

## 扩展Kalman滤波框架下的地平线检测算法

徐伟杰, 李平, 韩波

(浙江大学控制科学与工程系, 浙江杭州 310027)

**摘要:** 针对基于视觉的无人机姿态测量中的地平线检测问题, 提出一种结合图像处理和扩展Kalman滤波的地平线检测算法. 图像处理部分先从图像边缘中提取直线来获取候选地平线, 再根据图像暗原色先验来选取地平线. 扩展Kalman滤波部分将地平线观测模型与机身旋转模型结合起来, 获得观测值和残差协方差的先验信息, 用于判别检测到的地平线是否正确, 并在检测到错误地平线时进行修正. 实验结果表明, 该算法能够有效地检测地平线, 对复杂场景具有鲁棒性.

**关键词:** 地平线检测; 边缘检测; 暗原色先验; 无人机; 姿态估计

**中图分类号:** TP242.6 **文献标识码:** A

## Horizon detection algorithm in extended Kalman filter framework

XU Wei-jie, LI Ping, HAN Bo

(Department of Control Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

**Abstract:** To detect the horizon in the pose measurement for a vision-based unmanned aerial vehicle (UAV), we propose a horizon-extraction algorithm which combines the image processing and extended Kalman filter (EKF). The image processing part extracts straight lines from the image edges as candidates of horizon; and then, it uses the dark channel prior of the image to decide the horizon. The EKF part of the algorithm combines a horizon line observation model with a fuselage rotation model to obtain the predicted observation and innovation covariance, which are employed for judging whether a correct horizon is detected. Correction will be carried out when wrong horizon is detected. The experimental results show that the proposal algorithm can effectively detect the horizon, and is robust to complex scenes.

**Key words:** horizon detection; edge extraction; dark channel prior; unmanned aerial vehicle; attitude estimation

### 1 引言(Introduction)

近10年来, 无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)技术的发展极为迅速, 已经在军事、民用上有着广泛的应用. 早期无人机使用由惯性导航系统(inertial navigation system, INS)和全球定位系统(GPS)构成的组合导航系统<sup>[1]</sup>, 存在当GPS信号丢失时INS测量值因无法修正而逐渐漂移直至发散的问题. 近期随着计算机视觉算法性能和硬件性能的提高, 基于计算机视觉的导航成为无人机领域研究热点之一.

无人机视觉导航通过图像中提取标志物来估计位置与姿态, 标志物分为人工标志物和自然标志物. 对于人工标志物的研究集中在检测特定的几何标志物: 如直升机降落时检测各种平面图标<sup>[2-4]</sup>和固定翼降落时检测跑道两侧边缘<sup>[5-6]</sup>. 由于人工标志物需要预先设置, 限制了应用范围. 对于自然标志物的研究集中在检测地平线<sup>[7-13]</sup>.

地平线检测方法大致可以分为基于区域特征的算法<sup>[7-11]</sup>和基于边缘特征的算法<sup>[12-13]</sup>. Cornell<sup>[7]</sup>使用Otsu算法和K-means算法将蓝色通道图像二值化

来检测地平线. McGee<sup>[8]</sup>以颜色为特征使用支持向量机离线对训练图像序列进行分类学习, 在线将图像像素分割成天空和地面两类, 然后使用形态学滤波进行处理. Ettinger<sup>[9]</sup>、高爱民<sup>[10]</sup>和赵世峰<sup>[11]</sup>等人利用天空成像具有均一性, 根据天空与地面区域像素的不同色彩性质来检测地平线. Bao<sup>[12]</sup>通过将边缘点方向角投影映射的方法识别地平线. Dusha<sup>[13]</sup>利用各单色通道图像边缘相关性减少边缘像素数量, 然后用Hough变换检测地平线.

