

文章编号 1004-924X(2015)03-0846-09

## 结合仿射变换和多层 B 样条配准的湍流畸变图像校正

张 姣<sup>1\*</sup>, 李俊山<sup>1</sup>, 杨亚威<sup>1,2</sup>

(1. 第二炮兵工程大学 信息工程系, 陕西 西安 710025;

2. 96215 部队, 广西 柳州 545616)

**摘要:**为解决大气湍流引起的图像抖动和图像偏移问题,提出了一种结合仿射变换和多层 B 样条配准的图像校正方法。由于湍流像素偏移具有非线性和随机性,且序列中常伴有成像系统运动引起目标全局运动,该方法将像素校正分为整体运动校正和局部非刚性配准两部分。采用仿射变换描述目标整体运动;引入多分辨率策略处理像素偏移,利用多层 B 样条对湍流引起的局部形变进行非刚性配准。基于对称约束的代价函数,通过梯度判定感兴趣区域,进一步细化控制点网格提高 B 样条配准精度。最后,采用有限内存拟牛顿法优化代价函数,得到像素偏移量,实现畸变图像的像素校正。对真实图像和实际序列图像分别进行了实验,结果表明,该方法能够有效降低湍流造成像素偏移畸变,在噪声和模糊干扰下校正结果依然理想。

**关键词:**湍流图像;畸变校正;仿射变换;B 样条配准;多分辨率策略;有限内存拟牛顿法

**中图分类号:** TN919.8; TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152303.0846

## Turbulence distorted image correction using affine transformation and multilevel B-spline registration

ZHANG Jiao<sup>1\*</sup>, LI Jun-shan<sup>1</sup>, YANG Ya-wei<sup>1,2</sup>

(1 Department of Information Engineering,

The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;

2 96215 Unit, Chinese People's Liberation Army, Liuzhou 545616, China)

\* Corresponding author, E-mail: zj8822tt@163.com

**Abstract:** A correction method for distortion sequences was proposed based on affine transform and multilevel B-spline registration to overcome the image distortion and pixel deviation from the atmospheric turbulence. As the pixel deviation caused by turbulence is nonlinear and random, and the global motion caused by the imaging system movement might exist in practice, the correction method divided the pixel into two parts, the global motion estimation and the local non-rigid registration. The affine transformation was adopted to eliminate the global motion. The multi-resolution strategy was introduced to process pixel distortion and the multilevel B-spline was adopted to register the local motion. On the basis of the symmetry constraint cost function, the control point gridding was fined further to improve the B-spline accuracy by evaluating the regions of interest with the gradient method. Finally, limited-memory Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno(L-BFGS) algorithm was used to

收稿日期:2014-11-05;修订日期:2014-12-31.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61175120)

minimize the cost function to obtain the pixel deviation and to complement the correction of image distortion. Experiments demonstrate that the proposed method effectively reduces the pixel distortion from the atmospheric turbulence even for noisy and blurred conditions.

**Key words:** turbulence-degraded image; distortion correction; affine transformation; B-spline registration; multi-resolution strategy; Limited-memory Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno(L-BFGS)

## 1 引 言

当光学成像制导飞行器在大气中高速飞行时,其获取的图像存在像模糊、像抖动和像素偏移<sup>[1-2]</sup>。这是由于受大气流场的影响,空气折射率发生变化,导致光线穿过大气后传播路径发生了改变,从而使成像结果中像点强度分布扩散,成像质量退化。湍流增加了目标场景识别的难度,对湍流退化图像进行校正是光电成像系统图像处理的重点,具有重要的实际意义。

近年来,国内外学者对湍流退化图像进行了大量研究,但大多数是对湍流模糊进行复原。由于湍流模糊的退化函数往往未知,因此主要采用盲复原方法结合先验模糊辨识<sup>[3-4]</sup>,极大似然估计<sup>[5-6]</sup>及正则化<sup>[7]</sup>等技术。由于湍流与时间、空间密切相关,只研究单帧图像意义并不大,而多帧图像能够提供更丰富的信息。现有的大部分多帧复原方法往往采用连续帧之间相同位置上像素的相关性作为先验知识,即假设在静态场景下,目标图像仅受降晰影响<sup>[8-9]</sup>。实际上,忽略成像抖动、像素偏移的图像恢复并不完善。文献<sup>[10]</sup>证明,图像配准仅使模糊核发生位置上的移动,核的形状和频谱并不受影响。经过校正后,连续帧相同位置像素之间的相关性更加明显。因此畸变校正可作为去模糊前的预处理。目前对湍流引起成像畸变的研究并不多。华中科技大学气动光学研究团队提出了基于特征点配准方法对高速流场下的图像畸变进行校正的方法<sup>[11-12]</sup>,其采用二阶函数模型对多帧图像的匹配点对位置进行拟合,获得了近似的像素偏移模型。该方法在小视场成像范围内有效,但需要提取足够多且分布呈近均匀的特征点,对特征提取配准精度要求较高,需上百帧信息来逼近偏移函数。Mao等<sup>[13]</sup>将畸变帧看作任意扭曲图像,采用光流估计的形变配准方法来校正湍流畸变。该算法对帧率要求不高,低帧率下依然可行,但它的光流亮度守恒约束条件在噪声

