

一种基于图像信息的微小型飞行器姿态测量方法^{*}

黄英东,李 杰,范宁军

(北京理工大学宇航科学技术学院,北京 100081)

摘 要:提出了一种基于图像信息的微小型飞行器姿态测量方法。该方法综合运用 Laplacian-Gauss 边缘检测、OTSU 算法以及 Hough 变换等数字图像处理技术,从机载摄像机图像中识别出地平线或者海天线。根据得到的直线信息可以迅速地测量出飞行器的滚转角与俯仰角。实验表明,该方法可以有效地识别出复杂背景中的地平线和海天线,计算得到的滚转角与俯仰角精度满足飞行器的姿态控制要求。

关键词:微小型飞行器;边缘检测;OTSU 算法;Hough 变换;姿态测量

中图分类号:V249.122.2 文献标志码:A

An Attitude Measurement Approach for Micro Air Vehicles Based on Image Information

HUANG Yingdong, LI Jie, FAN Ningjun

(School of Aerospace Science & Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: An attitude measurement approach for micro air vehicles (MAVs) based on image information was presented. The horizon or sea-sky-line can be recognized from the onboard image by digital image processing techniques such as Laplacian-Gauss edge detection, OTSU algorithm and Hough transform. The roll angle and pitch angle can be measured rapidly with the obtained line information. The experimental results show that the approach can be used to effectively detect horizon or sea-sky-line with complicated background, the accuracy of the calculated roll angle and pitch angle are satisfactory regarding the MAV attitude control requirement.

Keywords: MAV; edge detection; OTSU algorithm; Hough transform; attitude measurement

0 引言

微小型飞行器的自主飞行是实现微小型飞行器达到实用的最关键的技术,其核心技术又在于飞行姿态的稳定与控制,而其前提就是姿态角的测量^[1]。由于微小型飞行器的结构尺寸和有限载荷的限制,不能通过使用常规飞行器使用的角速度或角加速度的积分或垂直陀螺来获得姿态角。利用视觉系统控制微小型飞行器的姿态是近年发展起来的一种先进的定姿方法,其利用机载摄像机摄取图像信息,经图像处理提取并识别相关信息,估计出微小型飞行器的姿态,进而控制飞行器飞行。较为常用的方法之一是通过识别图像中的地平线或者海天线来获得飞行器的姿态信息。

目前的方法,主要是分别针对识别地平线或者海天线的单一方法。在地平线检测方面,文献[2]采用对 RGB 三色聚类的方法来得到天空与地面的分割线,该方法能处理比较复杂背景的地平线分割,但该方法计算量较大,并且先验概率难以确定。文献[3]提出通过统计图像中 Blue 色分量的办法来实现天空与地面的分割,但该方法只能在光照条件好的情况下取得满意的效果,否则会出现误检测的问题。在海天线识别方面,文献[4-5]实验中,在低对比度、高噪声条件下,该方法仍能准确的定位海天线,但是当出现云团干扰、其它较大面积自然干扰时,效果仍不太理想。

考虑到地平线和海天线为直线模型,文中提出一种适合复杂地平线和复杂海天线(文中统称地平线和海天线为分界线)的统一检测算法。具

^{*} 收稿日期:2008-06-24

基金项目:国防基础科研基金资助

作者简介:黄英东(1981-),男,广西梧州人,博士研究生,研究方向:数字图像处理。

体算法是先用 Laplacian-Guass 检测边缘,使用 OTSU 算法得到自适应阈值并得到候选直线,最后采用 Hough 变换检测出分界线。通过识别得到的直线信息,通过计算分别获得微小型飞行器的滚转角和俯仰角。

1 姿态角检测方法

1.1 滚转角计算方法

建立大地坐标系 $O_d x_d y_d z_d$ 与机体坐标系 $O_1 x_1 y_1 z_1$,如图 1 所示。

O_d 为地平线上任一点; $O_d x_d$ 与地平线重合; $O_d y_d$ 轴垂直地面向上; $O_d z_d$ 轴垂直于 $x_d O_d y_d$ 平面。 O_1 取在飞机重心处; $O_1 x_1$ 轴处于飞机对称平面内,与机身轴线一致,指向前方;