以上这些算法都只从图像处理的角度来解决地平线检测问题, 经常有对场景设定一定的假设条件, 在复杂场景下会发生检测错误. 由于算法无法自动识别检测错误并进行修正, 因此欠缺鲁棒性. 为提高地平线检测在复杂场景下的鲁棒性, 本文提出一种将图像处理与扩展Kalman滤波结合起来的算法. 算法的图像处理部分对环境没有设定假设条件, 通过将地平线的边缘特征和不同区域的暗原色特征结合起来检测地平线. 算法的扩展Kalman滤波部分将载体无人机的运动考虑进来, 在扩展卡尔曼滤

波(extended Kalman filter, EKF)理论框架下,结合机身旋转模型和地平线观测模型以得到观测值(地平线直线参数)及其残差协方差,用 $\chi^2$ 测试判别是否有检测错误,若检测错误则进行修正.本文最后用该算法对真实的航拍视频进行处理,验证其在复杂场景下的鲁棒性.

## 2 图像处理(Image processing)

图像中地平线的检测基于以下两点知识的结合:

1) 在低空飞行航拍图像中,地平线成像为直线;2) 在室外环境下成像,存在暗原色现象.

### 2.1 地平线图像(Image of horizon)

地平线图像由过摄像机光心的直线与地面切点的像构成.由于切点的距离非常远,因此地平线图像可以看作由过摄像机光心的水平面内无穷远点的像构成,近似为直线,记为 $l_h$ .

地平线是垂直方向灰度负阶跃的边缘线,可以依据垂直方向的灰度梯度是否为负排除部分非地平线上的边缘像素(图1(a)),减少后续图像处理的计算量.同时地平线是较长的直线,可以使用Hough变换检测直线,再从中选择较长的直线作为地平线候选(图1(b)).

### 2.2 暗原色先验(Dark channel prior)

航拍是在室外环境下成像.何恺明<sup>[14]</sup>通过对大量图像分析后指出,在室外环境下成像的图像中普遍存在暗原色现象,即地面区域总存在部分像素的 $\{r, g, b\}$ 3个通道中的某个通道灰度值非常低.图像的暗原色先验可以通过以下算子提取:

$$I_{\text{dark}}(\mathbf{x}) = \min_{c \in \{r, g, b\}} \left( \min_{\mathbf{y} \in \Omega(\mathbf{x})} I_c(\mathbf{y}) \right), \quad (1)$$

其中 $\Omega(\mathbf{x})$ 是像素 $\mathbf{x}$ 的邻域.有些航拍视频中图像的颜色信息会严重损失,近似灰度图像.暗原色先验同样适用于灰度图像,只需要做腐蚀操作:

$$I_{\text{dark}}(\mathbf{x}) = \min_{\mathbf{y} \in \Omega(\mathbf{x})} I(\mathbf{y}), \quad (2)$$

邻域大小的选取以使地面景物细节消失为宜(见图1(c)).

暗原色先验图中地面区域的灰度值比天空区域的灰度值低.本文定义以下判据函数 $J(l_i)$ 来判断候选直线 $l_i$ 是否为地平线:

$$J(l_i) = \alpha(\sigma_s^2 + \sigma_g^2) + (1 - \alpha)\sigma_s\sigma_g, \quad (3)$$

其中 $\sigma_s, \sigma_g$ 是天空、地面区域的像素暗原色灰度方差.权系数 $\alpha$ 用于调整判据函数中 $\sigma_s^2 + \sigma_g^2$ 和 $\sigma_s\sigma_g$ 的重要性,实验中取0.4 ~ 0.6.若判据函数 $J(l_i)$ 取最小值,则认为 $l_i$ 是地平线(见图1(d)).

### 2.3 地平线检测流程(Horizon detection flowchart)

结合2.1和2.2中的内容,地平线检测流程具体步骤如下:

1) 边缘提取.将彩色图像转换为灰度图像,使用Sobel算子得到水平方向梯度 $G_x$ 和垂直方向梯度 $G_y$ ,只保留垂直方向灰度梯度为负的边缘像素.

2) Hough变换直线检测.为减少计算量,参数分辨率 $\Delta\rho$ 取1个像素, $\Delta\theta$ 取1度.对提取出的直线计算其长度 $m$ 和所属像点数 $n$ ,若 $\frac{n}{m}$ 小于给定阈值则作为虚直线舍弃.选取最长的数条直线作为地平线候选.

3) 计算图像的暗原色先验.

4) 计算暗原色判据函数.对各地平线候选直线计算判据函数,以判据函数取最小的直线作为地平线,输出该直线参数 $\phi$ 和 $\theta$ .

图1给出了一帧航拍图像的各步骤处理结果.

