

— 文章编号: 1001-1595(2011)03-0326-06

## 基于 B 样条的云图非刚性配准方法

徐丽燕, 陈允杰, 邱 军, 史栋林, 夏德深

南京理工大学 计算机科学与技术学院, 江苏 南京 210094

### Nephogram Nonrigid Registration Method Based on B-spline

XU Liyan, CHEN Yunjie, QIU Jun, SHI Donglin, XIA Deshen

The School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

Abstract: Serial images obtained by meteorological satellite have both rigid and nonrigid deformations. Due to this characteristic, a hierarchical transformation model of the motion based on B-spline is introduced. The global rigid deformation of the image is mainly caused by the position changes of the sensor, and it includes rotation and shift. Cloud's distortion results in the local nonrigid deformation. The global motion of the image is modeled by an affine transformation which carries out the rigid registration. While the local image deformation is described by an improved free-form deformation (FFD) model based on B-spline. The algorithm has been applied to the fully automated registration system of nephograms, and the results clearly indicate that the approach we proposed can not only achieve sub-pixel precision, but also decrease the runtime of the process.

Key words: nephogram; nonrigid registration; B-spline; FFD model; normalized mutual information

摘 要: 针对气象卫星分时成像所获得的序列图像同时具有刚性及非刚性形变的特点, 提出结合 B 样条的分级变换模型进行配准。该算法不但考虑到传感器位置变化引起的旋转和平移等整体刚性形变, 而且还考虑云的扭曲所引起的局部非刚性形变。对于图像整体刚性形变采用仿射变换配准算法进行校正, 使图像整体趋于一致; 而云的局部扭曲等非刚性形变采用改进的基于 B 样条的自由形态变形模型(FFD)非刚性配准算法进行校正。试验结果表明, 本算法能够达到亚像素级的配准精度, 并且具有较快的运行速度。

关键词: 云图; 非刚性配准; B 样条; FFD 模型; 归一化互信息

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A

基金项目: 国家自然科学基金(60773172); 江苏省自然科学基金(BK2008411); 教育部博士学科点基金(200802880017)

## 1 引 言

图像配准是多源信息融合、地理信息处理、变化检测、目标提取与定位、提高图像分辨率等实际应用中的首要步骤, 广泛应用于计算机视觉、遥感图像处理、医学诊断等多个领域。图像配准是指对同一场景在不同时间、不同视角或由不同传感器拍摄的两幅或多幅图像之间确定最佳匹配的过程<sup>[1]</sup>。待配准的两幅或多幅图像在分辨率、灰度属性、位移和旋转、非线性变换等方面均存在不同, 其包含的信息具有互补性。为充分利用各幅图像的信息, 扩大信息应用的广度和深度, 需要对图像进行计算、比较、融合等高级处理, 而图像配准正是这一切工作的重要前提。

根据变换模型的不同, 可将配准方法分为刚性配准和非刚性配准两类。刚性配准通常需要建立待配准图像和参考图像各特征的对应关系, 从

而计算出六个变换参数(三个平移分量和三个旋转分量)。目前刚性配准算法已日趋成熟, 可以达到较高的配准精度。但是在许多情况下刚性配准不能满足实际需求, 图像的扭曲、局部的旋转平移变化等非线性形变, 需要研究对应的非刚性配准方法进行校正。

目前非刚性配准研究主要集中在医学领域, 已发展出许多算法<sup>[2-7]</sup>。这些算法的思想是将非刚性配准问题视为一个优化问题, 即对待配准图像实施特定的空间变换得到与参考图像差异最小、相似性测度最优的图像。空间变换参数通过最小化待配准图像与参考图像之间的差异得到, 根据求取空间变换参数方法的不同发展出使用基函数的非刚性配准、基于平滑函数的非刚性配准、基于物理模型的非刚性配准和基于有限元(finite element method, FEM)配准等方法<sup>[8-12]</sup>。相似性测度是对两幅图像相似程度的度量, 通常采用的

相似性测度有相关系数、联合熵、互信息 (mutual information, MI) 和归一化互信息 (NMI) 等<sup>[13-16]</sup>。

本文在分析气象图像形变特点的基础上, 提出采用分级变换模型进行图像配准, 即先校正图像整体的刚性形变, 再对图像局部采用改进的基于 B 样条的 FFD 非刚性配准算法进行校正。