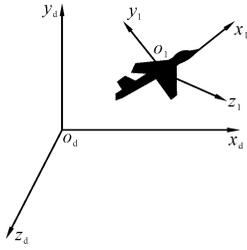


图 1 大地坐标系与飞机坐标系

$O_1 y_1$ 轴也处于对称平面内垂直于 $O_1 x_1$ 轴,指向上方; $O_1 z_1$ 轴垂直于 $x_1 O_1 y_1$ 平面,指向右方。如果要控制飞行器平稳的飞行,则必须要知道它的飞行姿态,即其中俯仰角 θ 与滚转角 ϕ 。

将俯仰角 θ 定义为 $O_1 x_1$ 与地平面的夹角,飞行器抬头时为正;滚转角 ϕ 定义为 $O_1 y_1$ 与 $O_d y_d$ 的夹角,飞行器右倾时为正^[6]。

当飞机在中低空水平飞行时,可以认为地平线在飞行器所处的位置与地球相切,并且与像平面垂直。地平线在像平面上的成像为一条直线,位于像平面的中间位置,把像平面分为两部分。

对于安装在飞机正前方的摄像机,如果得到一幅带分界线的图像,滚转角 ϕ 可以从图像中的分界线的斜率得到。

图像中的分界线可表示为: $y = mx + b$,其中: m 为斜率, b 为截距。

滚转角由下式得到: $\phi = \arctan(m)$ (1)

1.2 俯仰角计算方法

将两部微型摄像机安装在飞机的正前方,其中一部摄像机 A 和飞机的机头轴线在同一直线上,另一部摄像机 B 在飞机的剖平面上,并且与第一部成 10° 角,如图 2 所示。这样,每次拍摄都会形成两张图像。飞机抬头时,分界线在图像中的位置将向下移动;飞机低头时,分界线在图像

中的位置将向上移动。

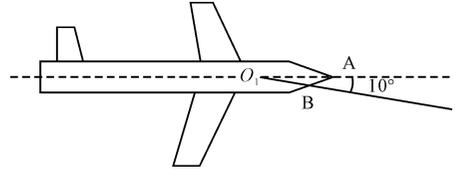


图 2 两个机载摄像机安装示意图

定义俯仰率 δ 为:

$$\delta = \frac{\text{地平线下面图像的面积}}{\text{整幅图像的面积}} \quad (2)$$

其函数表达式为:

$$\delta(x, y) = \frac{2b - xm}{2y}, 0 < x \leq I_w, 0 < y \leq I_H \quad (3)$$

其中: I_w 为图像的宽度, I_H 为图像的高度, m 为分割线斜率, b 为分割线截距。

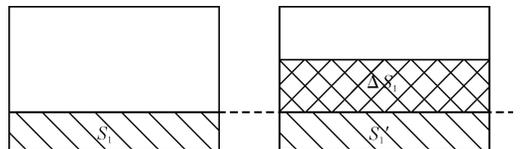
将飞行器在平飞状态时获得的两张图像作为基准图像,如图 3 所示,设它们在分界线下方的面积分别为 S_1 和 S_2 ,整幅图像的面积 S 。 $\delta_1 = S_1/S, \delta_2 = S_2/S$ 。假设在下一个时刻,飞机向下俯冲角度为 θ ,理论上,第一部摄像机获得的图像分界线下增加的面积与第二部摄像机获得的图像分界线下增加的面积基本相等,即 $\Delta S_1 \approx \Delta S_2$ 。为了最大限度消除误差,取:

$$\Delta S = \frac{\Delta S_1 + \Delta S_2}{2} \quad (4)$$

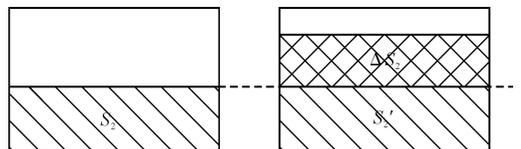
$$\Delta \delta = \frac{\Delta S}{S} \quad (5)$$

于是,俯仰角度满足:

$$|\theta| = \frac{10^\circ \times (\delta_2 - \delta_1)}{\Delta \delta} \quad (6)$$



(a) 基准图像 S_1 与向下俯冲时获得的图像(摄像机A)



(b) 基准图像 S_2 与向下俯冲时获得的图像(摄像机B)

