无人直升机自主着舰系统设计及仿真试验

乌兰巴根 胡继忠 徐元铭

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 设计了一套包含视觉目标识别单元、目标跟踪器、甲板状态跟踪器和模糊逻辑控制的无人直升机自主着舰系统. 视觉系统通过对采集的图像预处理提取出可能的甲板标识区域, 然后对此区域计算其仿射不变矩特征集合, 对得到的特征集经过模糊识别技术实现对甲板降落区域的识别, 并根据矩特征集计算出甲板运动状态信息. 目标跟踪器采用了卡尔曼滤波技术, 在目标二阶运动方程的基础上设计了跟踪算法. 甲板运动状态跟踪器用于在无人直升机的降落期间实现对甲板尤其是触舰瞬间甲板的纵摇、横摇及浮沉状态的预测, 该跟踪器采用了改进的卡尔曼多步预测算法. 设计了基于模糊逻辑的比例积分控制器, 由多个并行的对特定任务实施控制的子控制行为构成. 仿真试验结果验证了所提出的算法. 在仿真试验中, 无人直升机能够正确的识别甲板目标区域, 实现了对运动舰船在二维水平面内的跟踪, 甲板状态跟踪器能够预测未来 1~5个周期内甲板状态, 控制器基于目标信息和甲板状态能够正确地引导无人直升机实现安全着舰.

关 键 词: 无人直升机; 自主降落; 卡尔曼滤波; 仿射矩; 模糊识别

中图分类号: TP 217. 3

文献标识码: A 文 章 编 号: 1001-5965(2010) 08-0986-05

Unmanned helicopter autonomous board landing system and simulation experiment

Wulan Bagen Hu Jizhong Xu Yuanming

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract The unmanned helicopter autonomous landing system was composed of vision and recognition sytem, a target tracker, a deck's state tracker and a fuzzy logic controller. The vision system performed to process the captured image and compute the image's affine moment invariants. The label was recognized based on the fuzzy logic and those invariants. The label's motion state was estimated based on the moment. A Kalman filter integrating into the control system was used to track the label and plan the route of unmanned helicopter. The board's motion state, especially the pitch, roll and lift, is important for safe landing, so an improved Kalman forecast algorithm was designed to predict the board's state of further one to five steps. The controller was customized based on behavior and fuzzy logic. Simulation results validate proposed algorithm. The unmanned helicopter can recognize the label accurately and track the label in any direction on ground. The improved Kalman filter can estimate the state future one to five periods, and there is less error than normal Kalman filters. The controller can generate the accurate commands and perform the autonomous landing on board safely.

Key words unmanned helicopter; autonomous landing; Kalman filters; affine moment; fuzzy recognition

收稿日期: 2009-06-30

作者简介: 乌兰巴根(1981-), 男(蒙古族), 黑龙江肇源人, 博士生, wlbg@ase.buaa.edu.cn

无人直升机特别适合执行救援、监视以及通信中继等任务, 因而吸引了许多科研工作人员的关注. 其中扩展无人直升机的能力, 使其能够执行复杂的任务是当前研究的热点, 其中之一就是实现无人直升机在军舰上自主降落.

无人直升机自主降落由于其地面效应而变得更加困难[1], 科研人员已经进行了多种尝试. 文献[2]建立了用于着陆的视觉系统, 该系统建立在独特的标识上, 缺点是该标识与常规标识差别太大, 不利于共用. 文献[3-5]中 Hu不变矩作为目标特征向量用于识别和计算目标的几何信息, 在该系统中存在的限制是要求目标是平面的且只能在平面内运动, 所设计的跟踪器只能实现对目标的单方向跟踪. 科研人员对机器视觉在无人直升机自主降落上的应用进行了大量对比研究[6-8]. 文献[6-7]对边界检测、模版匹配和立体视觉等方案进行了研究, 这些方案在对作复杂运动的目标识别上存在极大限制. 文献[8]提出了一种基于规格化小波描述算子的特征表示, 并与几何矩集合和傅里叶算子在多个方面进行了性能对比, 但该算子在描述具有空间运动的目标时缺乏足够的能力.

本文根据对无人直升机飞行特性的分析, 建立了一套视觉目标捕捉、跟踪系统用于实现无人直升机在甲板上降落. 仿真试验验证了本文的方案.

