

一种基于 Zernike 矩和稳态遗传算法的遥感图像匹配方法

徐建斌 洪文 吴一戎
(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘要: 该文提出了一种基于稳态遗传算法和 Zernike 矩的遥感图像匹配方法。将稳态遗传算法快速而有效的全局寻优特点应用于遥感图像的匹配定位。考虑到旋转畸变, 采用遥感图像的 Zernike 矩作为相似性量度, 实现遥感图像的匹配。实验结果表明, 该算法可以克服图像的旋转畸变, 在保证一定的匹配精度下, 具有较高的匹配效率。

关键词: 稳态遗传算法, Zernike 矩, 图像匹配

中图分类号: TP751 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2005)06-0924-04

A Remote Sensing Images Matching Method Based on Zernike Moments and Steady Genetic Algorithms

Xu Jian-bin Hong Wen Wu Yi-rong
(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract In this paper, a remote sensing images matching method based on Zernike moments and steady genetic algorithms is proposed. Genetic algorithms, which are rapid and efficient in global finding optima, are used to match the images. Considering rotation distortion, the Zernike moments of remote sensing images are used as similarity measurements. The results confirm the proposed algorithm can overcome the distortion of images and improve the efficiency while guarantee the accuracy.

Key words Steady genetic algorithms, Zernike moments, Image matching

1 引言

遥感数据应用的前提是确切地知道遥感影像的地理位置, 也就是进行遥感影像的定位。目前的遥感影像定位主要通过卫星轨道信息和时码信息来完成的^[1]。在无法获取轨道信息和时码信息的情况下, 遥感影像的定位目前主要还是依靠有经验的解译人员人工判读、解译, 工作量大、效率低、而且精度不高。

图像的模板匹配算法是通过比较参考图像和目标图像之间的相似性来确定目标图像在参考图像中的位置, 这种方法可以用于遥感影像的定位。这种算法需要考虑的一个主要问题是图像的畸变。对于遥感图像而言, 常见的畸变包括平移、缩放, 旋转等。对于这些畸变的图像, 要实现其匹配, 就需要从图像中提取一些不变特征, 例如基于形状的各种不变描绘子^[2], 图像的 Hu^[3]矩和 Zernike 矩等, 其中 Zernike 矩由于其旋转不变性, 高效, 抗噪以及易于实现等特点^[4,5]受到了广泛的应用。

图像匹配要考虑的另外一个问题是匹配的效率, 在这方面, 很多学者进行了相关研究, 例如 Sharma 和 Pavel 等人^[6]将 Gauss-Newton 算法应用于图像相关处理; Starink 和 Baker 等人^[7]采用模拟退火算法进行图像匹配操作; Sawhney 等人^[8]则利用 Levenberg-Marquart(LM)算法进行图像的相关

匹配。这些算法在一定程度上都提高了匹配操作的运算效率。

作为一种实用而有效的优化算法, 遗传算法(Genetic Algorithms, GA)在很多方面得到了应用。按照种群生成的机制, 遗传算法可以分为稳态遗传算法(Steady GA)和简单遗传算法(Simple GA)两类, 相对于简单遗传算法而言, 稳态遗传算法具有较快的收敛速度和较高的运算效率^[9]。

本文利用 Zernike 不变矩作为相似性量度, 结合稳态遗传算法对具有旋转畸变的遥感图像进行匹配, 充分利用稳态遗传算法的群体搜索策略和较高的寻优效率, 在没有任何先验知识的情况下实现遥感图像的匹配。

2 算法基本原理

2.1 稳态遗传算法

遗传算法是一类借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机化搜索算法, 1975年由密歇根大学的 Holland 教授提出^[10]。其主要特点是群体搜索策略和群体中个体之间的信息交换, 搜索不依赖于梯度信息。遗传算法使用所谓的遗传算子(Genetic operators)作用于群体 $P(t)$ 中, 进行下述遗传操作, 从而得到新一代群体 $P(t+1)$ 。

(1) 选择(selection) 根据各个个体的适应度, 按照一定的规则或方法, 从第 t 代群体 $P(t)$ 中选择出一些优良的个体遗传到下一代群体 $P(t+1)$ 中。

