

文章编号 1004-924X(2009)04-0895-06

航空斜视成像异速像移的实时恢复

李 仕^{1,2}, 张 葆¹, 孙 辉¹

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:提出了一种异速像移补偿算法,解决了航空相机斜视工作时成像靶面的异速像移补偿问题。当载机侧身飞行时,航空相机会处于斜视状态,成像靶面上会同时出现多个不同大小的像移量,生成复杂的运动模糊图像。提出的方法通过对异速像移产生机理的分析,根据像移量的不同将图像分成多个区;然后将各区图像继续细分到像素线来提高算法的运算效率;最后,用一维维纳滤波并行处理各像素线,将处理结果合并成结果图像。实验表明:运用本文算法的并行方案在GPU平台下17.11 ms内能恢复一帧2 048 bit×2 048 bit斜视模糊图像,恢复结果的峰值信噪比(PSNR)达到30.469,图像细节得到有效恢复。

关键词:航空成像;像移补偿;斜视状态;并行计算;GPU

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A

Real-time restoration for aerial side-oblique images with different motion rates

LI Shi^{1,2}, ZHANG Bao¹, SUN Hui¹

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: Aerial cameras on the aircraft will work with a side-oblique angle, when aircraft flies in a steep state, and many image motions with different rates occur on the focal plane array simultaneously. To compensate the different rates of image motion, an image algorithm is presented to improve the quality of blurred motion images in the aerial camera system. On the basis of the mechanism of the image motion with different rates generated in side-oblique situation, the entire blurred image is segmented into many slices by their different motion rates. Then, the slices are divided into pixel lines continuously to improve the computing speed, and a specific parallel computing scheme with 1D Wiener filters is utilized to restore all the pixel lines. Finally, a restored image is obtained by processed pixel lines combined together. The experimental results show that the proposed parallel computing algorithm can restore a blurred image of 2 048 bit×2 048 bit in 17.11 ms, with the help of the parallel computing capability of a GPU, and can offer good image details with a Peak Signal Noise Ratio (PSNR) of 30.469.

Key words: aerial imaging; image motion compensation; side-oblique situation; parallel computing; GPU

收稿日期:2008-05-16;修订日期:2008-07-18.

基金项目:国防科技基础预研基金资助项目(No. 1040603)

1 引言

在侦察过程中,侦察机为躲避雷达的监视,常需要做高速低空(高速高比)飞行,这时航空成像不可避免地会出现像移模糊^[1]。像移模糊的形成与载机的飞行姿态紧密相关,载机的飞行速度、高度、翻滚角度、偏航角度、俯仰角度等参数的不同均会产生不同的像移形态。其中当载机侧身飞行或镜头向侧方俯仰成像的时候,载机上的航空相机会处于一种斜视工作状态。这时成像靶面上不同位置会有不同速度的像移产生,生成复杂的运动模糊图像。

针对斜视状态下的航空像移补偿,国内外常用的方法有:帧转移 CCD 分区独立像移补偿技术^[2]、移动焦平面像移补偿技术^[3-4]、焦平面快门调节补偿技术^[5]等。但帧转移 CCD 价格昂贵,而机构补偿技术消耗较大载机空间和载重。在多种像移同时作用下,常用的像移补偿算法^[6](如维纳滤波算法)是无法对其进行有效补偿的,这也是一直以来航空斜视成像系统采用事前补偿技术来补偿像移的主要原因。本文提出一种针对斜视状态下航空像移的补偿算法,解决斜视状态下变速像移作用时模糊图像的补偿恢复问题。

2 斜视状态下的像移补偿

2.1 斜视像移分析

载机飞行时常会根据需求做出俯仰、翻身(滚动)、偏航等飞行姿态,当载机侧身飞行的时候,载机上的航空相机会处于一种斜视工作状态,地面上的景物通过镜头光学系统后会在 CCD 靶面上产生不同的像移(如图 1 所示)。假设载机的对地飞行速度为 v_{flight} ,飞行高度为 H ,镜头横向的俯仰角度为 δ ,镜头的焦距为 f ,镜头半视场角为 θ ,则地面远景点在 CCD 阵面上的像移速度为:

$$v_F = f \left(\frac{v_{\text{flight}}}{H} \right) \frac{\sin(\delta - \theta)}{\cos \theta}, \quad (1)$$

