

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.02.005

景象匹配相似性测度准则研究

安 如¹,王慧麟²,陶晓勋¹,张 琴¹,陈春烨¹,刘志辉¹

(1.河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098;2.南京大学地理与海洋科学学院,江苏 南京 210093)

摘要 :对基于灰度的互信息、归一化积相关、序贯相似性检测和基于特征点重复率、改进的 Hausdorff 距离以及 AB 匹配等几种典型的相似性测度方法进行了研究,探讨了这些方法在 2 种不同传感器、不同空间分辨率和不同季节拍摄的遥感景象匹配中的匹配成功率和匹配效率.试验表明,对于各种不同的地表景观,互信息、特征点重复率和改进的 Hausdorff 距离方法的匹配性能均好于归一化积相关以及序贯相似性检测算法,尤其当景象存在明显的灰度反转时,前者的匹配性能明显优于后者.对相似性测度准则的分析比较研究,有助于在实际应用中选择合适的相似性测度匹配方法.

关键词 :相似性测度;景象匹配;图像匹配;有效性;匹配性能

中图分类号 :TP391.41 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2009)02-0147-06

相似性测度是衡量 2 幅待匹配景象特征或亮度接近程度的一种度量方法,对景象匹配成功与否起到关键作用,一直以来是人们研究的热点问题.采用何种相似性测度,取决于采用何种图像特征进行匹配.到目前为止,人们已提出几十种相似性测度方法,如直接基于像元灰度的归一化互相关函数、相关系数、相位相关、灰度的绝对差和、逐点灰度差变化计数以及最近广泛应用于多模态医学图像匹配的互信息方法,基于特征的各种相似性测度方法,如边缘的绝对差之和、Hausdorff 距离等^[1-6].但各种相似性测度方法的匹配性能、普遍适应性如何,适应何种景象特征即它们的有效性如何是值得研究的问题.本文对几种常用的基于特征和基于灰度的相似性测度匹配方法进行了研究,从匹配成功率分析比较了他们对不同地表景观、灰度畸变、灰度反转、自相似区域的适应性;应用相同的匹配搜索策略进行匹配计算复杂性研究,得出了各种方法的匹配效率.

1 相似性测度准则

1.1 基于灰度的相似性测度准则

1.1.1 互信息(MI)法

互信息是信息论中的一个基本概念,用来度量 2 个随机变量的统计依赖性或者一个变量包含另一个变量的信息量^[7].这种信息可以是图像的灰度、直方图信息、图像梯度或 2 幅图像中提取的特征信息.当 2 幅图像达到最佳配准时,它们对应像素的灰度互信息应达到最大,因而互信息可作为图像配准中的相似性测度^[8].由于该测度不需要对不同成像模式下图像灰度间的关系作任何假设,也不需要图像进行分割或任何预处理,所以被广泛应用于多种医学图像配准^[9],近来也被应用于遥感图像的配准^[10].

互信息是一种描述变量不确定性和复杂性的测度,通常可以由 2 个变量的联合概率密度或信息熵来表示.若互信息较小,说明变量独立性较强,反之说明两者依赖性强.互信息用信息熵表示时公式如下:

$$I(U,V)=H(U)-H(U|V)=H(V)-H(V|U)=H(U)+H(V)-H(U,V) \tag{1}$$

式中: U,V ——2 幅图像; $H(U),H(V)$ ——图像 U 和 V 的边缘熵,描述了随机变量的不确定性; $H(U,V)$ ——两者的联合熵; $H(U|V)$ ——条件熵,描述了已知 V 时 U 的不确定性总量.

研究发现,互信息与 2 个图像重叠部分的多少成正比.为了使目标函数能更加准确地反映互信息量和配准参数之间的关系,Studholme 等^[9]提出了一个基于重叠不变的相似性测度——归一化互信息测度,它能使

收稿日期 :2008-04-25

基金项目 :国家自然科学基金(40771137);中国科学院遥感应用研究所、北京师范大学遥感科学国家重点实验室开放基金、国家高科技研究发展计划(863 计划) 2008AA12Z106 联合资助

作者简介 :安如(1963—),女,江苏淮安人,教授,博士,主要从事遥感、地理信息系统的研究与应用.