(2) 交叉(crossover) 将群体 $P(t)$ 内的各个个体随机搭配成对, 对每一对个体以某个概率(称为交叉概率, crossover rate)交换它们之间的部分染色体。

(3) 变异(mutation) 对群体 $P(t)$ 中的每一个个体, 以某一概率(称为变异概率, mutation rate)改变某一个或某一些基因座上的基因值为其它的等位基因。

遗传算法按照每代种群的生成机制基本可分为两类, 即简单遗传算法和稳态遗传算法。在简单遗传算法中, 种群每代中的每一个个体都参与交叉变异操作, 下一代与上一代的个体没有重复。与简单遗传算法相比, 稳态遗传算法的交叉变异操作不是在群体中的每一个个体中进行, 而是按一定比例保留了上一代的优秀个体, 对剩下的具有较差的适应度函数的个体进行交叉变异操作。在稳态遗传算法中有一个比例因子 nReplacement 来控制每代中参与交叉变异操作的个体数量。文献[9]对稳态遗传算法进行了分析研究, 结果表明, 与简单遗传算法相比, 稳态遗传算法具有更快的收敛速度。

2.2 Zernike 不变矩

图像密度函数 $f(\rho, \theta)$ 的二维 Zernike 矩定义为

$$\begin{aligned} Z_{nm} &= \frac{n+1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 [V_{nm}(\rho, \theta)] f(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta \\ &= \frac{n+1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 R_{nm}(\rho) e^{jm\theta} f(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta \end{aligned} \quad (1)$$

式中 n 为正整数或零, m 为正或负整数, 且满足 $n-|m|$ 为偶数和 $|m| \leq n$ 的条件限制。 ρ 为原点到点 (x, y) 的矢量长度, 即 $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$, $-1 < x, y < 1$; θ 为 x 轴与长度为 ρ 的矢量在逆时针方向的夹角, 即 $\theta = \arctan(y/x)$; $R_{nm}(\rho)$ 表示点 (x, y) 的径向多项式, 定义为

$$R_{nm}(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} \frac{(-1)^s [(n-s)!] \rho^{n-2s}}{s! \left(\frac{n+|m|}{2} - s \right)! \left(\frac{n-|m|}{2} - s \right)!} \quad (2)$$

Zernike 多项式 $V_{nm}(x, y) = V_{nm}(\rho, \theta) = R_{nm}(\rho) e^{jm\theta}$ 是定义在单位圆盘 $x^2 + y^2 \leq 1$ 上正交复函数的集合。

在图像分析中, 由于 Zernike 多项式的正交性, 可使信息冗余达到最优化, 其递归性质使运用矩的快速算法成为可能。由 Zernike 矩的上述定义可知, 它的一个重要特性为: 图像旋转一定角度后的 Zernike 矩 Z'_{nm} 与原图像的 Zernike 矩 Z_{nm} 具有非常简单的关系, 即 $Z'_{nm} = Z_{nm} e^{jm\phi}$ 。该特性的意义在于图像旋转后 Zernike 矩仅发生相位变化而幅值保持不变。即图像的 Zernike 矩的幅值具有旋转不变性。这一特性在模式识别和图像匹配中特别有用。

3 算法实现

3.1 自然数编码

将问题的可行解从解空间转换到遗传算法编码空间的过程就称为编码。编码是应用遗传算法时要解决的首要问题, 也是设计遗传算法的一个关键步骤。编码方法除了决定个体的染色体排列形式外, 还决定了个体从搜索空间的基因

型变换到解空间的表现型时的解码方法, 同时也影响到交叉和变异操作。传统的遗传算法的编码方式为二进制编码, 即遗传空间的个体(individual)或染色体(chromosome)通常由二进制串来表示。在图像相关匹配应用中, 采用二进制编码存在以下缺点^[11]:

(1) 不同图像尺寸不同, 因此若采用二进制编码则编码的位数不可事先确定。编码位数取决于参考图像和目标图像的大小, 当其中之一变化时, 需要修改程序中染色体编码位数以适应不同大小的搜索空间。

