

文章编号 1004-924X(2009)03-0648-07

旋转运动模糊的实时恢复

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:提出了一种旋转运动模糊恢复算法,用来解决航空成像时旋转运动模糊的实时恢复问题。对旋转运动模糊这种具有异速像移的空间变化模糊进行了分析,并推导出旋转运动模糊的数学模型。用基于 Bresenham 画圆法的坐标转换方法将旋转圆弧上的空间变化模糊转变为常见的线性空间不变模糊,并使用一维维纳滤波对圆弧轨迹上的像素点进行模糊恢复。实验结果显示:本文算法在 GPU 处理平台下用 3.31 ms 即能恢复一帧 $1\ 024 \times 1\ 024, 8\ \text{bit}$ 旋转运动模糊图像,且极好地恢复了图像上的细节信息,恢复图像的峰值信噪比(PSNR)为 28.76。算法的速度及效果表明本文所提出的算法具有较大的实用价值。

关键词:航空成像;旋转运动模糊;空间变化模糊;实时恢复

中图分类号:TP391.4;TP301.6 **文献标识码:**A

Real-time restoration of images blurred by rotational motion

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: A real-time image restoration algorithm is proposed for the images blurred by rotational motion during aerial imaging. According to the rotational motion with space-variant blur and different motion rates for image, this paper analyzes how the rotational motion is generated and derives a mathematical model of rotational motion. Then, the coordinate conversion based on Bresenham algorithm is applied to transform the space-variant blur on circular arc into the space-invariant blur on pixel lines and 1D Wiener filter is used to restore the linear image motion transformed by coordinate conversion. The experimental results show that the proposed algorithm can restore a $1\ 024 \times 1\ 024, 8\ \text{bit}$ blurred image in 3.31 ms on the Graphics Processing Unit (GPU) platform, and the details in the rotational motion blurred image is pretty well restored and the PSNR of the restoration image can reach 28.76. The restoration quality and the effectiveness of the proposed algorithm reveals it is practical in the aerial imaging system.

Key words: aerial image; rotational motion blur; space-variant blur; real-time restoration

1 引言

飞行载体做高速低空飞行时,航空成像很容易发生像移模糊。在多种像移模糊中较为常见的是飞行器前向飞行时产生的前向像移模糊,其原因多是前向飞行一般比较贴近大家对飞行器飞行的认知;另外该种像移模糊产生时,靶面上全体像点的像移方向和大小一致,使得前向像移模糊较容易被消除,且介绍该种模糊消除的文献也较多。但实际上飞行器的飞行姿态并不仅是前向飞行。当飞行载体处于旋转运动状态时(比如弹体的旋转飞行,飞机的盘旋、偏航运动等),弹载或机载的成像系统会出现旋转运动模糊,这时成像靶面上每个像点的像移矢量均不相同。

针对旋转运动模糊的像移补偿,国内外常用的方法有:帧转移 CCD 像移补偿技术^[1]、机构旋转光学像面像移补偿技术^[2-3]、电机消旋系统像移补偿技术^[4]等。其中帧转移 CCD 在国内较难获得成品,而机构旋转、电机消旋技术除自身结构体积、重量等因素外,还较难在旋转中心移动时对旋转像移进行有效补偿。常见的像移模糊恢复算法(如维纳滤波算法^[5])大多是针对具有空间不变性的线性模糊(如前向像移模糊),而旋转模糊是空间变化模糊,它的像移是空间变化的,距离旋转轴越远,像点的像移量越大,并且相同圆弧轨迹上的像点的像移大小相等,相同旋转角上的像点的像移方向相同。文献[6-8]详细论述了旋转运动模糊的恢复方法,它们各有其优缺点。本文在此基础上提出一个全面、系统、快捷的算法。