配准函数更平滑,减少对图像重叠部分的敏感性,配准精度也更高,其表达式如下:

$$E(U,V)=\frac{H(U)+H(V)}{H(U,V)} \tag{2}$$

近年来归一化互信息法被广泛应用.实践证明,在刚性匹配中,归一化互信息比传统互信息具有更强的鲁棒性.

由于用于匹配的输入图像尺寸较小,当用 256 阶灰度级表示像元亮度时,各灰度值出现的概率过于分散,统计力不强,用互信息法进行匹配,正确率较低且匹配时间较长.通过试验发现,匹配图像用 16 阶灰度级表示,匹配效果最佳.

1.1.2 归一化积相关算法(NPROD)

常用的基于灰度的匹配方法是归一化积相关算法,其相似性测度函数为

$$P(x,y)=\frac{\sum_{i=1}^m\sum_{j=1}^nR_{i+x,j+y}F_{i,j}}{[\sum_{i=1}^m\sum_{j=1}^nR_{i+x,j+y}^2]^{\frac{1}{2}}[\sum_{i=1}^m\sum_{j=1}^nF_{i,j}^2]^{\frac{1}{2}}} \tag{3}$$

式中, $P(x,y)$ 为相似性测度函数, $0 \leq x \leq M-m$, $0 \leq y \leq N-n$, 基准图 $R_{M \times N}$ 的大小为 $M \times N$, 实时图 $F_{m \times n}$ 大小为 $m \times n$, 并且 $m < M$, $n < N$, (x,y) 为实时图在基准图中的位置, 所以, 当 $P(x,y)$ 为最大时, 最佳的匹配位置就是 (x,y) .

1.1.3 序贯相似性检测算法(SSDA)

传统的归一化积相关算法在每个基准图的待匹配位置上都要进行 $m \times n$ 次相关计算, 计算量很大. 为了减少在每个待匹配位置上的计算量, Barnea 等^[11]提出了对传统模板匹配算法进行改进的序贯相似性检测算法(SSDA).

1.2 基于特征的相似性测度准则

主要研究特征点重复率、改进的 Hausdorff 距离以及 AB 方法.

1.2.1 基于距离变换的特征点重复率(EDSRBDT)法

特征点重复率是将待匹配图像重复与基本重复的特征点数与总点数之比作为图像是否匹配的度量. 当 2 幅图像精确匹配时, 点重复率应最大. 一般在经过距离变换后的图像上判断特征点是否是重复特征^[12].

假设实时图像的点集为 R , 参考子图的点集为 F , 当两图像重叠后, 如果位于 R 中的一点落在 F 中以某点为中心、 ϵ 为半径的圆形区域内, 则认为这 2 点是大致重复的^[13]. 特征点重复率定义如下:

$$S_{\text{th}}(A,B)=\min(n_a/T_A,n_b/T_B) \tag{4}$$

式中, n_a, n_b ——图像 R 和 F 具有大致重复的点个数; T_A, T_B —— R 和 F 分别包含的点数. 当两图像几何上正确对准时, 认为 $S_{\text{th}}(A,B)$ 取得最大值.

1.2.2 改进的 Hausdorff 距离法

由于 Hausdorff 距离(HD)相似性测度具有计算简单、抗干扰能力强等特点, 被广泛用于图像的特征点匹配中. 然而直接用 HD 进行图像匹配的鲁棒性较差, 为此, 研究者们对经典的 HD 进行了一系列修改, 以提高匹配的鲁棒性.

1.2.2.1 平均 HD 法(MHD)

Dubuisson 等^[14]提出了 MHD 法, 其有向距离用求平均值的方式定义为

$$h_{\text{MHD}}(A,B)=\frac{1}{N}\sum_{a \in A}d_B(a) \tag{5}$$

式中, N ——点集 A 所包含的点的个数; $d_B(a)$ ——点集 A 中的一点到点集 B 的最短距离.

