

基于NSSCC的快速多波段图像配准算法

汪 炜,王 伟,濮运辰

(上海交通大学 自动化系,上海 200240)

(batisfang@sjtu.edu.cn)

摘 要:归一化互相关(NCC)方法是图像配准中使用非常广泛的方法,经典的NCC方法是基于空间域的,适用于单波段图像配准。但在实际应用中,往往要对多波段图像进行配准,此时NCC方法很可能无法获得正确的结果。最近有学者提出了归一化空间频谱互相关(NSSCC)方法,该方法可将多波段图像中不同波段的信息应用到图像配准中,与经典的NCC方法相比能够有效地提升配准的有效性。然而,如果图像所含波段较多且尺寸较大,NSSCC方法需要很大的计算量。结合标准的NCC快速算法,可以对NSSCC方法作进一步的改进,仿真实验验证了改进的方法用于多波段图像配准时的快速性和有效性。

关键词:多波段图像配准;归一化空间频谱互相关;归一化互相关;模板匹配

中图分类号:TP391.41 **文献标志码:**A

Fast multi-spectral image registration based on NSSCC

WANG Wei, WANG Wei, PU Yun-chen

(Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Among the methods for image registration, the Normalized Cross Correlation (NCC) method is the most widely used one, which is conceptually straightforward and easy to implement. The classic NCC method is based on spatial domain, works for single band image and does not leverage the spectral information of all spectral bands of images. A new normalized Spatial-Spectral Cross Correlation (NSSCC) method was proposed recently by some researchers, which utilizes all spectral bands for multi-spectral image registration. This NSSCC method effectively increases the registration reliability and discrimination compared to the classic NCC method. However, if the image contains many spectral bands and its size is large, the NSSCC method will require high computation cost. This paper presented an improved algorithm for fast calculation of the NSSCC method and its application to the problem of multi-spectral image registration. The simulation results show that the improved algorithm can effectively reduce the computation cost of the NSSCC method.

Key words: multi-spectral image registration; Normalized Spatial-Spectral Cross Correlation (NSSCC); Normalized Cross Correlation (NCC); template matching

0 引言

图像配准就是将不同时间、不同传感器或不同条件下(气候、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,它已经被广泛应用于遥感数据分析、导航、医学诊断、自动监测等领域。迄今为止,在国内外的图像处理研究领域,已有研究者进行相当多的图像配准研究,并产生了不少图像配准方法。总的来说,图像配准的方法可以分为两大类:基于特征的图像配准方法和基于灰度信息的图像配准方法。基于特征的匹配方法首先要对待配准图像进行预处理,也就是图像分割和特征提取的过程,再利用提取到的特征完成两幅图像特征之间的匹配,通过特征的匹配关系建立图像之间的配准映射关系;基于灰度信息的图像配准方法一般不需要对图像进行复杂的预先处理,而是利用图像本身具有灰度的一些统计信息来度量图像的相似程度。

在基于灰度信息的图像配准方法中,归一化互相关(Normalized Cross Correlation, NCC)方法是使用最为广泛且易于实施的方法,但该方法是基于空间域的,适用于单波段图像配准。而在实际应用中,往往要对多波段图像进行配准,如果

图像含噪声且配准时选取的模板所含的变化信息较少,NCC方法很可能无法获得正确的结果。文献[1-2]提出了一种新的归一化空间频谱互相关(Normalized Spatial-Spectral Cross Correlation, NSSCC)方法,该方法可将多波段图像中不同波段的信息应用到图像配准中。与经典的NCC方法相比,NSSCC方法有效地提升了配准的有效性。然而,如果图像所含波段较多且尺寸较大,NSSCC方法需要很大的计算量,对于实时性要求比较高的一些图像配准问题来说,其运算速度需要进一步提高。本文结合文献[3]提出的NCC快速算法,对NSSCC方法作进一步的改进,仿真实验验证了改进的方法用于多波段图像配准时的快速性和有效性。当然,NCC方法对旋转、尺度、投影等变换十分敏感,因此本文仅限于讨论只存在平移的图像配准问题。

1 互相关方法

1.1 归一化空间互相关方法^[3]