地面近景点在 CCD 阵面上的像移速度为:

$$v_N = f \left(\frac{v_{\text{flight}}}{H} \right) \frac{\sin(\delta + \theta)}{\cos \theta}, \quad (2)$$

近、远景点间像移速度比值为 $\frac{v_N}{v_F} = \frac{\sin(\delta + \theta)}{\sin(\delta - \theta)}$,当 θ 取固定值时, v_N/v_F 值随俯仰角 δ 的减小而增大,

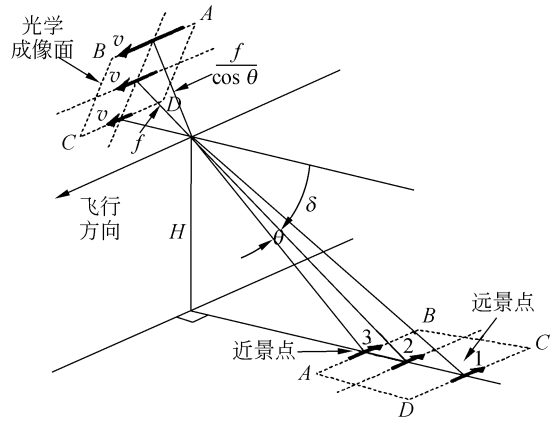


图 1 斜视状态图像运动补偿分析

Fig. 1 Analysis of side-oblique image motion compensation

当 δ 变动范围在 $[90^\circ, \theta]$ 时, v_N/v_F 取值范围为 $[1, +\infty)$ 。这说明镜头的横向俯仰角度对地面远近物点在 CCD 面上对应像点的像移速度差值影响很大,随着 δ 的减小像移速度差异已经无法近似忽略。

为描述一般像点的像移速度,引入当前物点所处的视场角 φ ($-\theta \leq \varphi \leq \theta$),视场角相对视场中心向上为正,向下为负。则可得到 CCD 靶面上一般像素点的像移速度:

$$v = f \left(\frac{v_{\text{flight}}}{H} \right) \frac{\sin(\delta - \varphi)}{\cos \theta}. \quad (3)$$

由于同一 CCD 面阵上,像点的曝光积分时间 T 是相同的,由式(3)得到不同视场角 φ 下像素点的像移量 \tilde{L} :

$$\begin{aligned} \tilde{L} = & f \cdot \frac{1}{c} \cdot \left(\frac{v_{\text{flight}}}{H} \right) \cdot T \cdot \frac{\sin(\delta - \varphi)}{\cos \theta} = \\ & f \cdot \frac{1}{c} \cdot \left(\frac{v_{\text{flight}}}{H} \right) \cdot T \cdot (\sin \delta - \cos \delta \cdot \tan \varphi), \end{aligned} \quad (4)$$

其中, c 为 CCD 像元尺寸。由式(4)知道,在俯仰角 δ 一定情况下,像移量随视场角的增大而减小。针对这种相同方向下并行存在不同像移量(参见图 2)的算法补偿,一般的维纳滤波方法很难实现像移模糊的有效恢复,本文提出一种按视场角大小对图像进行分割的方法,使用一维维纳滤波(1DWF)对图像进行补偿恢复。