2 旋转运动模糊的恢复

常见的旋转像移如图 1 所示,它的模糊算子是空间变化的,比图 2 所示的空间不变的像移来得复杂,因此要用新的方法对其进行建模分析。

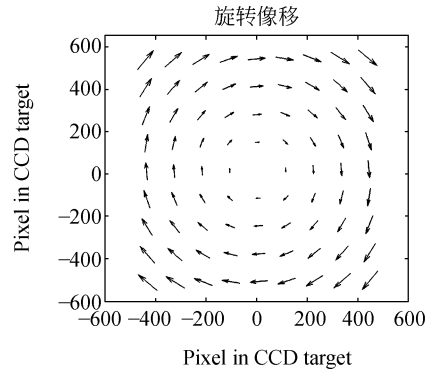


图 1 旋转像移

Fig. 1 Rotational motion

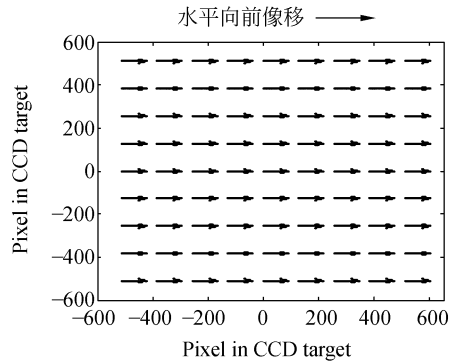


图 2 水平前向像移

Fig. 2 Horizontal forward motion

2.1 旋转运动模糊分析

设 $f(x, y)$ 为原始图像, $g(x, y)$ 为旋转模糊图像, r 为当前像点距离旋转中心的旋转半径, ω 为图像的旋转角速度, T 为曝光积分时间,则推导出如下关系式:

$$g(x - \Delta x, y - \Delta y) = \frac{1}{T} \int_0^T f[x - \Delta x - r \cos(\omega t), y - \Delta y - r \sin(\omega t)] dt, \quad (1)$$

其中, Δx 、 Δy 分别为图像旋转中心相对图像坐标原点(0,0)的偏移量, $r = \sqrt{(x - \Delta x)^2 + (y - \Delta y)^2}$ 。由式(1)及图 1 可知旋转像移模糊的轨迹是一系列的同心圆弧,为表达的方便,这里将式(1)转换为极坐标式:

$$g(r, \theta) = \frac{1}{T} \int_0^T f(r, \theta - \omega t) dt. \quad (2)$$

针对相同圆弧半径 r 上的点,式(2)可作如下简写:

$$g_r(\theta) = \frac{1}{T} \int_0^T f_r(\theta - \omega t) dt. \quad (3)$$

式(3)与常见的水平运动模糊的表达式^[9](式(4))十分相似:

$$g(x) = \frac{1}{T} \int_0^T f(x - vt) dt, \quad (4)$$

所以能很容易地将式(3)整理为:

$$g_r(l) = f_r(l) * h_r(l), \quad (5)$$

$$h_r(l) = \begin{cases} 1/a_r, & 0 \leq l < a_r \\ 0 & a_r \leq l < 2\pi r \end{cases}. \quad (6)$$

式(5)、(6)中的 l 为圆弧 r 上的坐标,式(6)中的 $a_r = r\omega T$ 。至此,旋转像移造成的空间变化模糊被分解成各个圆弧上的空间不变模糊,即旋转运动模糊的消除可以通过求解各圆弧上的类匀速运动模糊来实现。

2.2 模糊的转换

对旋转运动模糊进行恢复,首先是要将模糊图像上的像点坐标转换到各圆弧坐标上。对于图像坐标的转换,文献[6-7]分别有不同的论述。图像坐标转换的方法不同必然导致图像恢复算法的不同,本文结合文献[6-7]各自图像坐标转换方法的优点,提出一种快速有效的图像坐标转换方法。

2.2.1 图像的圆弧分解

模糊图像上任意点像素要由原直角几何坐标转换到圆弧坐标,首先要在模糊图像上确定以旋转轴为中心的各圆弧位置。这相当于在模糊图像上画圆弧,然后将坐落在圆弧上的各像素点坐标转换为相应的圆弧坐标。

有很多算法可以实现快速画圆,其中最为著名的是 Bresenham 画圆法和中点画圆法。考虑到模糊图像的旋转中心位置不确定,在本算法中使用 Bresenham 画圆法来使得离散圆弧上的各像素点位置最佳逼近理想圆弧。具体 Bresenham 画圆法可参见文献[10-12]。通过画圆法将模糊图像的空间位置分解成一系列的同心圆弧。

2.2.2 图像的坐标转换

如果各圆弧被确定,模糊图像中坐落在各圆弧上的像素(如图 3(a)或图 4(a))可以以旋转半径为纵坐标,沿极坐标的弧度角展开排列(如图 3(b)或图 4(b)),即将圆弧上的所有像素依次转换成线性排列,使得模糊图像经坐标转换后变成如图 3(b)或图 4(b)所示的图像信息排列。由(5)式可知图 3(b)(或图 4(b))上的每个水平像素线条均为一个线性空间不变的运动模糊像素线,且每个像素线的点扩散函数由式(6)所确定。

