

文章编号:1000-582X(2012)02-098-07

改进极坐标的频域图像配准算法

郭永彩,何卫华,高潮

(重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室,重庆 400044)

摘要:针对传统极坐标变换在频域配准中的问题,提出了一种基于改进极坐标的频域配准算法。先对参考图像和待配准图像分别进行傅立叶变换,将频谱信息映射至改进极坐标下。依次沿角度和极径方向投影,计算出图像间的旋转、缩放参数;再对待配准图像进行相应地旋转、缩放校正,根据幅度加权的相位差进一步得到图像间的平移量。当耗费的计算量大致相当时,与基于传统极坐标或伪极坐标变换的频域配准算法相比较,文中算法获得更高的图像配准精度。

关键词:图像配准;改进极坐标;投影;相位差

中图分类号:TP391.41

文献标志码:A

A frequency-domain image registration algorithm using the improved polar transform

Guo Yong-cai, He Wei-hua, Gao Chao

(Key Laboratory of Opto-electronic Technology and Systems,
Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: The traditional polar transform usually suffers from the non-uniform sampling problem, which means that the low-frequency components are often over-sampled, while the high-frequency components are relatively under-sampled. Consequently, the inappropriate sampling rates will affect the registration accuracy, or else increase the computation cost vainly. To conquer the drawbacks mentioned above, we develops a novel frequency-domain registration algorithm using the improved polar transform. The reference image and the image to be registered are both carried out Fourier transform individually, and the corresponding spectrum images are sequentially mapped into the improved polar coordinate. Then projection operations are done along the angular and radius direction, respectively. As a result, the rotation and scale parameters between the two spatial images can be easily induced from the corresponding projection curves. Eventually, the shift parameters are retrieved with the weighted phase difference, after the inverse rotation and scale operations are implemented for the image to be registered. The experimental results show that the registration precision of our algorithm is much higher than the algorithm using the traditional polar transform or the pseudo-polar transform, while the required computation costs are almost equivalent.

Key words: image registration; the improved polar coordinate; projection; phase difference

收稿日期:2011-08-27

基金项目:教育部重点科研资助项目(108174);重庆市自然科学基金资助项目(2008BB3169)

作者简介:郭永彩(1963-),女,重庆大学教授,博士生导师,主要从事光电技术和信息处理方向研究,
(E-mail)yeguo@cqu.edu.cn。

图像配准是指对不同时间,不同视角或不同成像模式下获取的两幅或多幅图像进行空间变换处理,使它们在几何上能够彼此对应^[1]。高质量的图像配准,对于后续的图像处理、分析、理解有着重要意义。图像配准技术在医学图像分析、遥感图像处理、立体视觉、目标识别等多个领域中获得广泛应用。

现有图像配准算法大体上可分为以下 3 类:1) 基于图像灰度信息的空域配准算法^[2];2) 基于边缘、角点、轮廓等特征的配准算法^[3-4];3) 基于频域信息的配准算法^[5-8]。其中,空域配准算法的计算量通常较大,且易受光照条件变化、遮挡等干扰因素的影响;基于特征的配准算法灵活性较好,尤其是在处理具有复杂空间变换关系的图像间配准时具有优势,但也存在一些局限:如要求目标图像与周围背景相比,具有鲜明的特征;算法稳定性与计算复杂度均受所选图像特征的影响。

图像在空域内进行旋转、缩放变换时,其谱图亦会呈现相应的旋转、缩放;而图像在空域内的平移,则会在频域引入一组线性相移。基于上述性质,可以利用频域配准算法估计出图像间的旋转、缩放和平移参数。而且,当图像受噪声污染时,该类算法通常表现出较好的鲁棒性。近年来,基于极坐标变换的频域配准算法尤受关注^[5-8]。该类算法将图像对应的频谱信息由直角坐标系映射至极坐标系下,通过对频域信息的相关运算实现图像间的配准,充分利用了极坐标变换所具有的旋转、缩放特性。该类算法的不足之处在于,由于 2 种坐标系之间映射的非均匀性,使得中高频段的信息未能被充分利用,进而制约了图像配准精度。Keller 等人采用伪极坐标变换改进高频段的计算精度^[9-10],提高了对图像间缩放参数的估计精度,但由于低频段的谱信息存在较大的近似性,影响了配准算法的稳定性^[11]。