1.2.2.2 改进的平均 HD 法(M-HD)

Sim 等^[15]提出了 2 种不同的 HD 修改形式, 其中一种被称为 M-HD 法, 其有向距离定义为

$$h_{\text{M-HD}}(A,B)=\frac{1}{N}\sum_{a \in A}\varphi(d_B(a)) \tag{6}$$

$$\varphi(x)=\begin{cases} |x| & |x| \leq \tau \\ \tau & |x| > \tau \end{cases} \tag{7}$$

M-HD 法实际是对 MHD 法的改进, 它用一个阈值 τ 来限制一些出格点的影响.

1.2.3 AB 匹配法

Young-Seuk 等^[16]提出 AB(the accumulated buffer)匹配法.该方法利用一系列累加单元进行基于边缘的不同传感器图像匹配,匹配速度较快.

AB 匹配法具体计算步骤如下:(a)用边缘检测算子提取边缘,获取边缘 2 值图像.(b)AB 匹配.分别把基准图和待匹配图中边缘特征点的位置信息存入一个数组中,再将基准图边缘特征点的位置数组与待匹配图边缘特征点的位置数组相减,把相减后位置差相同的数放入 1 个与基准图大小相同的累加器中,累加数最多的位置就是正确的匹配位置.

2 准则的实证与讨论

2.1 试验数据

试验数据为 2 种传感器在不同时间拍摄的具有不同分辨率的遥感图像,如图 1 所示.以 1999 年 12 月 21

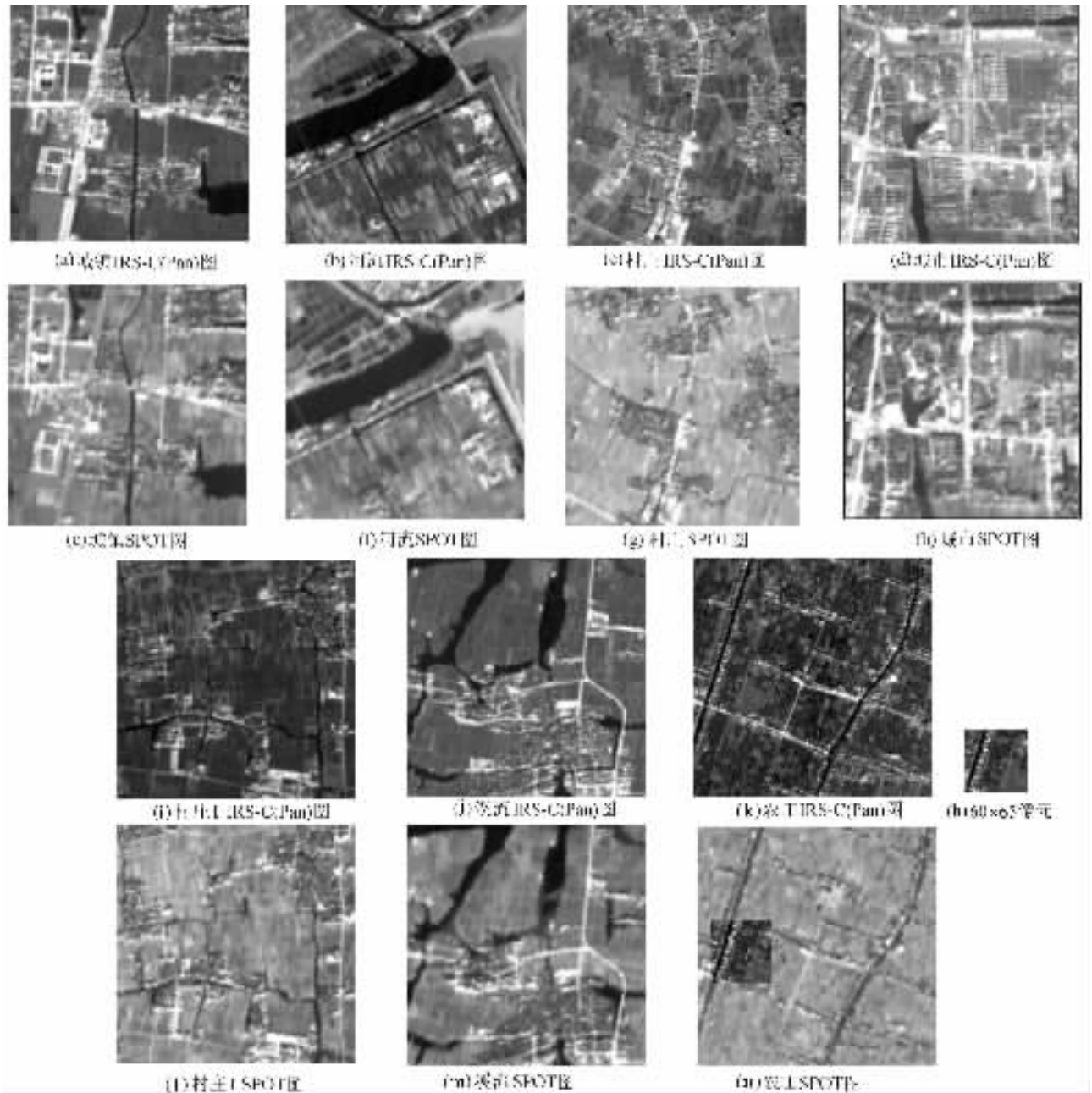


图 1 试验图像

Fig. 1 Various scene images for tests