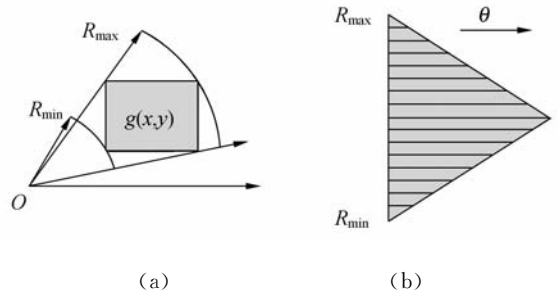


图 3 图像坐标转换指示图 I

Fig. 3 Illustration I of image coordinate conversion

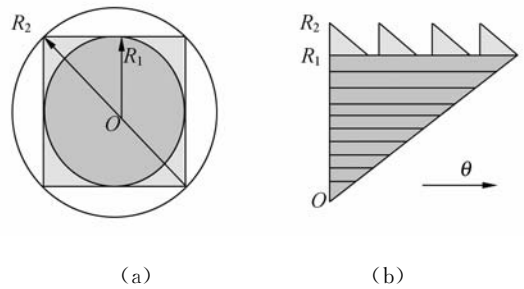


图 4 图像坐标转换指示图 II

Fig. 4 Illustration II of image coordinate conversion

图 3 所示的坐标转换是模糊旋转中心在图像外时的一种情形,图 4 所示的则是旋转中心在图像内时的情况。容易看出当旋转中心在图像内的时候,图像坐标的转换要复杂些:图像 4 个顶角上的像素信息相互不连续,使得旋转半径在 $R_1 \sim R_2$ 间的圆弧被分割成 4 个部分,该 4 部分的数据在坐标转换后形成如图 4(b)上的 4 个三角形的数据排列。

对于旋转中心在图像内部的情形,文献[6]中并没有做阐述和探讨,文献[7]则是使用基于邻域信息的最优估值算法对 4 个角上的像素信息进行预测。本文认为通过图 4 所示的坐标转换,4 个角边缘上的图像信息还是可以通过式(5)、(6)进行恢复,实验结果也证明了这点。

2.3 算法具体实现

坐标转换后,图像上各圆弧的信息均被线性存储,各像素线条的点扩散函数能通过式(6)确定。假设各像素线条为一维信号,在各信号的点扩散函数确定的情况下,通过一维维纳滤波^[13]的

方法能恢复各像素线条信息。一维维纳滤波公式如下:

$$F_r(u) = \frac{H_r(u)^*}{H_r(u)H_r(u)^* + k} G_r(u), \quad (7)$$

式中, $F_r(u)$ 、 $H_r(u)$ 、 $G_r(u)$ 分别为 $f_r(l)$ 、 $h_r(l)$ 、 $g_r(l)$ 所对应的 FFT 变换, k 为一维像素线条上信噪比倒数。这里信噪比的引入是考虑到(5)式模型可能存在噪声干扰, 用来增强算法的噪声抑制能力。

为提高算法的运行速度, 在坐标转换的过程中, 使用专门的数组记录下了图像上像素点坐标转换前后的位置对应关系, 以减少图像做坐标逆转换时的运算量。为让算法速度达到实时, 用 CPU 作为主处理器, 用图形处理器(GPU)作为协处理器来实现算法, 其中 CPU 主要完成图像坐标的正逆转换, GPU 则通过通用计算技术(GPGPU)^[14]完成式(7)所示的一维维纳滤波处理。整个算法的流程图如图 5 所示:

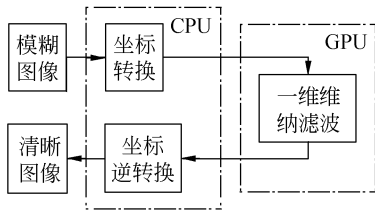
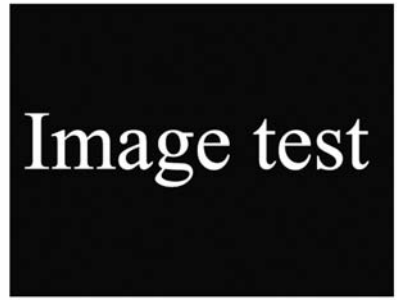