## 2 针对气象图像的分级变换模型

气象卫星采用分时成像, 在成像时间间隔内, 遥感器处于非常复杂的运行状态, 一方面卫星在轨道上向前飞行并带有随机的姿态变化, 可以分解为微小的方位旋转和平移, 表现为图像的刚性形变; 另一方面在这段时间间隔内, 由于相机拍摄角度的变化或云的运动使得图像的局部区域发生扭曲, 导致拍摄的图像产生非刚性形变。因此卫星在时间间隔前后得到的多光谱图像之间的形变主要包括两部分: ① 遥感器本身轨道位置和姿态变化引起的刚性形变; ② 分时成像时间间隔内拍摄角度及云的运动所引起的非刚性形变。

图 1 描述了由于遥感器轨道位置及姿态变化引起的图像平移、旋转、缩放刚性变化。图中  $dX_0$ 、 $dY_0$  表示遥感器在  $X$ 、 $Y$  方向的位移, 表现为图像在这两个方向的平移;  $dZ_0$  表示遥感器在  $Z$  方向的位移, 表现为图像的缩放;  $d\varphi$ 、 $d\omega$ 、 $d\kappa$  表示遥感器在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的旋转角度, 表现为图像的旋转。这类形变可通过刚性配准方法校正。

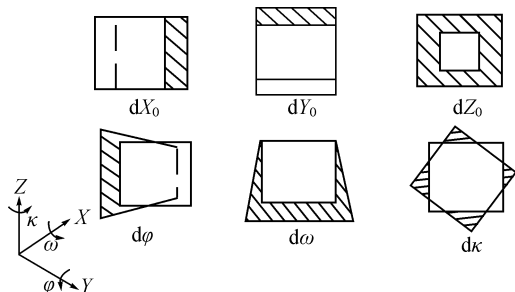


图 1 遥感器轨道位置和姿态变化引起的刚性形变  
Fig. 1 The rigid deformation

图 2 表示遥感器拍摄角度及云的运动引起的非刚性形变, 刚性配准算法显然无法解决这类形变, 因此必须研究适当的非刚性配准算法来校正这类形变, 满足气象云图的配准要求。

针对待配准云图和参考云图之间既存在整体刚性形变, 又有局部非刚性形变的特点, 本文采用分级变换模型进行图像配准。分级变换模型为

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

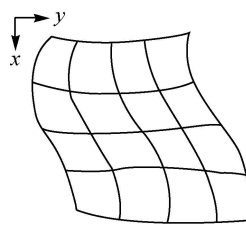


图 2 拍摄角度及云的运动所引起的非刚性形变  
Fig. 2 The nonrigid deformation

空间变换  $T(x, y)$  包括全局刚性变换  $T_{\text{global}}(x, y)$  和局部非刚性变换  $T_{\text{local}}(x, y)$ 。 $T_{\text{global}}(x, y)$  描述气象图像整体的刚性形变, 即由遥感器轨道位置和姿态的变化引起的形变, 可采用仿射变换模型作为图像整体刚性配准的空间变换模型。对于局部的非刚性变换模型  $T_{\text{local}}(x, y)$ , 采用基于 B 样条的 FFD 模型进行描述。

## 3 基于 B 样条的非刚性配准方法

本文对基于 B 样条的 FFD 模型的方法<sup>[10, 17-18]</sup>进行改进, 将其作为校正局部非刚性形变的配准方法。该方法利用建立在规则网格上的 B 样条函数模拟形变场, 然后通过控制点的网格扰动对图像进行变形, 以实现非刚性配准。同时, 本方法采用局部更新策略将变化后的控制点位置和图像直接用于下一次的计算, 以提高算法的运行时间及配准效果。

### 3.1 相似性测度

定义一种相似性测度以衡量两幅图像的相似程度, 判断配准后的图像与参考图像之间是否达到最佳匹配。虽然气象卫星分时成像的时间间隔较短, 但在此期间大气移动速度快, 致使云层有出现、增厚、变薄、消失等多种变化, 反映在图像中即为灰度值的变化, 所以不能直接比较两幅图像的灰度来判断其相似程度, 即对于不同模态的两幅图像来说, 标准均方差方法不能作为相似性的测度<sup>[19]</sup>。互信息是信息论的基本概念, 是基于图像统计信息的一种相似性测度准则, 它表示两幅图像相互包含的信息量。若两幅图像完全相同, 则它们的互信息值取得最大值 2。