及亮度不均匀下并不适用。Shimizu等<sup>[14]</sup>利用 B 样条配准算法实现热空气下远距离成像序列的配准。Zhu等<sup>[10]</sup>在其基础上,引入对称性约束代价函数,采用固定控制点的 B 样条配准实现湍流图像的畸变校正。该算法在短曝光静态场景下效果显著,但算法的计算和时间复杂度高。

针对湍流引起图像像素偏移的问题,本文结合仿射变换和多层 B 样条配准技术对退化图像序列进行畸变校正。具体为将序列的像素偏移分为整体运动和局部变化两类:利用仿射变换去除整体运动形变;采用多层分块 B 样条函数模拟局部形变。非刚性配准时采用有限内存拟牛顿法进行优化,通过求解偏移矢量的全局最优解,实现像素偏移校正。

## 2 湍流退化图像序列的像素偏移分析

由于湍流复杂多变,湍流退化的图像序列中存在不规则的像素偏移、抖动现象。大气湍流波动为不恒定态,受时间影响湍流图像的像素偏移建模十分困难。一般来讲,退化序列的单帧图像呈现出扭曲畸变,序列图像呈现出抖动畸变<sup>[12]</sup>。相关研究表明,虽然湍流畸变随时间呈随机变化,但每个像素点的偏移量在一个零均值偏移的位置附近轻微振荡,具有可重复性和局部中心<sup>[12,14]</sup>。因此可以通过对湍流畸变图像的局部形变进行补偿得到偏移像素的原始位置。

此外,成像过程、成像条件也会对成像结果造成全局偏移影响。例如成像系统抖动引起的目标全局运动在高速飞行器搭载的成像系统中就很常见。因此本文将序列图像的像素偏移分为 2 个部分:整体运动和局部形变。如式(1)所示:

$$D(x, y) = D_{\text{global}}(x, y) + D_{\text{local}}(x, y), \quad (1)$$

式中: $(x, y)$ 代表图像中任一点。为了实现像素校正,本文采用配准法将图像分为刚性和非刚性配准,以去除整体运动和局部形变。

### 3 基于配准的湍流序列畸变校正

#### 3.1 整体变换

对于可能存在的由成像系统运动所引起的全局运动,设第一帧图像为参考图像,再利用仿射模型去除其他帧的全局形变。仿射变换具有缩放、平移、旋转 6 个参数,记为矢量  $\mathbf{a}$ 。对于图像上任意点  $\mathbf{x}$ ,其整体变换可记作  $\mathbf{D}_{\text{global}}(\mathbf{x}; \mathbf{a})$ ,有:

$$\mathbf{D}_{\text{global}}(\mathbf{x}; \mathbf{a}) = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} a_5 \\ a_6 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

#### 3.2 局部变换

刚性变换只能去除图像的整体运动,对于高阶非线性的局部像素偏移需要进行非刚性配准。基于 B 样条的非刚性配准因具有良好的局部变形效果,适合 GPU 并行处理的优点<sup>[15]</sup>,被广泛应用于图像弹性配准<sup>[16-17]</sup>。基本思想是在二维图像上覆盖分布均匀的控制点网格,调整控制点位置,利用邻域内控制点 B 样条插值得到非控制点的像素位置,从而模拟像素偏移导致的局部形变场。配准的过程就是寻找畸变图像与参考图像的最佳形变场。

理想情况下,配准时需要选择无湍流影响的图像作为参考,但实际上很难获得。文献[2]证明湍流引起的局部像素偏移服从零均值的高斯分布。文献[14]指出,对无全局运动且局部运动服从零均值高斯分布的序列进行帧平均,相当于原始图像的高斯卷积。因此,对去除整体运动的图像进行序列帧平均,所得的图像可以作为非刚性配准的参考图。本文的局部校正算法是对传统 B 样条非刚性配准法的优化,其基本步骤如下<sup>[10]</sup>。

对于参考图像  $R$ ,建立与之大小相同的规则网格  $\Phi$ 。 $\Phi$  由相邻点横纵间隔分别为  $h_x$  和  $h_y$  的  $m \times n$  个节点构成,节点为待配准的控制点,初始位置记为  $\mathbf{x}_{0i} = (x_{0i}, y_{0i})^T, i = 1, 2, \dots, m \times n$ 。根据非刚性形变的对应关系可知,  $R$  上任意点  $\mathbf{x} = (x, y)^T$  在畸变图像  $G$  上的对应位置可通过调整所有控制点位置来计算,记为  $\mathbf{D}_{\text{local}}(\mathbf{x}; \vec{\mathbf{p}})$ ,如式(3)所示:

$$\mathbf{D}_{\text{local}}(\mathbf{x}; \vec{\mathbf{p}}) = \mathbf{x} + \mathbf{A}(\mathbf{x}) \vec{\mathbf{p}},$$

$$\vec{\mathbf{p}} = [\Delta \hat{x}_1, \dots, \Delta \hat{x}_{m \times n}, \Delta \hat{y}_1, \dots, \Delta \hat{y}_{m \times n}]^T. \quad (3)$$

