势, SINS 能够在短期内独立自主地提供精确的位置、速度和姿态角信息^[1], 但误差会随时间积累^[2-3]、GPS 可在全球范围内获取绝对的位置信息^[4-5]但在复杂地形时信号易受到遮挡^[6-7]。太阳光与大气散射形成的偏振光是地球大气空间的自然属性, 利用大气偏振模式的特性实现

偏振光导航^[8]。偏振光导航具有抗干扰和误差不随时间累积的优点^[9], 缺点是提供的导航信息相对较少^[10]。

组合导航是一种基于多种导航传感器协同工作的导航方式, 通过融合多种传感器的信息, 可以提高位置和姿态估计的精度和鲁棒性。组合导航在军事、民航、航空航天等领域得到了广泛应用, 成为现代导航技术的重要组成部分。使用组合导航能够充分利用单一导航工具的优势, 提高导航系统的性能和实用性。然而, 组合导航中涉及的多种传感器的测量误差、不确定性和噪声等因素, 往往会影响导航估计的精度和可靠性。因此, 如何对传感器数据进行有效地融合和处理, 成为组合导航中亟待解决的问题和研究热点。组合导航中常用的信息融合方法就是卡尔曼滤波^[11], 卡尔曼滤波器是动态过程模型和相关最优估计方法发展的巅峰。传统的卡尔曼滤波方法依赖于线性模型和高

收稿日期: 2023-09-27; 修回日期: 2023-10-31。

基金项目: 山西省科技成果转化引导专项项目(202204021301044)。

作者简介: 任彩鸣(1998-), 女, 硕士。

通讯作者: 李 沅(1982-), 女, 博士。

引用格式: 任彩鸣 李 沅 边宇峰, 等. GPS/SINS/偏振光组合导航的模糊控制算法研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(4): 129-134.

斯噪声假设, 在非线性和非高斯噪声条件下效果不佳。在实际应用中, 卡尔曼滤波的有效性可能会受到噪声的影响。具体来说, 在卡尔曼滤波的过程中, 需要假设过程噪声和测量噪声是零均值白噪声。然而, 在组合导航中, 由于各种各样的因素 (如传感器误差、环境干扰等), 很难完全满足这个假设, 导致噪声的特性与理想情况有所偏差。组合导航时无法保证卡尔曼滤波的过程噪声和测量噪声保持零均值白噪声, 导致出现滤波发散问题, 对下一时刻的预测造成影响。文献 [12-14] 表明将模糊控制加入卡尔曼滤波中可以有效地解决非白噪声时信号发散的问题。与传统的精确控制方法相比, 模糊控制不需要精确的数学模型, 而是通过设计一组基于经验规则的模糊逻辑来描述系统的行为, 从而实现了对系统的控制。上述文献使用模糊控制自适应卡尔曼滤波用来解算组合导航速度和位置, 但并未对姿态进行相应解算。然而姿态信息对导航精确性也很重要。如果姿态估计不准确, 就会导致位置和方向估计出现偏差, 从而影响导航的准确性和稳定性。姿态信息可以帮助我们理解载体相对于周围环境的朝向和姿势, 从而更好地规划路径和避免障碍物。通过准确获取姿态信息, 我们可以根据当前环境的特点进行决策, 使导航系统更加智能、安全和高效。

针对上述问题, 本文以 GPS/SINS/偏振光组合导航系统为背景, 设计了解算姿态角和速度、位置的模糊控制自适应卡尔曼滤波算法, 从而提升组合导航系统的精度和可靠性。

1 模糊控制自适应卡尔曼滤波

1.1 自适应卡尔曼滤波算法

卡尔曼滤波一直被用来估计动态系统的状态, 组合导航状态方程和量测方程的离散化状态为:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_k &= \boldsymbol{\varphi}_{k/k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{Z}_k &= \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{v}_k \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $\boldsymbol{\varphi}_{k/k-1}$ 为系统的状态转移矩阵; \mathbf{X}_k 是系统状态向量; \mathbf{w}_k 为系统过程噪声; \mathbf{Z}_k 为系统观测向量; \mathbf{H}_k 为观测矩阵; \mathbf{v}_k 为系统观测噪声。