$$MI = H_R + H_F - H_{RF} \quad (2)$$

$$H_R = - \sum_{i \in R} p_R(i) \log p_R(i) \quad (3)$$

$$H_F = - \sum_{i \in F} p_F(i) \log p_F(i) \quad (4)$$

$$H_{RF} = - \sum_{i \in R, j \in F} p_{RF}(i, j) \log p_{RF}(i, j) \quad (5)$$

互信息公式如式(2)所示, 其中  $p(i)$  是图像中像素灰度值为  $i$  的概率;  $p_{RF}(i, j)$  是两幅图像灰度对  $(i, j)$  的联合概率密度;  $H_R$  表示参考图像 R 的信息熵;  $H_F$  表示待配准图像 F 的信息熵;  $H_{RF}$  表示两幅图像 R 和 F 的联合熵。文献[14-15]证明互信息能较为准确地表示两幅不同模态图像间的相似度, 即该测度对待配准图像和参考图像没有灰度关系限制。文献[16]指出两幅图像的大小及重叠部分的大小对互信息测度影响很大, 如果重叠部分减小, 则参与统计互信息的像素数减少, 导致互信息值减小。文献[16]提出的改进形式——归一化互信息, 减小了对图像重叠部分大小的敏感性。

$$NMI = \frac{H_R + H_F}{H_{RF}} \quad (6)$$

### 3.2 非刚性配准算法

如图3所示, 建立一个由  $n_x \times n_y$  个控制点所组成的规则网格  $\Phi$ ;  $\delta_x$  和  $\delta_y$  是网格在  $X$  和  $Y$  方向的间距; 网格的交点(图中小圆圈)为控制点  $\Phi_{i,j} (0 \leq i < n_x, 0 \leq j < n_y)$ 。

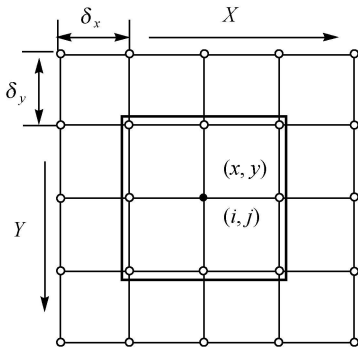


图3 网格分块及控制点

Fig. 3 The map of gridding and control points

将网格  $\Phi$  套用在待配准图像与参考图像上。待配准图像中的每一个控制点在其周围四个网格内移动(图3中黑色方框区域)。根据 B 样条理论, 控制点移动后, 该控制点周围  $4 \times 4$  网格内的像素点位置也会随之改变, 从而引起图像的形变。设网格内某点  $(x, y)$  移动到新位置  $(x + \Delta x, y + \Delta y)$ , 位移量  $(\Delta x, \Delta y)^T$  可通过公式(7)计算得到。

$$(\Delta x, \Delta y)^T = \sum_{l=0}^3 \sum_{m=0}^3 B_l(u) B_m(v) \Phi_{i+l, j+m} \quad (7)$$

式中,  $i = \lfloor \frac{x}{\delta_x} \rfloor - 1, j = \lfloor \frac{y}{\delta_y} \rfloor - 1, u = \frac{x}{\delta_x} - \lfloor \frac{x}{\delta_x} \rfloor, v =$

$\frac{y}{\delta_y} - \lfloor \frac{y}{\delta_y} \rfloor, \lfloor \cdot \rfloor$  表示取整运算;  $B_l (l = 0, 1, \dots, 3)$  表示 B 样条第  $l$  个基函数

$$\left. \begin{aligned} B_0(u) &= \frac{(1-u)^3}{6} \\ B_1(u) &= \frac{3u^3 - 6u^2 + 4}{6} \\ B_2(u) &= \frac{-3u^3 + 3u^2 + 3u + 1}{6} \\ B_3(u) &= \frac{u^3}{6} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

B 样条具有局部特性, 即控制点位置的改变仅影响该控制点周围邻域网格内像素点的位移。因此, 更新某个控制点的位置时, 仅需更新该控制点邻域网格内的点, 进行相似性度量时, 也只需计算两幅图像对应控制点邻域的 NMI 值, 而非两图整体的 NMI 值, 使得算法的计算量大大减小。