日 SPOT(pan)图像(具有 10 m 空间分辨率)作为参考图像,所有参考图像大小为 256×256 像元;以对应区域 1996 年 7 月的 IRS- α (pan)图像作为产生实时图像的源图像,空间分辨率为 5.8 m,实时图像大小为 65×65 像元,是从 IRS- α (pan)源图像中每隔 20 像元割取 1 幅产生的。每幅 256×256 像元的 IRS- α (pan)图像产生 100 幅实时图像。试验区域包含了不同的地表景观,例如农田、道路、村庄、集镇、河流、城市,共有 700 幅实时图像样本,如图 1 所示,其中集镇、城市图像特征丰富,河流、溪流图像信噪比高,像元灰度非线性变化小,而村庄、村庄 1 和农田图像灰度反差大。农田图像存在较多的相似区域。

2.2 试验方法

各种相似性测度遍历搜索匹配方法如下:设实时图 F 在基准图 R 上平移,实时图覆盖下的搜索图设为子图 $R_{x,y,x',y'}$ 为该子图左上角的像点在 R 图中的坐标。匹配时在基准图中自上而下、自左而右地遍历每一个像元,在每个像元位置上截取与实时图 F 大小相同的子图 $R_{x,y}$,计算实时图 F 和子图 $R_{x,y}$ 的相似性测度值,最后选取相似性测度值最大的位置作为实时图 F 在基准图 R 中的匹配位置。

2.3 结果分析

试验结果如表 1、表 2、图 2 和图 3 所示。表 1 为基于灰度的常用相似性测度方法在各种地表景观图像匹配中的性能。由表 1 可见,互信息法对于各种地表景观都取得了较高的匹配正确率,其匹配正确率显著高于归一化积相关算法和序贯相似性检测算法,说明互信息方法是一种普遍适用的相似性测度准则,尤其适用于不相似图像的匹配。它不需要对图像作任何预处理,例如特征提取。

