

# 三旋翼无人机在运动甲板上的着舰控制研究

陈怀民, 段晓军, 韩源

(西北工业大学 无人机特种技术国家重点实验室, 陕西 西安 710065)

**摘要:**在无人机着舰最后阶段,舰船的甲板运动严重威胁着无人机的着舰安全,其中,沉浮和横摇运动威胁最大。为了使无人机能够安全着舰,研究了在运动甲板上着舰的控制策略,该控制策略可以有效减少甲板沉浮和横摇运动对安全着舰的影响。它通过测量舰船的横摇和沉浮运动,并根据测量的历史数据预测未来2~3 s内着舰时的状态,再配置以稳定的下降控制,使无人机实现安全着舰。另外,为了控制触舰时飞机与甲板之间的相对垂直速度,采用了2种速率控制方法进行了仿真比较。经过仿真分析验证,该控制策略下,2种下降控制方法都能使着舰时的性能指标符合要求。

**关键词:**三旋翼无人机;着舰/高度控制策略;控制器;MATLAB

中图分类号:V249

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2016)06-1040-05

舰船在海面上受到风浪影响会出现六自由度随机复杂的运动——纵摆、纵荡、沉浮、横摇、横荡和艏摇运动,且其运动响应会随着海况等级的提高而加大,对无人机的着舰安全威胁非常大。其中横摇和沉浮运动对着舰安全威胁最大,所以基于机器视觉着舰的无人机必须能够测量舰船的横摇和沉浮运动,并且根据测量的历史数据信息预测未来2~3 s着舰时的舰的运动,再配置以快速、稳定的着舰控制,才能够实现安全着舰。

目前研究最多的舰载无人机的固定翼无人机,对固定翼无人机着舰的控制策略研究也比较成熟,而对垂直起降无人机的着舰研究较少。垂直起降无人机基于其垂直起降、定点悬停、操作灵活、低空低速飞行等优点,大规模应用到舰载机的潜力非常大。因此,本文研究三旋翼无人机在运动甲板上的着舰控制策略。

## 1 坐标系的选取

这里我们介绍本文中用到的三旋翼无人机和舰船的坐标系的选取,以便于后续进行控制仿真。建立飞机的数学模型时,必须使用合适的坐标系来描述飞机的空间运动的各种状态参数。这里,飞机的模型建立采用的是机体坐标系,舰船采用的也是机体坐标系,均采用机体的质心点为坐标原点,质心和机头和船头方向连接为纵轴正方向。与纵轴垂直,从质心向右为横轴正方向。通过质心点,与纵轴和横轴都垂直,并且向上为垂直轴正方向<sup>[1]</sup>。

着舰控制仿真时采用导航坐标系来研究无人机和舰船之间的相对运动。在这里,我们不对它们之间的转换作详细推导,直接给出它们之间的转换矩阵,如下式所示

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & \cos\psi\sin\theta\sin\phi - \sin\psi\cos\phi & \cos\psi\sin\theta\cos\phi + \sin\psi\sin\phi \\ \sin\psi\cos\theta & \sin\psi\sin\theta\sin\phi + \cos\psi\cos\phi & \sin\psi\sin\theta\cos\phi - \sin\phi\cos\psi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix}$$

所以,机体坐标系下的向量  $\mathbf{q}_{\text{body}}$  如果要转换成为其

对应的导航坐标系下的向量  $\mathbf{q}_{\text{navigation}}$  就可以使用如

下式所示的公式进行转换。

$$\mathbf{q}_{\text{navigation}} = \mathbf{R}\mathbf{q}_{\text{body}}$$

## 2 抗舰船横摇/沉浮的着舰控制策略

要想具有实用价值,无人机要有具备在 4 级海况下安全降落到目标舰船上的能力。在抗舰船横摇/沉浮方面,本文参考了加拿大 RAST、法国的萨马赫 210 和英国鱼叉直升机助降装置,无人机至少需要实现在舰船 $\pm 15^\circ$ 横摇情况下的起降才能够达到实用。

针对沉浮和横摇 2 种运动对着舰的影响,我们采取如下的控制策略<sup>[5,7]</sup>:

1) 无人机飞临甲板着舰点正上方悬停,下降开始前对着舰中心点的沉浮运动进行跟踪以确保无人机与甲板之间的高度一致,随时准备下降;

2) 通过预估横摇运动确定最佳的着舰下降时机;

3) 当甲板横摇运动预估器预估到横摇角为零时,触发无人机开始最后阶段下降过程,保证与甲板接触时舰船的横摇角为零,实现安全着舰。

为了后续对着舰仿真结果进行分析,检验上述着舰策略是否合理,我们根据目标舰船甲板的情况,并参考了大量文献以及其他一些型号飞机的指标要求,提出如下的着舰技术指标<sup>[4]</sup>:

