

从遥感图像估算遥感平台的稳定精度

陈秋林 薛永祺

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘要 提出一种从图像出发, 直接估算机载遥感系统中的陀螺稳定平台稳定精度的方法. 利用飞行 PHI 数据计算出 OMIS 所带的稳定平台的总体稳定精度达到 $\pm 4.33'$

关键词 陀螺稳定平台, 渐变边缘, 边缘检测, 实用型模块化成像光谱仪, 推帚式超光谱成像仪.

ESTIMATING STABILITY PRECISION OF GYROSTABILIZER FROM REMOTE SENSING IMAGE

CHEN Qiu-Lin XUE Yong-Qi

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract A new image-based method to estimate the stability precision of airborne gyrostabilizer was presented. From the PHI image data, the stability precision of the gyrostabilizer equipped with MOIS is $\pm 4.33'$.

Key words gyrostabilizer, ramp edge, edge detection, operative modular imaging spectrometer(OMIS), pushbroom hyper-spectral imager(PHI).

引言

作为遥感平台的飞机在飞行时, 姿态变化频繁不可预测, 而造成机载遥感图像中存在严重的几何畸变, 给图像处理带来很重的负担. 因此, 实用型模块化成像光谱仪 OMIS(Operative Modular Imaging Spectrometer)在系统设计时就考虑了在飞机机体和传感器之间安装一个陀螺稳定平台来稳定传感器的姿态. 从图像的视觉判断看, 平台的作用非常明显. 对仪器来说, 必须对其性能进行定量指标考核, 对于陀螺稳定平台而言就是稳定精度.

直接测定陀螺稳定平台的稳定精度很困难, 要借助一套特殊的装置才能实现. 影响陀螺稳定平台稳定精度的因素主要是漂移, 这种漂移的变化是随机的^[1], 所以平台的稳定精度也是不固定的. 传感器每次获取的数据可以通过图像的视觉判断来大致了解平台的稳定性, 但这只是非常粗糙的定性判断. 我们知道平台的稳定误差将导致传感器姿态的变化, 从而引起获取的图像中存在几何畸变. 如果能知道图像几何畸变的程度及畸变和传感器姿态变化间

的关系, 就能给出获取图像时传感器姿态变化的定量结果. 本文提出从图像直接估算姿态稳定精度的方法.

1 原理及分析

造成图像几何畸变的因素主要有仪器的投影关系和传感器的姿态变化, 这两种因素引起的畸变是交错的, 无法将它们分离开来. 对采用阵列 CCD 推扫的超光谱成像仪 PHI(Pushbroom Hyperspectral Imager), 没有由投影关系引起的正切畸变, 所以 PHI 图像的几何畸变将主要是传感器的姿态变化引起的. 陀螺稳定平台姿态的变化包括俯仰、翻滚和偏航, 俯仰引起图像上的地面目标在顺轨方向的压缩或拉伸, 翻滚在交轨方向上引起目标畸变, 而偏航会在两个方向上均产生影响. 下面以 PHI 的仪器参数和飞行参数为例计算姿态角引起的几何畸变. 飞行高度为 600m, 像元分辨率为 1.8m, 视场角为 21° , 平台的设计精度为 $\pm 4'$. 假设平台稳定误差引起的 3 个姿态角最大误差为 $10'$ (飞机的姿态变化一般在 $2 \sim 5^\circ$), 根据成像关系可以计算出偏航引起的位置误

差在交轨方向最大为 1mm 以下,在顺轨方向为 0.3m;俯仰起的位置误差在交轨方向为 0,顺轨方向为 1.7m;翻滚引起的位置误差在交轨方向最大为 1.8m,在顺轨方向为 0.可见畸变主要是由翻滚角和俯仰角综合引起的.

假设 PHI 遥感器处于理想的平稳状态,那么地面上笔直的目标在图像上也是笔直的.如果遥感器姿态稍有变化,图像上的目标就会发生扭曲,并且图像上的目标偏离线性的程度和姿态变化的大小直接相关.据此我们可以通过计算地面上笔直的目标在图像上偏离线性程度来估算遥感平台的姿态变化.