2.2 图像分割

2.2.1 点扩散函数的建立

由式(4)像移量 \tilde{L} 与物点所处视场角 φ 的单

调递减关系,确定斜视状态下航空成像的同一帧图像中像移量的最大、最小值分别在视场的近景点和远景点(如图 1 所示):

$$\tilde{L}_{\min} = L_F = f \cdot \frac{1}{c} \cdot \left(\frac{v_{\text{flight}}}{H}\right) \cdot T \cdot (\sin \delta - \cos \delta \cdot \tan \theta), \quad (5)$$

$$\tilde{L}_{\max} = L_N = f \cdot \frac{1}{c} \cdot \left(\frac{v_{\text{flight}}}{H}\right) \cdot T \cdot (\sin \delta + \cos \delta \cdot \tan \theta). \quad (6)$$

由于补偿算法是以像素为单位的运算,这里对式(4)、(5)、(6)中的 \tilde{L} 、 \tilde{L}_{\min} 、 \tilde{L}_{\max} 进行离散化(四舍五入)得到 L 、 L_{\min} 、 L_{\max} 。设差值为 ΔL :

$$\Delta L = L_{\max} - L_{\min}. \quad (7)$$

通过载机上的全球定位系统(GPS)和惯性导航系统(INS)能精准地获得载机对地飞行速度 v_{flight} 、飞行高度 H 、镜头俯仰角度 δ ,结合镜头的焦距 f 及镜头半视场角 θ 能够实时地确定 ΔL 的值。由此动态地得到 $\Delta L + 1$ 个的模糊像移量:

$$L = L_{\min} + n (0 \leq n \leq \Delta L). \quad (8)$$

根据式(8)得到如下 $\Delta L + 1$ 个点扩散函数

$$h(x, n) = \begin{cases} \frac{1}{L}, & x = 0, 1, \dots, L-1 \\ 0, & \text{其它} \end{cases}, \quad (9)$$

其中, n 表示当前图像中的第 $n + 1$ 个点扩散函数 $h(x)$, ($0 \leq n \leq \Delta L$)。

2.2.2 图像的分割及点扩散函数的分配

由于将式(4)的结果 \tilde{L} 取整离散化为 L , 原来处于区间 $[L - \frac{1}{2}, L + \frac{1}{2})$ 的像移量 \tilde{L} 均被赋值为

L 。此外根据式(4)能求得像移量 $L - \frac{1}{2}$ 与 $L + \frac{1}{2}$

分别所对应的视场角 φ_1 与 φ_2 , 则处在视场角 φ_1 与 φ_2 间的物点在 CCD 上所成的影像构成一个矩形区域, 该区域内的图像可以近似地被认为具有相同像移量 L 。据此可以将斜视状态下所拍摄的航空图像分割成图 2 所示的 $\Delta L + 1$ 个平行区域。根据示意图(图 3)每个区域宽度的像素数 d 为:

$$d = \frac{f}{c} \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2). \quad (10)$$

由式(4)得到

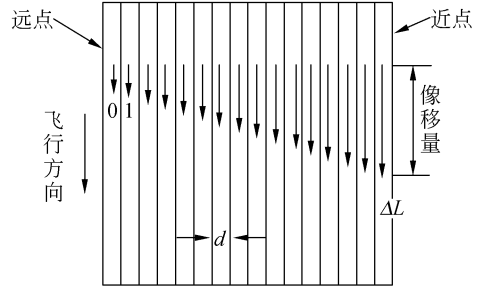
$$(L + \frac{1}{2}) - (L - \frac{1}{2}) = f \cdot \frac{1}{c} \cdot \left(\frac{v_{\text{flight}}}{H}\right) \cdot$$

$$T \cdot \cos \delta \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) = 1. \quad (11)$$

由式(10)、(11)得

$$d = \frac{1}{\left(\frac{v_{\text{flight}}}{H}\right) \cdot T \cdot \cos \delta}. \quad (12)$$

即分割区域的宽度 d 由载机的飞行姿态(速高比 (v_{flight}/H) 、侧身角 δ)及曝光积分时间 T 所决定, 因此同一幅图像中各分割区的宽度是相同的。



