

## 参数自适应的图像亚像素级配准方法

韩磊\*, 黄陈蓉, 徐梦溪, 郑胜男

(南京工程学院 计算机工程学院, 南京 211167)

(\*通信作者电子邮箱 han\_lei@126.com)

**摘要:** 目前基于区域的图像配准方法不能同时满足宽范围运动参数和高准确度的配准要求。基于图像变换的频域和空间域特性, 提出一种运动参数自适应的图像配准方法, 设计了旋转参数、平移参数的估计步骤和融合方法。基于仿真实验对参数自适应方法与 Vandewalle 方法、Keren 改进方法的效果进行了比较分析, 采用误差的标准差和均方误差两项指标评价配准算法的参数自适应性和配准准确度, 参数自适应方法的两项评价指标均低于另两种方法, 表明其在宽范围运动参数估计方面有自适应能力和高配准精度。

**关键词:** 图像配准; 亚像素; 运动参数估计; 自适应; 图像融合

**中图分类号:** TN911.73 **文献标志码:** A

### Parameter-adaptive approach to image sub-pixel registration

HAN Lei\*, HUANG Chenrong, XU Mengxi, ZHENG Shengnan

(School of Computer Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing Jiangsu 211167, China)

**Abstract:** The performance of some current area-based image registration algorithms declines when image transformation parameters are of both wide range and high precision. Concerning this problem, a parameter-adaptive registration algorithm was proposed based on the natures of image transformation in frequency/space domain, and the estimation steps and fusion method for rotation parameter and shift parameter were designed. A set of simulation experiments were implemented to compare the performance of the proposed algorithm with the Vandewalle's and improved Keren's. Mean square error and standard deviation of square error were used as evaluation indicators for registration precision and parameters adaptation. The two indicators of the proposed algorithm are lower than those of the other two methods, which means the proposed algorithm has adaptive ability in wide range parameters estimation and high accuracy of registration.

**Key words:** image registration; sub-pixel; motion parameter estimation; adaptive; image fusion

## 0 引言

在遥感数据分析、计算机视觉、模式识别、图像超分辨率重建等领域都存在图像配准问题。图像配准是将不同时间、不同传感器(成像设备)或不同条件下(天气、照度、摄像位置和角度等)获取的两幅或多幅图像进行匹配、叠加的过程<sup>[1]</sup>。由于图像配准的重要性,多年来,不同应用领域的研究者们从不同角度提出了很多配准方法。就算法本质而言,现有图像配准方法主要分为两大类:基于特征的方法和基于区域的方法<sup>[2]</sup>。基于特征的方法<sup>[3]</sup>以点、轮廓、封闭曲线、直线段等特征作为运动参数估计的依据,对不同类型图像的配准有明显优势;基于区域的方法的原理是直接利用图像像素的强度进行运动估计,常用于同种类别图像或图像中无明显局部特征的情况<sup>[4]</sup>,例如多帧图像超分辨率重建的图像配准。

在基于区域配准方法的框架下, Tsai 等<sup>[5]</sup>从频域视角提出解决多帧图像复原和配准的方法。此后,许多频域方法基于傅里叶变换的良好性质,即函数的平移、旋转和缩放对频域都有对称性,进而利用两幅位移图像在频率域相位相关估计配准参数。Lucchese 等<sup>[6]</sup>运用图像傅里叶变换的幅度谱与其镜像版有零交叉线的特性估计两幅图像的旋转角度; Vandewalle 等<sup>[7]</sup>提出运用图像频域幅度谱的旋转特性估计两

幅图像间旋转角度,然后,运用傅里叶变换平移定理估计两幅图像间的水平和垂直位移。另外,也有学者从空间域视角提出了一般运动估计模型,如 Bergen 等<sup>[8]</sup>和 Vrigkas 等<sup>[9]</sup>在分辨率数据结构中采用了分级结构进行运动估计; Keren 等<sup>[10]</sup>研究了基于泰勒级数展开的迭代平面运动估计算法,并用高斯金字塔对初始运动参数估计值逐渐精细化。此后,有学者在 Keren 方法基础上提出改进,扩展了算法适应能力<sup>[11-12]</sup>。也有学者从互信息角度提出配准算法,但算法对参数变化适应能力不强<sup>[13-14]</sup>。

