第 11 卷 第 6 期
2003 年 12 月

光学 精密工程
Optics and Precision Engineering

Vol. 11 No. 6
Dec. 2003

文章编号 1004-924X(2003)06-0602-05

舰船图像序列电子稳定算法的研究

赵红颖[1], 晏 磊[1], 熊经武[2]
(1. 北京大学 遥感与地理信息研究所, 北京 100871;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:分析了船载摄像系统获取的图像序列的特点,提出了稳定舰船图像序列的特征点电子稳像算法。详细地阐述了实现此算法的关键步骤:获取图像特征点,确定图像运动矢量和校正图像序列等。通过分析实际工作中舰船摄像系统的运动状态,进一步简化算法,提高了算法的精度。将此算法应用于舰船图像序列稳定实验,分别采用图像差值和图像序列的逼真度对稳定的结果进行了评定。试验和评定的结果表明,这种特征点稳像算法能够实现实时准确地稳定舰船图像序列。

关 键 词:电子稳像;图像序列;特征量
中图分类号:U674.7; U675.79 **文献标识码**:A

Image composition based on EIS model

ZHAO hong-ying[1], YAN Lei[1], XIONG Jing-wu[2]

(1. *Institute of Remote Sensing and Geography Information System, Peking University, Beijing* 100871, *China*;
2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)

Abstract: The characteristics of image sequence acquired in a ship-borne TV reconnaissance system are analyzed, and an electronic image stabilization algorithm based on these features is proposed. Detection of image features, estimation of image motion vector, and ways of image composition are detailed. The algorithm can be simplified according to the real motion state of the ship-borne TV reconnaissance system to achieve high precision. The ship image sequence can be stabilized using this algorithm and the results can be assessed by the fidelity of image sequence and image difference. Test results show that this algorithm can be used to achieve better real-time stabilization of image sequence.

Key words: electronic image stabilization; image sequence; features

1 引 言

由于载体的运动导致了舰船图像序列的不稳定,特别是采用长焦距、高分辨率摄像系统时,图像序列的晃动量大,使观测者易产生疲劳,无法正常地对目标进行跟踪和监视。以往采用陀螺稳定平台对舰船上的摄像系统直接进行稳定,但是稳定精度和稳定效果较差,功耗大,而进一步提高其稳定精度又因技术难度大而难以实现。目前,电

收稿日期:2003-04-12;**修订日期**:2003-10-14.

子稳像是一种新的稳像方法,该方法利用数字信号处理等技术实现实时、高精度地稳定由摄像机载体运动导致的失稳图像,近几年来得到了广泛的应用[1-3]。利用电子稳像稳定的图像序列要求每一帧都是清晰的,图像不稳定的原因主要是序列图像中相邻帧间图像不重合,由于人的视觉暂留原因,在监视器上显示时是不稳定的,甚至是模糊的。所以,电子稳像就是要去除图像序列中不需要的晃动量,使处理后的图像稳定而清晰。

电子稳像技术主要解决 3 个问题:(1)选取图像上的特征量;(2)获取图像运动矢量;(3)校正图像序列。电子稳像的稳像算法是围绕上述几个关键问题提出的。稳像算法有多种[4],在实际应用中应根据图像特点选取稳像算法。

2　舰船图像的稳定

舰船图像序列的稳定包括 2 个模块。运动估计模块,通过跟踪一组特征点,求取特征点的位移量,利用特征点按照二维运动模型估计图像帧间运动量。将估计的帧间图像运动量送入图像校正模块,此模块存储了摄像机运动的全部信息,根据帧间运动量和摄像机的运动状态进行校正,最终获得稳定的图像序列。