1) 触舰瞬间,无人机与舰船甲板的相对速度不超过 1.5 m/s;

2) 无人机能容忍舰船 $\pm 15^\circ$ 横摇;

3) 着舰瞬间,无人机与甲板平面的相对倾角不超过  $5^\circ$ 。

## 3 下降着舰控制

根据上述的着舰控制策略,我们采用横摇运动预估器确定最佳着舰时机,预估器能够预估的时间即是下降所需的时间。又由于预估器预估的时间越长,预估的误差就会越大,因此,我们这里仅采用 2 s 预估器进行预估。由于预估的时间较短,为了使触舰瞬间无人机与甲板的相对速度满足要求,我们将高度的下降过程分为 3 个阶段:

下降第 1 阶段 无人机到达甲板着舰点正上方 15 m 后开始以一定的速率匀速下降到着舰点正上

方 3 m 处。

下降第 2 阶段 无人机在甲板着舰点正上方 3 m 处悬停,并开始跟踪甲板沉浮运动,与着舰点之间保持高度一致。

下降第 3 阶段 当横摇运动预估器预估到 2 s 后甲板横摇角为零时,触发无人机开始以一定的下降速率着舰。并保证 2 s 后触舰,使触舰时与甲板的相对速度小于 1.5 m/s。

### 3.1 下降第 1 阶段

本文采取的下降第 1 阶段为无人机从甲板着舰点正上方 15 m 处以一定的速率缓慢匀速下降到 3 m 高处,其下降速率控制律为

$$\dot{h}_{\text{cur}} = \frac{h_{\text{cur}} - h_{\text{pre}}}{t - t_1}$$

式中,  $h_{\text{cur}}$  为飞机的当前高度,  $h_{\text{pre}}$  为下降起始高度 (15 m),  $t$  为当前时刻,  $t_1$  为下降起始时刻。

### 3.2 下降第 2 阶段

在无人机悬停于舰船甲板着舰点上空 3 m 处,甲板横摇预估器还未预测到 2 s 后的横摇角为零时,无人机需要在原地等待,并跟踪甲板沉浮运动信号,保持与着舰点之间的相对高度一致。第 2 阶段控制即是一个调整与着舰点相对高度的过程,并等待根据预估器判定的最佳着舰时机出现,做好最后阶段下降的准备。

将飞机的实际高度与预期高度进行比较,当有误差时,通过改进 PD 控制实现高度的稳定<sup>[2]</sup>。

由于三旋翼在跟踪甲板沉浮运动过程中会产生一定的滞后现象,所以我们采取预估补偿的方法来提高跟踪的精度<sup>[6]</sup>,如图 1 所示。

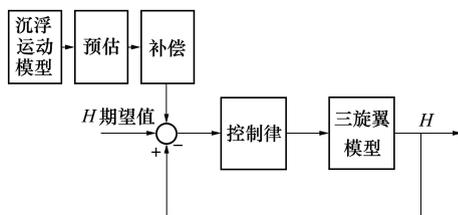


图 1 跟踪沉浮运动框图

### 3.3 下降第 3 阶段

第 3 阶段是最关键的一个下降阶段。由横摇运动预估器确定无人机的最佳着舰时机,在预估器预测到 2 s 后甲板横摇角为零时,立即启动无人机第 3 阶段下降模态进行下降着舰,使飞机能够在 2 s 的时间内下降到指定着舰点。

为了控制触舰时飞机与甲板之间的相对垂直速度,我们采用 2 种速率控制方法来进行仿真比较。即下降速率是高度的函数和下降速率是时间的函数 2 种控制方法<sup>[3]</sup>。

### 3.3.1 下降速率控制是高度的函数

为了使下降速度能够随高度降低而成比例减小,确保触舰速率符合指标要求(不大于 1.5 m/s),我们采用下降速率与下降高度成正比的指数下降规律<sup>[8]</sup>。

指数下降规律的速率控制律为

$$\dot{h}_{cur} = \dot{h}_1 - \frac{h_{cur} - h_{ave}}{\tau}$$

式中,  $\dot{h}_1$  为容许触舰速率(设置为  $-0.5 \text{ m/s}$ ),  $h_{cur}$  为当前飞机的高度,  $h_{ave}$  为着舰点的高度,  $\tau$  为下降时间常数,它的起始高度为第 2 下降阶段的高度。通过设置指数下降的时间 2 s,可以推算出为 2.85。