在同类图像配准的实际应用中,待配准图像间的相对运动尺度范围往往是不确定的,因此,水平位移、垂直位移、旋转角度的参数范围不同。另外,运动参数估计的精度要求也因应用目的而不同,但多数情况下,高配准精度有益于图像后续处理,例如:在图像超分辨率重建中,要求多幅低分辨率图像的配准精度达到亚像素级。因此,建立一种参数自适应的、高精度的图像配准方法是必要的。然而上述基于区域配准的典型方法,不能很好满足这些要求: Vandewalle 方法的旋转参数估计适应范围广、复杂度稳定,但在亚像素级平移参数估计方面存在不足; Keren 方法有亚像素级精度的配准能力,但是不适合图像大平移应用场合。针对图像配准中的参数自适应问题,本文首先分析频域模型和空间域模型的理论基础,

收稿日期: 2012-08-13; 修回日期: 2012-09-17。

**作者简介:** 韩磊(1982-),男,河南南阳人,讲师,硕士,主要研究方向:图像工程、嵌入式计算; 黄陈蓉(1963-),女,江西南昌人,教授,博士,主要研究方向:图像工程、多媒体技术; 徐梦溪(1983-),女,江苏南京人,讲师,硕士,主要研究方向:遥感信息处理、图像处理; 郑胜男(1986-),女,河南信阳人,助理实验师,硕士,主要研究方向:数字图像处理。

然后,融合 Vandewalle 方法和 Keren 方法的各自优势建立一种参数自适应的亚像素级图像配准方法;最后,通过仿真实验比较本文配准方法、Vandewalle 方法及 Keren 改进方法在参数适应、配准精度方面的差异。

## 1 图像配准模型分析

基于区域的图像配准方法需要先对图像间的运动建立模型,然后根据图像直接或间接信息求解模型参数,最后实现图像配准。下面阐述图像配准的一般模型,并从空间域和频率域建立图像配准的参数估计模型。

### 1.1 图像配准的一般模型

图像配准可以描述成两相邻图像之间的空间变换和灰度变换<sup>[15]</sup>,即先将一幅图像像素的坐标  $(x, y)$  映射到一个新的坐标系中的某一坐标  $(x', y')$ ,再对其像素进行重采样。若定义两幅图像分别为  $f(x', y')$  和  $g(x, y)$ ,则两幅图像的变换关系如式(1)所示:

$$g(x, y) = I[f(h(x, y))] \quad (1)$$

其中: $h$  表示空间变换,描述像素坐标变换关系; $I$  表示灰度变换,描述传感器类型不同或辐射变形所引入的变换。通常灰度变换在图像预处理阶段处理,图像配准一般只关心坐标的几何变换。本文只研究几何变换中的刚体变换,即变换前后,对应两点的间距在两幅图像中保持不变,刚体变换可分解为旋转、平移和镜像。

在二维空间中,若记点  $(x, y)$  为  $X = [x \ y]^T$ ,该点绕坐标原点旋转  $\theta$ 、水平平移  $s_x$ 、垂直平移  $s_y$  后,得到的点  $(x', y')$  记为  $X' = [x' \ y']^T$ ,若记旋转变换矩阵为  $R$ ,平移变换矩阵为  $S$ ,则:

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad S = [s_x \ s_y]^T$$

于是,坐标变换关系为

$$X' = RX + S \quad (2)$$

$$\text{即} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s_x \\ s_y \end{bmatrix}.$$

为方便后期模型推导,这里将配准参考图像记为  $f(x', y')$  或  $f(X')$ ,待配准图像记为  $g(x, y)$  或  $g(X)$ 。待配准图像经过旋转角度  $\theta$ 、水平平移  $s_x$  和垂直平移  $s_y$  变换到参考图像,忽略式(1)中的灰度变换,根据式(2)可得:

$$g(x, y) = f(x \cos \theta - y \sin \theta + s_x, y \cos \theta + x \sin \theta + s_y) \quad (3)$$

或

$$g(X) = f(RX + S) \quad (4)$$

因此,图像配准问题的关键是根据参考图像与待配准图像之间的关系估计出  $s_x$ 、 $s_y$  和  $\theta$  三个参数。

### 1.2 空间域参数估计模型

根据图像配准的一般模型,当  $\theta$  较小时,  $\cos \theta$  和  $\sin \theta$  可以用泰勒级数展开,于是式(3)可近似如下:

$$g(x, y) \approx f\left(x + s_x - y\theta - x \frac{\theta^2}{2}, y + s_y + x\theta - \frac{y\theta^2}{2}\right) \quad (5)$$