组合导航以东北天坐标系为导航参考坐标系。SINS 的状态向量为:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \varphi_E & \varphi_N & \varphi_U & \delta V & \delta V_N & \dots & \delta V_U & \delta L \\ \delta \lambda & \delta h & \epsilon_{bx} & \dots & \epsilon_{by} & \epsilon_{bz} & \epsilon_{rx} & \epsilon_{ry} & \epsilon_{rz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $\varphi_E, \varphi_N, \varphi_U$ 分别为东、北、天方向的姿态角误差; $\delta V_E, \delta V_N, \delta V_U$ 为东、北、天方向的速度误差; $\delta L, \delta \lambda, \delta h$ 为经度、纬度、高度误差; $\epsilon_{bx}, \epsilon_{by}, \epsilon_{bz}$ 为陀螺仪零偏; $\epsilon_{rx}, \epsilon_{ry}, \epsilon_{rz}$ 为加速度计零偏。

系统的量测分为两部分: 1) GPS/SINS 的速度、位置误差; 2) SINS/偏振光的姿态误差。

对观测噪声和系统噪声进行加权:

观测噪声:

$$\mathbf{R}_k = \mathbf{R}_\alpha^{-2(k+1)} \quad (3)$$

系统噪声:

$$\mathbf{Q}_k = \mathbf{Q}_\alpha^{-2(k+1)} \quad (4)$$

式中, \mathbf{R}_k 和 \mathbf{R} 是观测噪声协方差矩阵, α 是指数加权因子, \mathbf{Q}_k 和 \mathbf{Q} 是系统噪声协方差矩阵。

卡尔曼滤波是对系统状态进行最优估计的算法, 分为时间更新和量测更新两部分。根据上式对卡尔曼滤波的公式进行推导, 得到指数加权自适应卡尔曼滤波公式。指数加权自适应卡尔曼滤波方程如下:

时间更新方程:

$$\hat{\mathbf{X}}_{k,k-1} = \boldsymbol{\varphi}_{k,k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1} \quad (5)$$

$$\mathbf{P}_{k,k-1}^e = \alpha^2 \boldsymbol{\varphi}_{k,k-1} \mathbf{P}_{k-1}^e \boldsymbol{\varphi}_{k,k-1}^T + \boldsymbol{\Gamma}_{k,k-1} \mathbf{Q}_{k-1} \boldsymbol{\Gamma}_{k,k-1}^T \quad (6)$$

其中: $\hat{\mathbf{X}}_{k,k-1}$ 是上一时刻对当前时刻的状态预测结果; $\hat{\mathbf{X}}_{k-1}$ 是上一时刻的状态向量; $\boldsymbol{\varphi}_{k,k-1}$ 是状态转移矩阵; $\boldsymbol{\Gamma}_{k,k-1}$ 是噪声输入矩阵; $\mathbf{P}_{k,k-1}^e$ 是加权后的一步预测误差方差阵。

量测更新方程:

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \mathbf{X}_{k,k-1} + \mathbf{K}_k [\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_{k,k-1}] \quad (7)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k,k-1}^e \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k,k-1}^e \mathbf{H}_k^T + \frac{\mathbf{R}}{\alpha^2})^{-1} \quad (8)$$

$$\mathbf{P}_k^e = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k] \mathbf{P}_{k,k-1}^e \quad (9)$$

其中: \mathbf{H}_k 是观测矩阵; \mathbf{K}_k 是卡尔曼滤波增益, \mathbf{P}_k^e 为加权后的估计误差方差阵。

组合导航系统中输入到模糊控制器的是残差方差和理论协方差的差值 DoM , 通过计算 DoM , 可以评估不确定性的程度, 并将其作为模糊控制器的输入。模糊控制器根据这个输入来调整比例因子 α 。

实际残差方差计算:

$$\begin{aligned} r_k &= \mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_{k,k-1} \\ \hat{\mathbf{C}}_{rk} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i r_i^T \end{aligned} \quad (10)$$

理论方差值:

$$\mathbf{P}_z = \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k,k-1}^e \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R} \quad (11)$$

差值:

$$DoM = \mathbf{P}_z - \hat{\mathbf{C}}_{rk} \quad (12)$$

卡尔曼滤波没有发散时, 理论方差值应与实际残差方差值差别不大, DoM 的值应为零均值白噪声, 发散后需要根据模糊控制规则来调节指数加权因子的大小, 使 DoM 趋于零均值白噪声。