式中:  $\vec{\mathbf{p}}$  由所有控制点在  $G$  上偏移量构成的形变矢量。 $\mathbf{A}(\mathbf{x}) \vec{\mathbf{p}}$  代表  $R$  上任意点  $\mathbf{x}$  的偏移量,是所

有控制点位移量的线性组合。 $\mathbf{A}(\mathbf{x})$  是  $\mathbf{x}$  的基函数矩阵,其中  $c_i$  值根据不同的形变函数有不同的表达。对于 B 样条配准,  $\mathbf{A}(\mathbf{x})$  中的元素通过 B 样条函数的张量积计算得到,如式(4)所示:

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} c_1 & \dots & c_{m \times n} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & c_1 & \dots & c_{m \times n} \end{bmatrix},$$

$$c_i = \beta \left[ \frac{x - x_{0i}}{h_x} \right] \beta \left[ \frac{y - y_{0i}}{h_y} \right]. \quad (4)$$

从 B 样条基函数的定义式(5)可以看出,每个点只受周围  $4 \times 4$  点影响,具有极好的局部性。

$$\beta(t) = \begin{cases} \frac{2}{3} - \left[1 - \frac{|t|}{2}\right] t^2, & \text{if } 0 \leq |t| \leq 1 \\ \frac{2 - |t|^3}{6}, & \text{if } 1 < |t| < 2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

考虑到配准的对称性,文献[10]提出对称性约束的代价函数,如图 1 所示,  $\vec{\mathbf{p}}$  代表  $R$  到  $G$  的正向偏移,  $\overleftarrow{\mathbf{p}}$  代表  $G$  到  $R$  的逆向偏移,有  $\vec{\mathbf{p}} = -\overleftarrow{\mathbf{p}}$ , 记  $\mathbf{p} = [\vec{\mathbf{p}}^T, \overleftarrow{\mathbf{p}}^T]^T$ 。代价函数如式(6)所示:

$$C(\mathbf{p}) = \sum_{\mathbf{x}} |R(\mathbf{D}_{\text{local}}(\mathbf{x}; \vec{\mathbf{p}})) - G(\mathbf{x})|^2 + \sum_{\mathbf{x}} |G(\mathbf{D}_{\text{local}}(\mathbf{x}; \overleftarrow{\mathbf{p}})) - R(\mathbf{x})|^2 + \gamma (\vec{\mathbf{p}} + \overleftarrow{\mathbf{p}})^T (\vec{\mathbf{p}} + \overleftarrow{\mathbf{p}}). \quad (6)$$

式中:  $\gamma$  是对称约束的相关系数。最小化代价函数时,常选用牛顿法迭代,得到  $\mathbf{p}$ 。

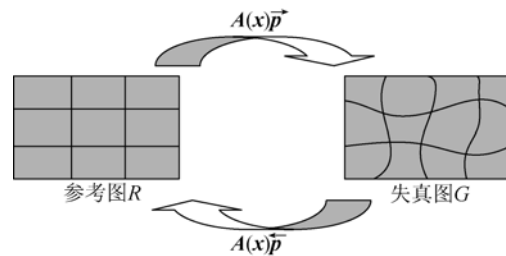


图 1 图像配准中的对称性约束

Fig. 1 Symmetric constraint in image registration

最后,可根据偏移量还原像素位置,对图像中没有灰度值的点进行样条插值。

#### 3.3 局部配准的影响因素

3.2 节中介绍的传统 B 样条配准法,其中控制点数目被称为非刚性形变的自由度,而网格的疏密程度在很大程度上决定了局部形变的精确度。采用传统算法对湍流畸变进行校正,不同网格尺寸结果如图 2 所示。