然后对式(5)进行二维泰勒级数展开,取前三项得

$$g(x, y) \approx f(x, y) + \left(s_x - y\theta - \frac{x\theta^2}{2}\right) \frac{\partial f}{\partial x} + \left(s_y + x\theta - \frac{y\theta^2}{2}\right) \frac{\partial f}{\partial y} \quad (6)$$

由式(6)建立误差函数:

$$E(s_x, s_y, \theta) = \sum \left[ f(x, y) + \left(s_x - y\theta - \frac{x\theta^2}{2}\right) \frac{\partial f}{\partial x} + \left(s_y + x\theta - \frac{y\theta^2}{2}\right) \frac{\partial f}{\partial y} - g(x, y) \right]^2 \quad (7)$$

误差函数  $E(s_x, s_y, \theta)$  用作运动参数估计的目标函数,以误差函数取得最小值时的  $(s_x, s_y, \theta)$  作为运动参数估计值,即:

$$(\hat{s}_x, \hat{s}_y, \hat{\theta}) = \arg \min E(s_x, s_y, \theta)$$

对式(7)关于  $s_x$ 、 $s_y$  和  $\theta$  分别求偏导数,并令偏导数等于0,则可得

$$CP = V \quad (8)$$

其中:

$$C = \begin{bmatrix} \sum \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 & \sum \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial y} & \sum Q \frac{\partial f}{\partial x} \\ \sum \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial y} & \sum \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 & \sum Q \frac{\partial f}{\partial y} \\ \sum Q \frac{\partial f}{\partial x} & \sum Q \frac{\partial f}{\partial y} & \sum Q^2 \end{bmatrix}$$

$$V = \begin{bmatrix} \sum \frac{\partial f}{\partial x} (g - f) \\ \sum \frac{\partial f}{\partial y} (g - f) \\ \sum Q (g - f) \end{bmatrix}$$

$$Q = x \frac{\partial f}{\partial y} - y \frac{\partial f}{\partial x}, \quad P = [\hat{s}_x \ \hat{s}_y \ \hat{\theta}]^T$$

由式(8)得:

$$P = C^{-1}V \quad (9)$$

Keren 方法正是运用上述空间域模型进行参数估计的代表方法之一,该方法可以获得亚像素级的配准精度,但是该方法基于小范围的泰勒级数展开式,所以,当旋转角度较大时,方法性能会下降。

### 1.3 频域参数估计模型

下面分析图像变换时,其频域中的一些特点,首先计算  $g(X)$  的傅里叶变换  $F_g(U)$ :

$$\begin{aligned} F_g(U) &= \iint_X g(X) \exp(-j2\pi U^T X) dX = \\ &= \iint_X f(RX + S) \exp(-j2\pi U^T X) dX = \\ &= \iint_K f(RK) \exp(-j2\pi U^T (K - R^{-1}S)) dK = \\ &= \exp(j2\pi (RU)^T S) \iint_K f(RK) \exp(-j2\pi U^T K) dK = \\ &= \exp(j2\pi (RU)^T S) \iint_L f(L) \exp(-j2\pi (RU)^T L) dL \end{aligned} \quad (10)$$

取幅度谱:

$$|F_g(U)| = |\exp(j2\pi (RU)^T S) F_f(RU)| = |F_f(RU)| \quad (11)$$

式(11)说明,图像  $g(X)$  和  $f(X')$  的傅里叶变换幅度谱仅与旋转变换有关,空间域中图像旋转多少度,频域中幅度谱也旋转相应度数。运用频域中这一特性,可以分离出旋转变换的参数,再利用傅里叶变换平移定理计算平移量。

Vandewalle 方法在运用上述频域模型的配准方法中性能突出,特别是在处理混叠图像配准方面具有很强的鲁棒性,在求解旋转变换时,算法具有较强稳定性。但是,频域方法求解平移量参数的能力较弱。

## 2 参数自适应的图像亚像素级配准方法

上述方法在某些运动参数估计方面有各自优势,但是都不能完全适应大范围、高精度的参数估计需求,因此,本章给出一种对运动参数有自适应能力的图像亚像素级配准方法。

### 2.1 旋转角度估计

根据式(11),待配准图像与参考图像之间的旋转参数 $\theta$ 的求解问题转变成了两幅图像的傅里叶变换幅度谱之间的旋转参数求解问题,有效地实现了旋转参数与平移参数的分离。由此,可以得到估计旋转参数的一般步骤:

