

基于粒子滤波的无人机自主轨迹 视觉导航控制方法研究

张 玲

(榆林职业技术学院 基础部, 陕西 榆林 719000)

摘要: 针对现有无人机导航控制方法存在的控制效果不佳的问题, 提出一种基于粒子滤波的无人机自主轨迹视觉导航控制方法研究; 利用粒子滤波算法, 实现对无人机自主轨迹视觉导航控制方法的优化设计; 采用栅格法构建无人机飞行环境地图, 根据无人机的机械组成结构和工作原理, 构建运动状态模型; 利用内置的摄像机设备采集视觉图像, 执行图像灰度转换、几何校正、滤波等预处理步骤; 通过对视觉图像的特征提取, 判断当前环境是否存在障碍物; 利用粒子滤波算法确定无人机位姿, 结合障碍物识别结果规划无人机的自主飞行轨迹; 将位置、速度和姿态角的控制量计算结果, 输入到安装的导航控制器中, 完成无人机的自主轨迹视觉导航控制任务; 通过实测分析得出结论: 研究方法的速度控制误差最低为 0.07%, 速度控制误差最低为 14%, 位置控制误差的平均值为 2.1 m, 低于预设值; 即设计的导航控制方法具有良好的控制效果。

关键词: 粒子滤波; 无人机自主导航; 轨迹视觉; 导航控制

Research on Visual Navigation Control Method of UAV Autonomous Trajectory Based on Particle Filter

ZHANG Ling

(Foundation Department, Yulin Vocational And Technical College, Yulin 719000, China)

Abstract: Aiming at the problem of poor control effect of existing unmanned aerial vehicle (UAV) navigation control methods, a visual navigation control method of UAV autonomous trajectory based on particle filter is proposed. The particle filter algorithm is used to optimize the visual navigation control method of the UAV autonomous trajectory. The flight environment map of the UAV is constructed by the grid method, and the motion state model is constructed by the mechanical composition, structure and working principle of the UAV. The built-in camera equipment is used to collect visual images and perform preprocessing steps such as image gray conversion, geometric correction and filtering. Through the feature extraction of visual image, judge whether there are obstacles in the current environment. The position and attitude of the UAV are determined by the particle filter algorithm, and the autonomous flight trajectory of the UAV is planned combined with the obstacle recognition results. The calculation results of the control quantities of position, speed and attitude angle are input into the installed navigation controller to complete the autonomous trajectory visual navigation control task of the UAV. Through the actual measurement and analysis, it is concluded that the minimum speed control error of the research method is 0.07%, the relative minimum speed control error is 14%, and the average value of position control error is 2.1 m, which is lower than the preset value. That is, the designed navigation control method has good control effect.

Keyword: particle filter; UAV autonomous navigation; track vision; navigation control

0 引言

近年来, 随着无人机及其相关技术的不断发展, 越来越多的无人机正在被使用。而四旋翼凭借着其小巧灵活, 对起飞场地要求极低等优点被广泛地应用到生活中的各个方面, 如生活中的航拍四旋翼无人机以及电力巡检四旋翼无人机等。利用无线电遥控设备与自备的程序控制装置操纵的不载人飞机即为无人机, 能够执行各种复杂、困难的任務。因此被广泛应用到管线巡检、地质勘察、森林防火、地震救灾、交通管理等多项工作中, 并起到良好的辅助作

用^[1]。由于其新颖的结构、良好的飞行性能以及其特有的姿态控制方法, 使得它具有广泛的应用前景, 因此受到了国内外众多专家和学者的广泛重视。

然而在实际的无人机使用过程中, 要求无人机按照既定轨迹飞行, 最大程度地减少其与固定建筑物以及其他障碍物之间的碰撞次数, 并精准地到达指定地点。可以说, 无人机的飞行精度直接影响其在各个领域中的应用价值。文献 [3] 方法提出了一种目标检测算法, 并经实验验证, 该算法具有较好的鲁棒性。无人直升机通过机载相机获取

收稿日期: 2022-03-09; 修回日期: 2022-04-21。

基金项目: 榆林市科技计划项目(2019-116-03)。

作者简介: 张 玲(1982-), 女, 陕西榆林人, 大学本科, 实验师, 主要从事计算机应用、无人机方向的研究。

引用格式: 张 玲. 基于粒子滤波的无人机自主轨迹视觉导航控制方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(9): 99-106.

目标图像,在对获取的图像进行一系列预处理操作后,结合所设计的目标特征标志的大小、形状以及目标轮廓不变距等特征,实现对“H”型着陆标志的自主检测,并设计了定高、悬停以及定速3种飞行模式,通过在3种飞行模式之间的切换,实现了无人直升机的自主着陆,之后研究者又将GPS信号与视觉信号相结合,使得无人直升机可以执行远程自主飞行的任务。文献[4]方法提出了一种能够识别和估计无人直升机的位置与姿态信息的解算方法,利用机载的双目相机对特征点进行匹配并进行位态的解算,从而估计无人直升机相对于着陆平面的位置和姿态信息。针对着陆平面运动的情况,将卡尔曼滤波技术与双目视觉系统相结合,从而实现对目标物的跟踪。

针对上述问题,本文提出一种基于粒子滤波的无人机自主轨迹视觉导航控制方法研究。采用栅格法对无人机的飞行环境进行量化描述通过对无人机飞行环境的栅格化处理,得出环境地图创建结果,采用电动机的驱动方式,对4个转子进行推力调节,实现了对飞行器的俯仰和总推力的控制。通过当前无人机位置与环境地图中标注的建筑物位置之间的关系直接判断得出,而动态障碍物以及其他障碍物的识别,通过逐行遍历整个图像,确定了移动物体的左右两个边界点,采用粒子滤波算法对无人机位姿进行自动定位,通过粒子滤波算法的运行,得出任意时刻无人机位姿的量化结果采用代价函数对路径中的栅格节点进行评估,根据控制器内部结构决定该参数的具体取值,完成对无人机飞行参数的实时导航控制,进而提升导航控制方法在无人机领域的应用价值。