图 3 俯仰角检测原理图

2 分界线检测算法的实现

由于微小型飞行器的飞行环境复杂多变,会

在比较复杂的海面上飞行,比如存在岛屿、礁石、船只等复杂背景的海面;也会在复杂的地面上飞行,比如存在山丘,树林等复杂

背景的地面。这些都会在不同程度上影响地平线和海天线的检测。这就要求算法能够有较好的适应性及鲁棒性,能在不同环境下时对地平线和海天线进行正确检测。文中分界线算法流程如图 4 所示。

2.1 边缘检测

在采集原始图像时,由于光学系统失真、相对运动、大气对流以及其它天气原因,或者在传输过程中噪声污染图像,引起图像质量下降。由于噪声点(灰度与周围点相差很大的点)对边缘检测有一定的影响,所以,在进行边缘检测前,必须滤除噪声。本算法采用 Laplacian-Guass 算法(LoG)进行边缘检测^[7],它把高斯平滑滤波器和拉普拉斯锐化滤波器结合了起来,先平滑掉噪声,再进行边缘检测,得到了更好的效果。

用 LoG 算子对图像 $f(x, y)$ 进行边缘检测,输出结果 $h(x, y)$ 是通过原图像进行卷积运算得到,即:

$$h(x, y) = \left[\left(\frac{x^2 + y^2 - 2\sigma^2}{\sigma^4} \right) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \right] * f(x, y) \quad (7)$$

式中, σ 决定图像中边缘和其他尖锐不连续部分的模糊程度。一般来说, σ 值越大,噪声滤波效果越好,但同时也丢失了重要的边缘信息,影响了边缘检测器的性能; σ 取值太小,有可能平滑不完全而留下太多的噪声。经过实验对比,当取 $\sigma = 2$ 时边缘检测的效果最好,本算法中采样该值。使用 LoG 算子的好处是可以使后续变换的计算量减少。边缘检测后,就可以看到明显的分界线。

2.2 计算自适应阈值并预检测直线

由于不同环境下的图像存在比较大的差异,使用固定阈值的方法,将得不到最优的分割结果。所以文中通过 OTSU 算法计算图像二值化的自适应阈值^[8]。对输入的灰度图像的直方图进行

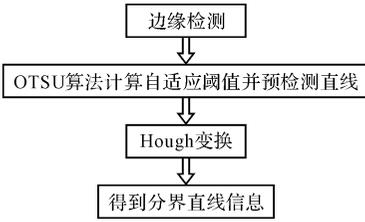


图 4 分界线检测算法流程图

分析,将直方图分成两个部分,并使两部分之间的距离最大,得到的划分点就是最优的阈值。根据得到的阈值进行二值化处理,通过检测相邻直线之间差值的比率,这时就可以得到候选的直线。另外,对于地平线或者海天线不存在的问题,设定一个图像阈值(取为图像宽度的 1/4),如果不存在,则不再进行后续的操作过程。

2.3 Hough 变换^[9]

Hough 变换是一种线描述方法,它可以将笛卡尔坐标空间的线变换为极坐标空间中的点。

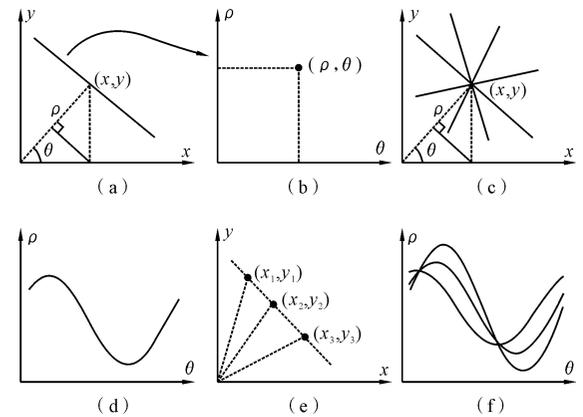


图 5 Hough 变换原理

图 5(a) 是笛卡尔坐标中的一条直线,如果用 ρ 代表直线距原点的法线距离, θ 为该法线与 x 轴的夹角,则可用如下参数方程来表示该直线。这一直线的 Hough 变换为:

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (8)$$

在极坐标中便是图 5(b) 所示的点 (ρ, θ) ,在极坐标里,横坐标为直线的法向角 θ ,纵坐标为笛卡尔坐标原点到直线的法向距离 ρ 。在笛卡尔坐标系中通过公共点的一簇直线(如图 5(c) 所示),映射到极坐标中便是一个点集,这些点集构成一条曲线,其实这是正弦曲线(图 5(d))。因此笛卡尔坐标空间中的一个点对应于极坐标中就是一条正弦曲线。