- 1) 分别计算参考图像和待配准图像傅里叶变换幅度谱 $|F_f(U)|$ 、 $|F_g(U)|$ ;
- 2) 对范围内的每一个旋转参数 $\theta$ ,计算相应的旋转变换矩阵 $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{R}^{-1}$ ,旋转幅度谱 $|F_g(\mathbf{R}^{-1}U)|$ ,并计算 $|F_f(U)|$ 和 $|F_g(\mathbf{R}^{-1}U)|$ 的相关;
- 3) 使 $|F_f(U)|$ 、 $|F_g(\mathbf{R}^{-1}U)|$ 最大相关的 $\theta$ 即是旋转角度的估计值 $\hat{\theta}_0$ 。

### 2.2 亚像素级参数估计

借鉴 Keren 亚像素级参数估计方法的思想,为了增强算法对噪声的稳健性,采用由粗到精的三层金字塔结构,运用迭代方法逐步求得亚像素级的配准参数。

正如前文所述,式(5)仅在 $\theta$ 很小时成立,所以 Keren 方法不适合求解大旋转配准参数,本文使用 2.1 节频域方法求出旋转参数后,修正待配准图像,然后再对参考图像、修正后的待配准图像进行分层建模,直至求解,具体方法如下。

- 1) 基于待配准图像 $g(x,y)$ ,将 2.1 节得到的旋转参数 $\hat{\theta}_0$ 代入式(12)求得修正图像 $g'(x,y)$ :
- $$g'(x,y) = g(x \cos \theta + y \sin \theta, y \cos \theta - x \sin \theta) \quad (12)$$
- 2) 对两张都是 $N \times N$ 的参考图像 $f(x,y)$ 和修正图像 $g'(x,y)$ 进行高斯滤波和降采样,得到两张 $(N/2) \times (N/2)$ 的图像;重复上述过程,得到两张 $(N/4) \times (N/4)$ 的图像,形成分辨率由粗到精的图像金字塔。
  - 3) 从最底层的图像开始配准。
  - 4) 根据式(9)求得运动参数估计 $\mathbf{P}$ 。
  - 5) 用步骤4)求得的 $\mathbf{P}$ ,根据式(3),对上一层的图像进行刚体变换,得到修正图像。
  - 6) 重复步骤4)、5),迭代求解。
  - 7) 执行步骤4)得到亚像素级参数估计 $\mathbf{P}_f = [\hat{s}_x \quad \hat{s}_y \quad \hat{\theta}_f]^T$ ,结束。

### 2.3 参数融合

2.1 节旋转参数估计方法在实施时, $|F_f(U)|$ 、 $|F_g(\mathbf{R}^{-1}U)|$ 是离散的,旋转角度 $\theta$ 也是离散的,通常选择 $\theta$ 的步进值为 $0.1^\circ$ ,因此 $\hat{\theta}_0$ 存在非噪声引起的误差。

2.2 节的参数估计是在 2.1 节旋转参数估计的基础上进行的,2.1 节方法可以应对较大范围的旋转变换,而 2.2 节的参数估计则可以达到亚像素精度,两者的参数估计可以进行融合,得到最终精确的运动参数。

亚像素级参数估计值 $\mathbf{P}_f$ 中的 $\hat{s}_x$ 、 $\hat{s}_y$ 即是最终的水平平移、垂直平移量,而 $\mathbf{P}_f$ 中的 $\hat{\theta}_f$ 只是旋转角度的修正量,最终旋转角度估计值应是 $\hat{\theta}_f$ 和 2.1 节求得的 $\hat{\theta}_0$ 之和。

## 3 仿真实验

本文采用仿真实验验证参数自适应的图像亚像素级配准方法对宽范围的运动参数的适应能力,实验思路如下:首先选取宽范围运动参数的 9 组有代表性的参数值,然后由 1 幅参考图像按照既定参数值生成 9 幅待配准图像,并分别运用 Vandewalle 方法、Keren 改进方法和本文的参数自适应方法求解待配准图像和参考图像之间的运动参数。