1 无人机自主轨迹视觉导航控制方法设计

在无人机自主轨迹视觉导航控制方法的基础上,结合粒子滤波算法,分别从视觉图像、飞行控制、执行机构等方面实现导航控制方法的优化,其基本框架如图1所示。

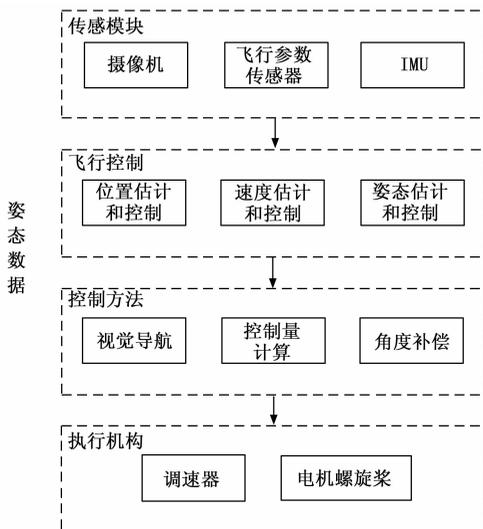


图1 无人机自主轨迹视觉导航控制方法框图

无人机飞行控制模块根据视觉图像的采集结果以及无人机姿态的判定结果,得到各个参数的控制量计算结果,最后经过控制分配形成直流无刷电机的控制量,控制电机桨叶旋转使得无人机机身产生相应运动。

1.1 创建无人机飞行环境地图

在无人机自主轨迹规划以及视觉导航之前应考虑其周围的环境问题,并根据无人机的不同特性,选择不同的规划算法。无人机的实时飞行位置需保证每个轨迹点均满足设定的环境约束条件,因此采用栅格法对无人机的飞行环境进行量化描述[2]。该方法将网格分为一组具有二值信息的网格,该网格具有两种属性,并利用最优算法对网格进行规划。在网格模型中,一般都是将网格模型的大小和步长作为网格的大小,但也要根据实际情况作出改变。通过对无人机飞行环境的栅格化处理,得出环境地图创建结果,如图2所示。

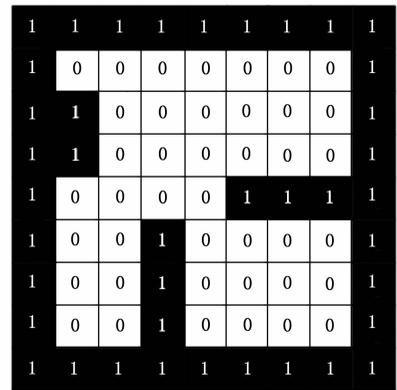


图2 无人机飞行环境栅格地图

由此可以得出飞行环境的约束条件为:

$$\begin{cases} x_{min} \leq x \leq x_{max} \\ y_{min} \leq y \leq y_{max} \\ z_{min} \leq z \leq z_{max} \end{cases} \quad (1)$$

上式中 i_{min} 和 i_{max} 分别为 x 、 y 、 z 三个方向上的飞行坐标最大值和最小值,并在实际的飞行导航控制过程中,以公式1作为空间约束条件[3]。另外需要标记固定静态障碍物的位置,即建筑物的位置。在已知建筑物高度的前提下,障碍物信息可以描述为:

$$W = \bigcup_{i=1}^{i=K} W_i \quad (2)$$

其中:变量 W_i 为第 i 个建筑物所占的区域范围, K 表示无人机飞行环境中建筑物的数量。同理也可以得出其他飞行障碍物的占用面积和位置坐标,并将其标记在创建的初始环境地图中。

1.2 构建无人机运动状态模型

从结构上来说,无人机的旋翼是固定在一个平面上的,4个旋翼均匀地分布在飞行器的四角,两个相对的旋翼转动的方向是一样的,而另外两个则是相反的。一般认为,一

个逆时针转动的旋翼被定义为飞机的前进方向, 并将该转子的旋转中心和飞机的质量也连线相等的角度平分线作为飞行器的前进方向。由于飞行器的空间自由度为6个, 4个为可控制的基本动作, 因此该飞行器为一个非主动控制的系统^[4]。这6种空间自由度包含了3种姿态角, 即沿3个方向的运动, 航向、俯仰角、横滚角。采用电动机的驱动方式, 对4个转子进行推力调节, 实现了对飞行器的俯仰和总推力的控制。当4个推进器同时增大推进器的推力, 使得转子的总推力超过了机身自身的自重, 从而产生一个向上的加速度。结合上述无人机的运行原理, 从牛顿第二定律可以看出, 在平面坐标系统的3个方向上, 无人机运动方程可以量化表示为:

$$\begin{cases} X = \frac{(F_x - \kappa_x x^2)}{m} \\ Y = \frac{(F_y - \kappa_y y^2)}{m} \\ Z = \frac{(F_z - mg - \kappa_z z^2)}{m} \end{cases} \quad (3)$$

其中: 变量 m 为无人机的机体质量, F_x 、 F_y 和 F_z 分别表示的是无人机的所受旋翼升力在3个方向上的分量, κ_i 为空气阻力系数^[5]。在此基础上, 根据刚体转动的动力学方程:

$$\frac{d}{dt}(J\omega) = M \quad (4)$$

公式(4)中 J 和 ω 分别为无人机的惯性矩阵和角速度矢量, M 为总力矩, 由横滚力矩、俯仰力矩、偏航力矩三部分组成, 其量化计算公式如下:

$$\begin{cases} M_{\text{Roll}} = L(F_2 - F_4) \\ M_{\text{Pitch}} = L(F_3 - F_1) \\ M_{\text{Yaw}} = C(F_1 - F_2 + F_3 - F_4) \end{cases} \quad (5)$$