为充分利用图像的中高频段频谱信息,进而提高图像配准精度,文中提出了一种基于改进极坐标变换的频域图像配准算法,将频谱信息由直角坐标系映射至改进极坐标系下,较好地解决了算法计算量与配准精度之间的矛盾。实验结果表明,当计算量大致相当时,文中算法的配准精度明显优于基于传统极坐标或伪极坐标变换的配准算法。

1 基于传统极坐标变换的频域配准

设 $f_1(x, y)$ 为参考图像, $f_2(x, y)$ 为待配准图像,图像大小为 $m \times n$ 。 $f_2(x, y)$ 是 $f_1(x, y)$ 经平移、旋转和缩放变换后对应的图像,即

$$f_2(x - \Delta x, y - \Delta y) =$$

$$f_1[s(x \cos \theta + y \sin \theta), s(-x \sin \theta + y \cos \theta)], \quad (1)$$

其中,参数 θ 、 s 、 Δx 、 Δy 分别表示待配准图像相对于参考图像,沿逆时针方向旋转的角度、缩放因子、以

及沿水平和垂直方向的平移量。则这 2 幅图像的傅立叶频谱存在如下关系

$$F_2(u, v) = \exp[j2\pi(u\Delta x/m + v\Delta y/n)] \cdot s^{-2} F_1[s^{-1}(u \cos \theta + v \sin \theta), s^{-1}(-u \sin \theta + v \cos \theta)], \quad (2)$$

二者的幅度谱满足

$$M_2(u, v) = s^{-2} M_1[s^{-1}(u \cos \theta + v \sin \theta), s^{-1}(-u \sin \theta + v \cos \theta)], \quad (3)$$

式中: $M_1(u, v) = |F_1(u, v)|$, $M_2(u, v) = |F_2(u, v)|$ 。

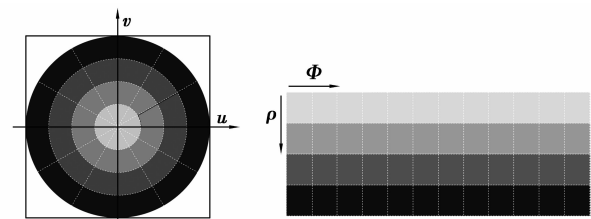
将频谱幅度信息映射至极坐标系下,则有

$$M'_1(\rho, \phi) = M_1(\rho \cos \phi, \rho \sin \phi), \\ M'_2(\rho, \phi) = s^{-2} M'_1(\rho/s, \phi - \theta), \quad (4)$$

式中, $\rho = \sqrt{u^2 + v^2}$, $\phi = \arctan(v/u)$ 。 ρ 、 ϕ 分别对应极径、角度参数。式(4)表明,上述 2 幅图像所对应频谱幅度之间的变换关系,仅与旋转角度 θ 和缩放因子 s 有关,而与平移量 Δx 、 Δy 无关。根据式(4)和频谱信息的二维相关运算结果,可计算出图像间的几何变换参数,具体细节请见参考文献[7]。

传统极坐标映射的原理如图 1 所示。传统极坐标变换按照等角度间隔方式进行采样,即任一圆周上的采样点数目均相等。若同一圆周上相邻采样点间的角度间隔大小记为 $\Delta \phi$,则沿圆周方向上的采样点数目为: $n = 2\pi/\Delta \phi$ 。分析可知,传统极坐标系下某处对应的频率分辨率,同时取决于圆周上的采样点数目和该处的极径大小,即 $\Delta f = 2\pi\rho/n$ 。

图像的细节信息分布在中高频段,为提高该频段的频率分辨率,只有增加圆周上的采样点数目,如此一来,势必在低频段造成不必要的过采样,使得计算量大大增加;反之,若减少圆周上的采样点数目,则又会导致中高频段欠采样,即已有图像信息未能得到充分利用,使得配准精度受到制约。总之,基于传统极坐标变换的频域配准算法无法合理地实现计算量与配准精度之间的平衡。