互相关方法是一种匹配度量,通过计算模板图像和搜索窗口之间的互相关值,来确定匹配的程度,互相关系数值最大时的搜索窗口位置决定了模板图像在待配准图像中的位置。

收稿日期:2010-07-01;修回日期:2010-08-23。

作者简介:汪炜(1986-),男,上海人,硕士研究生,主要研究方向:遥感数字图像处理;王伟(1962-),女,河南人,副教授,博士,主要研究方向:系统建模、控制与优化、图像信息处理、IT项目管理;濮运辰(1988-),男,上海人,硕士研究生,主要研究方向:遥感数字图像处理。

归一化空间互相关方法即经典的 NCC 方法,它定义了模板图像与待配准图像中对应搜索窗口之间的相关性,设分别有待配准图像($M \times M$)与模板图像($N \times N$),归一化互相关系数的定义如下:

$$\gamma(u, v) = \frac{\sum_{x, y} [f(x+u, y+v) - \bar{f}_{u,v}] [t(x, y) - \bar{t}]}{\sqrt{\sum_{x, y} [f(x+u, y+v) - \bar{f}_{u,v}]^2 \sum_{x, y} [t(x, y) - \bar{t}]^2}}; \quad (1)$$

$u, v = 1, 2, \dots, M - N + 1, x, y = 1, 2, \dots, N$

式中: $\gamma(u, v)$ 为位置点(u, v)的归一化互相关系数, $f(x+u, y+v)$ 表示待配准图像在($x+u, y+v$)位置上的像素灰度值, $\bar{f}_{u,v}$ 表示 f 在位置点(u, v)上与模板图像同样大小的区域内的平均灰度值, $t(x, y)$ 表示模板图像在(x, y)位置上的灰度值, \bar{t} 表示模板图像的平均灰度值, $\gamma(u, v)$ 将在匹配位置出现峰值,一般情况下峰值接近1,即最终的匹配点可由式(2)求得:

$$\max_{u, v} \{ \gamma(u, v) \} \quad (2)$$

其中 $u, v = 1, 2, \dots, M - N + 1$ 。

需要指出的是, NCC 方法只应用了待配准图像和模板图像各一个波段,而对于多波段图像,需要将其变换为单波段图像或者只取其中的某个波段进行运算。从式(1)可以看出,归一化空间互相关系数是通过计算模板图像和搜索窗口之间的互相关值得到的,因此我们希望所取的模板图像能够与整个图像的其他部分有显著的差异,从而增强该方法在应对噪声时的鲁棒性,得到正确的配准结果。但是对于一般的自动化图像配准系统,模板图像通常是随机选取的,因此无法确保选取到与整个图像的其他部分有显著差异的模板图像。通过式(1)求得的归一化空间互相关系数代表了图像在空间区域的相似性,但没有用到多波段频谱特征信息,因此,对于多波段图像配准,其关键在于如何运用图像的频谱特征信息来提升模板图像的辨别力。

1.2 归一化频谱互相关方法^[1-2]

归一化频谱互相关方法定义了两个多波段图像中像素之间的相关性,对于两个多波段图像 $f(x, y, k)$ 和 $t(x, y, k)$,图像的波段数都为 L ,归一化频谱互相关系数的定义如下:

$$\gamma(u, v) = \frac{[f(x+u, y+v) - \bar{f}_{u,v}]^T [t(x, y) - \bar{t}]}{[\|f(x+u, y+v) - \bar{f}_{u,v}\|^2]^{1/2} [\|t(x, y) - \bar{t}\|^2]^{1/2}} \quad (3)$$

$\gamma(u, v)$ 为位置点(u, v)的归一化频谱互相关系数,其中:

$$f(x+u, y+v) = \begin{bmatrix} f(x+u, y+v, 1) \\ f(x+u, y+v, 2) \\ \vdots \\ f(x+u, y+v, L) \end{bmatrix}$$

$$t(x, y) = \begin{bmatrix} t(x, y, 1) \\ t(x, y, 2) \\ \vdots \\ t(x, y, L) \end{bmatrix}$$

$$\bar{f}_{u,v} = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L f(x+u, y+v, k), \bar{t} = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L t(x, y, k)$$

式(3)度量了两个多波段图像中两个像素间的频谱相似性,由于单个像素的频谱特征往往是非唯一的,因此频谱特征的相关系数不适用于图像配准及图像匹配,但是多波段中各波段的频谱特征可以提供相对更多的信息,如果能够将这些信息用到空间区域相似性的度量,将可以提升模板图像的辨别力。

1.3 归一化空间频谱互相关方法^[1-2]