上式中 $F_1 - F_4$ 表示的是无人机上4个旋翼所受的升力值, 参数 L 和 C 分别代表单个旋翼杆长和比例系数, 由于4个旋翼的安装高度相同, 因此 L 的取值为定值^[6]。结合无人机结构参数, 将其运动方程与动力方程融合在一起, 得出无人机运动状态模型的构建结果。

1.3 采集并处理无人机视觉图像

1.3.1 自主生成无人机视觉图像

将摄像机设备安装到无人机上, 并利用摄像机、图像以及世界坐标系之间的关系, 对视觉相机进行标定。在采集无人机视觉图像时, 保证摄像机与无人机机体平面处于平行状态, 利用摄像机设备的成像原理得出实时视觉图像。目标在相机坐标系中距离像素中心的坐标及其在世界坐标系中实际坐标的关系可以表示为:

$$\begin{cases} \frac{f}{H} = \frac{x}{x'} \\ \frac{f}{H} = \frac{y}{y'} \end{cases} \quad (6)$$

式中: f 和 H 为相机的焦距及其距离地面的高度, (x, y) 和 (x', y') 分别为目标在相机坐标系和世界坐标系中的位置

坐标。由于在获取目标影像时, 飞行器的侧面模组会随着机身的倾斜而产生偏差, 因此测量结果并非与飞行器的垂直高度一致, 因此必须进行相应的补偿^[7]。最终对实时采集影像图像进行逐帧输出, 便能够得出初始图像的采集结果。

1.3.2 转换图像灰度

在无人机的视觉导航中, 由于对视觉图像的检测速度具有较高要求, 在对图像进行预处理时, 需要将采集到的图像转换成灰度图像, 且注意保留图像的结构特征。由于无人机获取的原始图像具有随机性, 且与目标对象的边界没有相应的对应关系, 采用加权方法可以很好地识别出目标与背景之间的差异, 且存在着一定的模糊性^[8]。采用高斯函数进行处理, 在获取图像时, 给定的像素点与场景区的周边点之间的亮度贡献是正常的, 所以选取了高斯光滑函数 $g(x, y)$, 并对距离不同的给定像素点的周边点进行不同的处理。高斯光滑函数表达式如下:

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-x^2+y^2/2\sigma^2} \quad (7)$$

其中: σ 为高斯光滑偏置。由此可以得出初始目标图像的灰度转换结果为:

$$\text{gray} = g(x, y)(R \cdot \omega_R + G \cdot \omega_G + B \cdot \omega_B) \quad (8)$$

公式(8)中 R 、 G 和 B 为图像像素点的红、绿、蓝色分量, 而 ω_i 表示对应的权重值。联立公式(7)和公式(8), 并将初始采集的图像代入其中, 即可得出灰度图像转换输出结果。

1.3.3 图像几何校正

无人机采集到的遥感影像畸变, 主要是由于摄像机镜头的非线性失真, 以及拍摄过程中由于无人机姿态的改变而产生的影像转动和投影变形^[9]。一般情况下, 无人机的感应器焦距都是固定的, 所以对每个图像的偏差都是一样的, 这样就可以将镜头的畸变归类为系统错误, 并通过模型和公式来修正。对于复杂的几何变形可以使用二阶多项式进行纠正, 具体的几何校正过程可以表示为:

$$\begin{cases} x_{\text{cor}} = a_0 + (a_1 x + a_2 y) + (a_3 x^2 + a_4 xy + a_5 y^2) \\ y_{\text{cor}} = b_0 + (b_1 x + b_2 y) + (b_3 x^2 + b_4 xy + b_5 y^2) \end{cases} \quad (9)$$

公式(9)的输出结果 $(x_{\text{cor}}, y_{\text{cor}})$ 为校正后任意像素的坐标位置, a_i 和 b_i 均为多项式系数, 取值为常数。在实际的图像几何校正过程中, 为了提高图像处理效率, 需要先对其几何畸变情况进行判定, 若当前图像未出现畸变情况, 则不需要执行校正程序。

1.3.4 图像滤波

图像滤波是降低图像噪声的重要手段。图像噪声是由多种因素引起的, 既有系统的外部因素, 也有系统内部的因素。实际获取的图像均包含有噪声, 其特征和与图像信号之间的关系是由噪声引起的^[10]。选取 3×3 的滑动窗口, 在影像资料矩阵内按一行或一行的方向, 逐个滑动。在每一次滑动之后, 根据公式10对窗口中的像素灰度进行排序。

$$y_i = Med\{x_i\} = [Med[x_{i-k}, \dots, x_i, \dots, x_{i+k}]] \quad (10)$$

其中: $Med\{\cdot\}$ 为 中 值 计 算 函 数。公 式 (10) 所 得 的 中 间 值 代 替 窗 口 中 心 位 置 像 素 的 灰 度 值^[11]。滑 动 窗 口 遍 历 完 图 像 中 的 所 有 像 素 点 后, 输 出 的 结 果 即 为 图 像 的 滤 波 处 理 结 果。整 合 所 有 图 像 处 理 结 果, 最 终 将 其 标 记 为 $D(x)$ 。