假设地面上的某个目标(比如一段高速公路)是笔直的.由于遥感器姿态的变化,图像上的目标出现相应程度的扭曲.根据其在图像上的边缘点可以拟合出一条直线,拟合误差则反映了边缘点偏离线性的程度^[3],并以此作为姿态稳定的度量.但在实际应用中,首先,要保证边缘点提取得非常精确,其次,在图像上边缘点是一些离散的点,直接用这些点去进行线性拟合会产生很大的拟合误差.所以必须首先解决好这两个问题.

1.1 精确的边缘提取

对边缘提取的图像处理研究已进行了多年,并已经提出了许多非常实用的边缘提取算法.

一方面,我们在考察这些算法时要考虑 3 个因素:(1)算法对噪声的敏感程度,图像中总是或多或少存在一定程度的噪声,如果算法对噪声非常敏感,那么它的实用价值就不大;(2)算法的定位精度,因为在这里提取目标的边缘通常是为了识别,而识别的目的是要回答图像中是否有某类目标,如果有,要确定它的位置和属性,所以对于边缘定位的精度有很高的要求;(3)要最大限度地压制错误检测概率,也就是提高算法的可信度.

另一方面,在边缘提取算法讨论中,对于阶跃边(step edge)讨论得较多,并且总是假定边缘处于高斯白噪声的淹没中.实际上,理想的阶跃边只有在模拟生成的图像中才存在.由于图像获取系统的响应总有一定的带宽,而不是理想的冲激响应.所以边缘在实际图像中总是以渐变边缘(ramp edge)的形式存在.而对于渐变边缘中分界点的确定也是非常困难的, Maria Petrou^[3]提出了一种渐变边缘模型.

考虑到前面提到的 3 个因素,对于一维的情形来分析最优的边缘检测算子,先假设要检测的渐变边缘轮廓可以用下面的模型函数来模拟:

$$c(x) = \begin{cases} 1 - e^{-sx}/2, & (x \geq 0) \\ e^{sx}/2, & (x \leq 0) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, s 为一正常数.

再假设我们所求的用于检测边缘的一维卷积滤波函数为 $f(x)$,它必须具有如下性质:(1) $f(x)$ 函数是反对称的,即 $f(x) = -f(-x)$;(2) $f(x)$ 在有限的范围内函数值将由正值变到 0,即存在有限的半宽度 ω ,即 $f(\pm\omega) = 0$,并且当 $x > \omega$ 时, $f(x) = 0$;(3) $f(x)$ 在 $(-\omega, 0)$ 范围内有一个极值点.

根据 Canny 理论, $f(x)$ 的信噪比可以定义为

$$S = \frac{\int_{-\omega}^0 f(x)[1 - e^{-sx}] dx}{\int_{-\omega}^0 |f(x)|^2 dx}, \quad (2)$$

$f(x)$ 的定位精度定义为

$$L = \frac{s^2 \int_{-\omega}^0 f(x) e^{sx} dx}{\int_{-\omega}^0 |f'(x)|^2 dx}, \quad (3)$$

$f(x)$ 压制错误检测的能力定义为

$$C = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{\int_{-\omega}^0 |f'(x)|^2 dx}{\int_{-\omega}^0 f''(x)^2 dx}}. \quad (4)$$

最后使

$$P = (SLC)^2 \quad (5)$$

最大,由拉格朗日乘子的方法可以求出 $f(x)$.

对于图像中的边缘而言必须考虑二维的情形,没有办法从一维的最优检测算法推广出二维的最优检测算法,只能根据一维下的最优滤波器推导出一个二维的最优滤波器.经过此滤波器的平滑滤波后,图像中的边缘可以恢复成阶跃边来处理.

实验表明 Canny 算子对于经过此滤波后的图像检测出的边缘在信噪比、定位精度和错误检测率方面效果最好.