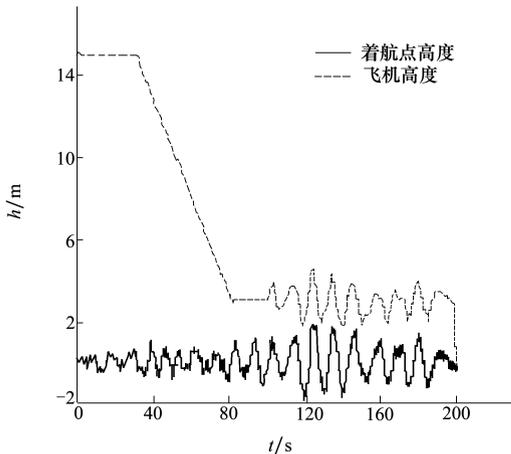


图 2 飞机高度与着舰点高度变化比较图

图 2 为飞机实际高度变化与着舰点高度变化图。从图 2 中可以看出,飞机先是在着舰点上方 15 m 处悬停,然后匀速下降至 3 m 高处,在 197.98 s 时刻之前一直在 3 m 高处跟踪舰船沉浮运动,在 197.98 s 时横摇运动预估器预估到 2 s 后横摇角为零,启动第 3 阶段下降着舰,在 200.04 s 时飞机触舰,用时约 2.06 s。

图 3 为无人机与舰船着舰点之间的垂向相对速度,从图中可见,第 3 下降阶段,速度逐渐增大然后再减小的过程,在触舰瞬间,垂向相对速度为 0.954 5 m/s,符合前述的不大于 1.5 m/s 的着舰安全指标。

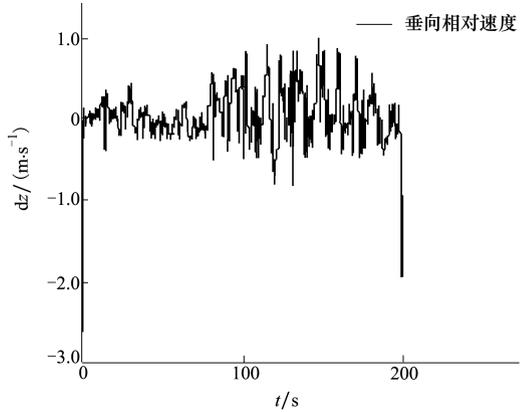


图 3 无人机与舰船的垂向相对速度

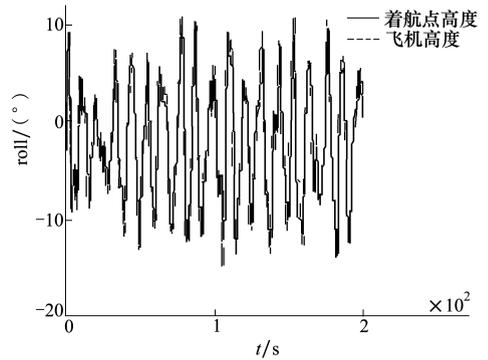


图 4 2 s 预估器预估结果

图 4 为舰船横摇角 2 s 预估器的预估结果比较图,从图中可见,2 s 预估器的预估效果很好,触舰瞬间,舰船甲板横摇角为 1°,符合不大于 5°的着舰安全指标。

### 3.3.2 下降速率控制是时间的函数

为了使触舰时的相对速度符合要求,第 2 种方法我们采用飞机的下降速度是时间的函数,总下降时间  $t_{fall} = 2 \text{ s}$ ,在下降过程中飞机先加速再减速,在  $t_{fall}/2$  时达到最大速度  $v_{hmax}$ ,然后开始减速,使触舰时的速度为零。

根据上述要求,我们可以得到下降速度需要满足的条件

$$t = 0, v = 0, \dot{v} = 0, \ddot{v} = 0$$

$$t = \frac{1}{2}t_{fall}, v = v_{hmax}$$

$$t = t_{fall}, v = 0, \dot{v} = 0, \ddot{v} = 0$$

满足上述条件的速度方程为

$$v = \left[ -64 \left( \frac{t}{t_{fall}} \right)^6 + 192 \left( \frac{t}{t_{fall}} \right)^5 - \right]$$

$$192\left(\frac{t}{t_{\text{fall}}}\right)^4 + 64\left(\frac{t}{t_{\text{fall}}}\right)^3 \Big] v_{\text{hmax}}$$

由下降速度和高度之间的积分关系可以得到

$$t_{\text{fall}} = \frac{50h}{23v_{\text{hmax}}}$$

下降时间  $t_{\text{fall}} = 2 \text{ s}$ , 下降起始高度  $h = 3 \text{ m}$ , 可以求得最大下降速度  $v_{\text{hmax}} = 3.26 \text{ m/s}$ 。