1.4 识别环境中的飞行障碍

建筑障碍物的识别可以通过当前无人机位置与环境地图中标注的建筑物位置之间的关系直接判断得出, 而动态障碍物以及其他障碍物的识别, 则需要根据实时采集的视觉图像, 判断当前无人机飞行路径上是否存在障碍物^[12]。首先以采集并处理完成的图像为基础, 对其进行逐行遍历, 确定了运动物体的最高点和最低点, 并用 $y_{highest}$ 和 $y_{minimum}$ 对其进行了纵向标注。在此基础上, 通过逐行遍历整个图像, 确定了移动物体的左右两个边界点, 并用 x_{left} 、 x_{right} 标出相应的横坐标。最终, 获得了整个图像的 4 个顶点 $(x_{left}, y_{highest})$ 、 $(x_{right}, y_{highest})$ 、 $(x_{left}, y_{minimum})$ 、 $(x_{right}, y_{minimum})$, 再选择一个最小的长方形框架, 将上述 4 个坐标点作为顶点, 对图像进行裁剪, 由此保证最小的方框可以容纳所有的障碍物特征信息。在分割后的图像中, 含有前景障碍的物体的边界, 而在计算机视觉中, 大多数的特征提取和识别都是以物体的边界为对象。在对障碍物特性进行研究时, 可以充分地利用障碍物的边缘轮廓来获得特征信息^[13]。因此, 在此基础上, 对分割后的图像进行边缘提取, 并将其用于下一步的处理。分别计算各个图像块中相应的轮廓点数量, 进而得出障碍物的特征提取结果如下:

$$\Phi = [\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5] \quad (11)$$

式中, φ_1 表示导航控制的特征量, φ_2 表示导航控制的数据节点, φ_3 表示特征信息融合参数, φ_4 表示飞行障碍的序列节点, φ_5 为目标的移动速度。最终将提取的目标特征与设置的障碍物边缘轮廓特征进行匹配, 便可以确定当前无人机飞行区域是否存在障碍物及其类型^[14]。将障碍物的识别结果添加到创建的环境地图中, 并将障碍物所在位置的栅格转换为“0”, 即不予通过标记处理。

1.5 利用粒子滤波算法确定无人机位姿

无人机位姿估计可以视为一个概率推测的过程, 采用粒子滤波可以将无人机位姿估计问题转换为解算后验概率密度问题, 从而得到最优的目标状态估计^[15]。粒子滤波算法的基本流程如图 3 所示。

采用粒子滤波算法对无人机位姿进行自动定位, 并对航标进行跟踪, 从而构成一种复杂的粒子滤波算法。另外, 在粒子滤波失去目标后, 该方法会对航标进行重新定位, 从而提高跟踪算法的鲁棒性^[16]。首先, 根据色彩直方图搜索整个图像区域的航标, 然后根据其位置进行定位。然后, 在该航标附近随机产生初始颗粒, 并对其进行彩色直方图分析, 并将其存储起来。通过这种方式, 完成了初始化工作。在对无人机视觉图像进行粒子滤波处理过程中, 首先利用先验密度概率求出一组微粒, 并将无人机当前位姿量

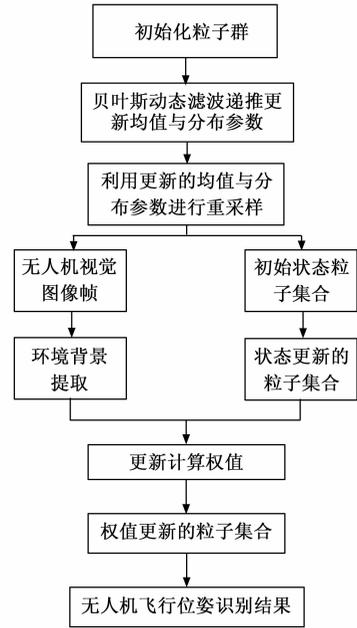


图 3 粒子滤波算法流程图

化描述为 $\{\hat{x}^{(i)}, \omega_0^{(i)}\}_{i=1}^N$, 其中 \hat{x} 的量化计算公式如下:

$$\hat{x} = \int x_t P(x_t | D_t) dx_t \quad (12)$$

其中: D_t 和 x_t 分别为实时视觉图像及求得状态, $P(x_t | D_t)$ 为利用所获得实时信息求得状态的后验概率密度函数^[17]。在此基础上根据概率密度分布生成 N 个新的粒子, 并利用公式 (13) 计算生成新粒子的权重值。

$$\omega_k^{(i)} = P(D_k | X_k^{(i)}) \quad (13)$$

式中, $X_k^{(i)}$ 为新生成的粒子, i 表示新生成粒子序列, k 表示粒子数据节点。在此基础上, 利用系统方程式对状态的先验概率密度进行了预测, 并采用了贝叶斯准则, 通过 t 时间点的测量, 对状态的前验概率密度进行了修正, 由此得出了后验概率密度函数的预测和更新结果:

$$\begin{cases} P_{\text{forecast}}(x_t | D_{t-1}) = \int p(x_t | x_{t-1}) p(x_{t-1} | D_{t-1}) dx_{t-1} \\ P_{\text{update}}(x_t | D_t) = \frac{p(y_t | x_t) p(x_t | D_{t-1})}{p(y_t | D_{t-1})} \end{cases} \quad (14)$$

由公式 (14) 所得到的结果为粒子滤波的最优解。通过加权、概率分布对微粒进行再抽样, 形成 N 个新的、独立的、随机粒子。最后, 用粒子滤波方法得到的无人飞行器姿态数据进行了分析, 当发现与目标的初始模板存在较大的偏差时, 说明该方法的跟踪失效。因此, 将会对该算法进行初始化, 并对无人机实时位姿进行重新判断^[18]。通过粒子滤波算法的运行, 得出任意时刻无人机位姿的量化结果如下:

$$Q_k = P(x_t | D_t) \hat{x}_t + \omega_0^{(k)} \quad (15)$$

以公式 (15) 计算得出的无人机实时航行位置作为视觉导航的起点位置, 并考虑无人机航行模型, 对其姿态进

行调整。

1.6 规划无人机自主飞行轨迹

以当前无人机的位置确定结果为飞行轨迹的规划起点，采用启发式方法，使搜索节点沿目标方向运动，从而减少了运算速度，提高了运算速度。与此同时，该方法还以初始结点至当前结点的代数为总路径代价，以防止在该路径上遇到障碍物。在飞行轨迹规划过程中，首先采用代价函数对路径中的栅格节点进行评估，评估函数可以表示为：