1.2 偏振光导航原理

当太阳光穿过大气层时, 会与大气中的分子和微粒发生散射现象。其中, 当入射光的波长远小于散射体的尺寸时, 由大气分子引起的散射称为 Rayleigh 散射。在这种散射过程中, 光波与大气中的颗粒发生相互作用, 光的偏振状态会发生改变, 导致在大气中形成稳定的偏振分布模式。具体来说, Rayleigh 散射使得入射光的偏振方向发生轻微偏离, 其中垂直于光传播方向的垂直偏振光相对于水平偏振光更强烈地散射出去。这一现象导致了大气中的光呈现出特定的偏振分布模式, 通常以水平方向偏振为主。

这种稳定的大气偏振分布模式在许多科学研究和应用领域中具有重要意义。通过观测和分析大气中的偏振现象, 我们可以获取导航信息。早期人们发现动物^[15-16]具有超高

的导航能力, 对其进行研究后发现, 它们利用探测到的天空偏振信息进行导航。人类借鉴动物的导航方式研制了偏振光导航传感器。作为一种无源、自主的新型导航方式, 偏振光导航更多地应用于组合导航。

天空偏振光在宏观上形成稳定的偏振光分布模式, 其中包含丰富的方向信息, 如偏振度 (DOP)、偏振角 (AOP)。偏振度和偏振角度分别表示光的偏振度和光的振动方向 (E 矢量方向)^[17]。偏振光传感器可分为点源偏振光传感器和按成像偏振光传感器。两种测量原理基本相同, 均用描述光的偏振状态的斯托克斯向量法描述。斯托克斯向量有 4 个分量, 即 $S = [I, Q, U, V]$ 。其中 I 是总光强度。 Q 和 U 分别是两个相互垂直的线性极化分量, V 是圆偏振光, 由于天空中主要是线偏振光, 一般 $V=0$ 。计算偏振角 d 和偏振度 φ 的公式为:

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right) \quad (13)$$

$$d = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (14)$$

点源式是根据仿生物结构设计的, 一般采用光电二极管以及线性偏振片等。成像式探测系统一般使用相机测量, 拍摄不同偏振方向上的图像, 然后对进行图像处理, 解算偏振角。当涉及区域范围检测时, 点源式偏振光传感器通常具有较大的侦测范围, 可以覆盖广阔的区域。而图像式偏振光传感器则受限于相机的视野范围, 需要更多的传感器组合或者移动来实现大范围的检测。在实时性方面, 点源式偏振光传感器往往响应速度更快, 因为它通过模拟电路直接处理信号, 几乎可以实时获取偏振光信息。而图像式偏振光传感器需要进行图像采集和解码的过程, 相较于点源式传感器会有一定的延迟, 并且处理速度受到图像采集和处理器性能的限制。至于计算量方面, 点源式偏振光传感器通常只需要进行简单的模拟电路处理, 计算量较小。而图像式偏振光传感器需要对采集到的图像数据进行复杂的解码和处理, 相对而言计算量较大。

根据不同的使用需求, 可以根据区域范围、实时性和计算量等因素来选择适合的偏振光传感器类型。如果需要覆盖广阔区域、实时性要求较高, 而对计算量和成本有一定限制, 电源式偏振光传感器可能更为适合。如果需要更高的空间分辨率、更丰富的信息量, 并且计算资源和成本可以满足, 那么图像式偏振光传感器可能是更好的选择。总之, 根据具体需求和应用场景, 综合考虑区域范围检测、实时性和计算量等因素, 选择适合的偏振光传感器类型是非常重要的偏振角的获取是解算偏振的最终目的。

根据偏振光的分布规律, 我们可以观察到大气偏振模式具有明确的对称性, 太阳的位置决定了周围大气偏振度的分布规律。通过观察天顶点和太阳位置之间的太阳子午线, 可以确定当前的大气偏振模式。当运载体沿着特定方向移动时, 天空中的特征点相对于运载体坐标系也会发生位置变化。借助这些特征点的空间位置变化, 结合大气偏

