

文章编号:1000-6893(2010)10-2056-06

一种基于类间方差的地平线检测算法

程序,郝群,宋勇,胡摇,张凯

(北京理工大学 光电学院,北京 100081)

A Horizon Detection Algorithm Based on Between-class Variance Analysis

Cheng Xu, Hao Qun, Song Yong, Hu Yao, Zhang Kai

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

摘要: 针对视觉导航中用于微型飞行器(MAV)稳定飞行控制的地平线提取问题,提出一种基于类间方差的地平线检测算法。该算法使用角度和距离两个变量进行图像中直线的穷举,选取像素的蓝色分量作为区分天地的特征,利用类间方差构造判别准则进行直线的最优选择,从而实现地平线的检测。实验结果表明:与基于色彩协方差矩阵的地平线检测算法相比,本文算法对地平线检测的平均角度误差减少 1° ,距离误差减少3个像素,角度和距离参数的检测正确率分别提高1.98%和4.95%,且具有良好的速度特性。

关键词: 微型飞行器; 计算机视觉; 图像处理; 姿态控制; 地平线检测

中图分类号: V249.32 **文献标识码:** A

Abstract: To detect the horizon for the steady flight control of micro air vehicles (MAV) in vision navigation, a horizon detection algorithm based on between-class variance analysis is proposed. The angle and distance are used as parameters to exhaust the straight lines in the image. The blue color component of the pixel is chosen as the feature for distinguishing the sky and the ground. A criterion based on the between-class variance is set up for determining whether or not a straight line is the horizon within the exhaustive straight lines. Experimental results show that, compared with the horizon detection algorithm based on color covariance matrix calculation, the proposed algorithm performs better. The average detection error decreases by 1 degree in angle and 3 pixels in distance. The correct detection rate increases by 1.98% in angle and 4.95% in distance at a satisfactory speed.

Key words: micro air vehicles; computer vision; image processing; attitude control; horizon detection

微型飞行器(Micro Air Vehicle, MAV)具有体积小、重量轻的飞行平台优势,机动灵活、隐蔽性好,在军事领域和民用领域都有良好的应用前景。飞行器通常携带小型摄像机进行拍摄和侦查。而视觉导航技术利用机载图像传感器输出的视频信息即可进行导航,无需增加飞行器的额外负载,因此视觉图像处理技术是解决飞行器导航问题的重要途径^[1-3]。

在摄像机视场中,地平线是自然界中最明显的特征。在无需增加额外负载的前提下,利用视频中的地平线可为飞行器提供姿态导航参数,因此地平线常被用于进行飞行器的姿态估计^[4]。在基于地平线提取的飞行器稳定飞行控制研究中,佛罗里达大学的研究人员通过实验发现,相比只有人工操控的情况,增加基于地平线检测的姿态估计对飞行器飞行进行反馈控制,能明显改善飞

行器的飞行稳定性^[4],而算法的性能影响到飞行稳定程度^[5]。这样,基于视觉的飞行器稳定飞行控制的关键问题就转化为图像中地平线的准确和稳定提取。另外,图像具有数量大的特点,要求算法具有良好的速度特性。

在对图像中地平线的提取研究中,目前的方法可以分成3类:基于边缘特征、基于机器学习和基于区域特征。

在基于边缘特征的方法中,一种方法是选取视频图像中的兴趣区域^[6],通过边缘检测进行地平线提取。该方法需要选取兴趣区域,没有充分利用视频中的信息,因而该算法适应性较差。文献^[7]提出基于方位投影的地平线检测算法,该算法主要是通过确定最大投影值的方向进行地平线的检测,但该方法容易受到噪声的干扰。多尺度线性判别分析法(MLDA)被提出用于进行地平线检测^[2,8-9]。使用这种方法能在一定程度上克服噪声的影响,但是计算复杂,处理的实时性较差。

基于机器学习的方法^[10]对在恶劣环境条件

收稿日期:2009-11-12; 修订日期:2010-01-20

基金项目:国家自然科学基金(60801050)

通讯作者:郝群 E-mail: qhao@bit.edu.cn

下获取的图像仍能较为准确地检测出地平线。但该方法只是对那些与训练相似的图像检测结果较为准确,而且需要预先进行学习训练,在使用上具有一定的局限性。

在基于区域特征的方法中,文献[4]提出一种基于色彩协方差矩阵的地平线检测算法,该算法通过最大化基于色彩协方差矩阵的判别准则实现地平线的检测。该文献称对地平线的检测正确率能达到 99.9%,但是没有说明检测正确的标准。其后续研究在色彩模型的基础上增加了纹理信息^[11],提高了算法的鲁棒性,但也增加了算法的运算量。为了减少运算量,主元分析技术被用于对图像的多维特征进行简化压缩,用于后续的图像处理和分析^[12]。