(2) 二进制位交叉和变异后有可能会产生无对应可行解的个体, 这些个体经解码处理后所表示的解为无效解。

由于图像相关匹配是欲求出目标所在的位置坐标 (i, j) , i, j 均为自然数, 因此本文采用自然数编码方法。本文采用以下的编码方案:

X 轴位置(i)	Y 轴位置(j)
--------------	--------------

3.2 适应度函数

根据矩不变量性质, 定义如下的归一化相关函数作为适应度函数 $f(x, y)$:

$$f(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^6 Z^i(T) Z^i(x, y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^6 (Z^i(T))^2 \sum_{i=1}^6 (Z^i(x, y))^2}} \quad (3)$$

其中 $Z^i(T)$ 为目标图像的 i 阶 Zernike 矩, 本文取 Zernike 的前 6 阶矩。 $Z^i(x, y)$ 为参考图像中以 (x, y) 为左上角, 与目标图像大小相等的一块图像的 i 阶 Zernike 矩。

3.3 选择和交叉机制

从群体中选择优胜的个体, 淘汰劣质个体的操作叫选择。本文采用适应度比例选择机制。

适应度比例选择方法可以描述如下:

设群体大小为 n , 其中个体 i 的适应度值为 f_i , 按照适应度比例方法个体 i 被选择的概率 P_{si} 为

$$P_{si} = f_i / \sum_{j=1}^n f_j \quad (4)$$

显然, 概率 P_{si} 反映了个体 i 的适应度在整个群体的个体适应度总和中所占的比例。个体适应度越大, 其被选择的概率就越高。反之, 其被选择的概率就越低。按式(4)计算出群体中各个个体的选择概率后, 就可以决定哪些个体被选出。

3.4 稳态遗传算法的参数选择

在稳态遗传算法中用 nReplacement 参数来控制每代中参与交叉变异操作的个体数量, 我们用百分比来表示, 如果 nReplacement 取 100%, 则表示每一个个体都参与交叉变异操作, 此时的稳态遗传算法就演变为简单遗传算法。在具体实现过程中, 需要先按每代中个体的适应度函数排序, 然后只对每代中适应度函数最差的个体按 nReplacement 比例进

行交叉变异操作，生成的新个体并不是每一个都进入到下一代种群，而是与参与交叉变异的个体进行比较，选择其中的最优个体形成下一代种群。相关的研究表明与简单遗传算法相比，稳态遗传算法具有更快的收敛速度，本文在实验的基础上选取 $nReplacement=50\%$ 。

3.5 自适应调整交叉概率和变异概率

交叉概率和变异概率的自适应调整一方面是为了保证个体的多样性，防止过早收敛，另一方面也是为了防止算法过度发散，进入随机搜索状态，用 gdm 作为衡量每代群体中个体多样性的量度， gdm 定义为

$$gdm = \bar{f} / f_{max} \quad (5)$$

其中 \bar{f} 为某一代群体中个体适应度的平均值， f_{max} 为该代中个体适应度的最大值。 gdm 值越大，则个体越集中，个体的多样性越小， $gdm = 1$ 时，所有的个体具有相同的适应值，即为同一个体，此时个体的多样性最小，需要适当增加变异概率而减小交叉概率来增加个体的多样性以防止遗传算法收敛于局部最优。反之，当 gdm 越小，则个体多样性越多，当 $gdm \ll 1$ 时，遗传算法就接近于随机搜索，此时就适当减小变异概率而增加交叉概率。

本文采用图1所示的算法实现交叉概率和变异概率的自适应调整：

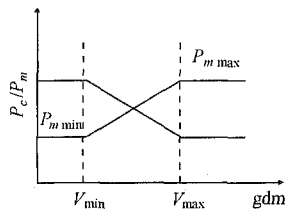


图1 自适应调整遗传和变异概率

其中 P_c 代表交叉概率， P_m 代表变异概率， V_{max} ， V_{min} 为 gdm 的门限值，文中在实验的基础上分别取 $V_{max} = 0.9$ 和 $V_{min} = 0.1$ 。