图 5 旋转模糊恢复算法图解

Fig. 5 Illustration of proposed algorithm

3 实验结果

实验测试平台的 CPU 是 P4 主频 3.0 G(单核), GPU 为 GeForce8800GTS(显存 500 M), 内存 1 G。测试程序在 VC2005 环境下编译完成。为更好地说明旋转运动模糊的特点, 首先提供一组简单的实验合成图像(图 6)。图 6(a)为原始图像, 图 6(b)为人工旋转模糊图像, 旋转角度为 15° , 图 6(c)是用图 5 算法对图 6(b)进行恢复后得到的实验结果图。由图 6(b)可以清楚看出图像中心的字母模糊程度较轻, 靠近图像边缘、远离旋转中心的字母的模糊程度较厉害。图 6(c)则表明本文算法可以有效地恢复图 6(b)所示的旋转运动模糊。



(a) 原图

(a)Original image



(b) 15° 旋转运动模糊图

(b)Blurred image with 15° rotation



(c) 实验结果图

(c)Restored image

图 6 旋转运动模糊恢复实验

Fig. 6 Experiment of rotational blur image restoration

为全面评价本文算法的性能, 实验分别对 512×512 及 1024×1024 (图 7 所示)图像进行了图像恢复质量评价及速度评价。图 8 为经 5° 旋转角模糊后的机场图像, 图中距离旋转中心越远的景物模糊的越厉害, 整个图像的细节基本无法识别。图 9 为图 8 所对应的恢复图像, 对比原始图像(图 7)可发现本文算法能够将图像的细节很好

地恢复出来,有效地保证图像恢复质量。表 1 为图 8、图 9 的画面评测数据。

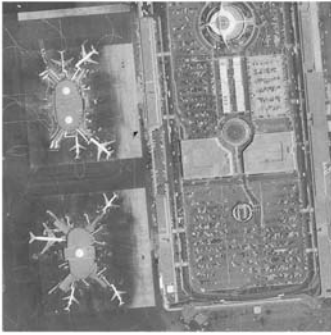


图 7 原始图像(1 024×1 024)

Fig. 7 Original image(1 024×1 024)

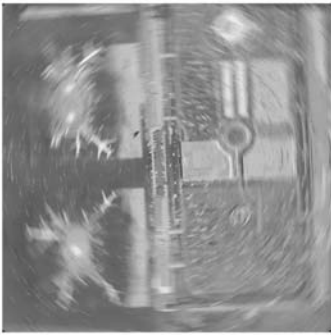


图 8 模糊图像(1 024×1 024)

Fig. 8 Blurred image(1 024×1 024)

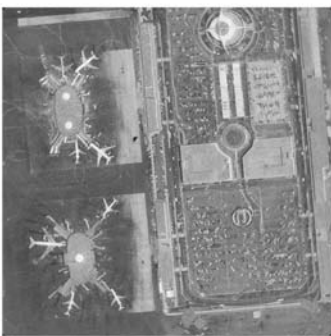


图 9 恢复图像(1 024×1 024)

Fig. 9 Restored image(1 024×1 024)

表 2 数据为 GPU 部分运算所需的时间,由于 CPU 对图像进行坐标转换运算所用的时间小于 GPU 上的运算时间(频谱转换运算的时间加一维维纳滤波运算的时间),并且 CPU 与 GPU 的运算处理是相互独立的,在处理视频序列的时

候 CPU 与 GPU 可以同时工作,所以文中取运算处理所需时间较长的 GPU 运算时间作为旋转运动模糊图像恢复所需运算时间。表中数据表明本文算法具有很好的实时处理能力,可以满足大分辨率旋转模糊图像的实时恢复需求。

表 1 图像评价

Tab. 1 Image evaluation

图像	尺寸	MSE	PSNR
模糊图像	1 024×1 024	709.17	19.62
恢复图像		86.57	28.76

表 2 时间测试结果

Tab. 2 Results of time test

图像尺寸	512×512	1 024×1 024
时间(ms)	1.34	3.31

4 结 论

本文算法在图像坐标转换时,使用 Bresenham 画圆法进行圆弧轨迹坐标的快速测定,并且依照极坐标角度对各圆弧上像素点进行坐标转换,此举相对文献[6-7]中的坐标转换方法来得快速、有效。文中使用一维维纳滤波算法对圆弧上的像素点进行去模糊运算。用一维维纳滤波恢复二维的模糊图像能将去模糊运算的运算量减低约 50%。基于上面两点,本文算法的运算量得到了有效控制,在图 5 所示的框架下能在 3.31 ms 内恢复一帧 1 024×1 024 旋转运动模糊图像。