总结上述 3 类地平线检测方法,基于边缘特征的方法准确度高,但检测结果容易受到噪声干扰,稳定性差^[13];基于机器学习的方法需要经过学习训练,导致使用上存在局限性^[10];基于区域特征的方法具有较好的稳定性,通过增加穷举分辨率可以提高检测准确度,但需要注意运算量的问题。本文利用区域特征,提出一种基于类间方差的地平线检测算法。该算法使用角度和距离两个变量进行图像中直线的穷举,选取像素的蓝色分量作为区分天地的特征,利用类间方差构造判别准则进行直线的最优选择,从而实现地平线的检测。实验结果表明,该地平线检测算法的准确性高、稳定性好、耗时少,适用于对实时性要求高的场合。

1 基于区域特征的地平线检测算法

利用区域特征对视频图像中的地平线进行检测,该算法基于以下 2 个假设^[4]:①地平线在图像中近似地表现为一条直线;②地平线将图像分为 2 个具有不同特征的区域,即天像素与地像素相差程度大。这样,基于区域特征的地平线检测算法的实现可以分为 2 个步骤:第 1 步是进行图像中直线的穷举;第 2 步是根据天地区域的不同特征对穷举的直线进行最优选择。

1.1 直线的穷举方法

在对图像进行直线穷举时,使用角度和距离两个变量描述直线。角度和距离的定义如图 1 所示。在图像坐标系 Oxy 中,点 M 是图像的中点,其坐标为 (x_0, y_0) , L 是图像中任意一条直线。其中,角度 ϕ 是直线 L 与 x 轴的夹角,大小范围是

$[-\pi/2, \pi/2]$;距离 d 是点 M 到直线 L 的垂直距离 MD ,大小范围是 $[-MO, MO]$ 。

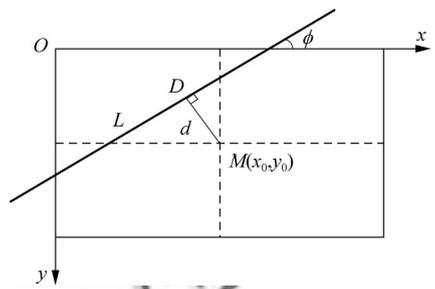


图 1 直线的角度和距离定义

Fig. 1 Definition of angle and distance of a straight line

根据穷举分辨率的不同,使用角度和距离两个变量描述直线能穷举出区域中不同情况的直线。设 n 为穷举分辨率,则直线的角度 ϕ 和距离 d 的穷举范围分别是

$$\phi_i = \left(\frac{i}{n} - \frac{1}{2}\right)\pi \quad (0 \leq i \leq n) \quad (1)$$

$$d_j = \left(\frac{j}{n} - \frac{1}{2}\right)S \quad (0 \leq j \leq n) \quad (2)$$

式中: S 的大小为点 M 到该直线最长距离的两倍,该距离会随着角度的变化而变化。穷举分辨率 n 的大小可以根据量化精度的需要进行选择。

1.2 直线最优选择的判别准则

在所有穷举出来的直线中,能给出天地最佳分割的直线是地平线。这样,检测地平线的问题就转化为一个最优选择的问题,即在穷举的直线中寻找一条能让一个判别准则达到最大的直线。

在选择判别准则使用的特征中,考虑到图像中的蓝色分量既包含了颜色信息,也包含了亮度信息,因此在晴天和阴天,蓝色分量的数值大小都能很好地描述天地之间的差异,因此这里选择图像像素 RGB 中的蓝色分量作为区分天和地的主要特征。对于图像中的任意一条直线,将直线上方的像素标记为天像素,下方的标记为地像素。这样,天像素记为 b_{si} ,表示第 i 个天像素的蓝色分量数值的大小,其中 $i \in \{1, 2, \dots, n_s\}$, n_s 为天像素的个数。与此类似,地像素记为 b_{gi} ,表示第 i 个地像素的蓝色分量数值的大小,其中 $i \in \{1, 2, \dots, n_g\}$, n_g 为地像素的个数。