1.2 离散像素点的线性拟合

图像和计算机屏幕一样,是以离散的像素或点为基本单位.在屏幕上画出一条理想直线是由一些由像素组成的锯齿形状组成,画直线最好的算法是 Bresenham 算法,由于它不需要乘法和除法,而只有加减法,所以速度很快.如果想从离散的像素点拟合出原来的直线,我们会发现线性拟合的误差非常大,并且其大小与直线斜率有关.对直接从 Bresenham 算法画出的直线的像素进行线性拟合得到的误差达到 0.9722 像素.为了分析实际图像中检测出来的离散边缘点的拟合误差,必须消除 Bresenham 算法的影响.



图1 理想的阶跃边图像
Fig.1 The ideal step edge image



图3 图2 旋转后使得阶跃边接近水平
Fig.3 The rotated Fig.2 where the step edge is approaching horizon



图2 图1 经过高斯模糊($r=3$)后的图像
Fig.2 Image of Fig.1 blurred by a Gaussian blurring filter ($r=3$)

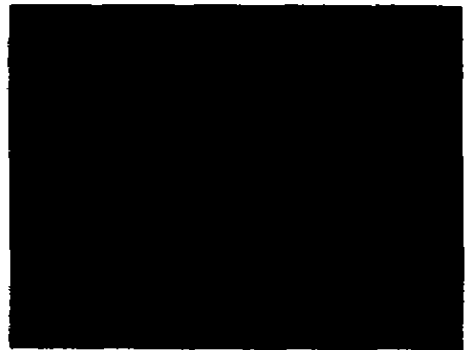


图4 从图3 检测出来的边缘图像
Fig.4 The edge image detected from Fig.3

仔细分析 Bresenham 算法可以发现,对于斜率接近于 0 的直线拟合误差非常小,且接近为 0. 据此,我们可以将任意方向的直线目标旋转到水平方向来分析,从而消除离散像素拟合所产生的系统误差.

1.3 边缘检测精度分析

我们对边缘的定位精度进行了分析.图 1 为一理想的直的阶跃边图像.图 2 为图 1 经过 Gaussian 模糊(模糊半径为 5 个像素)后的图像.图 3 为图 2 旋转到使边缘接近水平时的图像.图 4 为用前文介绍的滤波加 Canny 算子的方法对图 3 进行处理得到的边缘图像.最后得到的线性拟合误差几乎为 0.用

不同的图像测试结果表明,用这种方法计算得到的线性拟合误差均接近于 0. 由于上面的分析已经指出,水平的离散边缘点的线性拟合误差接近于 0,所以水平边缘检测的误差也接近于 0.这不仅说明了边缘检测算法非常可靠,而且说明在图像旋转过程中,并没有引入额外的误差.

2 实验结果与分析

从 1999 年 9 月 PHI 获取的图像中,选取 4 个分别包含机场跑道和高速公路的目标区域(参见图 5),运用上面论述的方法计算得到的线性拟合结果如表 1.

在计算过程中,图像都是旋转到目标边缘最接近水平的位置,以最大限度地消除离散像素线性拟合的误差.从上面的分析得知,稳定平台姿态(翻滚)变化的大小为 0.4198 像素,PHI 的空间分辨率为 3mrad,稳定平台的姿态(翻滚)稳定精度用角度表示为 $\pm 4.33'$,这是 3 个姿态角变化综合作用的结果.对于翻滚、俯仰和偏航单个指标的精度,有待于进一步研究.