$$f(n) = \psi(n) + r(n) \quad (16)$$

式中，参数 n 代表栅格节点， $\psi(n)$ 和 $r(n)$ 分别为由起始节点到栅格节点 n 以及当前栅格节点到导航目标终点的评估代价值， $f(n)$ 则为全局评估代价值。由此可以确定创建的环境地图中，任意一个栅格的允许通过状态。在无人机航行的轨迹规划过程中，首先，将无人机的初始航行位置纳入 open 表中。通过对现有的结点进行扩充，计算每个待扩充结点的代值，选取由公式 (16) 所输出的最小值节点，将其添加到 closed 表格中。判断扩展节点是否为轨迹导航终点，若判断结果为否，则继续向前进行扩展，直至达到目标点为止。如果 open 表中的栅格节点为空，则表示无可以被扩充的节点，若此时未到达导航轨迹终点，则表示无人机自主飞行轨迹规划失败，需要重新规划^[19]。由于在障碍物识别过程中，将识别结果添加到环境地图中，并对障碍物所处位置进行栅格标记，因此在轨迹规划过程中无需进行进一步障碍物筛选与判断，在一定程度上提高了无人机航行轨迹的规划效率和质量。无人机轨迹规划流程图如图 4 所示。

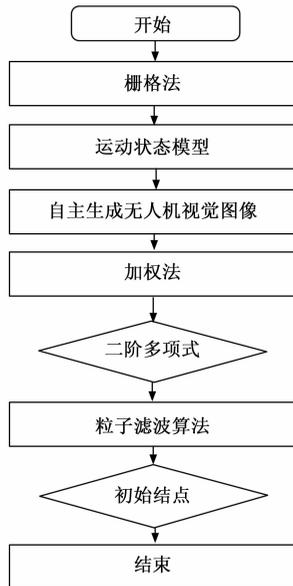


图 4 无人机轨迹规划流程图

1.7 计算无人机导航控制量

无人机视觉导航控制的最终目的就是保证实时无人机的运行姿态与参数与规划的路径一致，根据无人机航行轨

迹的规划结果，可以确定各个轨迹点位置上无人机的预期位姿，将其表示为：

$$X_{\text{expect-t}} = (x_t \ y_t \ z_t \ v_{xt} \ v_{yt} \ v_{zt} \ \varphi \ \theta \ \varphi)^T \quad (17)$$

其中： x_t 、 y_t 和 z_t 为轨迹点预期位置坐标， v_{xt} 、 v_{yt} 和 v_{zt} 对应的是无人机航行速度在 x 、 y 、 z 三个方向上的分量，而 φ 、 θ 和 φ 表示的是滚转角、俯仰角和偏航角。利用粒子滤波算法可以直接得出无人机相应时刻的所处位置坐标和飞行运动参数，并将其记为 $X_{\text{actual-t}}$ ，那么无人机视觉导航的控制量可以表示为：

$$\Delta = |X_{\text{expect-t}} - X_{\text{actual-t}}|s(v) \quad (18)$$

式中， $s(v)$ 表示控制方向函数，由此可以得出无人机轨迹位置、姿态角度以及航行速度 3 个方面的控制量计算结果。公式 (18) 中 $|\cdot|$ 为绝对值计算符号，能够保证计算得出的控制量始终为正数。但在实际的控制过程中，需要判断无人机预期运行参数与实际参数之间的大小，从而确定具体的导航控制方向。

1.8 安装无人机自主轨迹视觉导航控制器

无人机自主轨迹视觉导航控制器是导航控制任务的硬件支持设备，能够实现驱动、开关状态调整等功能，同时能够将计算的无人机导航控制量数据转换成控制信号，直接作用在无人机设备上。由于无人机自主轨迹导航需要从 3 个方面执行，因此需要连接 3 个不同功能的控制器，并利用姿态控制回路，速度控制回路和位置控制回路，完成控制器的连接。安装的无人机自主 UI 及视觉导航控制器结构如图 5 所示。

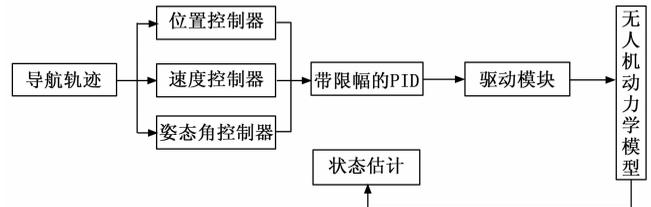


图 5 无人机自主轨迹视觉导航控制器结构图

控制器为深圳市捷红昌科技有限公司，型号为 JHC-JQW-B，最高工作频率为 128 GHz，外部设备齐全，内置双精度 FPU，并支持多种 DSP 指令。特别是 FPU 和 DSP 指令集的设计，通过位置控制器、速度控制器和姿态角控制器，得到带限幅的 PID，得到后将其输入到驱动模块，从而实现卡尔曼滤波器的实时控制。在实际操作中，将三轴的转速和所得到的转速输入到转速控制器中，再由转速控制器计算出所需的转子总升力和目标姿态角控制值，再由姿态控制器控制 4 个转子的张力，从而达到对飞机的姿态控制。另外，为了降低无人机飞行环境中无线电或其他信号对控制效果产生的干扰，在控制器内部加设一个自抗扰芯片，在保证控制精度的同时也最大程度地保护控制器设备的运行安全。

1.9 实现无人机自主轨迹视觉导航控制

将计算得出的无人机自主轨迹视觉导航控制量输入到安装的控制器的控制量中，分别从位置、角度和速度 3 个方面完成导航控制任务。以姿态角中的偏航角为例，利用导航控制器对操纵杆进行操舵，使其产生相应的转向，从而实现无人机的转向和保持。假设当前无人机处于直线飞行状态，则偏航角控制率可表示为：

$$\varphi_{\text{expect}} = \varphi_{\text{actual}} - \tan^{-1}(k_p \Delta\varphi) \quad (19)$$