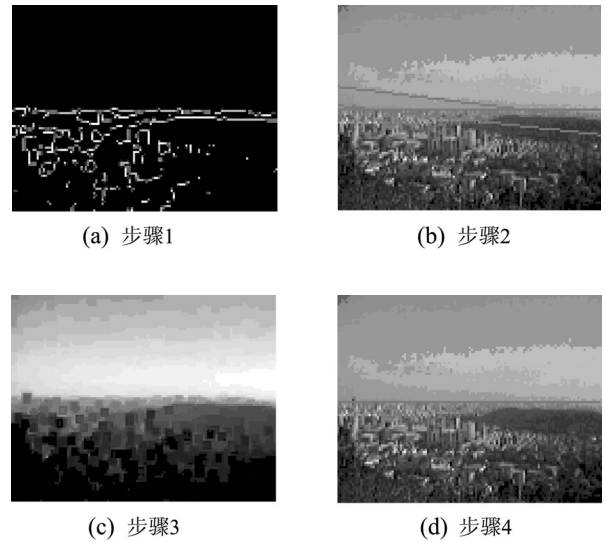


图1 各步骤处理结果

Fig. 1 Results of each step

## 3 扩展Kalman滤波(Extended Kalman filtering)

由于仅凭图像信息无法自动识别检测错误,因此在EKF框架下结合无人机的运动模型和地平线观测模型,依据观测值和残差协方差的先验信息来识别检测错误.

### 3.1 无人机旋转模型(UAV rotation model)

本文用欧拉角描述机体坐标系 $O_B X_B Y_B Z_B$ 与世界坐标系 $O_W X_W Y_W Z_W$ 之间的旋转关系,如图2所示.由于地平线 $l_h$ 只与滚转角 $\phi$ 和俯仰角 $\theta$ 有关,故定义状态向量 $\mathbf{x}_B$ 和协方差 $\mathbf{P}_B$ :

$$\mathbf{x}_B = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}, \mathbf{P}_B = \begin{bmatrix} P_\phi & P_{\phi\theta} & P_{\phi\dot{\phi}} & P_{\phi\dot{\theta}} \\ P_{\theta\phi} & P_\theta & P_{\theta\dot{\phi}} & P_{\theta\dot{\theta}} \\ P_{\dot{\phi}\phi} & P_{\dot{\phi}\theta} & P_{\dot{\phi}} & P_{\dot{\phi}\dot{\theta}} \\ P_{\dot{\theta}\phi} & P_{\dot{\theta}\theta} & P_{\dot{\theta}\dot{\phi}} & P_{\dot{\theta}} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中 $\dot{\phi} = \frac{d\phi}{dt}$ ,  $\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt}$ 是角速度.

机体运动模型 $\mathbf{x}_{B,k} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{B,k-1}, \mathbf{w}_k)$  定义为

$$\begin{bmatrix} \phi_k \\ \theta_k \\ \dot{\phi}_k \\ \dot{\theta}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{k-1} + (\dot{\phi}_{k-1} + \varepsilon_{\dot{\phi},k})\Delta t \\ \theta_{k-1} + (\dot{\theta}_{k-1} + \varepsilon_{\dot{\theta},k})\Delta t \\ \dot{\phi}_{k-1} + \varepsilon_{\dot{\phi},k} \\ \dot{\theta}_{k-1} + \varepsilon_{\dot{\theta},k} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中 $\varepsilon_{\dot{\phi},k}$ 和 $\varepsilon_{\dot{\theta},k}$ 是 $\Delta t$ 时间内角速度的变化量,由无人机控制信号和气流扰动造成,作为系统噪声 $\mathbf{w}_k = [\varepsilon_{\dot{\phi},k} \ \varepsilon_{\dot{\theta},k}]^T$ 来处理。 $\mathbf{w}_k$ 的协方差为 $\mathbf{Q}_k = \text{diag}\{\sigma_{\dot{\phi}}^2, \sigma_{\dot{\theta}}^2\}$ ,方差 $\sigma_{\dot{\phi}}^2$ 和 $\sigma_{\dot{\theta}}^2$ 值的大小与无人机飞行模式有关,如平飞时方差值较小,机动飞行时方差值较大,为适合所有的飞行模式设定较大的方差值。严格的说 $\phi$ 和 $\theta$ 之间存在耦合,式(5)是近似成立的。