振模式, 我们可以计算出相对于运载体的航向角。图 1 为天空偏振模式图。

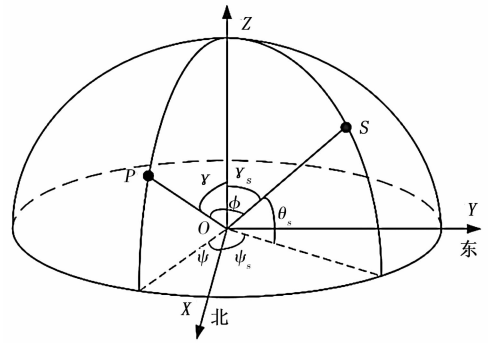


图 1 天空偏振模式图

图 1 中, 以观测点 O 为坐标原点, 头顶方向为 Z 轴正方向。球面上任意一点 P 的观测点方位角为 ψ , 观测点天顶角为 γ 。太阳位置为 S , 太阳天顶角为 γ_s , 太阳高度角为 θ_s , 太阳方位角为 ψ_s 。根据观测位置的经纬度、具体的日期以及时间能获取此刻的太阳高度角和太阳方位角。用偏振光传感器检测天空中的偏振信息, 根据瑞利散射规律计算可得航向角。

1.3 模糊控制

模糊控制是一种基于模糊逻辑的控制方法, 更贴近人类的思维方式, 能够有效处理非线性和模糊信息。与传统的二值逻辑不同, 模糊逻辑能够更灵活地处理现实生活中各种相似和不精确的情况, 而不仅仅局限于真或假。通过使用模糊逻辑, 可以建立模糊规则库来描述输入和输出之间的关系。模糊控制器通过隶属度函数对输入变量进行模糊化, 并根据模糊规则执行推理过程来生成模糊输出。隶属度函数用来刻画一个对象隶属于某种定义的程度, 隶属度函数具体的选择需要根据实际问题的特点和需求来确定, 正确的构造隶属度函数是运用模糊理论解决实际问题的基础, 通过正确构造隶属度函数, 我们能够更准确地将模糊的现实世界问题转化为模糊集合的运算和推理。模糊规则库包含大量控制规则, 是将实际控制经验进行归纳总结并提取规律到模糊控制器的关键步骤^[18]。最后, 通过解模糊化将模糊输出转换为具体的、精确的控制信号来解决实际问题。模糊逻辑的优势在于其能够处理模糊、不确定的信息和语义模糊的问题。例如, 在温度控制系统中, 温度高、温度低等概念并没有明确的定义, 模糊逻辑可以在考虑到环境条件的情况下, 根据模糊规则进行控制。这使得模糊控制在工业自动化、交通系统、电力系统等领域得到广泛应用。总的来说, 模糊控制利用模糊逻辑的灵活性和对不确定性问题的处理能力, 适用于各种实际问题的解决。模糊控制将人的经验知识转化为控制策略, 建立在对系统的数学模型之上。由于模糊控制能够整合操作人员的经验知识, 因此它能够在模型难以确定的系统中发挥出较好的控制作用。特别是在对象参数发生变化的情况下, 模糊控制具有更强的适应性和鲁棒性。模糊控制器的基本结构如图 2

所示。

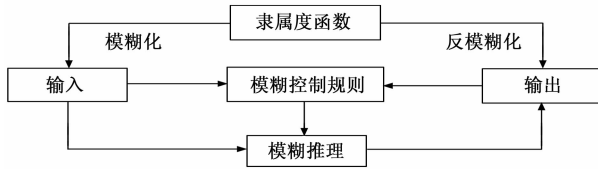


图 2 模糊控制器

2 组合导航算法设计

组合导航在实际应用中有着独特的优势，导航工具性能受限高效的滤波算法是提高组合导航系统精度和稳定性的关键^[19]。组合导航算法可以避免单一传感器故障或信号遮挡等问题带来的导航失败。可以利用多个传感器的不同测量信息，进行误差补偿和校正，从而提高导航精度和准确性。在常见的 SINS 和 GPS 的组合导航解算速度和位置的基础上，本系统加入 SINS/偏振光导航，计算导航系统的姿态角。本文将基于模糊控制的自适应卡尔曼滤波算法 (FAKF) 用到 SINS/偏振光的姿态解算和 GPS/SINS 速度位置解算中。模糊自适应卡尔曼滤波是一种数据处理方法，它通过观测数据来校验预测值，并在更新预测值的同时检测系统特性是否发生了变化，使用模糊控制系统实时地调整权值矩阵，从而对模型参数和噪声特性进行估计和修正。

2.1 系统整体设计

惯性导航系统的工作不依赖任何外部信息，惯导的陀螺仪和加速度计数据解算东北天向的速度位置信息和姿态角信息。GPS 在无遮挡的情况可以持续获得速度和位置信息。偏振光导航系统连续为载体提供姿态信息。目前，偏振光导航技术已经在机器人、水下探测、智能家居等领域使用。将偏振光导航与惯性导航系统进行组合，可以更加精准地实现自主导航和定位。惯导会随着时间积累误差，为了弥补惯性导航的不足，使用 GPS/SINS 组合导航子系统解算组合后的东北向速度和位置信息，SINS/偏振光导航系统解算组合后的姿态角信息。