1　系统模型

系统的结构如图 1所示. 视觉系统完成目标识别、状态提取; 目标跟踪器在视觉系统发现目标后跟踪目标, 不断推演出目标的未来位置以引导无人直升机的飞行; 甲板状态跟踪器在收到控制器的启动命令后开始工作, 根据测量得到的甲板状态推演出未来某一时刻甲板可能运动状态, 供降落决策使用; 控制器控制无人直升机的飞行.

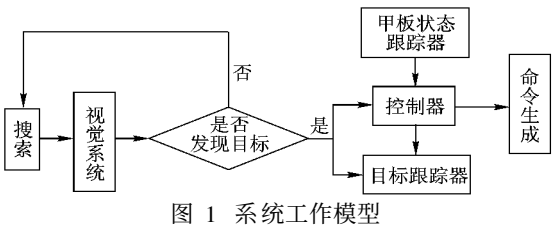


图 1　系统工作模型

软件仿真环境见图 2所示, 环境中包含一架共轴式无人直升机, 一艘军舰. 图 2中无人直升机下方白色对称区域为目标的标识, 视觉识别的对象, 其由 5个连通区域组成, 详见图 3

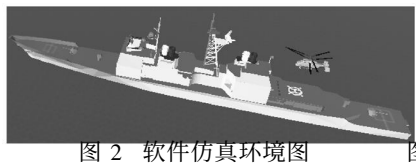


图 2　软件仿真环境图

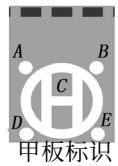


图 3　甲板标识

2　系统设计

2 1　预处理

视觉系统的图像预处理算法见作者的前期工作, 参考文献[9].

摄像机采用仿射成像模型, 以处理目标的复杂运动. 通过分析已有的工作[1, 3, 6-8], 本文选取仿射不变矩[10]集合中 I_1, I_2, I_3, I_4作为目标提取的特征参数.

2 2　模糊识别

由于无人直升机的振动和数字化图像的本质等原因, 计算出来的特征参数呈现出一定程度的波动, 为此采用模糊识别技术. 隶属度方程如下:

$$M = e^{-\frac{(x-C)^2}{2\times\delta^2}}$$

其中, M 为隶属度; C 为统计均值; δ为统计方差.

定义的统一识别参数为

$$F = w_1 \times M_{I_1} + w_2 \times M_{I_2} + w_3 \times M_{I_3} + w_4 \times M_{I_4}$$

其中, w_1, w_2, w_3, w_4是相应仿射不变矩隶属度的权重.

2 3　目标状态计算

在仿真中所使用的坐标系如图 4所示, 高度为 y方向, x, z轴在水平面内.

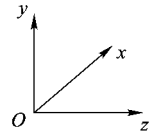


图 4　坐标系示意图

根据目标的矩信息计算出目标中心在图像坐标系的坐标[9], 计算公式如下:

$$x_c = \frac{m_{10}}{m_{00}} \qquad z_c = \frac{m_{01}}{m_{00}}$$

其中, m_{00}, m_{10}和m_{01}为目标的惯性矩, 数字图像的惯性矩通过下式计算[9]:

$$m_{pq} = \sum_{-\infty}^{\infty}\sum_{-\infty}^{\infty} i^p j^q f(i, j)$$

通过相机的成像参数和机载高度计获得的相对高度, 再根据成像原理, 可以得到目标相对无人直升机在水平面上的距离, 计算公式如下:

$$x_h = \frac{H \times \tan(\phi_x/2) \times x_c}{\text{相机在 } x \text{ 方向的解析度}}$$

$$z_h = \frac{H \times \tan(\phi_z/2) \times z_c}{\text{相机在 } z \text{ 方向的解析度}}$$

其中, ϕ_x, ϕ_z 分别为摄像机在 x, z 方向的视场角度; H 为测得的高度.

2.4 甲板状态测量

提取合作目标 A, B, D, E 的中心, 连接 A 和 E 的中心得到直线 AE, 连接 B 和 D 的中心得到直线 BD. AE 和 BD 两条直线形成的平面就是甲板平面. 该平面的法线向量为: $\eta = \overrightarrow{AE} \times \overrightarrow{BD}$, 即可得到甲板的横摇角、纵摇角.