其中： φ_{actual} 表示控制速度函数， $\Delta\varphi$ 为偏航角控制量，其具体取值可以通过公式 (18) 计算得出， k_p 为偏航角比例系数，根据控制器内部结构决定该参数的具体取值^[20]。同理可以得出其他姿态角以及位置、速度控制律，在控制器的支持下，完成对无人机飞行参数的实时导航控制，保证无人机的实际飞行轨迹与规划轨迹一致。

2 实测分析

以测试设计的基于粒子滤波的无人机自主轨迹视觉导航控制方法的应用效果为目的，针对导航控制效果进行测试，并通过与预设值的对比，体现出设计控制方法的性能优势。

2.1 选择无人机研究对象

此次实验以 MS-680 型四旋翼无人机为实验样本，该机的结构以轴对称为主，结构较为简洁，4 个转子均匀地排列在 4 个转子上，中间装有电池、控制器等机载设备。4 个螺旋桨为飞机的飞行提供动力，而起落架则是对机身的支持。采用外转式无刷电动机 C28-30-15，并配备与电动机相匹配的电动机调速器，以保证其在空中的稳定运行。选择的外转式无刷电动机，其额定电源电压是 22 V，最大电流可达 23 A。两个对称的马达轴距为 620 毫米，推进器采用 14 寸塑料三片桨叶。根据对电动机运行电流的粗略测定，四台电动机在悬挂状态下的最大功率不大于 25 A，选用 22.0 V 的锂电池，其容量为 600 米 Ah，可持续 30 分钟。为了最大限度地降低机身的重量，除了发动机支架和起落架，其他部件均由碳纤维制造，电机底座则是由尼龙制成。电池已安装完毕。这架无人机的总重量是 1 560 g，最大载荷是 600 g。

2.2 配置实验环境

从基于粒子滤波的无人机自主轨迹视觉导航控制方法的开发环境，以及其应用环境两个方面进行实验环境的配置，其中利用导航控制方法对开发环境进行构建，将控制器以及传感器设备安装到无人机上，并在地面上设置一个控制中心，要求控制中心发出的控制指令能够通过无线网络被无人机接收。而设置的导航控制方法应用环境分别为室外环境和室内环境。室外环境选择的是某城市的主干道和居民区，在满足无人机飞行条件的同时，提供了天然的障碍物条件。而室内环境主要选择的是某大型建筑的走廊以及房屋空间，在室内环境中需要通过加设纸箱、桌椅等设施，实现环境障碍物的设置。

2.3 试飞准备与调试

试飞准备调试的内容包括：控制信号能否正常被无人机接收、导航控制方法能否在无人机设备上运行、视觉模块运行是否正常、无人机飞行动态参数是否能够及时采集与传输等。选择人口稀少的郊区，且要求试飞区域具有专用的起飞跑道，为起飞、降落等模拟飞行任务提供条件。在无高大建筑和树木的干扰下，最大限度地降低了无人机在空中的干扰。选择的无人机研究对象能够在配置的实验环境中正常飞行，可以执行无人机自主轨迹视觉导航控制测试任务。

2.4 描述实测过程

在配置的实验环境中选择多个导航终点，在考虑环境障碍物的前提下，生成无人机自主航行轨迹的测试样本，以此作为无人机的理想航行轨迹。每个实验环境中设置 4 条测试轨迹，实验中设置的测试轨迹数量为 8，由此将实验划分成 8 个组别，记录生成轨迹上各个点的轨迹坐标以及无人机到达的时刻。将理想航行轨迹数据输入到无人机的飞行程序中，并同时启动无人机、控制器以及基于粒子滤波的无人机自主轨迹视觉导航控制程序。在无人机飞行过程中，实时采集环境视觉图像数据，并根据采集结果调整实际飞行轨迹。图 6 为无人机视觉图像的输出结果。



图 6 无人机视觉图像输出界面

在程序以及控制器的协同作用下，完成无人机的导航控制任务，最终的控制结果如图 7 所示。

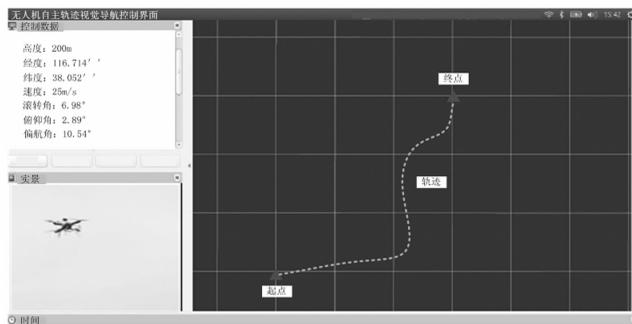


图 7 无人机自主轨迹视觉导航控制界面

同理可以得出所有控制任务的执行结果，最终调取控制方法的后台运行数据，获得无人机的实时运行参数信息。

2.5 设置轨迹视觉导航控制效果测试指标

由于设计的导航控制方法分别从位置、速度和姿态角 3 个方面进行控制，因此设置的控制效果测试指标分别为位置控制误差、速度控制误差和姿态角控制误差，其中位置控制误差的数值结果为：

$$\epsilon_{xyz} = \sqrt{(x_{ac} - x_{ex})^2 + (y_{ac} - y_{ex})^2 + (z_{ac} - z_{ex})^2} \quad (20)$$

其中： (x_{ac}, y_{ac}, z_{ac}) 和 (x_{ex}, y_{ex}, z_{ex}) 分别为无人机的理想轨迹坐标和实际轨迹坐标。另外其他两个测试指标的数值结果如下：

$$\begin{cases} \epsilon_v = |v_{ac} - v_{ex}| \\ \epsilon_{\varphi\theta\psi} = |\varphi_{ac} - \varphi_{ex}| + |\theta_{ac} - \theta_{ex}| + |\psi_{ac} - \psi_{ex}| \end{cases} \quad (21)$$