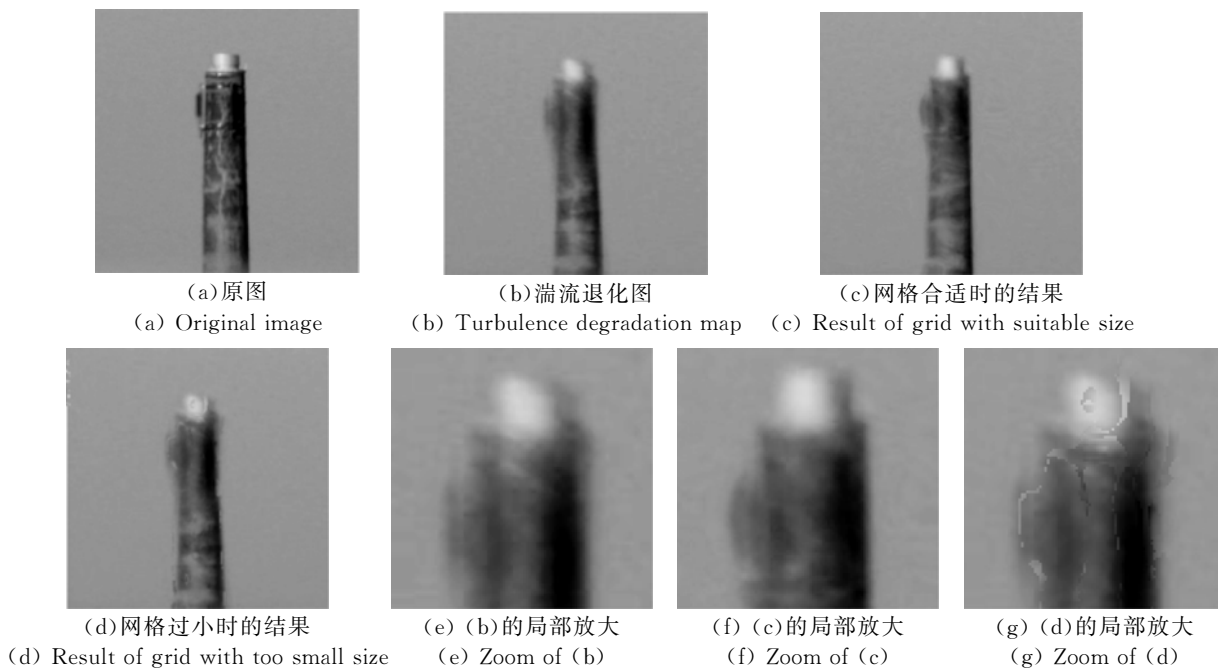


图 2 网格大小对非刚性配准的影响

Fig. 2 Influence of grid sizes on non-rigid registration

从图 2 可以看出,控制点网格过小会导致配准失误。这是由于网格过小时,控制点过密,配准容易陷入局部极值,从而使某些局部形变无法得到最优值,配准精度降低;而网格过大,可视为全局弹性配准,难以保证精度。由此可知,控制点网格的疏密程度决定了局部形变精度。利用固定的控制点网格对湍流图像配准,精度并不理想。

此外,网格的疏密也决定了配准的计算复杂度。假设图像大小为  $320 \times 240$ , 间隔  $[h_x, h_y]$  为  $[16, 16]$ , 则该层就有 300 个控制点,共需要上万次矩阵相乘。如果图像尺寸更大,则计算量变大。为了满足多分辨率配准精度,多层 B 样条配准算法<sup>[18]</sup>应运而生,多层 B 样条采用逐步细化控制点网格,通过由粗到细配准方法提高精度及控制计算量<sup>[19-20]</sup>。但多层 B 样条在每层控制点密度一致,对湍流局部形变而言,若采用均一形变场往往会导致误配准和计算复杂。因此,为了提高配准精度并尽可能地避免更大的计算量,针对局部变换,本文提出构建图像多分辨率分块细化的形变场。

### 3.4 多层分块的形变加强

多层 B 样条配准算法是通过图像建立多分辨率图像金字塔(图 3),从低分辨率到高分辨率进行配准。具体是对图像进行降采样,分辨率

和尺度逐层下降,每层的控制点数不变,间隔下降。形变场记为:

$$\mathbf{A}(x) \mathbf{p} = \mathbf{A}_1(x) \mathbf{p}_1 + \dots + \mathbf{A}_L(x) \mathbf{p}_L, \quad (7)$$

式中:  $L$  是层数。形变场看作多分辨率形变场集合。

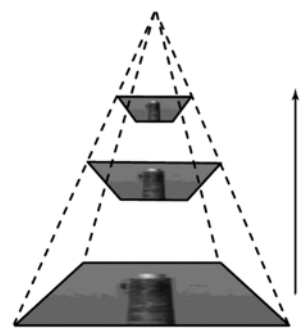


图 3 多分辨率金字塔( $L=3$ )

Fig. 3 Multi-resolution pyramid( $L=3$ )

多层分块的关键在于将每层图像分割成大小合适的区域,对配准结果进行判定。为此,设定一个局部误配准测度,在没有配准的区域进一步调整形变场。

配准结果与该层对应的控制点网格相关,首次配准时,层数为  $L$ ,将式(7)代入式(6)得到多层配准的代价函数。当代价函数的梯度幅值小时,

有两种可能:一是图像在当前层精确配准,或是代价函数在局部极小值图像非最优配准。无论哪种情况,区域细化都难以得到更好的结果,可忽略此情况。而当梯度幅值较大时,说明代价函数未处于全局最小值,存在误配准。因此,本文利用代价函数的梯度幅值判定当前层中最有可能误配准的区域,并对梯度幅值以控制点  $x_i$  为中心的区域进行降序排列。当梯度值大于给定值时,选定该区域(大小为控制点间隔的 2 倍),并从幅值列中清除相邻位置以避免区域重叠。对当前层的感兴趣区域进一步细化,将控制点间隔对半得到细化网格。每层图像的细化流程如图 4 所示。