3.6 算法实现流程

算法的实现流程如图2：

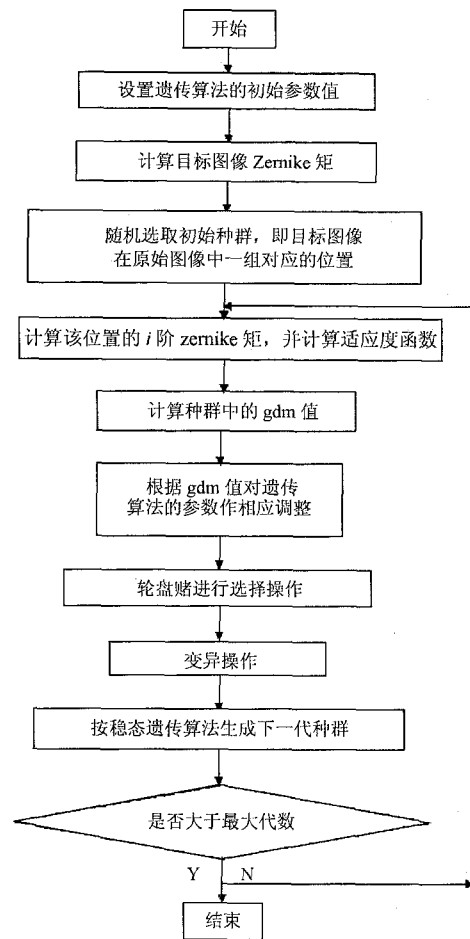


图2 算法流程

实际上，为了提高遗传算法的执行效率，实现过程中设置一个参数 N 用来控制遗传算法的遗传代数，当连续 N 代的最大适应值都没有发生变化，或者是连续 N 代都没有出现更大的适应值，则结束遗传操作，算法结束。

4 实验结果

实验是在 VC+Opencv 环境下完成的，实验求得的目标图像的 Zernike 矩如表1所示。

实验选取了两种传感器的遥感图像，分别是 5m 分辨率

表1 两类目标图像的 Zernike 矩

		一阶	二阶	三阶	四阶	五阶	六阶
Spot5 (219×219)	0°	801793	132508	15443	58703	44482	41098
	5°	801781	132505	15443	58703	44481	41097
	90°	801793	132508	15443	58703	44482	41098
	180°	801793	132508	15443	58703	44482	41098
Spot3 (150×150)	0°	46539	19982	25691	18748	9164	6653
	5°	46536	19982	25690	18746	9164	6653
	90°	46539	19982	25691	18748	9164	6653
	180°	46539	19982	25691	18748	9164	6653

的 Spot5 和 20m 分辨率的 Spot3 遥感图像, 考虑到旋转的影响, 参考图像和目标图像如图 3, 图 4 所示(作了适当缩小), 图 5 为匹配结果。