对于甲板的浮沉运动, 可以根据测量得到高度变化数据和横摇、纵摇角, 按照弹性振动模型估计浮沉运动参数.

2.5 目标跟踪器算法设计

系统加入了基于卡尔曼预测技术为基础的目标跟踪器[4-5], 为无人直升机的飞行决策提供参数依据. 卡尔曼跟踪器以视觉计算的输出为输入, 其状态方程为

$$\boldsymbol{X}_{k+1} = \Phi \boldsymbol{X}_k + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_k + \boldsymbol{w}_k$$

其中, Φ, $\boldsymbol{B}$ 是系统参数矩阵; $\boldsymbol{X}_k$ 为状态向量; $\boldsymbol{u}_k$ 为控制向量; $\boldsymbol{w}_k$ 为随机噪声.

根据目标的二阶运动模型, 可以得到系统状态方程的具体形式如下:

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ z_{k+1} \\ \dot{x}_{k+1} \\ \dot{z}_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_k \\ z_k \\ \dot{x}_k \\ \dot{z}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T^2/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & T^2/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_x \\ a_z \\ a_x \\ a_z \end{bmatrix} + \boldsymbol{w}_k$$

其中, a_x, a_z 为 x, z 方向的时变加速度; x_k, z_k 为目标在 x, z 方向的位置; $\dot{x}_k$, $\dot{z}_k$ 为目标在 x, z 方向的速度; T 为 k 到 $k+1$ 的时间间隔.

测量方程可以定义为

$$\boldsymbol{Z}_k = \boldsymbol{H}\boldsymbol{X}_k + \boldsymbol{v}_k$$

其中, $\boldsymbol{Z}_k$ 为观测向量; $\boldsymbol{H}$ 为观测矩阵; $\boldsymbol{v}_k$ 为测量噪声.

假设 $\boldsymbol{w}_k$, $\boldsymbol{v}_k$ 为零均值的高斯白噪声, 协方差阵分别为 $\boldsymbol{R}$, $\boldsymbol{Q}$, 且互不相关. 则可得到卡尔曼预测方程如下:

$$\boldsymbol{X}_{k+1} = \Phi \boldsymbol{X}_k + \boldsymbol{K}_k(\boldsymbol{Z}_k - \boldsymbol{H}\boldsymbol{X}_k) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_k$$

$$\boldsymbol{K}_k = \Phi \boldsymbol{P}_k \boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{H}\boldsymbol{P}_k\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{R})^{-1}$$

$$\boldsymbol{P}_{k+1} = \Phi \boldsymbol{P}_k \Phi^{\mathrm{T}} - \boldsymbol{K}_k\boldsymbol{H}\boldsymbol{P}_k\Phi^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{Q}$$

其中, $\boldsymbol{P}$ 为预测的协方差; $\boldsymbol{K}$ 为增益矩阵.

2.6 甲板状态跟踪器算法设计

仿真舰船甲板运动模型[11]设计为

$$Y = N \times \sin(F \times t)$$

其中, N 和 F 分别为甲板运动的幅值和周期.

分析已有工作[11-14], 对甲板状态预测采用卡尔曼滤波技术, 基于上述运动模型的卡尔曼 n 步预测方程为

$$\boldsymbol{X}_{k+n} = \Phi^{n-1}\boldsymbol{X}_{k+1}$$

其中, $\boldsymbol{X} = [P_p, V_p, P_l, V_l, P_v, V_v]^{\mathrm{T}}$; P_p, V_p 为甲板纵摇角和纵摇角速度; P_l, V_l 为甲板横摇角和角速度; P_v, V_v 为浮沉位移和浮沉速度.