(a) 直角坐标系下的幅度谱图 (b) 传统极坐标系下的幅度谱图

图 1 传统极坐标映射原理图

2 基于改进极坐标变换的频域配准

为了提升算法性能,较好地实现计算量与配准精度之间的平衡,文中提出基于改进极坐标变换的频域配准算法。

2.1 幅度谱图的改进极坐标表示

从直角坐标系到改进极坐标系的映射原理如图 2 所示。

坐标原点对应幅度谱图 M 的零频分量。以该点为圆心, R_{\max} 为半径,选择一圆形区域。依次计算该区域内各点至圆心的取整距离

$$D(u, v) = \text{floor}(\sqrt{u^2 + v^2}), \quad (5)$$

式中,函数 $\text{floor}(x)$ 的返回值为小于或等于 x 的最大整数, R_{\max} 的取值根据图像幅面大小确定。

下面将谱图 M 各点一一映射至改进极坐标系中。改进极坐标系下的谱图记为 IP , 则有 $IP(\rho, \phi) = M(u, v)$, $\rho = D(u, v)$, ϕ 值的确定遵循如下规则:若该点位于谱图 M 的第一象限, $\phi = \arctan(v/u)$;若该点位于第二象限, $\phi = \arctan(v/u) + \pi$, 以此类推,可定义第三、四象限内点对应的 ϕ 值。在给定极径 ρ 下,对谱图 $IP(\rho, \phi)$ 按 ϕ 值大小进行排序, ρ 的取值由小至大,直到 $\rho = R_{\max}$ 为止,如图 2 所示。

由图 2 可以看出,谱图中零频点附近的采样点数目较少,随着极径 ρ 的不断增大,采样点的数目呈线性增加,各采样点在直角坐标系下对应的频率间隔大小趋于一致。这样既可以改善中高频段的欠采样情形,提高该处频率分辨率,同时还能消除低频段盲目过采样的弊端,减少计算量。

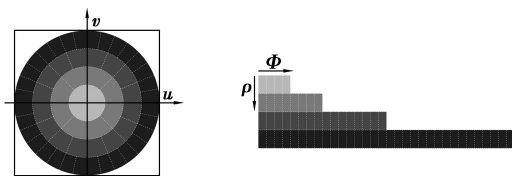


图 2 改进极坐标映射原理图

图 3(a) 是 Lena 原图像, 3(b) 是其对应的傅立叶频谱幅度图, 映射至改进极坐标系下的结果如图 3(c) 所示。考虑到实信号的频谱满足共轭对称性, 实际上只需对第一二象限内的点进行上述变换。

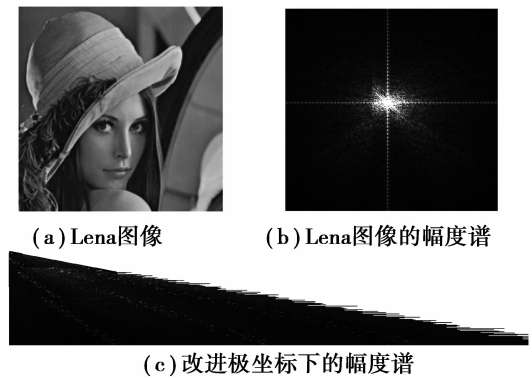


图 3 频谱幅度在改进极坐标下的映射

2.2 旋转、缩放参数估计

由图 3(c) 可知, 改进极坐标下表示的谱图呈阶梯状分布。这种非规则的谱信息排布方式, 不仅使得待配准图与参考图之间, 直观上不再具备抗旋转变换的特点, 而且会使后续的配准过程趋于复杂化。为此, 在实施图像配准之前, 需对 IP 进行插值, 使其呈规则的矩形分布。常见的插值法有最近邻插值、双线性插值和立方插值等^[12]。考虑到双线性插值计算速度较快、插值效果较好, 文中选用了该方法。对图 3(c) 进行插值, 结果如图 4 所示。