算法对全部的模糊圆弧均严格按照式(5)数学模型进行去模糊运算,同时维纳滤波的使用对图像的噪声有一定的抑制作用,所以本文算法的恢复精度相对文献[6]要高。实验数据表明本文算法可以将模糊图像的 PSNR 提高 9 dB,该实验结果取得的前提是旋转中心及旋转角度的精确获得。旋转运动模糊的恢复算法还有较多细节(比如旋转中心的动态偏移,旋转轴与图像不垂直等)有待确认和完善,算法本身距离实际工程应用还有段距离,这些会在今后的工作中能进一步完善。

参考文献:

- [1] LAREAU A G. Advancements in E-O framing [J]. *SPIE*, 1998, 3431: 96-107.
- [2] 张树青, 丁亚林, 李友一, 等. 基于像面旋转的画幅遥感相机姿态像移计算[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(9): 1432-1438.
ZHANG SH Q, DING Y L, LI Y Y, *et al.*. Image motion vector computation based on a long range oblique photography frame camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9): 1432-1438. (in Chinese)
- [3] 张树青, 丁亚林, 于春风. 凝视模式下的画图相机两轴像移补偿[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(11): 1789-1795.
ZHANG SH Q, DING Y L, YU CH F. Attitude compensation of frame aerial camera based on spot mode [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11): 1789-1795. (in Chinese)
- [4] 孙丽娜, 汪永阳, 戴明, 等. 航空光电成像消旋电视数字控制器[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(8): 1300-1304.
SUN L N, WANG Y Y, DAI M, *et al.*. Digital controller for aerial camera with despun control [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1300-1304. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] RIBARIC S, MILANI M, KALAFATIC Z. Restoration of images blurred by circular motion [C]. *Proceedings of the First International Workshop*, 2000: 53-60.
- [7] HONG H Y, ZHANG T X. Fast restoration approach for rotational motion blurred image based on deconvolution along the blurring paths [J]. *Opt. Eng.*, 2003, 42(12): 3471-3486.
- [8] QI SH, WEI X, JIA J. Rotational motion deblurring of rigid object from a single image [C]. *Computer Vision, IEEE 11th International Conference*, 2007: 1-8.
- [9] 于红斌, 李志能, 陈抗生. 一种运动模糊图像的快速恢复算法[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 1999, 33(5): 564-568.
YU H B, LI ZH N, CHEN K SH. An algorithm for the restoration of motion blurred image [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 1999, 33(5): 564-568. (in Chinese)
- [10] 王志喜, 王润云. Bresenham画圆算法的改进[J]. *计算机工程*, 2004, 30(12): 178-180.
WANG ZH X, WANG R Y. Improvement of Bresenham's circle generation algorithm [J]. *Computer Engineering*, 2004, 30(12): 178-180. (in Chinese)
- [11] 汪金友, 王淑礼, 廖兆曙. 3种画圆算法的优劣分析[J]. *信阳师范学院学报(自然科学版)*, 2005, 18(4): 486-488.
WANG J Y, WANG SH L, LIAO ZH SH. Virtues and defects analysis of three methods of drawcircle [J]. *Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition)*, 2005, 18(4): 486-488. (in Chinese)
- [12] 石慎, 张艳宁, 郝润平, 等. 基于Bresenham画线算法的图像快速-高精度旋转算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2007, 19(11): 1387-1392.
SHI SH, ZHANG Y N, XI R P, *et al.*. A fast-high-quality image rotation approach based Bresenham algorithm [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2007, 19(11): 1387-1392. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] PHARR M, FERNANDO R. *GPU Gems2* [M]. Addison-Wesley Professional, 2005.

作者简介:



李 仕(1984—),男,浙江苍南人,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,研究员,主要研究方向为数字图像处理与分析、计算机仿真技术等。E-mail: sunh@ciomp.ac.cn

导师简介:



张 葆(1966—),男,吉林盘石人,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

●下期预告

基于奇异点和 HMM 的指纹分类数据融合

罗 菁^{1,2}, 林树忠², 詹湘琳³, 倪建云⁴

(1. 天津工业大学 计算机技术与自动化学院, 天津 300160;

2. 天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300160;

3. 中国民航大学 电子信息工程学院, 天津 300300; 4. 天津理工大学 自动化学院, 天津 300191)

提出了一种基于奇异点和 HMM 的指纹分类数据融合方法。首先,分别对基于奇异点的指纹分类方法和基于 HMM 的指纹分类方法的信任度函数进行分配。然后,利用 D-S 证据理论进行融合完成指纹纹型分类,并在国际指纹竞赛数据库上作了测试,总的纹型辨识正确率可达 94.5%,并且对平移、旋转和低质量的指纹图像具有良好的鲁棒性,具有一定的实用价值。