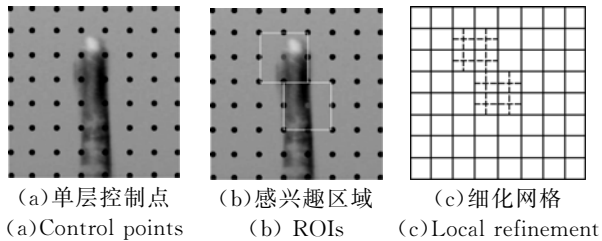


图 4 单层图像的分块细化示意图

Fig. 4 Illustration of local refinement at each level

图中黑点代表当前图像层的控制点,方框内为识别出的 ROI,增加控制点密度,利用 B 样条细分法获得细化网格上的控制点值。

### 3.5 配准优化

通过 3.4 节的图像多层分块细化得到最终的代价函数。为了解决代价函数最小化的计算量问题,本文采用有限内存拟牛顿算法(Limited-memory Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno, L-BFGS)<sup>[21]</sup>作为优化算法。L-BFGS 算法具有全局收敛性和超线性收敛性<sup>[22]</sup>。配准优化时,取单位矩阵作为初始正定矩阵。L-BFGS 仅存储最近  $m$  次更新的权重矢量  $c_x = [c_1, \dots, c_{m \times n}]^T$  和代价函数的梯度矩阵  $G = \nabla C(\mathbf{p})$ ,利用修正公式迭代至误差小于设定的精度,即得到 Hessian 矩阵的逆近似<sup>[23]</sup>,大大降低了时间消耗。

## 4 实验和分析

图像畸变校正的评判标准主要有主观评价和客观评价。由于湍流退化问题的病态性,一般情况下无法获得原始图像,因此目前还没有公认的

客观量化标准,主要采用主观判定。为了验证方法的有效性,设计了两组实验。所有程序均在 Intel Core 2.8GHz 处理器,2G 内存配置下运行,采用 Matlab 2010 编程。

### 实验 1:仿真图像

图 5(a)、5(b)是两幅原始图像,大小均为  $256 \times 256$ 。利用仿真软件各生成 50 frame 畸变图像序列。为了捕捉局部形变,层数设为 3;B 样条配准时初始网格间隔  $[h_x, h_y]$  设为  $[16, 16]$ ;对称约束系数  $\gamma$  按照相关文献设定为 5 000;分块的梯度阈值设为 0.1。L-BFGS 优化的误差精度设为  $10^{-4}$ ,  $m$  取为 5。由于篇幅所限,两组序列各仅列举一帧畸变图像,并给出了本文算法与传统 B 样条配准法在相同条件下校正结果,如图 6 所示。

图 6(a)为两组畸变序列的平均图像。由图可见,平均后的图像虽然较原始图像模糊,但帧平均相当于均值滤波,故使扭曲变形得到一定抑制,适合作为配准的参考图。对于畸变帧 6(b),传统 B 样条和本文校正结果分别如 6(c)、6(d)所示。与畸变图像相比,两幅图中像素偏移现象均得到校正。但对于灰度变化复杂的区域(如窗框,道路),由于传统 B 样条采用的是固定的控制点网格,故其校正结果中仍存在局部扭曲。本文方法采用图像多层结构,并对配准不高的区域进行二次细化,从而使得校正结果更平整,直观表明了分块加强的有效性。在时间复杂度方面,局部配准的计算量较大,耗时长,这与 B 样条拟合的复杂度和优化算法相关。本文采用多层分块配准,减小了不必要的网格细化;利用 L-BFGS 算法,避免牛顿法直接求解矩阵,实现了复杂度和配准精度间的平衡。