试验中发现上述多步预测存在较大的相位和幅值误差, 为提高精度, 跟踪算法改采用如下运动模型:

$$Y = K_N \times N \times \sin(F \times t + \varphi)$$

K_N 和 φ 由实际预测过程中通过对比分析确定, 具体做法是跟踪器在前几个周期内分析预测误差, 不断调整 K_N 和 φ 的值使误差达到要求, 同样基于极短期预报和线性化技术可以得到卡尔曼预测的预测矩阵为

$$\Phi_p = \begin{bmatrix} (1-F_pT)\cos\varphi - T\sin\varphi F_p & T\cos\varphi + \sin\varphi(1-F_pT)/F_p \\ -F_p^2\cos\varphi T - F_p\sin\varphi(1-F_pT) & (1-F_pT)\cos\varphi - T\sin\varphi F_p \end{bmatrix}$$

$$\Phi_l = \begin{bmatrix} (1-F_lT)\cos\varphi - T\sin\varphi F_l & T\cos\varphi + \sin\varphi(1-F_lT)/F_l \\ -F_l^2\cos\varphi T - F_l\sin\varphi(1-F_lT) & (1-F_lT)\cos\varphi - T\sin\varphi F_l \end{bmatrix}$$

$$\Phi_v = \begin{bmatrix} (1-F_vT)\cos\varphi - T\sin\varphi F_v & T\cos\varphi + \sin\varphi(1-F_vT)/F_v \\ -F_v^2\cos\varphi T - F_v\sin\varphi(1-F_vT) & (1-F_vT)\cos\varphi - T\sin\varphi F_v \end{bmatrix}$$

$$\Phi_2 = \begin{bmatrix} \Phi_p & 0 & 0 \\ 0 & \Phi_l & 0 \\ 0 & 0 & \Phi_v \end{bmatrix}$$

其中, T 为预报时间间隔; F_p, F_l, F_v 分别为纵摇、横摇、浮沉运动的周期.

上述实现的过程中没有考虑运动模型中的 K_N 参数. K_N 与预测的幅值误差相关, 在预测算法中实现形式如下:

$$\lambda_p = \begin{bmatrix} \lambda_{p_s} & 0 \\ 0 & \lambda_{p_v} \end{bmatrix} \qquad \lambda_l = \begin{bmatrix} \lambda_{l_s} & 0 \\ 0 & \lambda_{l_v} \end{bmatrix}$$

$$\lambda_v = \begin{bmatrix} \lambda_{v_s} & 0 \\ 0 & \lambda_{v_v} \end{bmatrix}$$

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_p & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_l & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_v \end{bmatrix}$$

其中, λ_{p_s}, λ_{p_v}, λ_{l_s}, λ_{l_v}, λ_{v_s}, λ_{v_v}为状态向量 $\boldsymbol{X}$ 相应分量的幅值预测调整系数. 最后, 修改后的卡尔曼预测方程为: $\hat{\boldsymbol{X}}_{k+n} = \lambda\varphi_2^{n-1}\hat{\boldsymbol{X}}_{k+1}$.

2 7　控制器设计

控制器的行为由许多简单的控制行为构成, 并以并行的方式完成整体控制目标[2].

航向控制根据惯性测量单元和视觉系统的输出保持无人直升机正确的航向; 速度控制单元控制无人直升机的飞行和飞行姿态; 高度控制使无人直升机在任何时候都能及时准确地控制高度; 导航控制根据系统运行命令和其他自主飞行子系统的输出规划无人直升机飞行总体行为. 系统的控制行为构成如图 5所示.

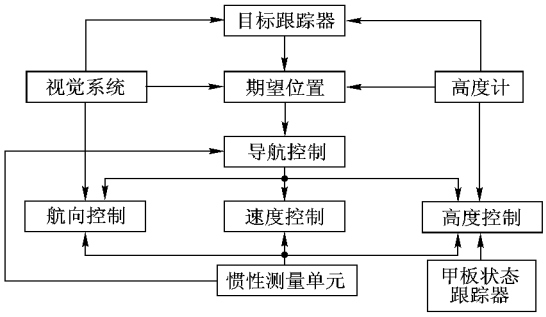


图 5　控制行为

控制系统采用模糊 PI(Proportion Integration) 控制技术, 形式如下:

If value> max_threshold

$$\tau = K_{P_{max}}(\beta_d - \beta) + K_{I_{max}}\int(\beta_d - \beta)\,dt$$

Else if threshold$_k$ < value< max_threshold

$$\tau = K_{P_k}(\beta_d - \beta) + K_{I_k}\int(\beta_d - \beta)\,dt$$

……

Else if threshold$_1$ < value< threshold$_2$

$$\tau = K_{P_1}(\beta_d - \beta) + K_{I_1}\int(\beta_d - \beta)\,dt$$

其中, β为现在的状态; β_d为期望达到的状态; τ为输出的命令; K_p为比例系数; K_i为积分系数. 在做条件判断时采用模糊技术.