根据文献[14]的分析,在判别准则中,类间方差基于零阶(数量比例)和一阶统计量(类均值)是

最直接和简便的判别准则。方差值越大,说明构成图像的两部分差别越大。这里使用类间方差构造直线最优选择的判别准则 T 。类间方差的数学表达式为

$$\sigma_B^2 = \omega_s(\mu_s - \mu_T)^2 + \omega_g(\mu_g - \mu_T)^2 \quad (3)$$

式中: ω_s 和 ω_g 分别为天和地像素所占的比例; μ_s 和 μ_g 分别为天和地像素蓝色分量数值的平均值,即

$$\left. \begin{aligned} \omega_s &= \frac{n_s}{n_s + n_g} \\ \omega_g &= \frac{n_g}{n_s + n_g} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_s &= \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} b_{si} \\ \mu_g &= \frac{1}{n_g} \sum_{i=1}^{n_g} b_{gi} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

μ_T 为整幅图像的蓝色分量数值平均值,即

$$\left. \begin{aligned} \mu_T &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_i \\ n &= n_s + n_g \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

通过等式关系

$$\left. \begin{aligned} \mu_T &= \omega_s \mu_s + \omega_g \mu_g \\ \omega_s + \omega_g &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式(3)可以简化为

$$\sigma_B^2 = \omega_s \omega_g (\mu_s - \mu_g)^2 \quad (8)$$

因此,判别准则 T 可以表达为

$$T = \omega_s \omega_g (\mu_s - \mu_g)^2 \quad (9)$$

根据前文论述,使判别准则取得最大值的直线认为是地平线。因此,在量化的角度和距离中,由式(1)和式(2)得出最优直线 (ϕ^*, d^*) 满足

$$\left. \begin{aligned} T(\phi = \phi^*, d = d^*) &\geq T(\phi = \phi_i, d = d_j) \\ (0 \leq i \leq n, 0 \leq j \leq n) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

综上,通过判别准则的最大值能够确定理想地平线所在的直线。

2 检测效果和性能比较实验

2.1 检测效果实验

为了能直观地检验基于类间方差的地平线检测算法的有效性,选取了若干幅图像进行实验,其中穷举分辨率取 $n=30$ 。检测效果如图2所示,图中的白色虚线表示算法检测的地平线。

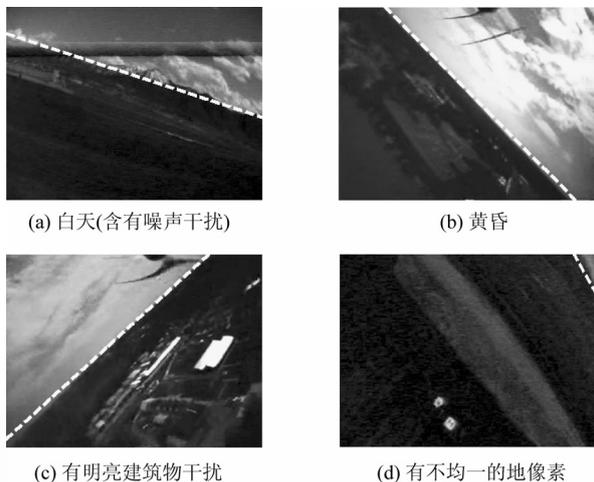


图2 基于类间方差算法的地平线(虚线)检测效果

Fig. 2 Horizon (dashed line) detection results based on between-class variance algorithm

从实验结果可以看出,基于类间方差的地平线检测算法能准确、有效地检测出图像中的地平线。在不同的时刻和成像条件下,该算法均能准确地检测出地平线,如图2(a)和图2(b)所示,它们分别是白天(含有噪声干扰)和黄昏情况下的检测结果。即使地面有明亮的建筑物干扰,甚至是视野中有较大面积并且不均一的地像素的情况,该算法也能较好地检测出地平线,分别如图2(c)和图2(d)所示。