从式(1)可以看出,通过 NCC 方法可以得到模板图像和待配准图像对应搜索窗口之间的空间区域相似性;从式(3)可以看出,通过归一化频谱互相关方法可以得到像素间的频谱特征相似性,虽然像素频谱特征的非唯一使得该方法不适用于图像配准,但是频谱特征信息的引入却可以提升模板图像与待配准图像对应搜索窗口匹配时的辨别力。为了同时将图像的空间分布信息和频谱特征信息应用到图像配准,可以将归一化空间互相关方法和归一化频谱互相关方法结合在一起,对于两个多波段图像 $f(x, y, k)$ 和 $t(x, y, k)$,分别设为待配准图像($M \times M$)与模板图像($N \times N$), $M > N$,归一化空间频谱互相关系数的定义如下:

$$\gamma(u, v) = \frac{\sum_{x, y} [f(x+u, y+v) - \bar{f}_{u,v}]^T [t(x, y) - \bar{t}]}{\sqrt{\sum_{x, y} \|f(x+u, y+v) - \bar{f}_{u,v}\|^2} \sqrt{\sum_{x, y} \|t(x, y) - \bar{t}\|^2}} \quad (4)$$

式中: $u, v = 1, 2, \dots, M - N + 1, x, y = 1, 2, \dots, N$, 为位置点(u, v)的归一化空间频谱互相关系数,其中:

$$f(x+u, y+v) = \begin{bmatrix} f(x+u, y+v, 1) \\ f(x+u, y+v, 2) \\ \vdots \\ f(x+u, y+v, L) \end{bmatrix}$$

$$t(x, y) = \begin{bmatrix} t(x, y, 1) \\ t(x, y, 2) \\ \vdots \\ t(x, y, L) \end{bmatrix}$$

$$\bar{f}_{u,v} = \frac{1}{N^2 L} \sum_{x, y} \sum_{k=1}^L f(x+u, y+v, k)$$

$$\bar{t} = \frac{1}{N^2 L} \sum_{x, y} \sum_{k=1}^L t(x, y, k)$$

从式(4)可以看出,归一化空间频谱互相关方法综合了空间相关性系数和频谱相关性系数,相比传统的 NCC 方法,该方法具备更高的辨别力,从而可以得到更加可靠的图像配准结果。另一方面,如果使 $L = 1$,即只考虑单波段的计算,则式(4)就是 NCC 方法的定义;如果使搜索窗口的大小为1,即只包含单个像素,则式(4)就是归一化频谱互相关方法的定义。因此可以认为归一化空间互相关方法和归一化频谱互相关方法都是归一化空间频谱互相关方法的特殊情况。

2 快速归一化空间频谱互相关算法

虽然有学者通过相关实验证明了归一化空间频谱互相关方法可以有效地利用图像的多波段频谱信息进行图像配准,但是由于引入了多个波段的信息,该方法需要计算量也相对增加,对于实时性要求比较高的一些图像配准问题来说,其运算速度需要进一步提高。

对于式(4)的分子部分,令 $f'(x, y) = f(x, y) - \bar{f}_{u,v}$, $t'(x, y) = t(x, y) - \bar{t}$,可以将分子部分重写为:

$$\gamma(u, v) = \sum_{x, y} [f'(x+u, y+v)]^T [t'(x, y)] \quad (5)$$

$$f'(x+u, y+v) = \begin{bmatrix} f'(x+u, y+v, 1) \\ f'(x+u, y+v, 2) \\ \vdots \\ f'(x+u, y+v, L) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} f(x+u, y+v, 1) - \bar{f}_{u,v} \\ f(x+u, y+v, 2) - \bar{f}_{u,v} \\ \vdots \\ f(x+u, y+v, L) - \bar{f}_{u,v} \end{bmatrix}$$

$$t'(x, y) = \begin{bmatrix} t'(x, y, 1) \\ t'(x, y, 2) \\ \vdots \\ t'(x, y, L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t(x, y, 1) - \bar{t} \\ t(x, y, 2) - \bar{t} \\ \vdots \\ t(x, y, L) - \bar{t} \end{bmatrix}$$