2.1　运动估计

图像的运动矢量估计基本方法是对相邻两幅图像作相关运算得到差值,此方法计算量大,很难实现实时处理,所以 Kenya, Hansen 等人相继提出了改进方法[5]。Kenya 提出分区选取代表点匹配法,大幅度减小了计算量,但是由于代表点是图像传感器确定位置上的点,不一定能代表图像灰度的变化。因此,Hansen 在此基础上又提出了选取图像特征量代替代表点,用多分辨率的特征跟踪算法(FTA),通过高斯金字塔分级检测特征量实现运动估计,不仅减小计算量,而且提高了运动矢量的估计精度。

在应用 FTA 算法时会面临一个严重问题:在真实场景中,各特征量所处的环境往往很复杂,其中经常有各种干扰,如目标的遮盖、景物的阴影、背景的变化等,这些变化使得特征量的跟踪变得十分困难。但是,如果事先对要处理的目标的某些信息(如几何结构信息)有所了解的话,将这些知识用于本项工作中就能使在特定条件下的特征量的跟踪变得比较简单而且可靠。主要被利用的特征量有:角点、直边缘、曲边缘等等局部特征和形心、表面积、惯量矩的长短轴等全局特征。在具体应用中,采用什么特征主要看目标具有那些特性。舰船图像序列如图 1 所示,被摄景物在海面上,景物比较简单而且有特点,图像上角点和直角边较多且易于提取。实验表明采用角点更为方便,所以采用角点作为算法的特征点。

选定特征量后,在参考图像(相邻帧是前一帧图像)上确定搜索区域,在搜索区域内作如下匹配运算:

$$\mathrm{MAE}(i,j)=\frac{1}{N^2}\sum_{k=1}^{N}\sum_{l=1}^{N}\left|X_t(k,l)-X_{t-1}(k+i,l+j)\right|,\tag{1}$$

MAE 是帧间绝对差,$N\times N$ 是搜索区的大小,i, j 是图像相对于参考图像分别在 x, y 方向的位移量。$X_t(k,l)$ 为 t 时刻图像上 (k,l) 坐标处的像素值。随着 i, j 的变化,当 MAE 得到其最小值时,对应着最优匹配,此时的 i, j 即估计的特征点的位移量。

2.2　图像校正算法

每一个特征点的位移量是用 (i,j) 来表示的。这是一个平移量,而由于载体的运动引起的图像运动不仅有平移,同时还有旋转运动,所以不能简单地将特征点的位移量作为图像的运动量。求取图像的运动量首先要建立图像运动的数学模型,再将获得的特征点的位移量代入模型中求得所需的运动矢量。数学模型的建立如下:

首先,当假设载体的运动导致连续两帧图像发生旋转、平移和变焦变化时,那么由同一视角,不同位置处获得的两帧图像间的图像运动模型为:

$$p_1=sR_e p_0+T,\tag{2}$$

p_0, p_1 分别是 t_0, t_1 时刻图像的特征点的坐标向量。T 是二维平移量,s 是变焦系数,R_e 是正交的旋转矩阵,定义如下:

$$R_e=\begin{pmatrix}\cos\theta & -\sin\theta\\ \sin\theta & \cos\theta\end{pmatrix},\tag{3}$$

参数 θ 定义为绕光轴的旋转角。需要说明的是,式(2)是应用在图像有平移、变焦和旋转运动时的数学模型,如果图像还有其他运动,则模型的形式将更为复杂。另外式(2)中的旋转运动是假设旋转中心在图像光轴上的运动,对于实际运动的图

像,这只是一个理想情况,但为了简化计算,通常还是将旋转中心转换到图像光轴上,具体方法视具体应用情况来定。在第 3 节中介绍了在稳定舰船运动图像序列时进行旋转中心转换的方法。由于相邻两帧图像间的旋转量很小,所以式(2)可简化为下式:

$$\begin{pmatrix} x_{ik} \\ y_{ik} \end{pmatrix} = S\begin{pmatrix} 1 & -\theta \\ \theta & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x_{jk} \\ y_{jk} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix}, \quad k = \{1, \cdots, N\}, \tag{4}$$