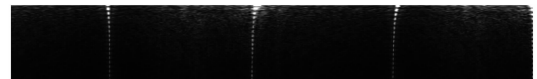


图 4 图 3(c) 的插值结果

进一步地, 将图 4 分别沿角度、极径方向进行一维投影, 可计算出图像间的旋转角度及缩放系数。上述投影操作, 实质上是将文献[7]中对应的频域二维相关运算进行了降维处理。

设插值后所得谱图 $IP'(r, \alpha)$ 的大小为 $m_r \times n_\alpha$, 则其沿极径方向的投影可表示为

$$h(\alpha) = \sum_{r=1}^{m_r} IP'(r, \alpha), \alpha = 1, \dots, n_\alpha. \quad (6)$$

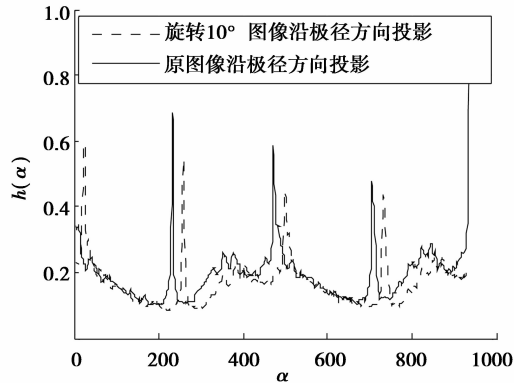
图 5 给出了 Lena 原图像及其旋转图像沿极径方向的投影曲线。

由式(4)可知, 空域图像在直角坐标系中的旋转变换, 在沿极径方向的投影曲线中表现为平移关系, 且平移量随着图像旋转角度的增大而线性增加。根据投影曲线的平移量, 可反求出图像间的旋转角度。设 $h_1(\alpha)$ 和 $h_2(\alpha)$ 分别为参考图像 $f_1(x, y)$ 、待配准

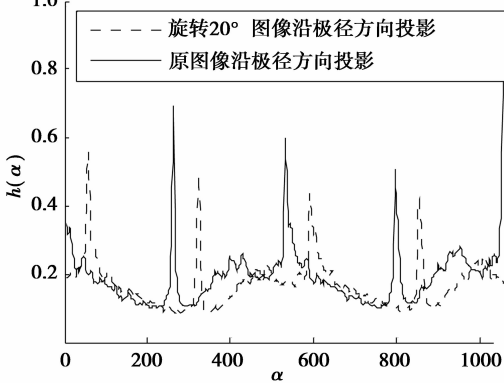
图像 $f_2(x, y)$ 在极径方向上的投影曲线。对 $h_1(\alpha)$ 与 $h_2(\alpha)$ 进行相关运算, 可得到 $f_2(x, y)$ 相对于 $f_1(x, y)$ 的旋转角度为

$$\theta = n_{\max} \times 360^\circ / n_\alpha, \quad (7)$$

其中, n_{\max} 对应相关峰值点。



(a) 原图像及旋转 10° 后对应投影曲线



(b) 原图像及旋转 20° 后对应投影曲线

图 5 图像在不同旋转角度下对应的投影曲线

同理, 谱图 $IP'(r, \alpha)$ 沿角度方向的投影可表示为

$$\Theta(r) = \sum_{\alpha=1}^{n_\alpha} IP'(r, \alpha), r = 1, \dots, m_r. \quad (8)$$

图 6 给出了 Lena 原图像及其缩放图像(缩放系数为 1.2)沿角度方向的投影曲线 $\Theta_1(r)$ 、 $\Theta_2(r)$ 。在不同倍率下(0.9、1.19 和 1.3)依次对 $\Theta_1(r)$ 进行抽样率转换, 得到 3 组新的抽样数据, 分别为 $\Theta'_1(r)$ 、 $\Theta''_1(r)$ 、 $\Theta'''_1(r)$ 。将这几组数据与 $\Theta_2(r)$ 进行比较发现, $\Theta''_1(r)$ 与 $\Theta_2(r)$ 的曲线形状最为接近, 如图 7 所示。对此, 从直观上也容易理解, 当抽样率转换系数越接近于图像的真实缩放系数时, 获得的抽样数据将越接近于 $\Theta_2(r)$ 。需指出的是, 为便于比较, 文中对沿角度方向得到的投影数据进行了归一化。