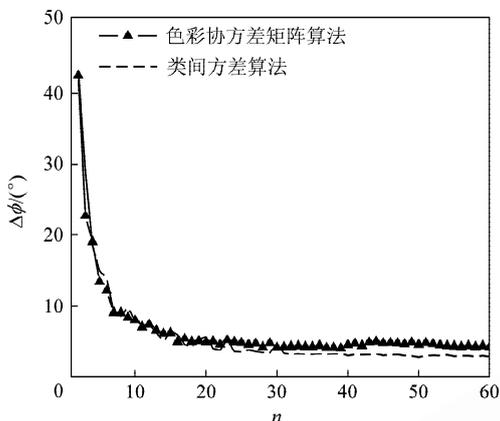
2.2 性能比较实验

为了定量地衡量和比较基于类间方差的地平线检测算法与文献[4]中基于色彩协方差矩阵的算法在地平线检测上的性能,这里选取了100幅分辨率为320像素×240像素的图像作为测试样本进行实验。所使用的计算机处理器是Pentium,主频为1.8 GHz,使用的软件环境是MATLAB 7.0。由于很难获取真实地平线的准确位置,假设人眼判定的地平线是准确的^[15]。在实验前先对每幅图像中的地平线进行人工判定,得到描述地平线的角度和距离两个基准参数,然后使用判断准则获得相应的地平线检测结果,再计算检测结果和人工判定结果两者的绝对偏差,从而获得该准则的检测性能。这里比较的指标主要是检测误差、检测正确率和运行时间。

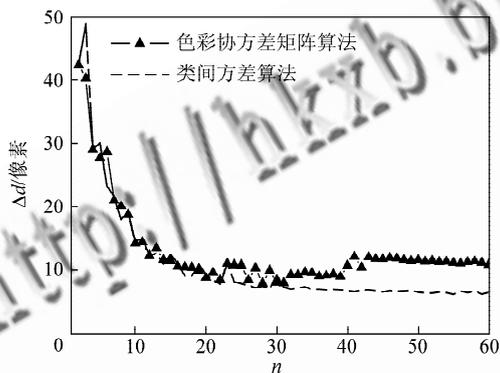
(1) 检测误差

检测误差主要是反映算法的地平线检测准确度。这个指标包括两个描述地平线位置的参数,即:角度误差 $\Delta\phi$ 和距离误差 Δd 。检测误差越小,说明算法的检测准确度越高。在对比实验中,随着穷举分辨率 n 的增加($2 \leq n \leq 60$),两种算法

的地平线检测角度误差 $\Delta\phi$ 和距离误差 Δd 曲线如图 3 所示。



(a) 角度误差



(b) 距离误差

图 3 检测误差与穷举分辨率的关系

Fig. 3 Relationship between detection error and exhaustive resolution

从检测误差的指标看，在穷举分辨率 $n < 30$ 的情况下，两种算法对地平线检测结果的误差相当。当 $n \geq 32$ 时，基于类间方差的算法其检测角度误差 $\Delta\phi$ 保持在 3° 左右，距离误差 Δd 保持在 7 个像素左右；而基于色彩协方差矩阵的算法其检测角度误差 $\Delta\phi$ 保持在 4° 左右，距离误差 Δd 保持在 10 个像素左右。因此，穷举分辨率取 $n = 32$ 较为合理。与基于色彩协方差矩阵的算法相比，基于类间方差的算法对地平线检测的平均角度误差减少了 1° ，距离误差减少了 3 个像素，说明基于类间方差的算法所检测的地平线结果更接近于人眼对地平线位置的判定。

两种算法在检测误差上的差别，主要原因是特征量选取的不同。如图 4 给出的是使用两种算法分别进行地平线检测的结果对比，其中实线对应色彩协方差矩阵算法，虚线是本文提出的基于类间方差算法的检测结果。可见，当地面存在色彩不均的时候，利用色彩协方差矩阵算法得到的地平线检测

结果的准确性就会受到影响。如图 4(a)，由于考虑的特征过多，因此影响了主要因素的作用，导致将部分地像素错判为天像素部分，而图 4(b) 则把部分天像素错判为地像素部分。两者相比较，基于类间方差的算法，其特征使用了最主要的蓝色分量，因此能很好地区分天地的差别，不会受到其他颜色的干扰，地平线检测结果更为准确。