区域0、1、……、 ΔL 为具有各自独立像移量的分割区

图 2 斜视状态像面分割补偿示意图

Fig. 2 Segmentation for motion compensation of side-oblique image

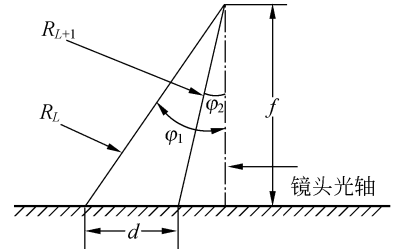


图 3 分割区宽度分析

Fig. 3 Analysis of segmentation width

2.3 1DWF 算法及并行运算

当图像的分割区域及每个分割区的点扩散函数确定时,可以用维纳滤波对每个分区进行独立的补偿恢复。但由于工作的需要,镜头的俯仰姿态会不断变化,航空图像分割区的宽度在帧与帧之间会存在差异,因此直接使用维纳滤波算法进行分割区内图像的恢复会使得每次运算都需要对二维快速傅里叶变化进行优化配置,这必然会影响到二维快速傅里叶变化运算的效率,进而影响图像恢复处理的效率。为避免频繁地对二维快速傅里叶变化进行优化配置,采用文献[7]所述的一维维纳滤波算法来进行像移补偿。

根据各分割区的点扩散函数将图像的每个分割区细分到“像素线”,使得同一个分割区内的“像素线”具有相同的点扩散函数(见式(9))。将各

“像素线”假设为点扩散函数已知的一维信号,则通过一维维纳滤波能对各“像素线”进行恢复,最后再将全部的“像素线”进行合并获得恢复图像。因为各“像素线”之间的数据相互没有关联,可以各自独立运算,所以模糊图像中的各“像素线”可被并行处理(如图 4 所示)。图 4 中 $g(n)$ 、 $G(n)$ 、 $F(n)$ 、 $f(n)$ 代表第 n 个“像素线”向量数据。 $1DWF(n)$ 表示对第 n 个“像素线”进行一维维纳滤波。用一维维纳滤波对二维模糊图像进行处理,这个改进能将算法的运算量减少一半^[7-8]。

$$g(x,y) = \begin{bmatrix} g(1) \\ g(2) \\ \vdots \\ g(M) \end{bmatrix} \xrightarrow[\text{FFT}]{1D} \begin{bmatrix} G(1) \\ G(2) \\ \vdots \\ G(M) \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 1DWF(1) \\ 1DWF(2) \\ \vdots \\ 1DWF(M) \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} F(1) \\ F(2) \\ \vdots \\ F(M) \end{bmatrix} \xrightarrow[\text{IFFT}]{1D} \begin{bmatrix} f(1) \\ f(2) \\ \vdots \\ f(M) \end{bmatrix} = f(x,y)$$

图 4 并行运算

Fig. 4 Parallel computing

3 实验结果

实验用的某款数码相机,焦距为 180 mm,半视场角为 3.31° ,像元尺寸为 $7.2 \mu\text{m} \times 7.2 \mu\text{m}$,有效像素为 $2 \text{ k pixel} \times 2 \text{ k pixel}$ 。实验设定环境为:低空飞行速高比 0.3,曝光积分时间 5 ms,相机俯仰角 30° 。根据式(5)、(6)分别求得 $\tilde{L}_{\min} = 16.87$ 、 $\tilde{L}_{\max} = 20.63$ 。离散化后得 $L_{\min} = 17$ 、 $L_{\max} = 21$,同时由式(7)求得 $\Delta L = 4$ 。从式(8)计算得到如下 5 个像移量:17、18、 \dots 、21,并根据式(9)得到对应的 5 个点扩散函数。由式(12)知每个分割区的宽度 d 相等,所以将 2 k 行的数字图像平均分割成 5 个分区来对应 5 个像移点扩散函数,并在此基础上用图 4 所示算法进行图像的补偿恢复。