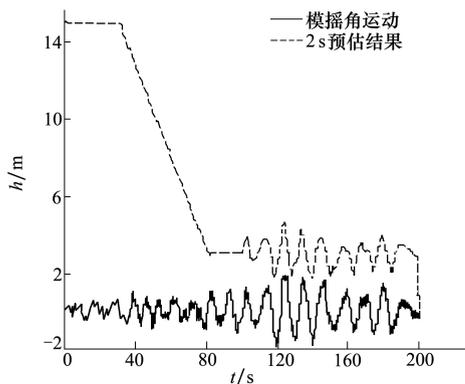


图5 下降高度与着舰点高度变化比较图

由图5可见,同样在197.98 s时横摇运动预估器预估到2 s后横摇角为零,在200.1 s时飞机触舰,用时约2.12 s。

由图6可见,触舰时的速度为1.046 8 m/s,也符合前述的不大于1.5 m/s的着舰安全指标。但是

根据仿真图可见,第1种方案对下降时间以及触舰速度的控制更好些。

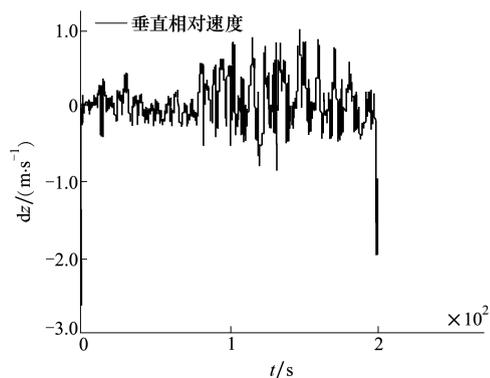


图6 相对垂向速度变化

## 4 结论

本文提出了一种三旋翼无人机在运动甲板上的着舰控制策略以及安全着舰的控制指标,在指标的控制下,设计了最后着舰过程的下降控制律,并在MATLAB/SIMULINK下做了仿真验证,通过仿真分析得知,该策略是可行的。对最后一个阶段的控制采用了2种方法进行比较,得出第一种方案更佳一些。

## 参考文献:

- [1] 吴森堂,费玉华. 飞行控制系统[M]. 第1版.北京:北京航空航天大学出版社,2005:243-245  
Wu Sentang, Fei Yuhua. Flight Control System[M]. First Edition. Beijing, Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2005: 243-245 (in Chinese)
- [2] Chun Kiat Tan1y, Wang Jianliang. Ship Deck Landing of a Quadrotor Using the Invariant Ellipsoid Technique[C]//SICE Annual Conference, 2014
- [3] 宁东方. 无人机自动着陆控制系统的设计与实现研究[D]. 西安:西北工业大学,2006  
Ning Dongfang. Design and Implementation of UAV Automatic Landing Control System[D]. Xi'an, Northwestern Polytechnical University, 2006 (in Chinese)
- [4] 戴文正. 无人直升机自主着舰引导与控制技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2014  
Dai Wenzheng. Unmanned Helicopter Landing Guidance and Control Technology [D]. Nanjing, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014 (in Chinese)
- [5] 郭署山. 无人直升机着舰控制技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2010  
Guo Shushan. Unmanned Helicopter Landing Control Technology[D]. Nanjing, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010 (in Chinese)
- [6] 张永花,周鑫. 纵向甲板运动补偿技术研究[J]. 电光与控制, 2012, 19(4): 18-22  
Zhang Yonghua, Zhou Xin. Research on Longitudinal Deck Motion Compensation Technology[J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(4): 18-22 (in Chinese)

- [7] 刘刚. 基于机器视觉导航小型无人机自主着陆控制策略研究与应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014  
Liu Gang. Research and Application of Autonomous Landing Control Strategy Based on Machine Vision Navigation for Small Unmanned Aerial Vehicle[D]. Nanjing, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014 (in Chinese)
- [8] 高九州. 无人机自主着陆控制[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016  
Gao Jiuzhou. UAV Autonomous Landing Control[D]. Changchun, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016 (in Chinese)

## Researchon the Control of Tri-Rotor UAV Landing on Moving Deck

Chen Huaimin, Duan Xiaojun, Han Yuan

(National Key Laboratory of Special Technology on UAV, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In the final stages of landing, the deck motion becomes a serious threat to the safety of landing. Among them, the greatest threat is the heave and roll motion of deck. In order to be capable of accurately secure landing, we studied the control strategy of landing on moving deck, the control strategy can effectively reduce the impact of decks heave and rolling motion on the safety landing. By measuring the deck's roll and heave motion, and predict the ship motion information within the next 2~3 seconds based on historical datas, only in this way it can be able to secure landing with configured stable landing control. In addition, in order to control the relative vertical velocity between the UAV and the deck when touching the ship, we used two rate control methods for simulation comparison. After simulation analysis and verification, with this control strategy, the two rate control methods all can make the landing performance meet the requirements.

**Keywords:** tri-rotor UAV; landing/altitude control strategy; controller; MATLAB