3　仿真试验

作者基于 Microsoft公司的 robotics developer studio 2008仿真开发工具开发了无人直升机自主着舰软件仿真系统, 在多种条件下进行了仿真试验, 以下为得到的典型结果.

3 1　位置跟踪精度

图 6为无人直升机自主着舰水平位置的记录. 从图中可以看出无人直升机首先以较高的速度飞向舰船, 当发现甲板上的标识后调整速度飞到标识上空, 然后在甲板上空保持相对悬停, 直至完成降落.

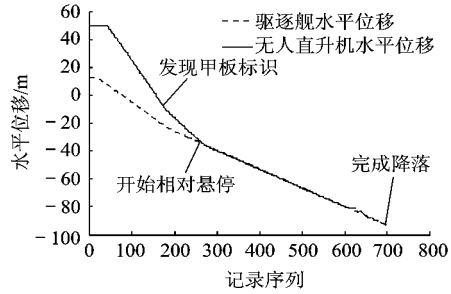


图 6　无人直升机水平跟踪记录

3 2　自主降落的高度轨迹

图 7显示了无人直升机的高度轨迹, 该曲线包含了从起飞爬升、巡航飞行、发现运动目标、逐渐下降高度、在第一甲板状态预测高度保持相对悬停, 对甲板预测算法进行初始化、下降高度至第二甲板状态预测高度, 实现稳定预测、在甲板状态满足要求的境况下完成降落的全阶段.

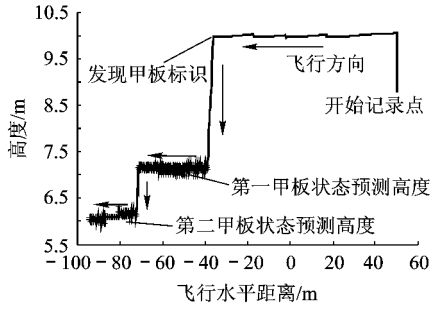


图 7　高度变化记录

3 3　甲板状态预测

图 8为纵摇角和纵摇角速度随时间变化的记录, 可以看出修改后的算法误差更小.

图 9、图 10分别为横摇运动和浮沉运动的记录, 可以看出本文提出的算法有着更小的误差.

3 4　降落精度统计

参考国军标 GJB534—88 舰船直升机舰面系统规范中相关规定, 分别在两个海况下进行了仿真试验, 海况情况为: 海况 1: 纵摇 1°, 横摇 5°, 浮沉 0. 76m; 海况 2 纵摇 2°, 横摇 7. 5°, 浮沉 1. 5m.

无人直升机自主降落精度见表 1.