可以看出,在位置点 (u, v) 处式(4)分子的值实际就是 (u, v) 处模板图像与待配准图像搜索窗口在对应像素及对应波段相乘的和,因此可以将式(5)写成:

$$\gamma(u, v) = \sum_{x,y} \sum_{k=1}^L f'(x+u, y+v, k) t'(x, y, k) \quad (6)$$

进一步根据互相关频域特性,式(6)可由式(7)计算得出:

$$F^{-1} \{ F(f') F^* (t') \}_{k=1} + \dots + F^{-1} \{ F(f') F^* (t') \}_{k=L} \quad (7)$$

其中 F 为快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT), F^{-1} 为FFT逆变换, F^* 为FFT后取复数共轭。

综上所述,分子部分若直接在空间域计算,总共需要约 $N^2 L(M-N+1)^2$ 次加法与 $N^2 L(M-N+1)^2$ 次乘法;若采用FFT计算,总共需要约 $12M^2 L$ 次乘法与 $18M^2 L$ 次加/减法。当 $M \gg N$ 且 N 很小时,直接用空间域的计算效率较高;当 M 与 N 大小相近且均为较大值时,频域的计算效率较高。

对于式(4)的分母部分,随着位置点 (u, v) 的变化, $\sqrt{\sum_{x,y} \|t(x, y) - \bar{t}\|^2}$ 保持不变,因此可以只预先计算一次;而 $\sqrt{\sum_{x,y} \|f(x+u, y+v) - \bar{f}_{u,v}\|^2}$ 位置点 (u, v) 的变化需要重新计算,这是在NCC方法计算时的主要瓶颈之一。通过将 $\sqrt{\sum_{x,y} \|f(x+u, y+v) - \bar{f}_{u,v}\|^2}$ 中的向量范式展开后可表示成 $\sqrt{\sum_{x,y} \sum_{k=1}^L [f(x+u, y+v, k) - \bar{f}_{u,v}]^2}$,可以得出如果在每个位置点 (u, v) 直接对其进行计算,总共需要约 $3N^2 L(M-N+1)^2$ 次运算(包含加、减、乘法)。根据文献[3]中定义的累计和与累计平方和,将其扩展到多波段的情况,可以得到:

$$s(u, v, k) = f(u, v, k) + s(u-1, v, k) + s(u, v-1, k) - s(u-1, v-1, k) \quad (8)$$

$$s^2(u, v, k) = f^2(u, v, k) + s^2(u-1, v, k) + s^2(u, v-1, k) - s^2(u-1, v-1, k) \quad (9)$$

表1 Landsat TM 传感器特性

波段	波长/ μm	分辨率/m	主要作用
1(蓝色波段)	0.45~0.52	30	水体穿透,分辨土壤植被
2(绿色波段)	0.52~0.60	30	分辨植被
3(红色波段)	0.63~0.69	30	处于叶绿素吸收区域,用于观测道路、裸露土壤、植被种类效果很好
4(近红外波段)	0.76~0.90	30	估算生物量,可以从植被中区分出水体,分辨潮湿土壤
5(中红外波段)	1.55~1.75	30	分辨道路、裸露土壤、水,它不同植被之间有好的对比度,并且有较好的穿透大气、云雾的能力
6(热红外波段)	10.40~12.50	120	感应发出热辐射的目标
7(中红外波段)	2.08~2.35	30	对于岩石、矿物的分辨很有用,也可用于辨识植被覆盖和湿润土壤

在参考图像中分别选取大小为 10×10 、 30×30 和 50×50 的模板,并且每次选取的位置都是随机的,之后分别用一般

当 $u, v < 0$ 时, $s(u, v, k) = s^2(u, v, k) = 0$ 。待配准图像在位置点 (u, v) 上与模板图像同样大小的区域的累计和与累计平方和为:

$$\sum_{x,y} f(x+u, y+v, k) = s(u+N-1, v+N-1, k) - s(u-1, v+N-1, k) - s(u+N-1, v-1, k) + s(u-1, v-1, k) \quad (10)$$

$$\sum_{x,y} f^2(x+u, y+v, k) = s^2(u+N-1, v+N-1, k) - s^2(u-1, v+N-1, k) - s^2(u+N-1, v-1, k) + s^2(u-1, v-1, k) \quad (11)$$

进一步将 $\sqrt{\sum_{x,y} \sum_{k=1}^L [f(x+u, y+v, k) - \bar{f}_{u,v}]^2}$ 展开成如下形式:

$$\sqrt{\sum_{x,y} \sum_{k=1}^L [f(x+u, y+v, k) - \bar{f}_{u,v}]^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^L \left[\sum_{x,y} f^2(x+u, y+v, k) - \frac{1}{N^2} \left[\sum_{x,y} f(x+u, y+v, k) \right]^2 \right]} \quad (12)$$