本系统一部分采用 GPS/SINS 为导航提供需要的速度和位置信息，速度位置解算流程如图 3 所示。另一部分使用 SINS/偏振光组合导航系统来获得更高精度的姿态信息如图 4 所示。

对两个子系统分别设计模糊逻辑控制器根据模糊控制规则调整自适应卡尔曼滤波的指数加权因子的大小，不断调整滤波器的量测噪声的大小，从而抑制滤波器发散。

2.2 模糊控制器设计

模糊控制理论认为人类对自身和设备的控制是基于规则的。在进行模糊规则制定之前，需要进行模糊分割来确定每个语言变量取值的模糊语言名称个数。语言名称需要考虑实际问题的特点和要求。例如，在处理温度问题时，可以选择 3 个模糊语言名称：低、中、高，以描述不同的温度水平。而在处理湿度问题时，可以选择 3 个模糊语言名称：干燥、适中、潮湿。模糊分割的数量主要决定了模糊

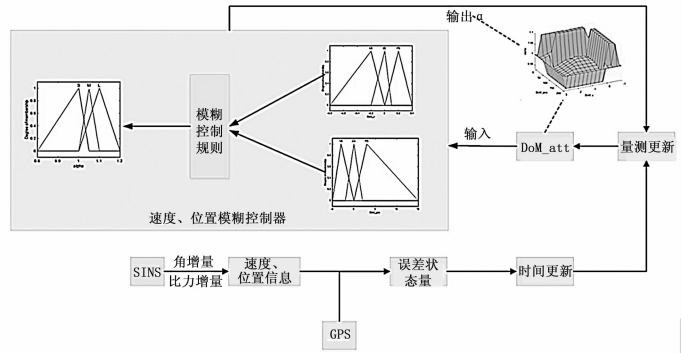


图 3 速度位置解算流程图

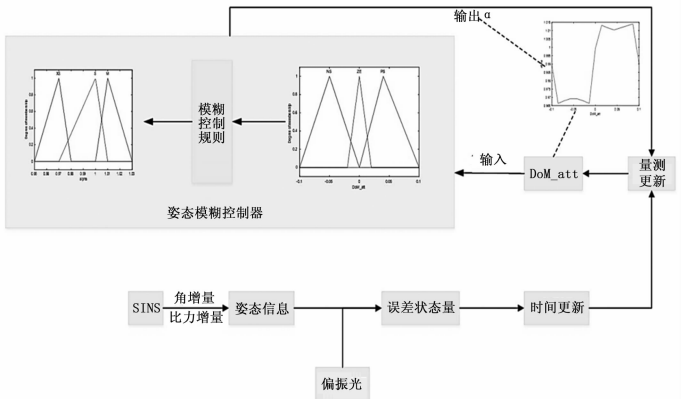


图 4 姿态解算流程图

控制的精细化程度，需要在模糊分割数量的选择中进行权衡。如果模糊分割过细，将会增加模糊控制规则的数量，导致工作量增大，同时也会增加计算复杂度。因此，在制定模糊规则时，应该根据实际需求和能承受的計算量来决定模糊分割的数量。但是，模糊分割的数量也不能太少，否则会导致控制太粗略，难以达到期望的控制效果。如果模糊分割过少，可能会存在信息丢失或不准确的情况，导致控制效果不理想。因此，在制定模糊规则时，还需要考虑控制精度和误差容忍度等因素，以确定适当的模糊分割数量，从而解决复杂的控制问题达到较好的控制效果。模糊系统的输入和输出分割后可以用模糊等级来描述如 NS (Negative Small)、ZE (Zero)、PS (Positive Small) 等。根据模糊分割后的等级进行模糊控制规则的制订。本系统设计了两个模糊控制器对系统进行解算。

SINS/偏振光组合导航子系统的输入 DoM_att 是偏航角的理论协方差值减去实际残差方差的差值，输入为 α_2 ，本模糊控制规则的描述如下：

If (DoM_att is NS) then ($alpha$ is XS)

If (DoM_att is ZE) then ($alpha$ is S)