基于上述原理, 对图像缩放系数进行了寻优搜索。为加快搜索速度, 事先采用图像的一阶矩对此

加以粗略估计。在此基础上限定缩放系数的搜索范围 $[s_l, s_h]$, 最大搜索次数设为 n , 则搜索步长 $s_\Delta = (s_h - s_l) / (n - 1)$, 相应地, 第 m 个搜索值为 $s_m = s_l + (m - 1)s_\Delta, m = 1, 2, \dots, n$ 。以 s_m 作为转换系数对 $\Theta_1(r)$ 进行抽样率转换, 得到抽样数据为 $\Theta''_1(r)$, 有

$$\| \Theta''_1(r) - \Theta_2(r) \|_2 = \min(\| \Theta'_i(r) - \Theta_2(r) \|_2),$$

$$i = 1, 2, \dots, n, \quad (9)$$

或

$$\| \Theta''_1(r) - \Theta''_2(r) \|_2 \leq \epsilon. \quad (10)$$

将 s_m 确定为图像的缩放系数估计值。 ϵ 为预先设定的阈值。确定搜索次数时, 应对缩放参数的估计精度和计算量进行折中考虑。此外, 亦可对搜索策略进行优化。

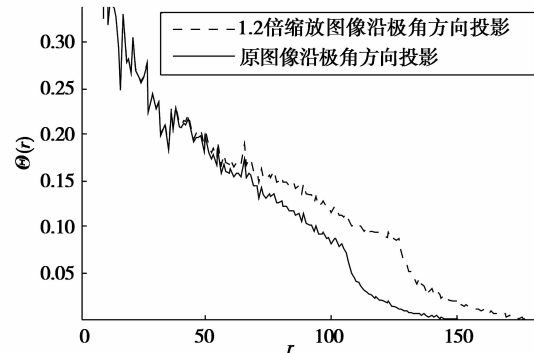


图 6 原图像及缩放 1.2 倍后对应投影曲线

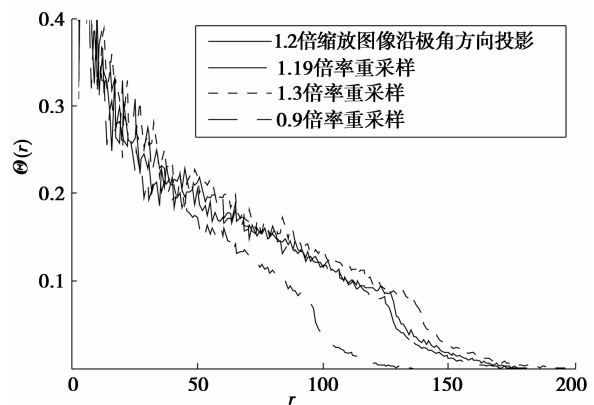


图 7 不同抽样率下投影曲线的抽样值

2.3 平移参数估计

按照节 3.2 计算出图像间的旋转角度 θ 和缩放系数 s 。将图像 $f_2(x, y)$ 进行相应的旋转、缩放校正, 得到图像 $f_3(x, y)$ 。理想情况下, $f_3(x, y)$ 与原图像 $f_1(x, y)$ 之间仅存在平移关系。由式(2)知, 当 $\theta_0 = 0, s = 1$ 时, 有

$$F_3(u, v) = \exp[j2\pi(u\Delta x/m + v\Delta y/n)]F_1(u, v). \quad (11)$$

可见,图像在空域内的平移,在频域内则对应一组线性相移。若谱图的大小为 $n \times m$,则水平位移量 $\Delta x'$ 可由下式求出

$$\Delta x' = \frac{\angle F_3(u, 0) - \angle F_1(u, 0)}{\frac{2\pi u}{m}}, u \neq 0, \quad (12)$$

式中,符号“ \angle ”表示对复数取相角。同理,可得到垂直位移量 $\Delta y'$

$$\Delta y' = \frac{\angle F_3(0, v) - \angle F_1(0, v)}{\frac{2\pi v}{n}}, v \neq 0, \quad (13)$$