(a) 错判地像素

(b) 错判天像素

—— 色彩协方差矩阵算法
 - - - - 类间方差算法

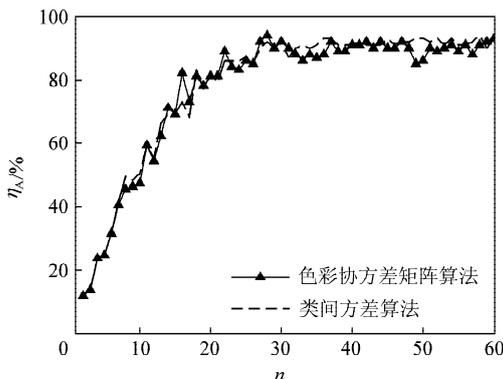
图 4 两种地平线检测算法的检测差别

Fig. 4 Detection difference between two horizon detection algorithms

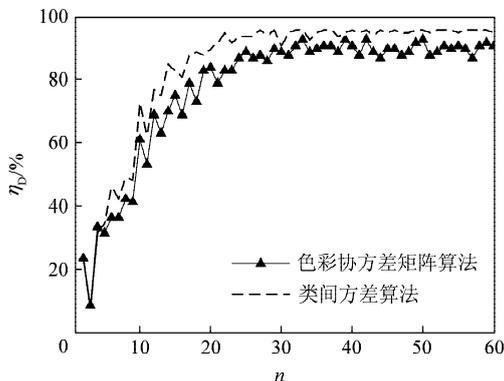
(2) 检测正确率

检测正确率主要是反映算法对地平线检测的稳定性。根据以上数据的统计结果，在检测误差趋于稳定时候，两种算法检测的角度误差 $\Delta\phi$ 保持在 5° 以内，距离误差 Δd 保持在 11 个像素以内。因此，这里分别取 5° 和 11 个像素作为角度检测误差和距离检测误差的阈值，误差超过阈值则认为检测结果错误。下面统计两种算法在地平线参数检测正确率上的变化情况，随着穷举分辨率的增加，两种算法的检测正确率如图 5 所示。

基于类间方差的地平线检测算法和基于色彩协方差矩阵的算法相比，从角度检测正确率 η_A 的指标来看，它们的检测正确率相当，如图 5(a) 所示。在穷举分辨率 $n = 32$ 的情况下，前者的检测正确率达到 90.10%，比后者高 1.98%。从距离检测正确率 η_D 的指标来看，前者普遍比后者高，如图 5(b) 所示。在穷举分辨率 $n = 32$ 的情况下，前者的检



(a) 角度检测正确率



(b) 距离检测正确率

图5 地平线参数检测正确率与穷举分辨率的关系

Fig. 5 Relationship between correct detection rate of horizon parameters and exhaustive resolution

测正确率达到 96.04%，比后者高 4.95%。可以看出，虽然使用的特征量减少，但它并不影响算法检测的稳定性。

(3) 运行时间

一般来说，穷举分辨率 n 越高，算法的检测分辨率就越高，量化误差就越小。但是，算法的运行时间也随之增大。另外，视觉导航对实时性有一定的要求，因此穷举分辨率只要选择在检测误差稳定的情况即可。根据前面的分析，穷举分辨率取 $n=32$ 较为合理。在实时性方面，算法经过优化，基于色彩协方差矩阵的地平线检测算法可以满足实时性的要求^[4]，可达到 30 Hz。然而，由于不同程度的优化对算法的运行时间会造成不同程度的影响，而且不同的处理器在运算性能上存在差异，从而会造成算法运行时间上的差别。因此，为了在相同的条件下比较两种算法在运行时间上的性能，这里对算法均不进行优化，并以穷举分辨率 $n=32$ 时基于色彩协方差矩阵算法的运行时间为参考，对不同算法的运行时间进行归一化和百分比展示，结果如图 6 所示。

通过比较看出，随着穷举分辨率的增加，在 n 从 30 增加到 32 的过程中，两种算法的运算时间都在增大。但是，基于类间方差的地平线检测算法其运行时间更少。在 $n=32$ 的情况下，基于类间方差的算法其运行时间只是基于色彩协方差矩阵的 5.2%。通过进行算法的优化，可以进一步减少运行时间。可以预测，在经过优化后，基于类间方差的算法在运行时间上将更少。

从上述对比实验得出，在地平线参数检测准确度方面和正确率方面，基于类间方差的算法均比基于色彩协方差矩阵的算法略高。同时，基于

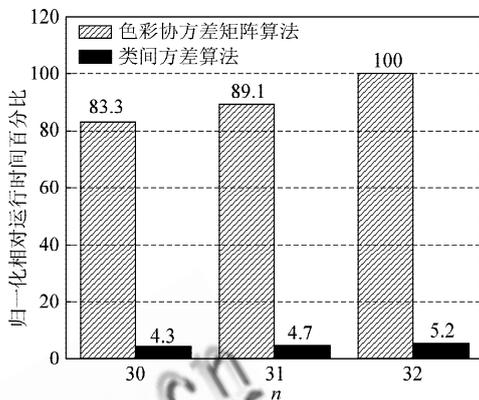


图6 两种算法在运行时间上的比较

Fig. 6 Comparison of time between two algorithms

类间方差的算法耗时更少，说明其更加适用于对实时性要求高的场合，有利于地平线检测算法在机载视觉导航系统上的实现。

3 结论

(1) 基于类间方差的地平线检测算法只利用了图像像素的零阶和一阶统计量，运算量少，有利于该算法应用在实时性要求高的场合。

(2) 与基于色彩协方差矩阵的地平线检测算法相比，提出的类间方差算法对地平线检测的平均角度误差减少 1° ，距离误差减少 3 个像素，角度和距离参数的检测正确率分别提高 1.98% 和 4.95%。该算法运算量少，耗时短，具有良好的速度特性，为其在机载视觉导航系统中的应用奠定了基础。