### 3.2 地平线观测模型(Horizon observation model)

摄像机坐标系 $O_C X_C Y_C Z_C$ 与机体坐标系之间的旋转关系与安装角度有关。在本文中假设摄像机坐标系的轴 $O_C X_C$ ,  $O_C Y_C$ ,  $O_C Z_C$ 分别与机体坐标系的轴 $O_B Y_B$ ,  $O_B Z_B$ ,  $O_B X_B$ 平行,如图2所示。

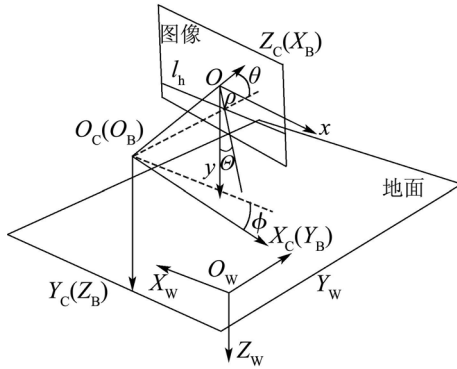


图2 坐标系旋转与地平线图像

Fig. 2 Rotation between coordinates and image of horizon

地平线直线参数 $\rho$ 、 $\Theta$ 与姿态角 $\phi$ 、 $\theta$ 的关系如下:

$$\begin{cases} \rho = f \tan \theta, \\ \Theta = -\phi, \end{cases} \quad (6)$$

其中 $f$ 是以像素为单位的摄像机等效焦距。

观测模型 $\mathbf{z}_k = \mathbf{h}(\mathbf{x}_{B,k}, \mathbf{v}_k)$  定义为:

$$\begin{bmatrix} \rho_k \\ \Theta_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \tan \theta_k + \varepsilon_{\rho,k} \\ -\phi_k + \varepsilon_{\Theta,k} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中 $\varepsilon_{\rho,k}$ 和 $\varepsilon_{\Theta,k}$ 与直线参数提取误差有关,作为观测噪声 $\mathbf{v}_k = [\varepsilon_{\rho,k} \ \varepsilon_{\Theta,k}]^T$ 来处理。 $\mathbf{v}_k$ 的协方差 $\mathbf{R}_k = \text{diag}\{\sigma_{\rho}^2, \sigma_{\Theta}^2\}$ ,方差 $\sigma_{\rho}^2$ 和 $\sigma_{\Theta}^2$ 与Hough参数分辨率相关。

### 3.3 EKF流程(EKF flowchart)

EKF流程的目的是依据观测值和残差协方差的先验信息,判断是否发生地平线检测错误,具体步骤如下:

1) 状态预测. 预测状态向量和状态协方差:

$$\mathbf{x}_{B,k|k-1} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{B,k-1|k-1}, \mathbf{0}), \quad (8a)$$

$$\mathbf{P}_{B,k|k-1} = \mathbf{F}_k \mathbf{P}_{B,k-1|k-1} \mathbf{F}_k^T + \mathbf{G}_k \mathbf{Q}_k \mathbf{G}_k^T, \quad (8b)$$

$$\text{其中 } \mathbf{F}_k = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}_{B,k-1}}, \mathbf{G}_k = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{w}_k}.$$

2) 观测预测. 预测观测值和残差协方差:

$$\mathbf{z}_{k|k-1} = \mathbf{h}(\mathbf{x}_{B,k|k-1}, \mathbf{0}), \quad (9a)$$

$$\mathbf{S}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{B,k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k, \quad (9b)$$

$$\text{其中 } \mathbf{H}_k = \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}_{B,k}}.$$

3) 判断是否发生检测错误. 将2.3节地平线检测流程获取地平线直线参数作为实际观测值 $\mathbf{z}_k$ ,进行 $\chi^2$ 测试以判断是否发生检测错误:

$$(\mathbf{z}_k - \mathbf{z}_{k|k-1})^T \mathbf{S}_k^{-1} (\mathbf{z}_k - \mathbf{z}_{k|k-1}) < \chi_{2,0.05}^2, \quad (10)$$