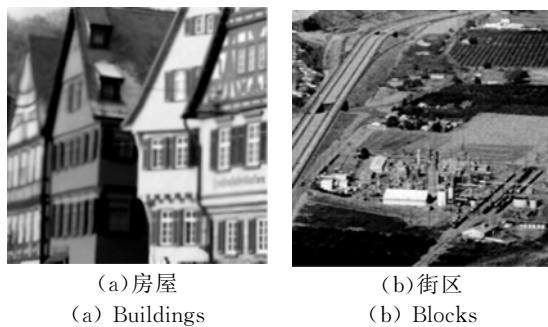


图 5 实验图像

Fig. 5 Experimental images

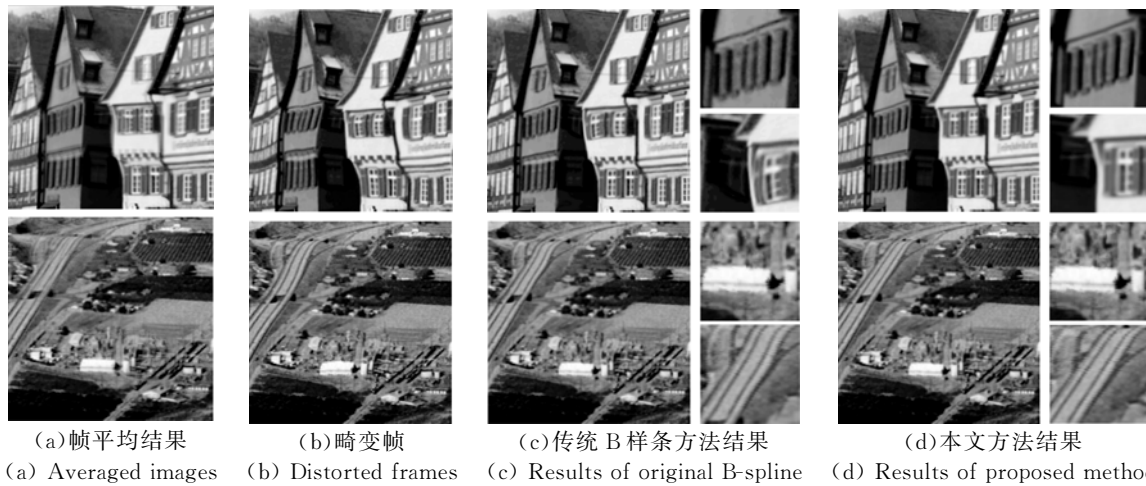


图 6 畸变图像校正实验结果

Fig. 6 Correction results of distorted images

为了更直观地对比本文算法和传统 B 样条配准的校正精度,将图 5 中的原始图像作为参考图像,记为  $R$ ,对校正前后的图像序列进行帧平均,结果分别记为  $M_1$  和  $M_2$ 。将校正前后的平均图像  $M_1$ 、 $M_2$  与原始图像  $R$  分别进行比较,将图像规整化为  $[0, 1]$ ,选用像素灰度差平方和(Sum of Squared Difference, SSD)、峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)作为相似性评价标准,如表 1 所示。由表 1 可知,校正后 SSD 均减小,这说明图像序列的平均图像均更接近原图;PSNR 增加,说明平均帧的模糊减轻,即校正后图像像素偏移减小。两种算法对图像畸变现象均有改善,但本文算法的校正结果比传统 B 样条方法更接近原始图像。

表 1 本文算法与传统 B 样条的校正结果对比

Tab.1 Comparison of our method and B-spline method

| 序列  | 校正前     |        | 本文算法    |        | B 样条算法  |        |
|-----|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
|     | SSD     | PSNR   | SSD     | PSNR   | SSD     | PSNR   |
| (a) | 0.019 8 | 17.041 | 0.000 5 | 33.760 | 0.001 1 | 30.120 |
| (b) | 0.018 3 | 15.712 | 0.000 4 | 30.722 | 0.000 9 | 26.819 |

一般情况下认为湍流图像中的噪声是高斯噪声。为验证本文方法在噪声条件下的校正效果,对畸变图像添加均值为零,方差随机的高斯噪声。图 7(a)是含噪声的两帧畸变图像,校正结果如图 7(b)所示。从目标结构和轮廓看,噪声干扰下的畸变校正效果还是理想的。

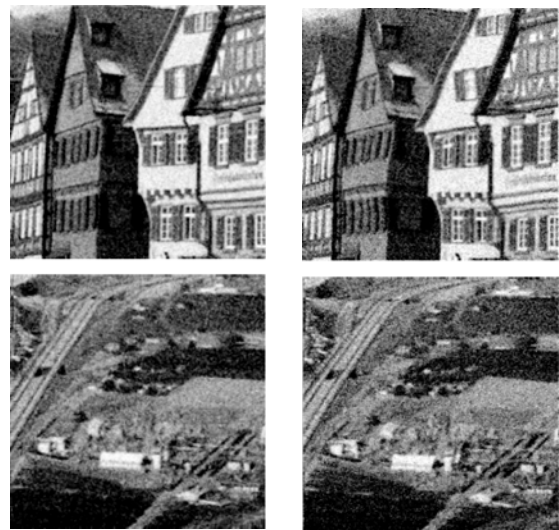


图 7 噪声下的畸变校正结果

Fig. 7 Correction results under noise condition

实验 2:真实湍流序列

采用实际拍摄的红外湍流序列对本文方法进行验证,分别在上午和下午拍摄两组图像。每组采集 100 frame,大小为  $320 \times 240$ 。在两组序列中随机抽取 3 frame 图像,如图 8 中前两行。由于下午地表热辐射强度大,获取的图像受热空气湍流影响较上午大,图 8 中第二行较第一行模糊严重。两组图像的校正参数与实验 1 相同,各帧对应的结果如图 8 的第 3 行,第 4 行所示。