式中 $\Delta x'$ 、 $\Delta y'$ 的量纲均为 1 个像素单位。当 $\Delta x'$ 、 $\Delta y'$ 值均为正数时,表明待配准图像相对于参考图像朝右下方平移,对于 $\Delta x'$ 、 $\Delta y'$ 值的正负性与此相异时的情形,可类推。为降低依据单点相位差计算平移量时对噪声的敏感性,采用了多点幅度加权的相位差,即

$$\Delta x' = \frac{\sum_{u=1}^k [(\angle F_3(u, 0) - \angle F_1(u, 0)) \times M_1(u, 0)]}{\left(\frac{2\pi}{m}\right) \sum_{u=1}^k (u \times M_1(u, 0))}, \quad (14)$$

$$\Delta y' = \frac{\sum_{v=1}^k [(\angle F_3(0, v) - \angle F_1(0, v)) \times M_1(0, v)]}{\left(\frac{2\pi}{n}\right) \sum_{v=1}^k (v \times M_1(0, v))}, \quad (15)$$

式中 $M_1(u, v) = |F_1(u, v)|$ 。特殊情况下,若低频分量较小时,则宜在频谱的峰值附近取点,以获取加权相位差信息。

根据相位差计算平移参数,在方法上不存在原理误差,其精度不受空域图像单像素尺寸的制约。通常条件下,很容易获得亚像素级的平移参数估计精度。

3 实验结果分析

为验证算法的性能,在 AMD1.81 GHz、1 G 内存/matlab 6.5 平台上进行了如下实验:1)在无噪声情形下,对同时存在旋转、缩放和平移变换关系的 Lena 图像进行配准,并在多组不同参数条件下,对

文中算法与基于传统极坐标、基于伪极坐标的配准算法进行性能对比测试;2)对具有上述仿射变换关系的图像添加一定量的高斯噪声后进行配准,以检验算法的抗噪性能。此外,还利用文中算法对 1 组实拍的遥感图像进行了配准。

3.1 无噪声情形下的 Lena 图像配准

4 幅待配准 Lena 图像,如图 8 所示。它们均与原 Lena 图像同时存在旋转、缩放和平移的变换关系。表 1 列出了这 4 幅图像对应仿射变换参数的估计结果,各估计值的最大误差绝对值为 $[0.315^\circ, 0.112^\circ, 0.2, 0.001]$ 。应当指出,如果对旋转角度的取值范围不加限定,则仅根据频谱幅度信息对其进行估计时,该估计值会出现 180° 模糊。这是由于空域图像为实信号,而实信号的频谱幅度满足对称性所致。不过,结合图像的空域信息,这类模糊是可以被消除的。



图 8 同时存在旋转、缩放、平移变换关系的一组待配准图像

对文中算法、基于传统极坐标以及伪极坐标变换的配准算法进行了性能对比测试。进行仿真时,各变换参数的取值范围分别为: $\theta \in [-20, 20]$, $\Delta x \in [-10, 10]$, $\Delta y \in [-10, 10]$, $s \in [0.8, 1.2]$,随机生成仿射变换参数,共进行了 200 次仿真实验,统计结果如表 2 所示。需指出的是,表中所列各变换参数的估计误差取的是平均绝对偏差值。对比结果表明,在平均用时大致相当的情况下,文中算法的配准精度,优于基于传统极坐标或伪极坐标变换的配准算法。

表 1 不同变换参数下的估计结果

$[\theta, \Delta x, \Delta y, s]$	参数估计值	估计误差
$[0^\circ, 6, 6, 1]$	$[0^\circ, 6, 6, 1]$	$[0^\circ, 0, 0, 0]$
$[3.25^\circ, -6, -6, 0.95]$	$[3.077^\circ, -6, -6, 0.949]$	$[-0.173^\circ, 0, 0, -0.001]$
$[-10.7^\circ, -10, -10, 0.8]$	$[-10.385^\circ, -9.888, -10.2, 0.8]$	$[0.315^\circ, 0.112, -0.2, 0]$
$[10.7^\circ, 10, 10, 1.1]$	$[10.658^\circ, 9.897, 10.109, 1.101]$	$[-0.042^\circ, -0.103, 0.109, 0.001]$