在笛卡尔坐标中共直线的点(如图 5(e) 中的 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) 三点共线)映射到极坐标系便是共点的一簇曲线(图 5(f))。在图 5(f) 中还可以看到这 3 条曲线的线有两个交点,其实这两个交点所对应的横坐标值即法向角数值相差 180° ,对应到笛卡尔坐标里是同一条直线。

如果令直线的法向角的取值范围为: $-\frac{\pi}{2} < \theta \leq$

$\frac{\pi}{2}$, 其交点就只有一个了。从图 5 中可以看出, Hough 变换使不同的线和点建立了一种对应关系。根据已经得出的候选直线, 只要检测图像中最长的直线, 即可得到分割线。

3 仿真

3.1 滚转角的检测结果

根据文中的方法, 在 Windows 环境下使用 VC++6.0 编写程序来对滚转角的识别进行仿真。图 6 为从两组摄像机序列图像中分别抽取出来的某时刻的陆地图像和海面图像。陆地图像成像不十分清晰且地平线非理想直线; 海面图像则含有大面积云团、海岛、海浪及海岸干扰。图 7 为对两幅原始图像进行边缘检测后的直线识别结果, 并根据识别的直线检测出当前飞行器的滚转角。



(a) 陆地图像



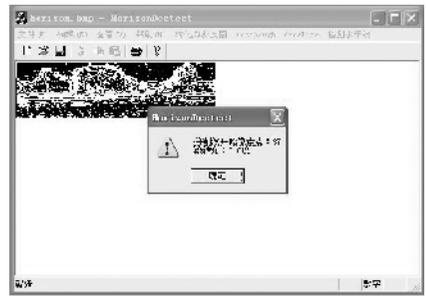
(b) 海面图像

图 6 原始图像

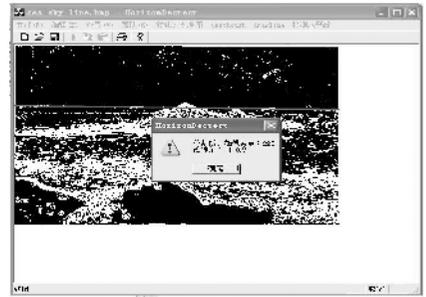
将摄像机拍摄的连续 50 帧图像使用文中方法计算飞行器在各帧时刻的滚转角, 并与机载激光惯性测量元件(IMU)测量结果进行对比, 在图 8 中可以看到计算得到的滚转角曲线与测量得到的滚转角曲线几乎重合, 说明计算值与理论值十分接近, 即精度较高。

3.2 俯仰角的检测结果

图 9 为通过 2 套成像系统获得飞行器俯仰角的实验图。通过文中的算法, 提取出了 4 幅图像的“海平线”。其中, 图 9(a)、图 9(b)为飞行器平飞时的第 1 帧基准图像, 图 9(c)、图 9(d)为第 3 帧, 即飞行器俯仰角为 -10.0° 时的图像。使用式(2)、式(3)计算得到飞行器的俯仰角为 -10.3° 。



(a) 陆地上滚转角检测



(b) 海面上滚转角检测

图 7 检测滚转角角度

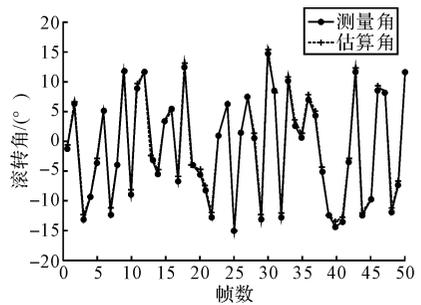


图 8 滚转角测量曲线与计算曲线对比



(a) 识别出地平线的基准图像

(c) 俯仰角为 -10.0° 时的图像(摄像机A)



(b) 识别出地平线的基准图像

(d) 俯仰角为 -10.3° 时的图像(摄像机A)

图 9 俯仰角检测图

跟滚转角类似, 使用连续拍摄的 50 帧图像计算俯仰角, 并与机载激光惯性测量元件(IMU)测量结果进行对比, 从图 10 可以看到, 计算得到的俯仰角曲线与测量得到的俯仰角曲线也是基本重合的。