从图 8 可以看出,受到湍流模糊影响,湍流退

化图像中人为目标靶和背景树木出现弯曲现象。在轻微模糊时,校正后的目标基本恢复直线。在

模糊严重时,本文方法仍然能起到一定的校正作用。

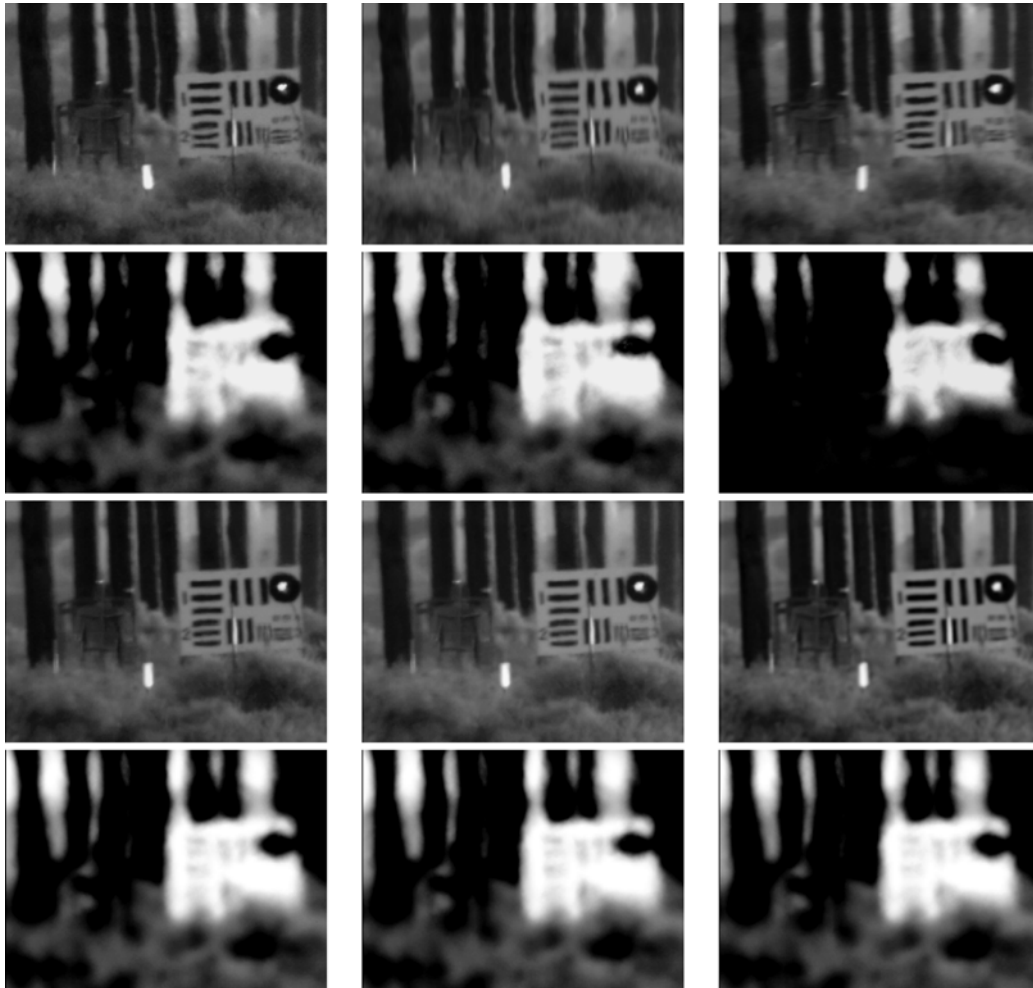


图 8 湍流退化序列校正实验(第 1 行和第 2 行分别为上午和下午获得的湍流帧,第 3 行对应首行轻微模糊下的校正结果,第 4 行对应第 2 行严重模糊下的校正结果)

Fig. 8 Correction results of turbulence-degraded sequence (The first column shows sample frames captured on the morning, which is weak blurred. The second column shows sample frames captured on the afternoon, which is serious blurred. The third and fourth columns are correction results of column 1 and column 2, respectively.)

## 5 结 论

本文针对湍流引起的成像畸变问题,通过分析图像畸变中全局和自由形变的特点,提出了一种基于仿射变换和多层 B 样条配准的偏移校正方法。首先,采用仿射变换去除序列中可能存在的整体几何畸变。然后,通过对湍流影响明显的区域进行控制点网格分层加密,采用 B 样条拟合局部形变。最后利用 L-BFGS 方法来优化配准代

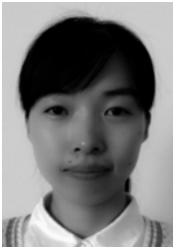
价函数,从而避免了大量矩阵计算。本文方法对序列帧的数量要求不高,帧数越多,帧平均所得参考图像的形变越小。仿真和实际试验均证明了该方法的有效性,在噪声和模糊条件下均能得到较好的校正结果。此外,本文算法采用多层分块的形变加强进一步优化 B 样条配准法,将文中算法用于存在较大扭曲的畸变图像,如医学图像配准时,校正结果也会令人满意。下一步的研究重点将考虑场景中存在目标运动时的序列校正和复原问题。