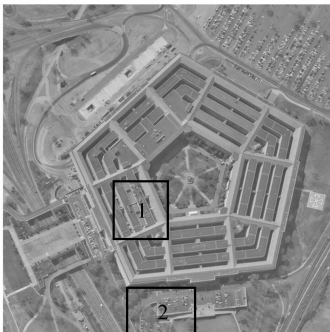


图 5 Pentagon 清晰原图(2 k pixel×2 k pixel)

Fig. 5 Original image of pentagon(2 k pixel×2 k pixel)

图 5 为仿真实验所用的 $2 \text{ k pixel} \times 2 \text{ k pixel}$ 清晰图片 Pentagon。按照前面的参数对图像进行斜视状态下的运动模糊仿真实验。图 6、图 7、图 8 为在原始图像、模糊图像、恢复图像的相同位置上所分别取得的截图,截图位置在图 5 中以 1 号标示出。模糊图像截图(图 7)从下到上可以明显看到由不同水平像移量共同造成模糊的痕迹,对这样具有多个像移量的模糊图像如果用一般的维纳滤波进行恢复,必将产生误差噪声,影响图像的恢复质量。从图 8 可以看出,本文算法很好地解决了具有多个不同像移量的斜视模糊图像的恢复问题。

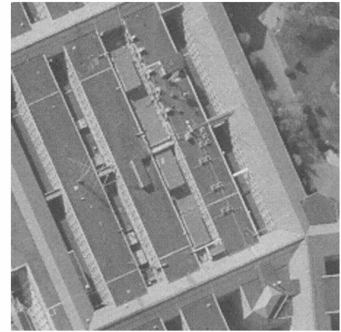


图 6 图 5 的截图 1

Fig. 6 Section 1 from Fig. 5

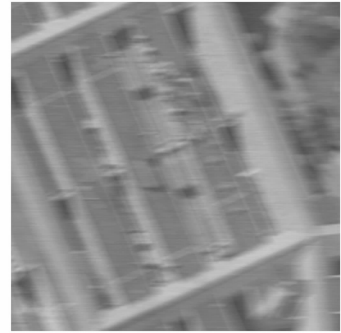


图 7 与图 6 相同位置的模糊图像截图

Fig. 7 Same part as Fig. 6 in blurred image

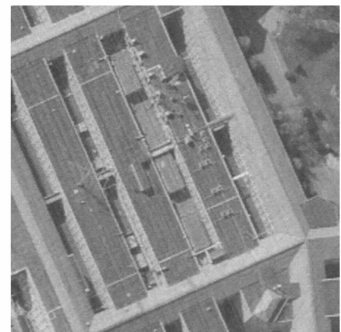


图 8 与图 6 相同位置的恢复图像截图

Fig. 8 Same part as Fig. 6 in restored image

仿真实验将图5的下方作为近景点,上方作为远景点,这样图5所标示的2号区域的最大像移量将达到21 pixel。图9、图10、图11为在原始图像、模糊图像、恢复图像上所分别取得的截图,截图位置在图5中以2号标示出。从图10可以看出在实际模糊参数作用下,图中右边的小径及图中停车场上的汽车很难被识别,本文算法对这些细节信息进行了恢复,达到了实用效果。从图8、图11的恢复图像截图上可以看出,画面较干净,并没有引入过多的振铃效应。实验的图像恢复质量评价参见表1数据。



图9 图5的截图2

Fig. 9 Section 2 from Fig. 5



图10 与图9相同位置的模糊图像截图

Fig. 10 Same part as Fig. 9 in blurred image



图11 与图9相同位置的恢复图像截图

Fig. 11 Same part as Fig. 9 in restored image

表1 图像评价

Tab. 1 Image evaluation

| 图像 | 尺寸/pixel | MSE | PSNR |
|------|-------------|---------|--------|
| 模糊图像 | 2 048×2 048 | 431.486 | 21.781 |
| 恢复图像 | | 58.365 | 30.469 |