然后,利用特征点的位移量代入运动模型中估计图像运动量并校正。

N 为特征点的数量。由 N 个特征点得到 $2N$ 个关于变量(θ、Δx、Δy)的线性等式,由图像的变换,得到下式中的 3 个矩阵向量:

$$\bar{b} = \begin{pmatrix} x_{i1} - sx_{j1} \\ y_{i1} - sy_{j1} \\ \vdots \\ x_{iN} - sx_{jN} \\ y_{iN} - sy_{jN} \end{pmatrix}; \quad A = \begin{pmatrix} -sy_{j1} & 1 & 0 \\ sx_{j1} & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -sy & 1 & 0 \\ sx_{jN} & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad \bar{x} = \begin{pmatrix} \theta \\ \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix}, \tag{5}$$

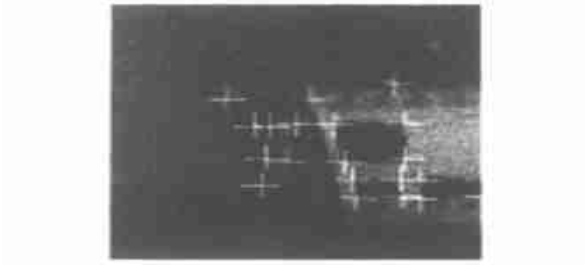
3 个矩阵向量式的关系为:$\bar{b} = A\bar{x}$;所以,得到

$$\bar{x} = (A^{t}A)^{-1}A\bar{b}, \tag{6}$$

变焦系数 s 可利用公式单独计算,然后再代入式(6)中求取其他参数。而且,变焦系数可以根据给出的摄像机焦距值得到,此方法简单、准确。

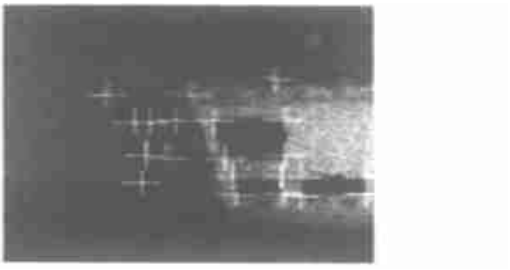
3 实验结果

图 1 所示是船上摄像系统获得的图像序列中的两帧图像(不采用相邻帧图像是因为变化量太小,效果不明显),由于船体的晃动导致这两帧图像不重合,图像序列不稳定。首先选取图像的特征点,这里选用图像上的角点,如图 1(a、b)上白色标记点所示。



第 1 帧图像

(a) The first image



第 10 帧图像

(b) The tenth image

图 1　图像序列中的两帧图像

Fig. 1　Two images of an image sequence

因为图像有旋转、平移运动,是否有变焦运动不清楚,所以用公式(4)所示的数学模型。首先,要确定图像的旋转中心,因为电子稳像是在船的陀螺稳定平台进行的二次稳定,稳定的是稳定平台残差导致的图像晃动。因此,在实际运动中,图像的旋转中心不会在图像的中心上。那么如何确定图像的旋转中心呢?由于图像的旋转是由摄像机载体/船的晃动导致的,所以这个旋转中心应该在船体上,而不在摄像机靶面上,当然也就不在图像像面上。通常很难确定这个旋转中心。为了解决这个问题,可作如下分析:

假设船体的质心 O 点,并以此为中心旋转了 θ 角,但船体上的 O 点难以确定,所以通常以摄像机的靶面中心(C 点)为旋转中心,因此当摄像机绕 O 点由 C 点旋转到 C' 点时,如图 2 所示,图像的运动可以分解为 CCD 摄像机靶面旋转了 θ 角和平移了 Δx,Δy 量。其中 Δx 和 Δy 可以由下式计算:

$$\begin{cases} \Delta x = H\sin\theta \\ \Delta y = H - H\cos\theta \end{cases}$$