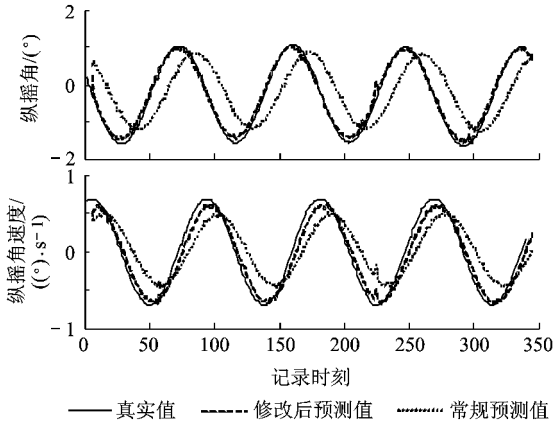


图 8 纵摇运动预测对比

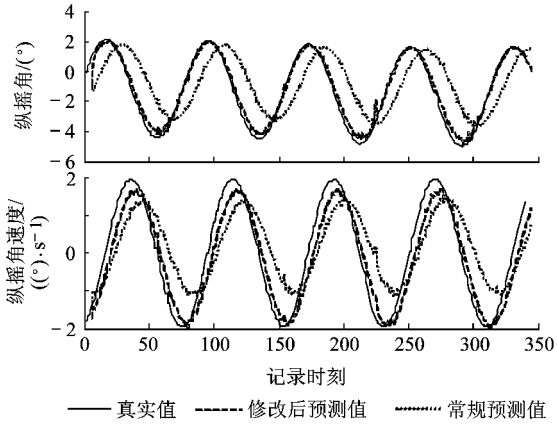


图 9 横摇运动预测对比

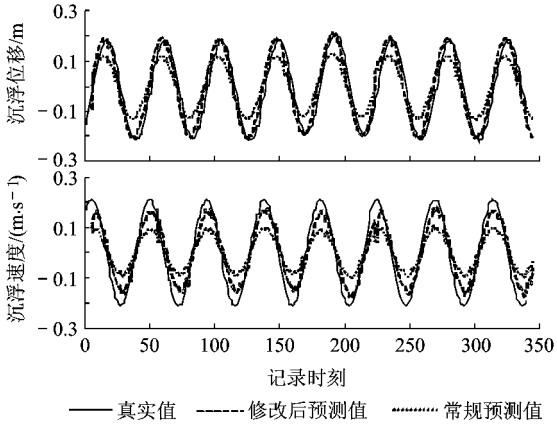


图 10 浮沉运动预测对比

表 **1** 降落精度统计

海况	纵摇 /m	横摇 /(°)	浮沉 /m	距离 /m
1	0.32	0.56	0.1	0.28
2	0.83	1.07	0.16	0.52

4 结束语

通过分析仿真试验结果, 可知本文提出的算法能在复杂条件下准确地识别目标、提取目标的信息, 能够高精度地预报甲板运动状态, 控制器算法能够根据实际情况做出合理的决策, 完成着舰.

参考文献 (**References**)

[1] Sinopoli B, Micheli M, Donato G, et al. Vision based navigation for an unmanned aerial vehicle[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seoul: IEEE, 2001: 1757-1765

[2] Shakernia O, Ma Y, Koo T J, et al. Landing an unmanned air vehicle: vision based motion estimation and nonlinear control[J]. Asian Journal of Control, 1999, 1(3): 128-145

[3] Saripalli S, Montgomery J F, Sukhatme G S. Vision-based autonomous landing of an unmanned aerial vehicle[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington D C: IEEE, 2002: 2799-2804

[4] Saripalli S, Sukhatme G S. Landing on a moving target using an autonomous helicopter[C]//Yuta S. Proceedings of the International Conference on Field and Service Robotics. Tsukuba: Springer, 2003: 277-286

[5] Saripalli S, Sukhatme G S. Landing a helicopter on a moving Target[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Roma: IEEE, 2007: 10-14

[6] Amidi O. An autonomous vision-guided helicopter[D]. Pittsburgh: Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 1996

[7] Shi Dongqing. Aerial robot navigation in cluttered urban environments[D]. Tallahassee, Florida: Mechanical Engineering Department, Florida State University, 2006

[8] Nsogo G F, Kith K, Wyk B J, et al. Robust helipad detection algorithm[C]//The 8th IEEE Africon Conference. Windhoek: IEEE, 2007: 1-7

[9] 乌兰巴根, 胡继忠, 徐元铭. 无人直升机自主着舰的目标定位视觉算法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(34): 243-245
Wulan Bagen, Hu Jizhong, Xu Yuanming. Visually-guided autonomous helicopter landing on deck[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(34): 243-245(in Chinese)

[10] Flusser J, Suk T. Pattern recognition by affine moment invariants[J]. Pattern Recognition, 1993, 26(1): 167-174

[11] 余勇, 杨一栋. 基于卡尔曼滤波理论的甲板运动预估技术研究[J]. 数据采集与处理, 2002, 17(4): 381-384
Yu Yong, Yang Yidong. Deck motion prediction technique based on Kalman filtering theory[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2002, 17(4): 381-384(in Chinese)

[12] Ford T, Hardesty M, Bobye M. Helicopter ship board landing system[C]//18th International Technical Meeting of the Satellite Division. CA: Institute of Navigation, 2005: 979-988

[13] Lee D, Sezer-Uzol N, Horn J F, et al. Simulation of helicopter shipboard launch and recovery with time-accurate airwakes[C]//The American Helicopter Society 59th Annual Forum. AZ: [s n], 2003: 448-461

[14] Wei Dong, Ye Jiawei, Wu Xi, et al. Time series prediction for generalized heave displacement of a shipborne helicopter platform[C]//ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management. Guangzhou: IEEE, 2008: 80-84

(编 辑: 李 晶)