网格  $\Phi$  的大小决定算法对非刚性变形校正能力的大小。对于不同类型的图像, 需要调整控制点间隔的大小, 以获取最优的配准效果: 对成像时间间隔长, 云的非刚性形变较大的图像, 应设定较大的控制点间隔; 对成像时间间隔短, 云的非刚性形变较小的图像, 应设定较小的控制点间隔。在实际应用中, 通常需根据对配准精度及算法运行时间的要求来选取合适的控制点间隔。文献[10]采用多级 B 样条 FFD 模型进行图像非刚性配准。该模型需建立控制点间距逐级递减的多级网格  $\Phi, \Phi^2, \dots, \Phi^L$ , 网格  $\Phi^i$  对应的变换为  $T_{local}^i$ , 各级变换累加得到总的非刚性变换  $T_{local}$ 。由于该模型需多次建立网格及进行 B 样条运算, 因此计算量较大, 算法运行时间较长。

### 3.3 改进

文献[10, 17-18]采用整体更新的方法, 即遍历网格中所有的控制点后才统一更新控制点的坐标位置信息, 再对整幅图像进行 B 样条计算以更新整幅图像的灰度信息, 实现图像非刚性配准。由于控制点在  $X$  和  $Y$  方向上的移动量在  $[-\delta, \delta]$  范围内, 每次更新过程中只有一个控制点移动, 则根据 B 样条理论, 该控制点网格区域内的点在  $X, Y$  方向上的位移量也在  $[-\delta, \delta]$  范围内。若待配准图像与参考图像的像差远大于  $\delta$  则需要多次遍历网格控制点才能完成图像配准。

本文提出采用基于贪婪算法的局部更新策略<sup>[20]</sup>, 在遍历控制点的同时立即更新该控制点的位置信息以及相应图像局部区域的灰度信息, 并

将两者的新信息直接用于下一个控制点的计算, 即前一个控制点的位移信息被立即应用于当前控制点的计算, 则根据 B 样条理论, 当前控制点网格区域内的像素点在  $X$ 、 $Y$  方向上的位移量不会被限制在  $[-\delta_x, \delta_y]$  范围内。因此, 对于含有较大像移的两幅图像, 方法的遍历次数要远小于整体更新的方法, 且能获得较好的配准效果。

非刚性配准算法的流程如图 4 所示。对  $\Phi$  中的每个控制点  $\varphi_{i,j}$ , 首先计算该控制点周围四个网格区域与参考图像中相应区域的 NMI, 判断其是否相同, 若相同, 跳到下一控制点, 否则当  $\varphi_{i,j}$  移动  $(\Delta X, \Delta Y)$  时, 根据公式(7) 计算  $\varphi_{i,j}$  所影响区域内每个像素点的位移量  $(\Delta x, \Delta y)$ , 并通过插值得到变换后的图像, 计算新的图像和参考图像中相应区域的 NMI。NMI 取得最大值时该控制点移动到的位置即被认为是正确的位置, 而通过邻域像素点位移插值得到的图像区域, 即是待配准图像局部配准后的区域。遍历所有控制点, 逐步更新控制点移动后的坐标位置及待配准图像局部区域配准后的灰度信息, 便可实现整幅图像的非刚性配准。

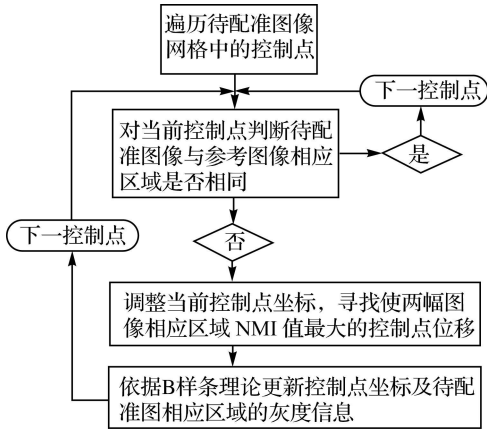


图 4 非刚性配准算法流程图

Fig. 4 The flowchart of the nonrigid registration method

### 4 试验结果与分析

用 Visual C++ 6.0 编程实现算法, 在 PC 机 (CPU 2.93 GHz, RAM 512 MB) 上进行测试, 控制点网格间距为  $4 \times 4$  像素。图 5 为本文算法对模拟图像的试验结果图。可以看出, 本文算法能够对变化较大的图像进行配准, 并且算法执行 4 遍后基本能够完成图像的非刚性配准。