If (DoM_att is PS) then ($alpha$ is M)

GPS/SINS 组合导航子系统的两个输入分别为 DoM_V 和 DoM_pos 是速度和位置的理论协方差值减去实际残差方差的差值，输出为 α_1 ，采用的模糊控制规则如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则

	DoM _v			
		NS	ZE	PS
DoM _{pos}	NS	medium	Zero	small
	ZE	small	Medium	large
	PS	medium	Large	zero

隶属度函数有三角隶属度函数、梯形隶属度函数、高斯隶属度函数、S型隶属度函数等^[20], 三角隶属度函数具有良好的控制性能, 三角隶属度函数的简单性也使得系统的计算效率相对较高。本系统采用三角隶属度函数进行模糊化和去模糊化。

3 仿真实验结果

为了验证本文设计的模糊控制自适应卡尔曼滤波(FAKF)能够优化扩展卡尔曼滤波(EKF)发散问题, 进行了仿真实验。设置初始经度为 112.444 7°、纬度为 38.017 8°、高度为 825 m, 初始速度和姿态角为 0, 陀螺零偏为 1°/h。偏振传感器测量精度为 0.3°。三维仿真轨迹如图 5 所示。

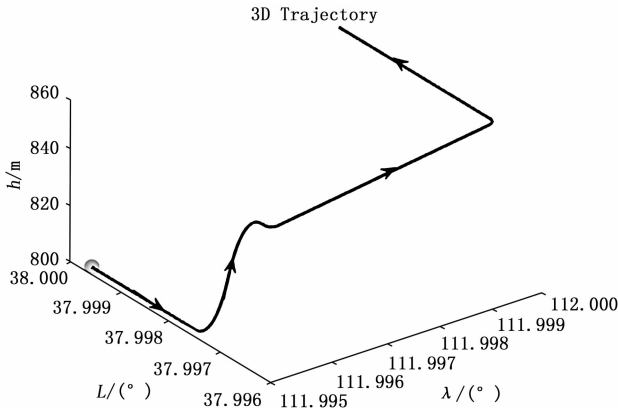


图 5 仿真轨迹图

本文设计 GPS/SINS 组合导航子系统基于模糊控制的自适应卡尔曼滤波(FAKF)和扩展卡尔曼滤波(EKF)东北向速度误差和位置误差对比如图 6 和 7 所示。

从图 6 和图 7 可以看出两种算法的东北天向速度和位置误差对比结果, 实线表示的模糊控制自适应卡尔曼滤波算法(FAKF), 虚线表示扩展卡尔曼滤波算法(EKF)。本文算法在速度和位置误差方面有较好的收敛性, 误差曲线也较为平滑, 精度有明显提高。

在仿真时未考虑横滚, 故 SINS 和偏振光子系统解算时仅计算俯仰角和航向角。两种算法对比的组合导航系统的姿态误差, 如图 8 所示。

从图 8 可以看出两种算法的俯仰角和航向角对比结果, 实线表示的模糊控制自适应卡尔曼滤波算法(FAKF), 虚线表示扩展卡尔曼滤波算法(EKF)。SINS/偏振光解算姿态角时加入模糊控制自适应卡尔曼滤波算法(FAKF), 误差曲线更为平稳。