参考文献

- [1] 邱力为，宋子善，沈为群. 用于无人直升机着舰控制的计算机视觉技术研究[J]. 航空学报，2003，24(4): 351-354.
Qiu Liwei, Song Zishan, Shen Weiqun. Computer vision scheme used for the automate landing of unmanned helicopter on ship deck[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2003, 24(4): 351-354. (in Chinese)
- [2] Todorovic S, Nechyba M C. A vision system for intelligent mission profiles of micro air vehicle[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2004, 53(6): 1713-1725.
- [3] 王睿，李欣，张广军. 单目主动视觉无人机导引中摄像机内参数标定的线性方法[J]. 航空学报，2006，27(4): 676-681.
Wang Rui, Li Xin, Zhang Guangjun. A linear algorithm for determining intrinsic parameters of zoomed monocular camera in the vision based landing of an UAV[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(4): 676-681. (in Chinese)

- [4] Ettinger S M, Nechyba M C, Ifju P G, et al. Vision-guided flight stability and control for micro air vehicles [J]. *Advanced Robotics*, 2003, 17(7): 617-640.
- [5] Grzywna J W, Jain A, Plew J, et al. Rapid development of vision-based control for MAVs through a virtual flight testbed[C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2005; 3696-3702.
- [6] Pereira G A S, Iscold P, Torres L A B. Airplane attitude estimation using computer vision: simple method and actual experiments[J]. *Electronics Letters*, 2008, 44(22): 1303-1305.
- [7] Bao G Q, Xiong S S, Zhou Z Y. Vision-based horizon extraction for micro air vehicle flight control[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2005, 54(3): 1067-1072.
- [8] Todorovic S, Nechyba M C. Intelligent missions for MAVs; visual contexts for control, tracking and recognition[C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2004; 1640-1645.
- [9] Todorovic S, Nechyba M C. Multiresolution linear discriminant analysis: efficient extraction of geometrical structures in images [C]// *International Conference on Image Processing*. 2003; 1029-1032.
- [10] Feflatyev S, Smarodzinava V, Hall L O, et al. Horizon detection using machine learning techniques [C] // *5th International Conference on Machine Learning and Applications*. 2006; 17-21.
- [11] Todorovic S, Nechyba M C, Ifju P G. Sky/ground modeling for autonomous MAV flight[C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2003; 1422-1427.
- [12] 王峻涛, 周宇. 基于主元分析的微型飞行器视觉导航[J]. *航空学报*, 2008, 29(增刊): 220-223.
Wang Juntao, Zhou Yu. Micro air vehicle visual navigation based on principal component analysis[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, 29(Sup): 220-223. (in Chinese)
- [13] 周宇, 黄显林, 介鸣, 等. Bayesian 分类方法在微型飞行器视觉导航中的应用[J]. *航空学报*, 2007, 28(增刊): 136-140.
Zhou Yu, Huang Xianlin, Jie Ming, et al. Bayesian classifier's application to micro aerial vehicle's visual navigation[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2007, 28(Sup): 136-140. (in Chinese)
- [14] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.
- [15] Zafarifar B, Weda H, With P D. Horizon detection based on sky-color and edge features [C]// *Proceedings of the SPIE*. 2008; 1-9.

作者简介:

程序(1982—) 男, 博士研究生。主要研究方向: 视觉导航、计算机视觉。

Tel: 010-81619703

E-mail: chengxu722@163.com

郝群(1968—) 女, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 微型光电成像/探测技术、仿生传感技术等。

E-mail: qhao@bit.edu.cn

宋勇(1973—) 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 微型光电成像/探测技术、人体通信技术。

E-mail: yongsong@bit.edu.cn

胡摇(1983—) 女, 博士, 讲师。主要研究方向: 光学干涉测量技术等。

E-mail: huy08@bit.edu.cn

张凯(1986—) 男, 博士研究生。主要研究方向: 图像处理、模式识别。

E-mail: 121886@bit.edu.cn

(编辑: 张利平, 晓坤)