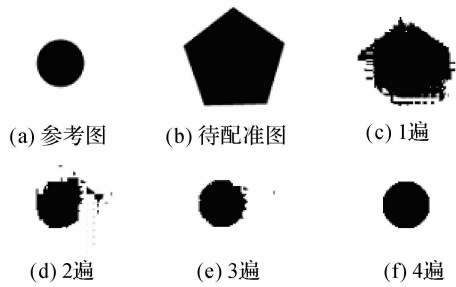


图 5 模拟图像的非刚性配准结果

Fig. 5 The registration results of synthetic images

采用的分级变换模型, 在第一步刚性配准时, 采用 Forstner 算子提取特征点<sup>[19]</sup>, 并利用全局仿射变换模型, 通过二次多项式的最小二乘法计算变换参数<sup>[21]</sup>, 校正图像整体的刚性形变, 使图像整体趋于一致; 然后在刚性配准的基础上进行非刚性配准, 从而使得非刚性配准能够高效地完成。图 6 给出两幅图像通过不同配准方法得到的结果图及其差值图。图 6(a)、6(b) 分别为参考云图和待配准云图 (图像大小  $512 \times 512$ , 灰度级  $0 \sim 255$ ), 图 6(c) 为基于特征点的刚性配准算法得到的结果图, 图 6(d) 为直接对待配准云图进行非刚性配准的结果图, 图 6(e) 为本文方法得到的结果图, 图 6(f)、(g)、(h) 给出各配准方法的结果图与参考云图的差值图像。从差值图像可以看出, 提出的基于 B 样条的分级变换模型配准算法与直接使用刚性配准或非刚性配准相比, 有显著提高。

表 1 给出直接非刚性配准方法和本文方法运行时间及配准效果的对比数据, 配准效果的评价数据包括 NMI、峰值信噪比 (peak signal to noise ratio, PSNR) 和配准精度。表 1 中分级变换模型进行配准的时间包括刚性配准耗时 (约 0.7 s) 及非刚性配准耗时 (约 203 s)。直接进行非刚性配准得到的图 6(d) 的 NMI、PSNR 及配准精度分别为 1.27、18.472、0.46; 采用分级变换模型进行配准得到的图 6(e) 的 NMI、PSNR 及配准精度值分别为 1.59、23.658、0.29, 其各项配准效果评价参数与直接进行非刚性配准方法的参数相比均有显著提高。试验中进一步定量分析了采用局部更新策略对算法性能的改善。对图 6(b), 文献[10]的算法运行时间为 1063 s, 远远长于本文算法的时间 (203 s)。可见本文方法在保证图像配准精度的同时, 显著提高了算法的效率。

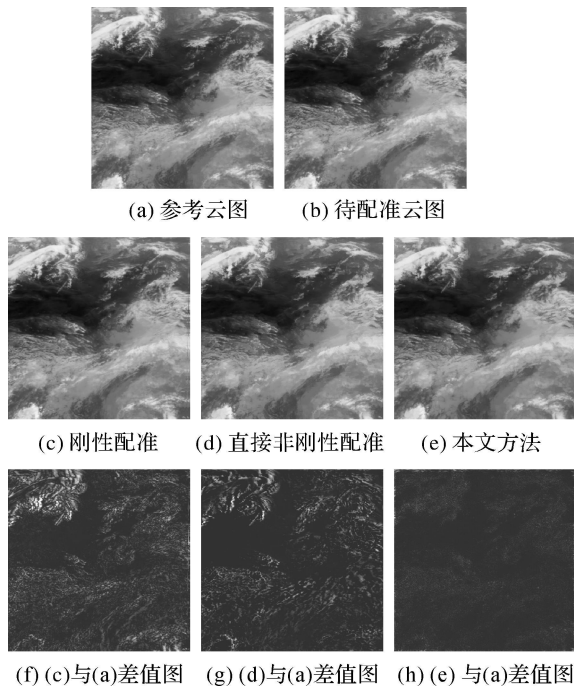


图6 配准结果图与插值图像

Fig. 6 The registration results and the comparison

表1 性能及配准精度对比

Tab. 1 The comparison of runtime and precision

|          | 运行时间/s | NMI  | PSNR   | 配准精度 |
|----------|--------|------|--------|------|
| 直接非刚性配准  | 282    | 1.27 | 18.472 | 0.46 |
| 分级变换模型配准 | 203.7  | 1.59 | 23.658 | 0.29 |