式中， v_{ac} 和 v_{ex} 为目标控制速度和实际速度， φ_{ac} 、 θ_{ac} 、 ψ_{ac} 、 φ_{ex} 、 θ_{ex} 和 ψ_{ex} 对应的是滚转角、俯仰角、偏航角的目标值和实际值。计算得出的误差值越大，证明导航控制方法的控制效果越差，因此设定 ϵ_{xyz} 、 ϵ_v 和 $\epsilon_{\varphi\theta\psi}$ 的预设值分别为 3.0 m、0.2 m/s 和 0.1°，且要求应用设计导航控制方法下，无人机的实际飞行数据不高于预设值。

2.6 实测结果分析

通过相关数据的提取及其与目标数据的比对，得出最终的控制效果测试结果。位置控制误差的量化测试结果，如图 8 所示。

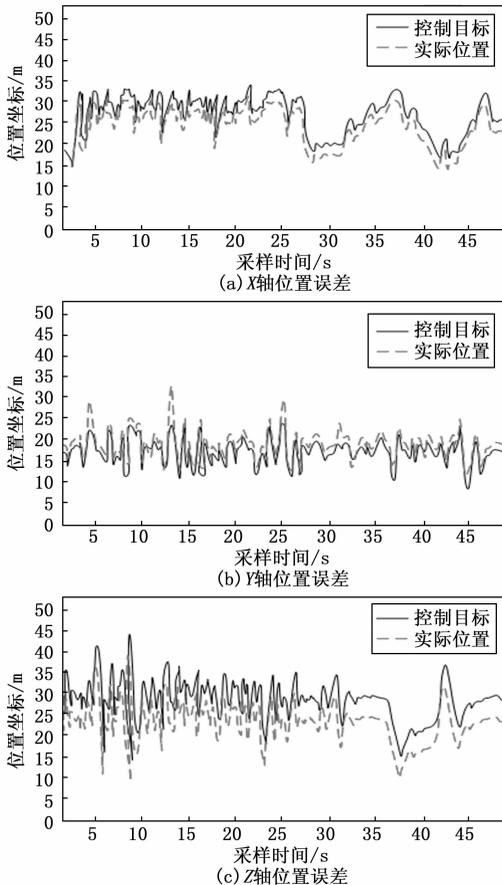


图 8 无人机飞行轨迹位置误差测试结果

将图 8 中的数据代入到公式 (20) 中，计算得出无人机的位置控制误差的平均值为 2.1 m，低于预设值。同理可以得出反映无人机飞行速度和姿态角控制效果的测试结果，如表 1 所示。

表 1 无人机飞行速度和姿态角控制效果测试数据表

实验组别	无人机飞行控制目标数据				设计导航控制方法下无人机实际飞行数据			
	v_{ac} /(m/s)	φ_{ac} /(°)	θ_{ac} /(°)	ψ_{ac} /(°)	v_{ex} /(m/s)	φ_{ex} /(°)	θ_{ex} /(°)	ψ_{ex} /(°)
A1	18.9	6.98	2.86	10.54	18.8	6.89	2.85	10.54
A2	19.7	4.37	3.51	7.90	19.7	4.33	3.51	7.90
A3	17.8	10.58	4.05	9.83	17.8	10.56	4.01	9.82
A4	19.2	11.64	21.37	1.39	19.2	11.62	21.34	1.37
B1	20.4	4.77	6.74	1.76	20.3	4.76	6.73	1.75
B2	21.5	1.83	8.28	3.25	21.5	1.81	8.28	3.23
B3	20.8	7.04	1.02	6.77	20.6	7.04	1.01	6.74
B4	20.3	9.71	5.31	4.76	20.2	9.71	5.31	4.75

将表 1 中的数据代入到公式 (21) 中，计算得出应用控制方法下，无人机的平均速度控制误差为 0.063 m/s，姿态角控制误差的平均值为 0.05°，均低于预设值，由此证明设计的基于粒子滤波的无人机自主轨迹视觉导航控制方法具有良好的控制效果。根据上述数据，得到速度误差如图 9 所示。

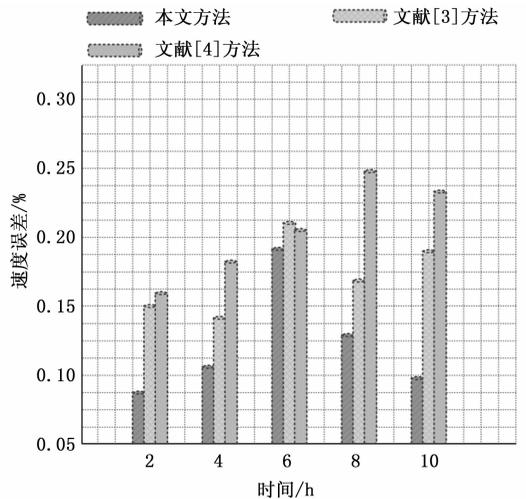


图 9 速度控制误差对比图

根据图 9 可知，本文方法的速度控制误差最低为 0.07%，文献 [3] 方法的速度控制误差最低为 0.15%，文献 [4] 方法的速度控制误差最低为 0.17%。由此可知，本文方法的速度控制误差最低，可有效提高控制效果。姿态控制误差如 10 所示。

根据图 10 可知，本文方法的速度控制误差最低为 14%，文献 [3] 方法的姿态控制误差最低为 25%，文献 [4] 方法的姿态控制误差最低为 40%。由此可知，本文方法的姿态控制误差最低。

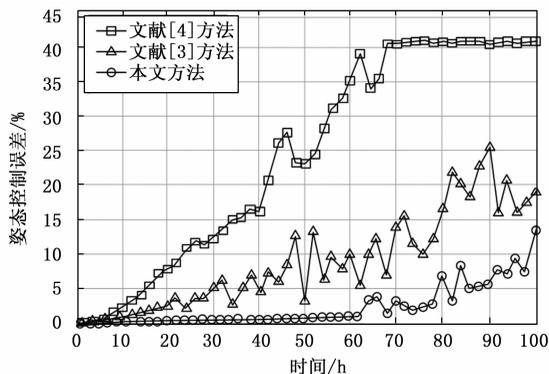


图 10 姿态控制误差对比

3 结束语

无人机作为重要的辅助工具，其飞行质量直接影响到无人机的应用价值。通过粒子滤波算法的应用，对处理非线性、非高斯动态系统相关问题的有效性已形成共识，进而有效地解决了现有控制方法存在的控制精度等问题。然而受到时间和空间的限制，实验设置的测试次数较少，因此得出的实验结果存在一定的局限性，需要在今后的研究工作中进一步补充与优化。

参考文献:

[1] 邓伟栋, 唐大全, 唐管政, 等. 基于改进粒子滤波的无人机编队协同导航 [J]. 兵工自动化, 2020, 39 (6): 21-26.