其中 H 是摄像机靶面中心到船体质心 O 的距离。这两个分量对应到摄像机靶面上的变化量为 $\Delta x'$,$\Delta y'$,根据成像原理有:

$$\begin{cases} \Delta x' = f/D \times \Delta x = (fH/D)\sin\theta \\ \Delta y' = f/D \times \Delta y = (fH/D)(1 - \cos\theta) \end{cases}, \tag{7}$$

其中,f 是摄像机的焦距,D 是摄像机的作用距离。

作为一个实际应用的例子,即在陀螺稳定平台稳定的基础上进行的二级电子稳像,由于稳定平台的残差较小,所以以旋转角 $\theta = 0.5°$ 为例计算 $\Delta x'$,Δy 值。此时设焦距 $f = 1.2\,\mathrm{m}$,作用距离

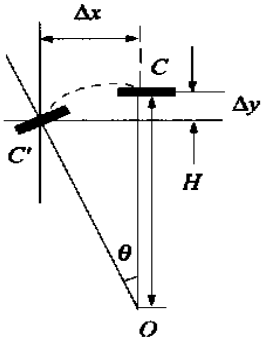


图 2　摄像机的旋转

Fig. 2　Rotation of camera

D = 5 km, H = 1 m, 摄像机靶面尺寸为:6.6 mm ×4.8 mm,像素数 752 ×582。计算 $\Delta x'$, Δy 值为:

$$\Delta x' = 2.09\ \mu m,\ \Delta y' = 0.009\ 18\ \mu m,$$

已知摄像机靶面上一个像素的尺寸为:8.8 μm × 8.2 μm,由此可见,当旋转角较小时, x, y 方向的分量成像到摄像机靶面上还不到一个像素,因此可以在忽略平移分量仅保留旋转量的前提下将旋转中心移动到摄像机靶面的中心处,也就是图像的中心,从而解决了图像旋转中心的问题。如果 H 值很大,旋转产生的平移不能忽略时,也可以对其进行校正,只是补偿时要复杂些。然后,利用公式计算 s, s 近似为 1,说明图像没有变焦量。然后将 36 个图像特征点在两帧图像上对应的坐标带入公式 (4) 中,计算旋转、平移量 (θ、Δx、Δy)。个别点由于图像的变化误差较大,而公式 (4) 是非线性方程组,求的是近似解,所以这些点对解的影响不大,计算结果为 (θ、Δx、Δy) = (0.035,4, - 1)。利用 (θ、Δx、Δy) 值校正第 10 帧图像。图 3(b) 是校正后的第 10 帧图像,由图 3(b) 可知图像校正后在原图像面内(黑色线框内),图像信息有所丢失(白色边缘)。

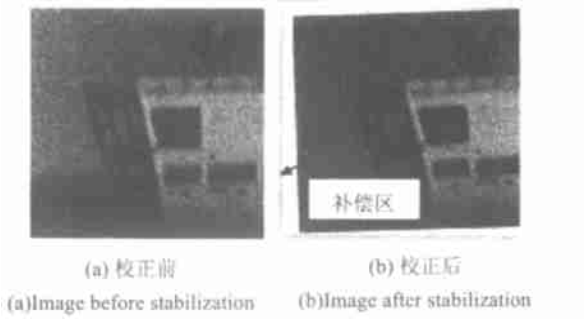


图 3　图像补偿

Fig. 3　Image compensation

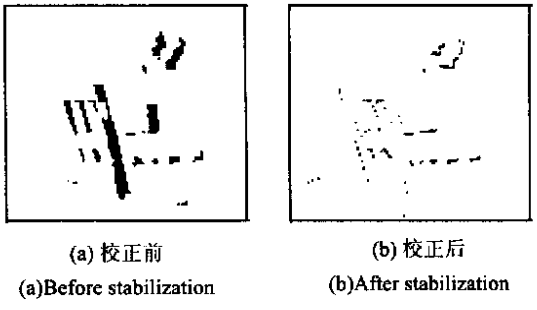


图 4　两幅图像的差值图

Fig. 4　Difference of the two images

图 3 显示的效果不直观,所以给出图 4 所示的稳像效果。图 4(a) 是未校正图像前的两帧图像的差值,图 4(b) 是将第 1 帧图像校正后与第 2 帧图像的差值,显然,校正后的两帧图像基本重合,保证了图像序列的稳定。