图7给出三幅风云2号气象卫星云图的配准结果。图7(a)、(b)、(c)为风云2号气象卫星于2006-05-13拍摄到的气象云图(图像大小 $720 \times 567$ 像素,灰度级 $0 \sim 255$ ),拍摄时间分别为17时、20时和24时,由于时间间隔较长,图像中云层有较大变化,因此将图7(a)、(b)、(c)三幅图像分别作为R、G、B三通道图像进行合成得到的图7(f)中有很多伪影。在试验过程中,将20时图7(b)作为参考图像,17时图7(a)和24时图7(c)作为待配准图像进行配准。图7(d)为图7(a)参照图7(b)的配准结果图,图7(e)为图7(c)参照图7(b)的配准结果图,图7(g)为将图7(b)、(d)、(e)三幅图像分别作为R、G、B三通道图像进行合成得到的图像。与图7(f)相比,图7(g)中除图像四周及图像中云层剧烈变化的部分仍有少量伪影外,其余部分几乎没有伪影。

本文算法能够对多时相云图进行配准,对云的扩散、收缩等形变能够取得较好的效果。但是,对于参考图像中有云,而待配准图像相应区域没

有云的情况(如图7(b)、(c)中白色圆圈所示),通过本算法并不能在配准后图像的相应区域生成云(如图7(e)中白色圆圈所示)。该问题的解决方案有待进一步研究。

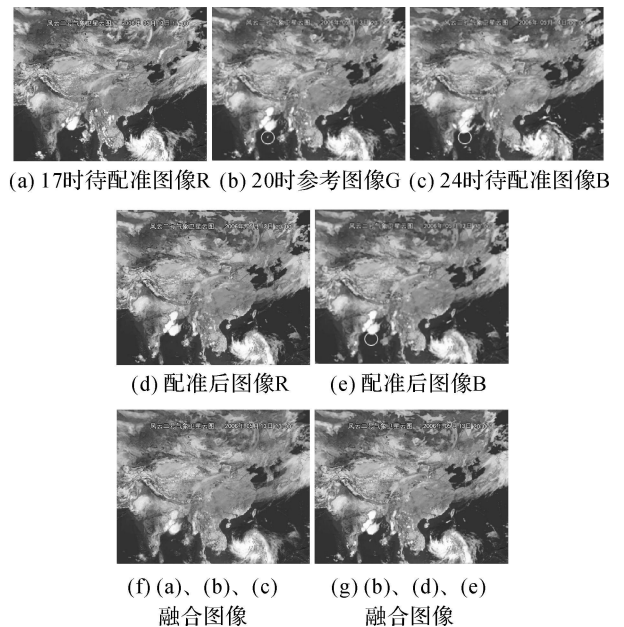


图7 风云2号气象卫星云图配准结果

Fig. 7 The registration results of FY-2 images

图7中,配准前17时图像与20时参考图像的NMI、PSNR值分别为1.311、18.061,配准后该两项值分别提高至1.437、26.512,配准精度达到0.235;配准前24时图像与20时参考图像的NMI、PSNR值分别为1.294、17.45,配准后该两项值分别提高至1.433、26.194,配准精度达到0.24。通过数值定量比较可以发现,本文提出的配准方法能够很好地实现对气象云图的配准,且配准精度达到亚像素级。

## 5 结论

针对气象图像既存在刚性形变,又存在非刚性形变的特点,提出分级变换模型对图像进行配准,即先用仿射变换校正图像整体的刚性形变,再采用改进的基于B样条的FFD非刚性配准算法校正由于云的运动等原因产生的局部非刚性变换,其配准精度(0.29像素)优于直接进行非刚性配准方法的精度(0.46像素)。对基于B样条的非刚性配准算法进行改进,以贪婪算法的局部更新策略代替原先的整体更新策略,使算法运行时间由1063s缩短至203s,效率提高4倍。