通过将式(10)和(11)代入式(12),累计和的计算大致需要 $3M^2 L$ 次加/减法,累计平方和的计算大致需要 $3M^2 L$ 次加/减法与 $M^2 L$ 次乘法,与在空间域直接计算相比,大大降低了运算量。

3 仿真实验

为了验证快速NSSCC算法的快速性,通过仿真实验对一般NSSCC方法和快速NSSCC算法用于多波段图像配准进行比较,实验结果证明了快速算法的快速性。仿真实验环境为OpenCV, 2.13 GHz CPU。实验中用于配准的两幅图像分别为目标图像和参考图像,大小都为 100×100 ,两幅图像在 x 方向上和 y 方向上分别存在1个像素和2个像素的位移,如图1。

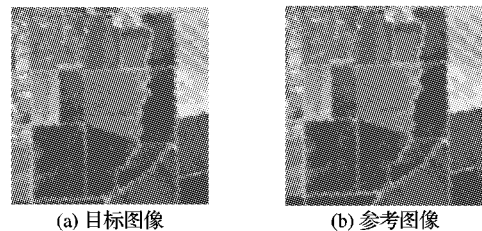


图1 目标和参考图像

图像数据通过Landsat TM传感器采集,共包含7个波段,其中波段1到波段5以及波段7的空间分辨率为30 m,而波段6(热红外波段)的空间分辨率为120 m,因此波段6没有用于图像配准实验中。Landsat TM传感器特性见表1。

NSSCC方法和快速NSSCC方法对所选取的模板图像与目标
(下转第174页)

- Study of image mosaic based on the method of finite difference [C]// 2008 Congress on Image and Signal Processing, New York: IEEE, 2008: 436 - 440.
- [16] 刘明奇, 倪国强, 陈小梅. 基于信息熵和灰度相关的图像拼接算法[J]. 光学技术, 2007, 33 (S1): 253 - 254.
- [17] ZHANG NING, WU XIAOLIN. Lossless compression of color mosaic images[J]. IEEE Transactions on Images Processing, 2006, 15 (6): 1379 - 1388.
- [18] LI HUI, MANJUNATH B S, MITRA S K. A contour-based approach to multisensor image registration[J]. IEEE Transactions on Images Processing, 1995, 4(3): 320 - 334.
- [19] LONG YANG-ZHAN, LONG GUO-BAO. Image mosaic based on sift[C]// International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing, New York: IEEE, 2008: 1422 - 1425.
- [20] 李铁军, 陈哲, 王任享. 基于尺度不变特征变换的图像快速拼接算法[J]. 微计算机信息, 2008, 24(12): 282 - 283.
- [21] 邱建国, 张建国, 李凯. 基于 Harris 与 Sift 算法的图像匹配方法[J]. 测试技术学报, 2009, 23(3): 271 - 274.
- [22] 柯涛, 张永军. SIFT 特征算子在低空遥感影像全自动匹配中的应用[J]. 测绘科学, 2009, 34(4): 23 - 26.
- [23] LI YAO. Image mosaic based on SIFT and deformation propagation [C]// International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling, New York: IEEE, 2008: 848 - 851.
- [24] 李云霞, 曾毅, 钟瑞艳, 等. 基于 SIFT 特征匹配的图像拼接算法[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(1): 43 - 45.
- [25] 黄英东, 李杰, 范宁军. 微小型飞行器航空图像拼接算法[J]. 光学工程, 2008, 35(9): 99 - 104.
- [26] REDDY B S, CHATTERJI B N. A FFT-based technique for translation, rotation, and scale invariant image registration [J]. IEEE Transactions on Images Processing, 1996, 5(8): 1266 - 1271.
- [27] ZULIANI M, KENNEY C, MANJUNATH B S. A mathematical comparison of point detectors[C]// Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, Washington, DC: IEEE Computer Society, 2004: 1063 - 1070.
- [28] PIZARRO O, SINGH H. Toward large-area mosaicing for underwater scientific applications[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2003, 28(4): 651 - 672.
- [29] 王金泉, 李钦富. 基于单应性矩阵的 SAR 图像配准技术研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2008, 3(6): 657 - 660.
- [30] FANG XIANYONG, ZHANG MINGMIN, PAN ZHIGENG, *et al.* A new method of manifold mosaic for large displacement images [J]. Journal of Computer Science and Technology, 2006, 21(2): 218 - 223.
- [31] 李勤, 俞信. 适合于生物图像的图像融合算法研究[J]. 光学学报, 2000, 20(4): 494 - 500.
- [32] 王娟, 师军, 吴宪祥. 图像拼接技术综述[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(7): 1940 - 1943.
- [33] MATTHEW B, LOWE D G. Automatic panoramic image[J]. International Journal of Computer Vision, 2007, 74(1): 59 - 73.
- [34] TUO HONGYA, JING ZHONGLIANG, ZHANG TINGHOU. Aerial sequence image mosaic using reduced sift descriptors[C]// Automatic Target Recognition and Image Analysis and Multispectral Image Acquisition, Wuhan: Bellingham, 2007: 6786 - 6794.
- [35] HAN XIAOWEI, YAN LEI, ZHAO HONGYING. An approach of fast image mosaic based on binary region segmentation[C]// 27th International Congress on High-speed Photography and Photomics, Xi'an: SPIE, 2007: 6279.
- [36] BIELSKI C, GRAZZINI J, SOILLE P. Automated morphological image composition for mosaicing large image data sets[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, New York: IEEE, 2007: 4068 - 4071.