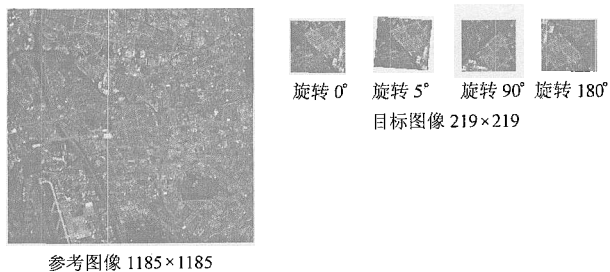


图 3 5m 分辨率的 Spot5 参考图像和目标图像

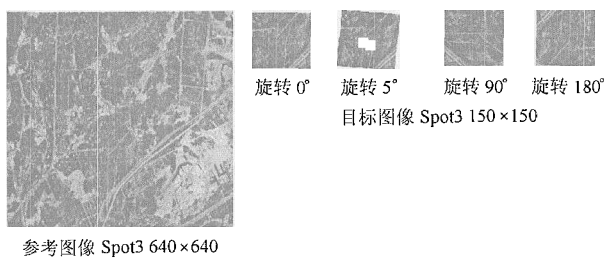


图 4 20m 分辨率的 Spot3 参考图像和目标图像

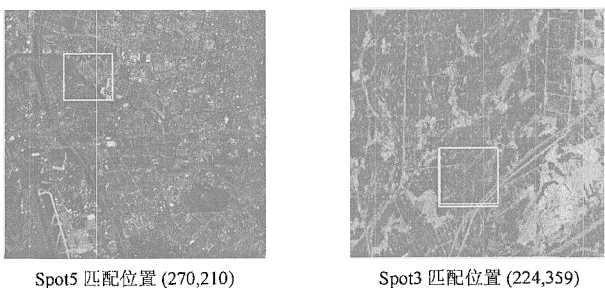


图 5 匹配结果

同时本文还将基于稳态遗传算法的实验结果与简单遗传算法和模板匹配的结果进行了对比。表 2 为实验结果, 可以看出, 基于稳态遗传算法的遥感图像匹配又比简单遗传算法具有更高的运算效率。

表 2 稳态遗传算法与简单遗传算法的执行效率比较 (ms)

	稳态遗传算法	简单遗传算法
Spot5	1520	7540
Spot3	673	3081

5 结束语

本文研究了 Zernike 矩在图像匹配中的应用, 利用 Zernike 矩旋转不变的特性, 结合稳态遗传算法高效的寻优性能进行遥感图像的匹配定位研究, 实验结果表明基于稳态遗传算法的 Zernike 矩匹配具有抗旋转的特性, 而且具有较高的效率。

下一步的工作, 一方面, 可以考虑矩不变量与其它优化算法相结合, 以进一步提高算法的执行效率。另一方面, 本论文没有考虑多传感器图像之间的匹配, 这也是今后需要进一步研究的问题。

参考文献

- [1] Emery W J, Brown J, Nowak Z P. AVHRR image navigation: summary and review. *Photogrammetry Eng. Remote Sensing*, 1989, 55(8): 1175 - 1183.
- [2] Wang W H, Chen Y C. Image registration by control points pairing using invariant properties of line segments. *Pattern Recognition Letters*, 1997, 18(3): 269 - 281.
- [3] Hu M K. Visual pattern recognition by moment invariants. *IRE Trans. of Information Theory*, 1962, IT-8: 179 - 187.
- [4] Khotanzad A, Hong Y H. Invariant image recognition by Zernike moments. *IEEE Trans. on Pattern Analysis. Machine Intelligence*, 1990, 12(5): 489 - 498.
- [5] Prokop R J, Reeves A P. A survey of moment-based techniques for unoccluded object representation and recognition. *Graphical Models Image Processing*, 1992, 54(5): 438 - 460.
- [6] Sharma R K, Pavel M. Multisensor image registration. *Proc. Society for Information Display*, 1997, XXVIII: 951 - 954.
- [7] Starink J P P, Baker E. Finding point correspondence using simulated annealing. *Pattern Recognition*, 1995, 28(2): 231 - 240.
- [8] Sawhney H S, Kumar R. True multi-image alignment and its applications to mosaicing and lens distortion correction. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, 21(3): 235 - 243.
- [9] Vavak F, Fogarty T. Comparison of Steady State and Generational Genetic Algorithms for use in Nonstationary Environments. *Proc. of the 1996 IEEE Conference on Evolutionary Computation*, IEEE Press, Nagoya, Japan, 1996: 192 - 195.
- [10] Holland J H. *Adaptation in Natural and Artificial System*, Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975: 30 - 58.
- [11] 种劲松, 王宏崎, 周孝宽. 自然数编码遗传算法在图像相关匹配中的应用. *电子与信息学报*, 2001, 23(7): 644 - 649.

徐建斌: 男, 1970 年生, 博士生, 主要研究方向为光学遥感影像处理、SAR 成像算法等。

洪文: 女, 1968 年生, 研究员, 主要研究方向为遥感影像处理、SAR 成像算法等。

吴一戎: 男, 1963 年生, 研究员, 主要研究方向为遥感影像处理、SAR 成像算法、遥感地面应用处理系统、并行处理等。