### 3.1 图像预处理

选用大小为 $256 \times 256$ 的灰度图片 Lena.tif,对图片下采样、加窗、边界补零生成如图 1 所示的 $128 \times 128$ 的参考图像。以该参考图像为基准,按照表 1 仿真参数栏的参数生成待配准图像。表 1 的仿真参数栏的 $s_x$ 、 $s_y$ 表示平移变换的水平、垂直位移,正负号表示移位方向; $\theta$ 表示旋转变换角度,正负号表示逆时针或顺时针旋转方向。不失一般性,9 组运动参数的设计充分考虑了运动的范围和精度,这样,得到 9 幅待配准图像的大小仍为 $128 \times 128$ ,图 2 是按照运动参数(12.3,14.5,18.5)生成的待配准图像。



图1 参考图像

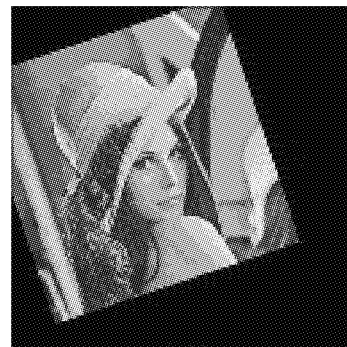


图2 待配准图像之一

### 3.2 仿真结果

分别使用 Vandewalle 方法、Keren 改进方法和本文参数自适应方法计算 9 幅待配准图像相对于参考图像的运动参数,计算结果如表 1 所示。

### 3.3 比较分析

表 1 中仿真参数列是 9 幅待配准图像与参考图像之间的平移、旋转变换的理论值,其他列是估计值。直观分析表 1 数据不难看出,Vandewalle 方法的旋转参数比较接近理论值,但是,在本次实验中,它的平移参数估计值与理论值有较大偏离;Keren 改进方法的平移参数估计接近理论值,旋转参数与理论值稍有偏离;本文的参数估计方法的平移参数和旋转参数估计值与理论值都相差不大。使用其他测试图像做同类实验,仍有类似结果:Vandewalle 方法的旋转参数估计能力较



强,而平移参数估计精度不足;Keren 改进方法对小角度旋转图像的参数估计较为精准,但在大角度情况下的参数估计稍有偏差;本文方法在参数宽范围变化时均表现出较高的配准准确度。此实验结果与前文的理论模型是一致的:Vandewalle 方法的平移参数估计基于傅里叶变换平移特性,然而在求解平移参数时,面临的是一个超方程组求解,频率范围、频率步长等因素都影响估计的精确程度;而 Keren 改进方法的本质仍是基于小角度下的泰勒级数展开,因此在解决大角度旋转参数估计问题时不够准确。

为了更准确地评价参数估计准确程度和参数范围适应能力,接下来从均方误差、平方误差的标准差两个角度对表1实

验数据进行分析,分析结果如表2所示。均方误差能够反映参数估计的准确程度,而平方误差的标准差则体现了三种方法对不同程度变换的测试图像的运动参数估计时误差的稳定程度,也说明了三种方法对运动参数变化的自适应能力。从表2可以看到,平移参数估计的均方误差的大小关系是:Vandewalle 方法最大,Keren 改进方法次之,本文方法最小;而旋转角度参数的均方误差大小关系是:Keren 改进方法最大,Vandewalle 次之,本文方法最小。这说明本文的图像配准方法在平移参数估计和旋转参数估计方面都有较高的准确度。另外,无论是平移参数还是旋转参数,本文方法的平方误差标准差都是最小的,说明其具有较强的参数自适应能力。

表1 仿真实验结果

仿真参数			Vandewalle 估计参数			改进 Keren 估计参数			本文方法估计参数		
$s_x$	$s_y$	$\theta$	$\hat{s}_x$	$\hat{s}_y$	$\hat{\theta}$	$\hat{s}_x$	$\hat{s}_y$	$\hat{\theta}$	$\hat{s}_x$	$\hat{s}_y$	$\hat{\theta}$
1.5	2.3	0.5	0.125	0.739	0	1.434	2.294	0.355	1.423	2.285	0.317
3.3	-4.2	5.5	-0.020	-0.100	5.6	3.305	-4.320	5.150	3.217	-4.196	5.508
-3.3	4.2	-5.5	0.215	0.140	-5.8	-3.627	4.180	-5.235	-3.323	4.139	-5.527
7.6	8.6	-10.5	0.043	-0.004	-10.7	7.765	8.343	-10.156	7.597	8.513	-10.581
-7.6	8.6	10.5	0.085	-0.085	10.6	-7.795	8.525	10.230	-7.707	8.650	10.529
9	-8.6	-12.5	0.012	0.012	-12.4	8.955	-8.705	-12.250	9.042	-8.686	-12.499
11.2	10.8	15.5	-0.110	0.038	15.4	10.750	10.950	14.980	10.936	10.858	15.394
11.2	-10.8	-15.5	0.003	0.039	-15.4	11.055	-11.005	-14.954	11.104	-10.858	-15.392
12.3	14.5	18.5	0.019	0.005	18.4	11.523	14.752	18.120	11.914	14.584	18.354