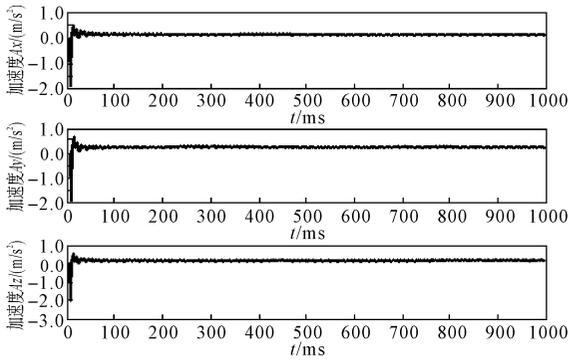


图 8 动态时滤波后的加速度信号

4 结论

不管是静态情形还是动态情形,对于模拟的

(上接第 12 页)

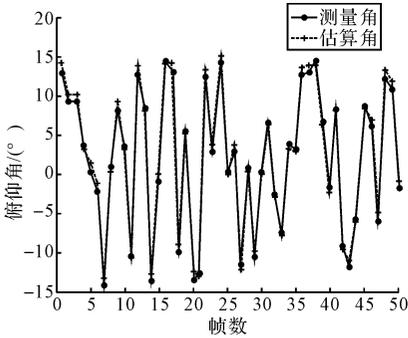


图 10 俯仰角测量曲线与计算曲线

4 结论

1)提出的算法能够准确地识别出一幅图像中的地平线或者海天线,并且通过识别出的地平线或者海天线信息,迅速地估计出飞行器的滚转角和俯仰角。

2)经过与实际测量角对比,证明精度可以满足飞行器的姿态稳定系统的需要,为飞行器的姿态控制提供必要的数据。

3)只需要在飞行器上安装 2 套成一定角度的成像设备即可工作,无需其他的设备,特别适合于体积及载荷有限的微小型飞行器。

参考文献:

[1] S MEttinger, M C Nechyba, P G Ifju, et al. Vision-guided flight stability and autonomy for micro air vehicles[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, 2002, Vol.

弹体内 IMU 输出,通过调整卡尔曼滤波参数,都能得到较好的滤波效果。实际中弹体内 IMU 的输出,参考仿真时得到的滤波参数,进行卡尔曼滤波,可减小由于惯性器件等误差因素所引起的系统误差,从而提高整个系统的导航精度。

参考文献:

[1] 秦永元. 惯性导航[M]. 北京:科学出版社,2006:5-8.
 [2] 高亚楠,陈家斌. 惯性导航系统中的 Kalman 滤波技术[J]. 火力与指挥控制,2005,30(1):1-4.
 [3] Greg Welch, Cary Bishop. 卡尔曼滤波器介绍 [EB/OL]. 姚旭晨 译. http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/media/pdf/kalman_into_chinese.pdf,2006-07-24/2007-07-16.

3:2134-2140.

[2] S MEttinger, M C Nechyba, P G Ifju, et al. Towards flight autonomy: Vision-based horizon detection for micro air vehicles[C]// Submitted to Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Washington D C, 2002.
 [3] Terry D Cornall and G K Egan. Measuring horizon angle from video on a small unmanned air vehicle [C]// 2nd International Conference on Autonomous Robots and Agents December 13-15, 2004 Palmerton North, New Zealand.
 [4] Hajduch G, Lecaille J M, Garello R. Airborne high-resolution ISAR imaging of ship targets at sea [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004,40(1):378-384.
 [5] 刘松涛,沈同圣,韩艳丽,等. 舰船目标海天线提取方法研究[J]. 激光与红外,2003,33(1):51-53.
 [6] 吴森堂,费玉华. 飞行控制系统[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005:9-13.
 [7] Rafael C Gonzalez, Richard E Woods. Digital image processing [M]. Second Edition. Prentice Hall,2003:467-474.
 [8] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on System Man and Cybernetic,1979,9(1):62-66.
 [9] Huichuan Duan, Xiyu Liu, Hong Liu. A nonuniform quantization of Hough space for the detection of straight line segments[C]// Pervasive Computing and Applications, 2007. ICPCA 2007. 2nd International Conference on 26-27 July 2007;149-153.