图 5 是具有代表性的图像序列。图像序列在稳定前,其图像的快速跳动和大幅度的晃动都使人眼无法正常地进行观察。通过稳像算法处理后,达到图像稳定的效果。图 5 中的各帧图像是在监视器上显示的稳定后的图像序列,水天线和目标船体位置不变,连续显示整个图像序列时,图像序列清晰稳定。图中边框处的黑色部分是每帧图像相对于参考图像的晃动量,也是图像补偿量。

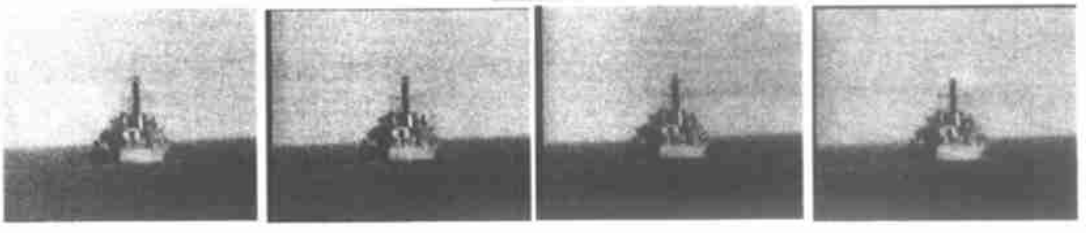


图 5　舰船图像的稳像效果

Fig. 5　Stabilization results for the sequences of the ship

本系统的实验结果与实验数据均是在 P Ⅲ 733CPU ,256M 内存 ,32M TNT2 显卡以及加拿大的 Meteor 图像采集卡的平台下获得的。利用水天线稳定舰船图像序列的方法,可实现获取图像帧间位移矢量的处理时间在 6 ms 以内,图像补偿时间在 16 ms 以内,保证了舰船图像序列实时处理小于 25 f/ s 的要求。利用灰度投影拟和算法稳定图像的处理时间为 22 ms。

4 结　论

采用特征点获取图像运动矢量的方法重点是(1)准确识别特征点;(2)建立正确的图像运动的数学模型。通过稳定实际图像序列的结果表明,本文采用的角点法和图像运动数学模型较好地实现了舰船图像序列的稳定,而且当图像上的运动较为复杂时,还可将图像分成多个区域,分别对每个区域进行校正,再对每个区域的校正结果进行综合处理。

参考文献:

[1] BALAKIRSKY S. *Comparison of electronic image stabilization systems* [D]. Master's thesis, Departmemt of Electrical Engineering ,University of Maryland ,Collage Park ,1995.

[2] MAHEUX J. Video-rate stabilization system[J]. *SPIE*, 1998 ,3414 :232-238.

[3] CENSI A. Image stabilization by feature tracking[A]. 10th *International Conference on Image Analysis and Processing*, *IEEE* [C]. 1999 :665-667.

[4] 赵红颖,金宏,熊经武. 电子稳像技术概述[J]. 光学 精密工程,2001 ,9(4) :353-359.
ZHAO H Y, JIN H, XIONG J W. Overview of the electronic image stabilization technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001 ,9(4) :353-359. (in Chinese)

[5] HANSEN M. Real-time scene stabilization and mosaic construction[C]. In Proc. DARPA Image Understanding Workshop , CA ,1994.

作者简介:赵红颖(1971 -),女,吉林长春人,北京大学地空学院遥感所博士后,主要研究方向为遥感数字图像处理、电子稳像技术。