置信度取为0.95. 若通过 $\chi^2$ 测试,则到第4步;反之发生检测错误,回到地平线检测流程的第3步进行修正,具体做法在剩余直线中选择使判据函数取最小值的直线作为地平线,再次进行 $\chi^2$ 测试。

4) 状态更新. 更新状态向量和状态协方差:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{B,k|k-1} \mathbf{H}_k^T \mathbf{S}_k^{-1}, \quad (11a)$$

$$\mathbf{x}_{B,k|k} = \mathbf{x}_{B,k|k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{z}_{k|k-1}), \quad (11b)$$

$$\mathbf{P}_{B,k|k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{B,k|k-1}. \quad (11c)$$

## 4 实验(Experiments)

### 4.1 实验设备(Experiment equipments)

实验所用视频采集设备由Logitech的Pro4000摄像机、Intel的D945GCLF2D主板、固态硬盘和电池构成,主板和固态硬盘安装在机箱内,摄像机和电池安装在机箱外,机箱通过硅胶减震器安装在载体Hirobo的Freya90直升机下方,如图3所示。安装摄像机时需要保证其在机头下方(避开发动机尾烟),镜头水平指向前方。视频的分辨率为 $320 \times 240$ 像素,帧率为30帧/秒。考虑到不能完全隔离直升机机械振动,会导致成像质量变差,在处理视频时降采样为 $160 \times 120$ 像素。



(a) 图像采集设备



(b) 无人直升机

图3 实验设备

Fig. 3 Experiment equipments

### 4.2 实验结果(Experiment results)

实验中对两段航拍视频用本文算法做地平线检测,下面以视频1实验结果为例进行分析。图4所示为数帧图像的检测结果,黑色+记号表示图像主像点,黑色直线表示检测到的地平线。图5给出了由地平线

直接得到的姿态测量值曲线和EKF滤波得到的姿态测量值曲线。●记号表示算法识别到检测错误,与直接得到的姿态测量值曲线的剧烈跳变处一一对应,表明识别结果是正确的。

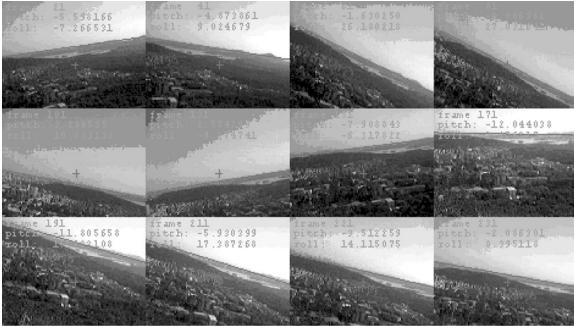


图4 视频1地平线检测结果

Fig. 4 Horizon detection results of video 1

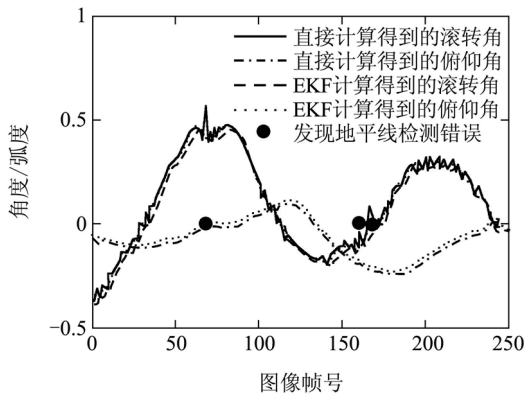
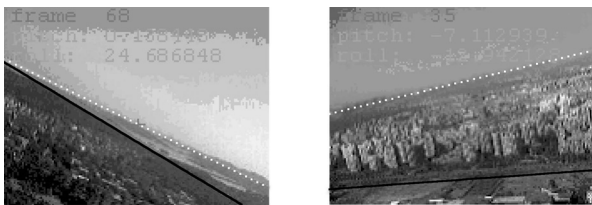


图5 视频1姿态测量值比较

Fig. 5 Pose estimations comparison of video 1

图6所示的复杂场景来自两段视频,共同的特点是在地平线与其他明显的直线边缘之间的区域有高反射率的物体,如湖泊和浅色建筑物。实线是直接检测得到的错误地平线,虚线是修正后得到的正确地平线。