表2 仿真实验数据分析

方法	均方误差			平方误差的标准差		
	$\hat{s}_x$	$\hat{s}_y$	$\hat{\theta}$	$\hat{s}_x$	$\hat{s}_y$	$\hat{\theta}$
Vandewalle 方法	8.342	8.837	0.221	52.487	61.208	0.075
Keren 改进方法	0.334	0.158	0.362	0.186	0.032	0.184
本文方法	0.129	0.028	0.049	0.047	0.003	0.011

#### 4 结语

本文主要研究刚体变换建模的多张图像配准问题,首先描述了常见技术方法,重点介绍基于区域方法的研究进展,指出了一些典型方法的适用范围,提出了参数自适应的高精度图像配准问题。针对该问题,从频域和空间域角度研究运动参数估计模型,分析了 Vandewalle 频域方法和 Keren 空间域方法各自的优势和不足,设计了一种基于频域和空间域模型的图像配准方法。利用9幅已知运动参数的典型图像和1幅参考图像进行配准实验,引入平方误差的标准差以及均方误差两项指标评价配准算法的参数自适应性和配准准确度,仿真实验数据表明,与 Vandewalle 方法、Keren 改进方法相比,本文的配准方法具有参数自适应性和较高的配准准确度。该方法有助于提高诸如图像超分辨率重建、遥感数据分析等的精度。

#### 参考文献:

- [1] 葛永新,杨丹,张小洪.基于边缘特征点对齐度的图像配准方法[J].中国图象图形学报,2007,12(7):1291-1295.
- [2] 文贡坚,吕金建,王继阳.基于特征的高精度自动图像配准方法[J].软件学报,2008,19(9):2293-2301.
- [3] MALIK S A, KUNWAR R S, HAQUE M E. Automatic image registration using evolutionary algorithm [J]. Recent Research Science and Technology, 2011, 4(1):33-39.
- [4] 全卉.超分辨率图像配准和重建[D].上海:上海交通大学,2009.
- [5] TSAI R Y, HUANG T S. Multiframe image restoration and registration [C]// Advances in Computer Vision and Image Processing.

Greewich: JAI Press, 1984: 317-339.

- [6] LUCCHESI L, CORTELAZZO G M. A noise-robust frequency domain technique for estimating planar roto-translations [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2000,48(6):1769-1786.
- [7] VANDEWALLE P, SÜSTRUNK S, VETTERLI M. A frequency domain approach to registration of aliased images with application to super-resolution [J]. EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 2006(2006):233.
- [8] BERGEN J R, ANANDAN P, HANNA K J, et al. Hierarchical model-based motion estimation [C]// ECCV '92: Proceedings of the Second European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer-Verlag, 1992:237-252.
- [9] VRIGKAS M, NIKOU C, KONDI L P. On the improvement of image registration for high accuracy super-resolution [C]// ICASSP2011: 2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Piscataway: IEEE, 2011:181-184.
- [10] KEREN D, PELEG S, BRADA R. Image sequence enhancement using sub-pixel displacement [C]// CVPR '88: IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 1988:742-746.
- [11] 李展,韩国强,陈湘骥,等.基于 Keren 配准和插值的快速超分辨率图像重建[J].华南理工大学学报:自然科学版,2011,39(5):84-90.
- [12] 张永育,李翠华,余礼钹,等.基于 Keren 改进配准算法的 IBP 超分辨率重建[J].厦门大学学报:自然科学版,2012,51(4):686-690.
- [13] 党建武,孙腾,王阳萍,等.互信息驱动的有限元医学图像配准方法[J].计算机应用,2011,31(3):733-736.
- [14] MALVIYA A, BHIRUD S G. Wavelet based image registration using mutual information [C]// ELECTRO-2009: International Conference on Emerging Trends in Electronic and Photonic Devices and Systems. [S. l.]: IEEE, 2009:241-244.
- [15] 唐玓.面向图像配准的亚像素运动估计算法研究[D].长沙:国防科学技术大学,2007.