实验使用GPU通用计算技术^[9],在GPU的并行框架下参照图4并行计算示意图对本文算法进行了实验。实验测试平台的GPU为 GeForce8800GTS(显存500M),CPU是P4主频3.0 G(单核),内存1 G。测试程序在VC2005环境下编译完成,程序共开辟了2048个并行线程。在测试平台上对不同分辨率的斜视模糊图像进行恢复处理,各分辨率图像恢复所需的时间如表2所示。实验数据证明本文算法的实现方案具有很好的实时处理能力。

表2 时间测试结果

Tab. 2 Results of time test

| 图像尺寸 /pixel | 512×512 | 1 024×1 024 | 2 048×2 048 |
|----------------|---------|-------------|-------------|
| 时间(ms) | 0.82 | 2.76 | 17.11 |

4 结 论

本文算法在计算各分割区的像移量时使用了离散化取整,不可避免地引入离散化误差,但每个分割区中边缘的像移量与中心的像移量偏差不超过0.5 pixel,据此所建立的点扩散函数可以确保图像的补偿精度达到一个像元以内。同时算法的并行设计方案及所选择的实验平台很好地实现了算法的实时运行,使算法更加具有实用性。

斜视状态下的运动模糊图像上并行地存在多个不同模糊像移量,国内外针对这种像移情况很少使用算法补偿的方法进行像移补偿,本文提出的补偿算法为该种像移模糊的补偿提供了新的方法,填补了事后像移补偿算法的一个空白,让算法补偿技术在与其它诸如CCD电子转移补偿技术、器件机构偏转补偿技术的竞争中更加具有优势。

参考文献:

- [1] 贾平,张葆,孙辉. 航空成像像移模糊恢复技术[J]. 光学精密工程,2006,14(4):697-703.
JIA P, ZHANG B, SUN H. Restoration of motion-blurred aerial image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(4):697-703. (in Chinese)
- [2] LAREAU A G. Advancements in E-O framing [J]. *SPIE*, 1998, 3431: 96-107.
- [3] 翟林培,刘明,修吉宏. 考虑飞机姿态角时倾斜航空相机像移速度计算[J]. 光学精密工程,2006,14(3):490-494.
ZHAI L P, LIU M, XIU J H. Calculation of image motion velocity considering airplane gesture angle in oblique aerial camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(3):490-494. (in Chinese)
- [4] 许永森,丁亚林,田海英,等. 斜视状态下航空遥感器像移的计算与补偿[J]. 光学精密工程,2007,15(11):1779-1783.
XU Y S, DING Y L, TIAN H Y, *et al.*. Calculation and compensation for image motion of aerial remote sensor in oblique situation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(11):1779-1783. (in Chinese)
- [5] GORIN B A. Side oblique real-time orthophotography with the 9Kx9K digital framing camera [J]. *SPIE*, 2003, 5109: 86-97.
- [6] BANHAM M R, KATSAGGELGS A K. Digital image restoration [J]. *IEEE Signal Proc. Mag.*, 1997:24-41.
- [7] 李仕,孙辉,张葆. 一种运动模糊图像的实时恢复算法[J]. 光学精密工程,2007,15(5):767-772.
LI SH, SUN H, ZHANG B. A method for real-time restoration of motion-blurred images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(5):767-772. (in Chinese)
- [8] SMITH S W. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing* [M]. California: California Technical Publishing, 1997.
- [9] PHARR M, FERNANDO R. *GPU Gems2* [M]. New Jersey: Addison-Wesley Professional, 2005.

作者简介:



李仕(1984—),男,浙江苍南人,中科院长春光机所博士研究生,主要从事航空成像补偿算法的研究。E-mail: brightlishi@gmail.com



孙辉(1963—),男,吉林柳河人,中科院长春光机所研究员,主要从事数字图像处理与分析和计算机仿真技术的研究。E-mail: sunh@ciomp.ac.cn



张葆(1966—),男,吉林磐石人,中科院长春光机所研究员,工学博士,博士生导师,主要从事航空光电成像技术的研究。E-mail: cleresky@vip.sina.com