[2] 宋欣屿, 王英勋, 蔡志浩, 等. 基于深度强化学习的无人机着陆轨迹跟踪控制 [J]. 航空科学技术, 2020, 31 (1): 68-75.

[3] 杨寒石, 张楚晗. 旋翼无人机姿态控制与自主返航技术 [J]. 设备管理与维修, 2020 (9): 137-139.

[4] 周清, 许悦雷, 加尔肯别克. 无人机软管式自主空中加油视觉导航技术 [J]. 导航定位与授时, 2020, 7 (1): 40-47.

[5] 袁苏哲, 高嘉瑜, 景鑫, 等. 基于多标签联合定位的自主视觉着陆技术研究 [J]. 现代导航, 2020, 11 (2): 109-113.

[12] 赵佰秋, 于笑楠, 董岩, 等. 空间激光通信组网反射镜跟踪性能 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58 (9): 203-211.

[13] 刘高辉, 刘军. 基于扩展粒子滤波算法的单载波通信信号载波跟踪方法研究 [J]. 微电子学与计算机, 2021, 38 (12): 61-68.

[14] 王菲, 姬冠妮. 基于圆弧拟合算法的海水激光通信信道研究 [J]. 光通信技术, 2021, 45 (3): 51-53.

[15] 刘东旭, 于笑楠, 佟首峰, 等. 基于单光子探测及脉冲位置调制的激光通信关键技术研究 [J]. 光子学报, 2021, 50 (3): 48-57.

[16] 鲁倩, 任斌, 边晶莹. 四象限探测器的信号光捕获与跟踪技术研究 [J]. 光电工程, 2020, 47 (3): 160-165.

[17] 谭业腾, 蒲涛, 郑吉林, 等. 基于光编/解码技术的抗截获

[6] 周颖文, 王勇. 基于多目红外视觉的室内无人车导航系统研究 [J]. 中国新技术新产品, 2021 (10): 31-33.

[7] 卫文乐, 芦利斌, 金国栋, 等. 基于单目 SLAM 的无人机视觉导航研究综述 [J]. 飞航导弹, 2020 (7): 17-22.

[8] 张皓森, 刘新. 基于视觉处理的四旋翼无人机自主导航系统设计 [J]. 无线互联科技, 2020, 17 (9): 35-40.

[9] 任艳霞, 屈科科. 基于双目视觉系统的农用无人机导航算法研究 [J]. 农机化研究, 2020, 42 (4): 227-230.

[10] 韩璞, 王耀宽, 胡四平. 基于嵌入式 Linux 的农用无人机视觉导航算法及应用 [J]. 农机化研究, 2020, 42 (11): 224-228.

[11] 孙楠, 裴信彪, 王春军, 等. 基于立体视觉——惯导 SLAM 的四旋翼无人机导航算法 [J]. 微电子学与计算机, 2020, 37 (5): 33-38, 42.

[12] 梁天骄, 陈晓明, 杨朝旭, 等. 舰载无人机滑行轨迹控制方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47 (2): 289-296.

[13] 郑积仕, 孟凡茹, 陈兴武, 等. 固定翼无人机锥形螺旋线飞行导航控制方法 [J]. 飞行力学, 2020, 38 (5): 37-43.

[14] 吕倩, 孙宪坤, 熊玉洁. 改进遗传算法的无人机路径规划 [J]. 导航定位学报, 2020, 8 (5): 42-48.

[15] 陈明星, 熊智, 刘建业, 等. 基于因子图的无人机集群分布式协同导航方法 [J]. 中国惯性技术学报, 2020, 28 (4): 456-461.

[16] 张子容. 基于单片机控制的农用无人机导航研究 [J]. 农机化研究, 2020, 42 (3): 240-244, 248.

[17] 徐明, 宋明, 马德友. 基于 GIS 的无人机超低空飞行航线规划方法 [J]. 火力与指挥控制, 2020, 45 (11): 143-145.

[18] 刘栋, 连晓峰, 王宇龙, 等. 无人机无线通信协议的形式化认证分析与验证 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (4): 7.

[19] 陈红梅, 常林江, 徐振方, 等. 复杂环境下 GNSS/INS/UWB 紧组合的无人机协同导航算法 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42 (7): 98-107.

[20] 王祖武, 丁健, 魏文力, 等. 基于无人机双目图像的线目标测量的研究 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (1): 6.

[18] 田辉, 贺硕, 林尚静, 等. 工业互联网感知通信控制协同融合技术研究综述 [J]. 通信学报, 2021, 42 (10): 211-221.

[19] 展爱云, 刘琪, 王艳丽, 等. 第五代移动通信控制信道极化码的设计 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20 (27): 11143-11148.

[20] 杜欣军, 刘鹏飞. WFRFT 认知通信系统控制参数联合优化方法研究 [J]. 计算机工程, 2021, 47 (12): 177-184.

[21] 张豪, 冯娜娜. 基于中间节点预测的卫星光通信精确跟踪控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (5): 126-130, 145.

[22] 晁令锦, 梅栋, 俞竹青. 基于微分预报的机载雷达稳定平台自抗扰控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (2): 58-62.