(a) 视频1

(b) 视频2

图6 地平线检测修正结果

Fig. 6 Corrected horizon detection results

## 5 结论(Conclusion)

本文提出的地平线检测算法将图像处理和扩展Kalman滤波结合起来,利用观测值与残差协方差来判断是否有检测到错误的地平线,在检测错误时通过修正得到正确的地平线。实验结果表明该算法在复杂环境下具有较强鲁棒性。

## 参考文献(References):

- [1] 邹维宝,高社生,任思聪.组合导航系统INS/GNSS/SAR及其降阶模型性能的研究[J].控制理论与应用,2002,19(1):135-138.  
(ZOU Weibao, GAO Shesheng, REN Sicong. Performance study of INS/GNSS/SAR integrated navigation system and its reduced-order model[J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(1): 135-138.)
- [2] SHARP C S, SHAKERNIA O, SASTRY S S. A vision system for landing an unmanned aerial vehicle[C] // *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Seoul: IEEE, 2001: 1720-1727.
- [3] MUKUNDAN R, RAGHU NARAYANAN R V, PHILIP N K. A vision based attitude and position estimation algorithm for rendezvous and docking[J]. *Journal of Spacecraft Technology*, 1994, 4(2): 60-66.
- [4] SARIPALLI S, SUKHATME G S, MONTGOMERY J F. An experimental study of the autonomous helicopter landing problem[C] // *International Symposium on Experimental Robotics*. Sant' Angelo d'Ischia: Springer, 2002: 466-475.
- [5] SASA S, GOMI H, NINOMIYA T, et al. Position and attitude estimation using image processing of runway[C] // *Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. Reno: AIAA, 2000: 1-10.
- [6] 李红,柴洪林,彭嘉雄.基于视觉的无人机姿态角估计[J].华中科技大学学报(自然科学版),2006,35(6):4-7.  
(LI Hong, CHAI Honglin, PENG Jiexiong. Vision-based estimation of attitude angles of unmanned air vehicles[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science)*, 2006, 35(6): 4-7.)
- [7] CORNALL T D, EGAN G K. Measuring horizon angle from video on a small unmanned air vehicle[C] // *International Conference on Autonomous Robots and Agents*. New York: IEEE, 2004: 339-344.
- [8] MCGEE G T, SENGUPTA R, HDRICK K. Obstacle detection for small autonomous aircraft using sky segmentation[C] // *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. New York: IEEE, 2005: 4679-4684.
- [9] ETTINGER S M, NECHYBA M C, IFJU P G, et al. Towards flight autonomy: vision-based horizon detection for micro air vehicles[C] // *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*. New York: IEEE, 2002: 2134-2140.
- [10] GAO Aimin, CAO Yunfeng, CHEN Songcan. The scheme of vision-based attitude detection for MAV[J]. *Aircraft Design*, 2002, 4(12): 70-73.
- [11] ZHAO Shifeng, ZHANG Hai, FAN Yaozu. Attitude estimation method for flight vehicles based on computer vision[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Nature Science)*, 2006, 32(8): 885-888.
- [12] BAO G, XIONG S, ZHOU Z. Vision-based horizon extraction for micro air vehicle flight control[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2005, 54(3): 1067-1072.
- [13] DUSHA D, WAGEEH B, RODNEY W. Attitude estimation for a fixed-wing aircraft using horizon detection and optical flow[C] // *Biennial Conference of the Australian Pattern Recognition Society on Digital Image Computing Techniques and Applications*. New York: IEEE, 2007: 485-492.
- [14] HE K, SUN J, TANG X. Single image haze removal using dark channel prior[C] // *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. New York: IEEE, 2009: 1956-1963.

## 作者简介:

徐伟杰 (1983—),男,博士研究生,目前研究方向为空中机器人控制与导航、机器视觉导航, E-mail: ichiro@163.com;

李平 (1954—),男,博士,教授,博士生导师,目前研究方向为复杂工程系统建模、企业综合自动化系统、智能交通系统、空中机器人控制与导航, E-mail: pli@iipc.zju.edu.cn;

韩波 (1969—),男,博士,副研究员,目前研究方向为嵌入式系统、空中机器人控制与导航, E-mail: bhan@iipc.zju.edu.cn.