## 参考文献:

- [1] 殷兴良. 气动光学原理[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003.  
YIN X L. *Principle of Aero-optics* [M]. Beijing: China Astronautics Press, 2003. (in Chinese)
- [2] LI D, SIMSKE S. Atmospheric turbulence degraded-image restoration by kurtosis minimization [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(2): 244-247.
- [3] 洪汉玉, 张天序. 基于多分辨率盲目去卷积的气动光学效应退化图像复原算法[J]. 计算机学报, 2004, 27(7): 952-963.  
HONG H Y, ZHANG T X. Investigation of restoration algorithm for degraded images caused by aero-optics effects using multi-resolution blind deconvolution [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2004, 27(7): 952-963. (in Chinese)
- [4] 张士杰, 李俊山, 杨亚威, 等. 湍流退化红外图像降晰函数辨识[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 514-521.  
ZHANG SH J, LI J SH, YANG Y W, *et al.*. Blur identification of turbulence-degraded IR images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 514-521. (in Chinese)
- [5] 罗林, 樊敏, 王黎, 等. 空间扩展目标对准误差图像的高分辨率复原[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(5): 372-376.  
LUO L, FAN M, WANG L, *et al.*. High resolution restoration of the space extended object images with collimate fault [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, 26(5): 372-376. (in Chinese)
- [6] 耿则勋, 魏小峰, 沈忱. 结合参数估计的天文图像极大似然恢复[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2943-2950.  
GENG Z X, WEI X F, SHEN CH. Astronomical image restoration based on maximum-likelihood incorporated parameter estimation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11): 2943-2950. (in Chinese)
- [7] HONG H Y, LI L C, ZHANG X Y. Blind restoration of real turbulence-degraded image with complicated backgrounds using anisotropic regularization [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(24): 4977-4986.
- [8] 黄建明, 沈忙作. 基于噪声特征的大气湍流退化图像多帧盲反卷积复原[J]. 光学学报, 2008, 28(9): 1686-1690.  
HUANG J M, SHEN M Z. Blind deconvolution restoration of atmospheric turbulence-degraded images based on noise characteristic [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(9): 1686-1690. (in Chinese)
- [9] LI D, MERSEREAU R M, SIMSKE S. Atmospheric turbulence-degraded image restoration using principal components analysis [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(3): 340-344.
- [10] ZHU X, MILANFAR P. Removing atmospheric turbulence via space-invariant deconvolution [J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013; 35(1): 157-170.
- [11] 刘纯胜, 卢晓芬, 洪汉玉, 等. 基于特征点配准的气动光学图像校正方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(10): 1468-1469.  
LIU CH SH, LU X F, HONG H Y, *et al.*. Investigation on the correction method of distorted image caused by aero-optic effects based on matching of feature points [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, 28(10): 1468-1469. (in Chinese)
- [12] 卢晓芬, 张天序, 洪汉玉. 气动光学效应像素偏移图像校正方法研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(5): 758-761.  
LU X F, ZHANG T X, HONG H Y. Image correction method with pixel deviation caused by aero-optics effects [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 758-761. (in Chinese)
- [13] MAO Y, GILLES J, ESEDOGLU S. Non-rigid geometric distortions correction-application to atmospheric turbulence stabilization [J]. *Inverse Problems and Imaging*, 2012, 6: 531-546.
- [14] SHIMIZU M, YOSHIMURA S, TANAKA M, *et al.*. Super-resolution from image sequence under influence of hot-air optical turbulence [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Alaska, USA: IEEE press*, 2008: 1-8.
- [15] MODAT M, RIDGWAY G R, TAYLOR Z A, *et al.*. Fast free-form deformation using graphics processing units [J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2010, 98(3): 278-284.
- [16] SZELISKI R, COUGHLAN J. Spline-based image registration [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 22(93): 199-218.
- [17] RUECKERT D, SONODA L. Non-rigid registration using free-form deformation: application to breast MR images [J]. *IEEE Transactions on*

- Medical Image*, 1999,8(18):713-715.
- [18] LEE S, WOLBERG G, SHIN S Y. Scattered data interpolation with multilevel B-splines [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1997, 3(3): 228-244.
- [19] ZITOVA B, FLUSSER J. Image registration methods: a survey [J]. *Image and Vision Computing*, 2003,21(11):977-1000.
- [20] 王敏尤,胡海波,秦斌杰.基于光流和多层次 B 样条自由形变的医学图像鲁棒形变配准[J]. *上海交通大学学报*, 2008,42(10):1661-1664.  
WANG M Y, HU H B, QIN B J. Robust deformable medical image registration using optical flow and multilevel free form deformation [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2008,42(10): 1661-1664. (in Chinese)
- [21] ZHU C, BYRD R H, LU P, *et al.*. Algorithm 778: L-BFGS-B: Fortran subroutines for large-scale bound constrained optimization [J]. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 1997,23(4):550-560.
- [22] MOEALES J L, NOCEDAL J. Remark on“algorithm 778: L-BFGS-B: Fortran subroutines for large-scale bound constrained optimization” [J]. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 2011,38(1):7.
- [23] 丁辉,张兴敢,唐岚.基于有限内存 Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno 优化算法的图像非刚性配准方法[J]. *南京大学学报:自然科学版*, 2011, 47(4):432-437.  
DING H, ZHANG X G, TANG L. Non-rigid registration based on Basic-spline free form deform and limited memory Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno optimal algorithm [J]. *Journal of Nanjing University: Natural sciences*, 2011,47(4): 432-437. (in Chinese)

## 作者简介:



张 姣(1988—),女,陕西汉中,博士研究生,2010 年于西北大学获得学士学位,2013 年于第二炮兵工程大学获得硕士学位,主要从事图像复原,目标识别方面的研究。E-mail: zj8822tt@163.com

## 作者简介:



李俊山(1956—),男,陕西白水人,教授,博士生导师,1981 于国防科技大学获得学士学位,1988 年于第二炮兵工程学院获得硕士学位,2001 年于西安微电子技术研究所获得博士学位,主要从事智能图像处理与目标感知识别,电子对抗模拟与仿真等。

(版权所有 未经许可 不得转载)