表 1 4 幅 PHI 图像中的边缘的线性拟合结果
Table 1 The linear fitting results of edges in four PHI images

测试图像	斜率 k	截距 b	线性误差
图 5(a)	0.0116	141.0480	0.4331
图 5(b)	-0.0060	56.6752	0.5953
图 5(c)	-0.0114	129.9158	0.3952
图 5(d)	0.0120	86.2137	0.2556
平均值			0.4198

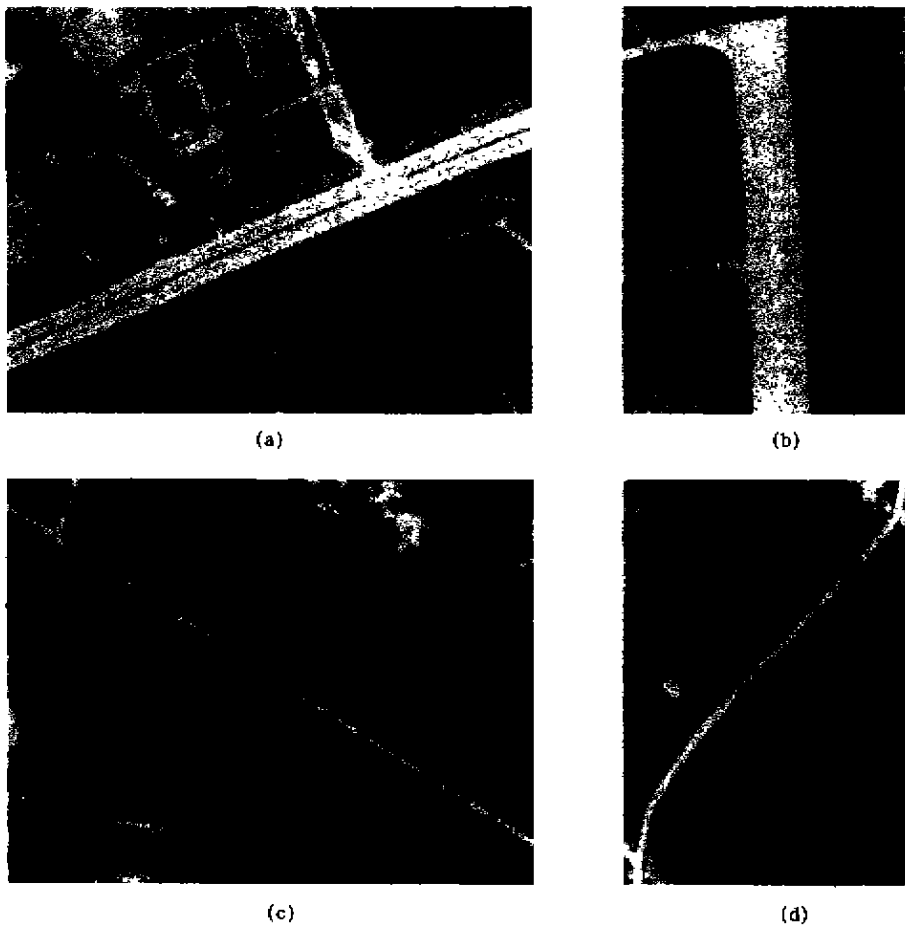


图5 测试用的 PHI 图像
(a)、(c)、(d)各包含一段高速公路 (b)包含一段机场跑道

Fig. 5 PHI images for test
(in each of(a),(c),(d), a part of an expressway is shown, in(b), a runway is shown)

3 结语

本文采用将最优滤波和 Canny 边缘检测算子结合起来的边缘提取算法,通过分析指出离散像素点直接进行线性拟合方法中存在较大的拟合误差,并提出一种将图像旋转到目标边缘接近水平的情形下进行线性分析的方法.通过分析算法的误差和最后的实际应用结果,指出 PHI 飞行中所带的平台综合姿态(翻滚)稳定精度达到 $\pm 4.33'$. 对于俯仰和偏航单个指标的精度,有待进一步工作.

REFERENCES

- [1] Charles Broxmeyer. *Inertial Navigation Systems*. New York: McGraw-Hill, 1964, 110—131
- [2] MAO Ying-Tai. *Error Theory and Precision Analysis*. Beijing: Defence Industry Press(毛英泰. 误差理论与精度分析. 北京:国防工业出版社), 1982, 47—71
- [3] Maria Petrou, Josef Kittler. Optimal edge detectors for ramp edges. *IEEE Trans. On PAMI*, 1991, 13(5): 483—491