(上接第 169 页)

图像进行匹配, 从而得出参考图像与目标图像在 x 方向和 y 方向上位移以及两种方法的运算时间, 实验结果见表 2。

表 2 实验结果

模板大小	模板选取时左上角顶点位置(x, y)	配准后得到的 x 和 y 方向位移(x, y)	一般 NSSCC 方法运算时间与快速 NSSCC 方法运算时间比值
10 × 10	(3, 20)	(-1, -2)	63
	(15, 6)	(-1, -2)	67
	(37, 56)	(-1, -2)	60
	(72, 43)	(-1, -2)	63
30 × 30	(7, 18)	(-1, -2)	35
	(25, 17)	(-1, -2)	28
	(43, 26)	(-1, -2)	36
	(55, 63)	(-1, -2)	29
50 × 50	(21, 18)	(-1, -2)	9
	(33, 24)	(-1, -2)	9
	(6, 44)	(-1, -2)	8
	(17, 34)	(-1, -2)	9

从实验结果可以看出, 两种方法都能得出正确的配准结果, 即目标图像和参考图像在 x 方向上和 y 方向上分别存在 1 个像素和 2 个像素的位移。快速 NSSCC 方法的用时明显少于一般 NSSCC 方法, 且模板越小, 快速算法的优势越明显。

4 结语

本文结合标准的 NCC 快速算法, 对 NSSCC 方法作了进一步改进, 提出了快速归一化空间频谱互相关方法, 提高了 NSSCC 方法的运算速度, 实验结果验证了此方法的快速性。在进行实时的批量图像配准时, 如果图像满足相关条件, 应用该方法可以有效提高配准的速度。

参考文献:

- [1] YANG ZHENGWEI, SHEN GUANGRONG, WANG WEI, *et al.* Spatial-spectral cross correlation for reliable multispectral image registration [C]// Proceedings of Applied Imagery Pattern Recognition Workshop, New York: IEEE, 2009: 1 - 8.
- [2] YANG ZHENGWEI, MUELLER R. Spatial-spectral cross-correlation for change detection: A case study for citrus coverage change detection[EB/OL]. [2010 - 02 - 10]. http://www.nass.usda.gov/research/sarsblog/Yang_ASPRS07_SSCC.pdf.
- [3] LEWIS J P. Fast template matching[EB/OL]. [2010 - 02 - 12]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.157.3888>.
- [4] BRIECHLE K, HANEBECK U D. Template matching using fast normalized cross correlation [EB/OL]. [2010 - 02 - 15]. http://isas.uka.de/.../SPIE01-BriecheHanebeck_CrossCorr.pdf.
- [5] 周东华. 基于 NCC 的快速匹配算法[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(9): 104 - 106.
- [6] 陈沈秋, 钱徽, 吴铮, 等. 模板图像匹配中互相关的一种快速算法[J]. 传感技术学报, 2007, 20(6): 1325 - 1329.