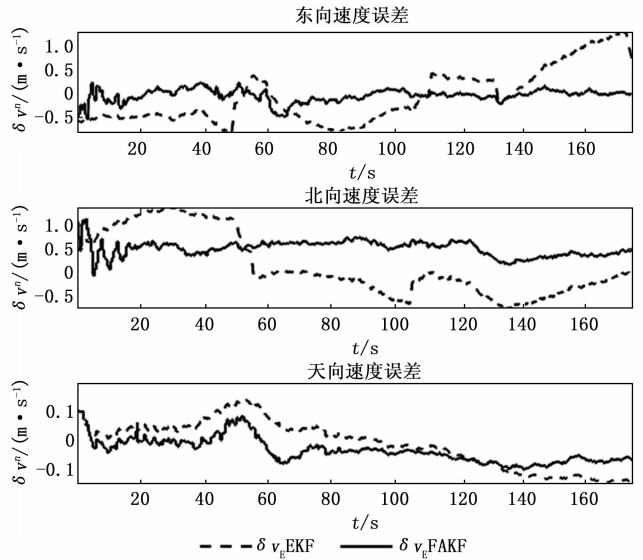


图 6 东北天向速度误差对比图

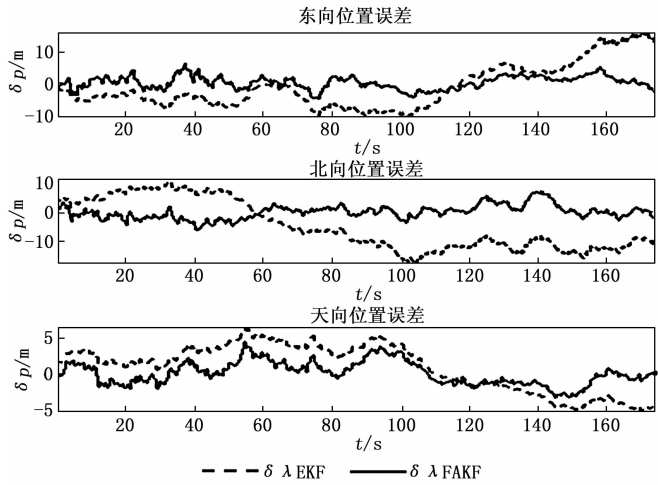


图 7 东北天向位置误差对比图

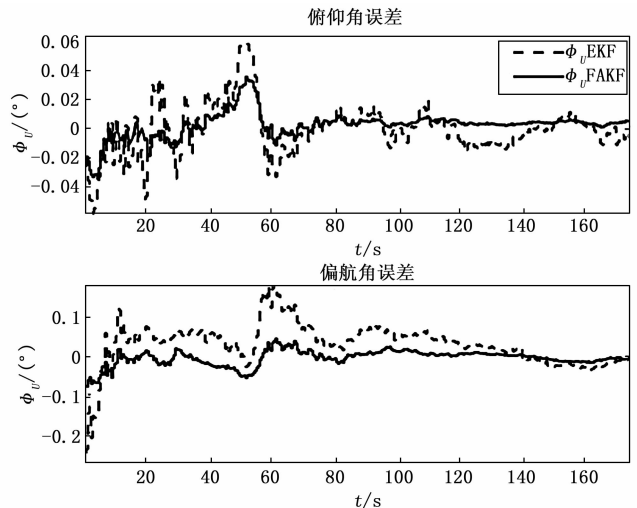


图 8 东北向姿态误差图

根据均方误差对比如表 2 所示, 可知本文算法比扩展卡尔曼滤波算法(EKF)在东、北、天向位置上分别提升精度

56.81%、65.17%、45.99%，东、北、天向速度上提升精度 46.99%、54.01%、43.82%，俯仰角、航向角分别提升精度 58.01%、53.58%。仿真结果表明，该算法设计的隶属度函数和模糊控制规则优化了扩展卡尔曼滤波发散问题。

表 2 均方误差对比表

	EKF	FAKF
东向位置误差/m	5.730 5	2.475 1
北向位置误差/m	9.037 9	3.147 6
天向位置误差/m	3.398 7 2.589 2	2.103 8 1.398 4
东向速度误差/(m/s)	0.579 9	0.307 4
北向速度误差/(m/s)	0.794 9	0.365 6
天向速度误差/(m/s)	0.084 9	0.047 7
俯仰角误差/(°)	0.003 1	0.001 3
航向角误差/(°)	0.268 2	0.134 5

4 结束语

本文研究了 GPS/SINS/偏振光组合导航下基于模糊控制的自适应卡尔曼滤波算法，设计了模糊控制器来调节指数加权因子的大小。模糊控制是一种基于专家知识和操作者经验的决策方法，它能够以规则的形式表达，并模拟人类的决策过程。这种方法具有较强的知识表达能力，可以通过模糊逻辑对不确定性和模糊性进行处理，从而实现更加精准地控制和决策。模糊控制应尽可能准确地建立被控对象的数学模型，确保控制系统的稳定性。在模糊控制中，模糊控制规则是实现控制功能的关键，它决定了输出结果如何对输入进行响应。一个优秀的模糊控制系统必须具备丰富而准确的模糊控制规则。在实际应用中，为了获得更好的控制效果，提高系统对输入变量的处理精度需要完善模糊控制规则。