表 2 算法性能对比

配准算法	旋转 误差/ $^\circ$	缩放 误差	平移 误差	平均 用时/s
传统极坐标变换 ^[7]	0.400 6	0.009	0.525 8	2.10
伪极坐标变换型 ^[9-10]	0.230 2	0.003	0.301 4	2.30
文中算法	0.124 8	0.002	0.150 4	2.01

3.2 含噪声情形下的图像配准

为考察算法的抗噪性能,对待配准 Lena 图像添加了一定量的零均值高斯噪声。各仿射变换参数的取值范围和生成方式,均与前述对比实验相同。在不同信噪比下各进行 50 次仿真实验。图 9 以双纵坐标图的形式,给出了各变换参数估计值对应的统计误差。

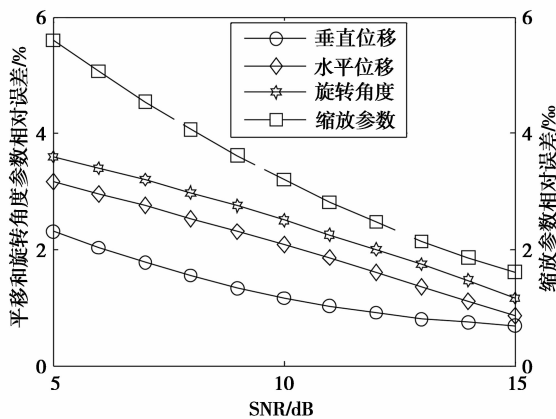


图 9 平移、旋转和缩放参数的相对误差曲线

可以看出,随着信噪比值的增加,各参数估计值的相对误差变小,即配准精度逐渐提高。当待配准图像的信噪比低至 5 dB 时,水平和垂直平移参数的相对估计误差均小于 4%,旋转角度的相对估计误差仅约 2.2%,而缩放系数的相对估计误差则低于 6%。

3.3 实际场景图像配准

为了检验文中算法对真实场景的适应性,进一步采用南加州大学提供的 USC-SIPI 图像库^[13]进行

了实验。图 10(a)和图 10(b)是具有仿射变换关系的某地区的遥感图像。图 10(c)是采用文中算法得到的配准图像。配准结果表明了算法的有效性。



图 10 某地区遥感图像的配准实验

3.4 计算复杂度分析

采用不同的频域极坐标变换模式,可以衍生出不同的频域配准算法。而不同频域配准算法之间,在性能上必然会存在一些差异。前文给出的实验结果,已经定性地证实了这一点。对不同变换模式的计算复杂度进行分析,有助于从定量角度上进一步地揭示出不同频域配准算法之间的差别。

假定空域图像大小为 $N \times N$, N 为 2 的整数次幂,复杂度以复数乘法次数衡量。对于伪极坐标变换而言,其计算复杂度主要包括 2 部分:行运算复杂度和列运算复杂度。其中,行运算复杂度又可进一步细分为:对行实施 1D-FFT 的复杂度为 $O\left(\frac{1}{2}N^2 \log_2 N\right)$, Chirp-Z 变换的复杂度为 $O\left(\frac{3}{2}N^2 \log_2 2N\right)$ 。列运算与行运算具有相同的计算

复杂度。此外,还应该包括对伪极坐标方形网格上的频率点进行插值映射的计算复杂度。不过,与前述行、列运算相比,插值部分对应的复杂度相对较小,可忽略不计。因而,伪极坐标变换对应的总复杂度约为 $O(4N^2 \log_2 N + 3N^2)$ 。若考虑对伪极栅格进行过采样,则伪极坐标变换的计算复杂度会随着过采样率的提高而显著增加,并与沿水平、垂直方向过采样率的乘积具有线性关系。而文中提出的频域改进极坐标变换,其计算复杂度主要包括:二维离散傅