试验结果表明该算法对气象云图的配准可以取得比较理想的效果,配准精度能够达到0.3像素,且算法性能较原算法有显著提高。

### 参考文献:

- [1] BARBARA Z, JAN F. Image Registration Methods: A Survey[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(11): 977-1000.
- [2] RERMI K S, ALAN C G, BRUCE P. MRI Simulation-based Evaluation of Image Processing and Classification Methods[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1999, 18(11): 1085-1097.
- [3] PLUIM J, MAINTZ J, VIERGEVER M. Image Registration by Maximization of Combined Mutual Information and Gradient Information[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2000, 19(8): 809-814.
- [4] REMCO C V. Shape Matching: Similarity Measures and Algorithms[C] // SMI 2001 International Conference on Shape Modeling and Applications. Genora: [s. n.], 2001: 188-197.
- [5] PLUIM J, MAINTZ J, VIERGEVER M. Mutual Information Based Registration of Medical Images: A Survey[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2003, 22(8): 986-1004.
- [6] MATTERS D, HAYNOR D, VESSELLE H, et al. PET-CT Image Registration in the Chest Using Free-form Deformations[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2003, 22(1): 120-128.
- [7] FENG Lin, ZHANG Mingju, HE Mingfeng, et al. A Non-rigid Medical Image Registration Approach Based on Hierarchical Mutual Information and Thin-plate Spline[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(7): 1492-1498. (冯林,张名举,贺明峰,等.用分层互信息和薄板样条实现医学图像非线性自动配准[J].计算机辅助设计与图形学学报,2005,17(7):1492-1498.)
- [8] TOU RAILLE E, BOIRE J. Elastic Registration of MRI Scans Using Fast DCT[C] // Proceedings of the 22nd Annual International Conference of the IEEE. Chicago: IEEE, 2000: 23-28.
- [9] KARL R. Elastic Registration of Multimodal Medical Images: A Survey[J]. KFKuenstliche Intelligenz, 2000(3): 11-17.
- [10] RUECKERT D, SONODA L, HAYES C, et al. Nonrigid Registration Using Free-form Deformations: Application to Breast MR Image[J]. IEEE Trans on Medical Imaging, 1999, 18(8): 712-721.
- [11] BENOIT M D. Non-rigid Registration of Medical Images: Purpose and Method, A Short Survey[C] // 2002 IEEE International Symposium on Biomedical Imaging Proceedings. Nashville: IEEE, 2002: 465-468.
- [12] PHILIP J E, HILL D L G, LITTLE J A, et al. A Three-component Deformation Model for Image-guided Surgery[J]. Medical Image Analysis, 1998, 2(4): 355-367.
- [13] BROWN L G. A Survey of Image Registration Techniques[J]. ACM Computing Surveys, 1992, 24(4): 325-376.
- [14] PAUL V. Alignment by Maximization of Mutual Information[D]. Massachusetts: Artificial Intelligence Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, 1995.
- [15] FREDERIK M, COLLIGON A, DIRK V, et al. Multimodality Image Registration by Maximization of Mutual Information[J]. IEEE Transaction on Medical Imaging, 1997, 16(2): 187-198.
- [16] STUDHOLME C, HILL D L G, HAWKES D J. An Overlap Invariant Entropy Measure of 3D Medical Image Alignment[J]. Pattern Recognition, 1999, 32(1): 71-86.
- [17] PENG Xiaoming, CHEN Wufan, MA Qian. Fast Elastic Image Registration Method Based on B-splines[J]. Computer Engineering and Applications, 2006, 42(11): 186-189. (彭晓明,陈武凡,马茜.基于B样条的快速弹性图像配准方法[J].计算机工程与应用,2006,42(11):186-189.)
- [18] CHEN Yunjie, ZHANG Jianwei, WEI Zhihui, et al. A Variational Model for Simultaneous Registration-Segmentation to Brain MR Images[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2007, 19(2): 215-220, 226. (陈允杰,张建伟,韦志辉,等.同时配准分割脑MR图像的耦合变分模型[J].计算机辅助设计与图形学学报,2007,19(2):215-220,226.)
- [19] QIU Jun. Nonrigid Registration Method: Application to Weather Images[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007. (邱军.弹性图像配准方法在气象图像中的应用[D].南京:南京理工大学,2007.)
- [20] THOMAS H C, LEISERSON C E, RIVEST R L, et al. Introduction to Algorithms[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005: 370-404.
- [21] ZHANG Qian, LIU Zhengkai, PANG Yanwei, et al. Automatic Registration of Aerophotos Based on SUSAN Operator[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2003, 32(3): 245-250. (张迁,刘政凯,庞彦伟,等.基于SUSAN算法的航空影像的自动配准[J].测绘学报,2003,32(3):245-250.)

(责任编辑:宋启凡)

收稿日期:2009-12-10

修回日期:2010-10-11

第一作者简介:徐丽燕(1983—),女,博士生,研究方向为图像处理与分析、模式识别、遥感信息系统等。

First author: XU Liyan(1983—), female, PhD candidate, majors in image processing and analysis, pattern recognition, remote sensing information system.

E-mail: leean666@126.com