偏振光导航作为一种新兴的导航技术，正在不断发展和探索中。它具有不受信号遮挡和多径效应影响、高精度定位和导航等优势，有望在室内定位、无人车、机器人导航等领域发展出更多实际应用。随着相关技术的不断成熟和突破，偏振光导航有望成为未来导航领域的重要研究方向和应用方向。虽然具有很多优势，但同时也存在着一些缺点和挑战。特别是在复杂的户外环境，光的传播路径和偏振状态变化更加复杂，这对偏振光导航系统的设计和算法提出了更高的要求。偏振光导航技术尚处于研究和探索阶段，仍需要进一步优化和完善。虽然在某些场景下具有明显的优势，但同时也存在着一系列的挑战和限制，需要通过开展更多的研究和实践，不断推动偏振光导航技术的发展和應用。

参考文献:

- [1] 蔡涵钰, 鲜勇, 张大巧, 等. 基于神经网络的 GPS 深度融合弹载惯导模型 [J]. 中国惯性技术学报, 2023, 31 (4): 359 - 365.
- [2] WANG D, WANG B, HUANG H, et al. Robust filter method for SINS/DVL/USBL tight integrated navigation system [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23 (10): 10912 - 10923.
- [3] QIAN L, QIN F, LI A, et al. An INS/DVL integrated navigation filtering method against complex underwater environment [J]. Ocean Engineering, 2023, 278: 114398 - 114408.
- [4] 李明, 柴洪洲, 郑乃铨. GNSS/SINS/视觉导航鲁棒算法 [J/OL]. 南京信息工程大学学报 (自然科学版): 1 - 8.
- [5] XIA M, SUN P, GUAN L, et al. Research on algorithm of airborne dual-antenna GNSS/MINS integrated navigation system [J]. Sensors, 2023, 23 (3): 1691 - 1711.
- [6] XU T, XU X, XU D, et al. A new robust filtering method of GNSS/MINS integrated system for land vehicle navigation [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71 (11): 11443 - 11453.
- [7] 张福斌, 王凯, 廖伟飞, 等. 激光雷达/MEMS IMU/里程计紧组合导航算法 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43 (7): 139 - 148.
- [8] 夏琳琳, 张晶晶, 初妍, 等. 融合天空偏振光的视觉 SLAM 研究进展与展望 [J]. 兵工学报, 2023, 44 (6): 1588 - 1601.
- [9] 褚金奎, 林木音, 王寅龙, 等. 偏振光传感器的无人船导航与编队应用 [J]. 光学精密工程, 2020, 28 (8): 1661 - 1669.
- [10] 王寅龙. 基于地球偏振光场的自主全球定位方法研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [11] 刘军, 刘克诚, 田甜, 等. 基于自适应卡尔曼滤波算法的紧组合导航系统的研究 [J]. 电子测量技术, 2019, 42 (5): 52 - 55.
- [12] 肖志涛, 赵培培, 李士心. 基于 INS/GPS 组合导航的自适应模糊卡尔曼滤波 [J]. 中国惯性技术学报, 2010, 18 (2): 195 - 198.
- [13] 聂浩翔, 关劲, 卞鸿巍. 模糊自适应 Kalman 滤波在 INS/GPS 组合导航系统中的应用 [J]. 舰船电子工程, 2011, 31 (1): 67 - 70.
- [14] 徐奔腾, 陈萍萍, 王秋阳, 等. 基于模糊自适应卡尔曼滤波的 GPS-INS 融合研究 [J]. 化工自动化及仪表, 2019, 46 (7): 571 - 574.
- [15] TEMPLE S E, HOW M J, POWELL S B, et al. Thresholds of polarization vision in octopuses [J]. Journal of Experimental Biology, 2021, 224 (7): 1 - 7.
- [16] J M H, ALASDAIR R P S S, et al. Polarization vision in terrestrial hermit crabs [J]. Journal of Comparative Physiology A, 2023: 1 - 7.
- [17] LI S, KONG F, XU H, et al. Biomimetic polarized light navigation sensor: a review [J]. Sensors, 2023, 23 (13): 5848 - 5882.
- [18] 袁佳星, 刘世敏, 赵晨, 等. 模糊控制应用在节能冰箱方面的探究 [J]. 日用电器, 2020, 177 (9): 109 - 113.
- [19] 邱望彦, 李荣冰, 刘建业. 基于改进自适应渐消卡尔曼滤波的通用航空 GNSS/微惯性组合导航算法研究 [J]. 电子测量技术, 2020, 43 (10): 95 - 100.
- [20] 季彬. 水利枢纽船舶过闸一泊位联合调度模型与方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.