里叶变换的复杂度为 $O(N^2 \log_2 N)$, 双线性插值的复杂度为 $O(\pi N^2)$ (注: 进行复杂度估算时, 将 4 次实数乘法等效为 1 次复数乘法), 即总的计算复杂度为 $O(N^2 \log_2 N + \pi N^2)$ 。另外, 在实施配准时, 采用一维相关运算替代了传统频域配准算法的二维相关操作, 使得配准阶段的计算复杂度也相应减少。

可见, 改进极坐标变换的引入, 以及对频域信息进行相关运算时的降维操作, 使得频域配准算法的计算复杂度得到改善。

4 结 语

重点研究了图像间同时存在旋转、缩放和平移变换时的高精度配准。为克服在传统极坐标系下, 难以兼顾计算量及配准精度的缺点, 提出了一种基于改进极坐标的频域配准算法。该算法按等频率间隔进行采样, 将谱图信息映射至改进极坐标中。利用沿极径和角度方向的一维投影曲线, 分别估计出待配准图像的旋转、缩放参数; 在估计平移参数时, 引入了幅度加权的相位差, 从而避免了依据单点相位差进行计算的不稳定性。实验结果表明, 当所耗费的计算量大致相当时, 与基于传统极坐标或基于伪极坐标变换的频域配准算法相比, 文中算法提升了配准精度。空间复杂形变条件下的图像配准问题是我们的后续研究内容。

参考文献:

- [1] LI ZHONG-KE, YANG XIAO-HUI, WU LE-NAN. Image registration based on hough transform and phase correlation [C]// Proceedings of 2003 International Conference on Neural Networks & Signal Processing, December 14-17, 2003, Nanjing, China. IEEE Inc, United States, 2003, 2: 956-959.
- [2] CHEN HUA-MEI, VARSHNEY P K, ARORA M K. Performance of mutual information similarity measure for registration of multitemporal remote sensing images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(11): 2445-2454.
- [3] LIN HUI, DU PE-JUN, ZHAO WEI-CHANG, et al. Image registration based on corner detection and affine transformation [C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Image and Signal Processing, October 16-18, 2009, Yantai, China. IEEE Computer Society, 2010, 5: 2184-2188.
- [4] PALENICHKA R M, ZAREMBA M B. Automatic extraction of control points for the registration of optical satellite and LIDAR images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(7): 2864-2879.
- [5] ZOKAI S, WOLBERG. Image registration using log-polar mappings for recovery of large-scale similarity and projective transformations [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(10): 1422-1434.
- [6] TRAVER V J, PLA F. Dealing with 2D translation estimation in log-polar imagery [J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(2): 145-160.
- [7] SARVAIYA J N, PATNAIK S, BOMBAYWALA S. Image registration using log-polar transform and phase correlation [C]// Proceedings of the IEEE Region 10 Annual International Conference on TENCON, November 23-26, 2009, Singapore. IEEE Inc, United States, 2009, 1-5.
- [8] SAMRIJIARAPON O, CHITSOBHUK O. An fft-based technique and best-first search for image registration [C]// International Symposium on Communications and Information Technologies, October 21-23, 2008, Vientiane, Laos. IEEE Computer Society, 2008, 364-367.
- [9] KELLER Y, AVERBUCH A, ISRAELI M. Pseudo-polar based estimation of large translations rotations and scalings in images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(1): 12-22.
- [10] KELLER Y, SHKOLNISKY Y. An algebraic approach to symmetry detection [C]// Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, August 23-26, 2004, Cambridge, Kingdom. IEEE Inc, United States, 2004, 3: 186-189.
- [11] 刘汉洲, 郭宝龙, 冯宗哲. 基于傅里叶变换的遥感图像配准[J]. 光电子激光, 2006, 17(11): 1393-1397.
- LIU HAN-ZHOU, GUO BAO-LONG, FENG ZONG-ZHE. Fourier-based registration technique for aligning remote sensing images [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2006, 17(11): 1393-1397.
- [12] TEKALP A. Digital Video Processing, 数字视频处理 (影印版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [13] The USC-SIPI image database [C/OL]. University of Southern California. <http://sipi.usc.edu/database/>.

(编辑 陈移峰)