表 1 不同地表景观基于灰度的相似性测度匹配性能

试验区域		互信息法		归一化积相关算法		序贯相似性检测算法	
		匹配用时/s	正确匹配率/%	匹配用时/s	正确匹配率/%	匹配用时/s	正确匹配率/%
村庄	100	4.54	57	4.194	10	2.411	1
村庄 1	100	4.54	78	4.492	61	2.544	15
农田	100	4.53	69	4.581	28	2.576	4
城镇	100	4.49	93	4.113	85	2.285	31
河流	100	4.47	90	4.480	63	2.131	57
城市	100	4.50	88	3.978	65	2.134	31
溪流	100	4.50	100	4.460	82	2.347	37

表 2 不同地表景观基于特征的相似性测度匹配性能

试验区域		特征点重复率法		MHD 法		M-HD 法		AB 匹配法	
		匹配用时/s	正确匹配率/%	匹配用时/s	正确匹配率/%	匹配用时/s	正确匹配率/%	匹配用时/s	正确匹配率/%
村庄	100	3.753	76	4.544	69	4.591	76	1.030	41
村庄 1	100	4.050	98	4.225	87	4.278	97	0.804	65
农田	100	4.206	86	4.252	85	4.305	86	0.781	65
城镇	100	3.919	100	4.709	94	4.758	100	1.188	88
河流	100	4.017	67	4.502	57	4.695	61	1.110	53
城市	100	3.791	80	4.764	78	4.801	78	1.527	63
溪流	100	4.268	99	4.422	96	4.440	97	1.109	82

从表 1 看,归一化积相关算法和序贯相似性检测算法对灰度变化不大即信噪比高的城镇和溪流图像匹配效果较好,其余的匹配结果均不理想,说明这 2 种方法仅适合质量好的图像的匹配,不适合非相似图像的匹配。

表 2 为基于特征的几种常用相似性测度方法。基于特征匹配的成功与否主要取决于待匹配图像包含特征的多少及其分布。其中基于距离变换的特征点重复率法、2 种改进的平

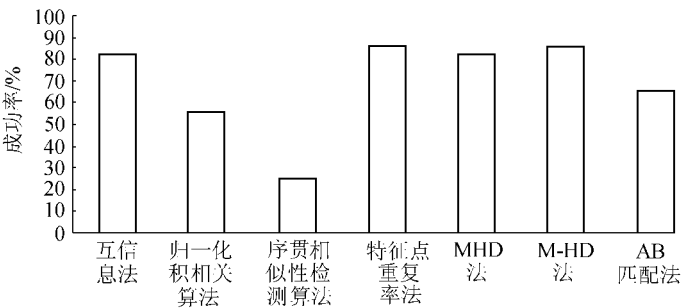


图 2 各种相似性测度匹配成功率比较

Fig. 2 Comparison of success rates among various similarity measures

均 Hausdorff 距离方法取得了好的匹配结果 ,AB 匹配法次之 .4 种方法均取得了较好的匹配成功率 ,说明基于特征的方法非常适合于不相似图像的匹配 .

图 2 对各种匹配方法的平均匹配成功率进行了比较 ,发现互信息、基于距离交换的特征点重复率和改进的 Hausdorff 距离法均取得了较好的匹配成功率 .而归一化积相关、序贯相似性检测和 AB 法匹配成功率较低 .尤其是序贯相似性检测算法匹配成功率极低 .

图 3 给出了各种方法匹配平均耗时的比较 .应用相同的遍历搜索匹配策略 ,发现 AB 匹配法最快 ,序贯相似性检测算法次之 ,互信息、基于距离变换的特征点重复率法、2 种改进的平均 Hausdorff 距离方法匹配时间相对长一些 ,但他们的匹配成功率远高于 AB 匹配法和序贯相似性检测算法 .

从匹配成功率和匹配用时折中来看 ,互信息法、基于距离变换的特征点重复率法、改进的 Hausdorff 距离法均取得了较好的匹配性能 ,AB 法匹配成功率稍差 ,但匹配速度最快 .

3 结 论

对几种常用的基于灰度和基于特征的相似性测度方法进行了研究 ,分析讨论了各种方法的匹配性能 .通过试验结果的比较分析 ,发现对于各种不同的地表景观 ,互信息、基于距离变换的特征点重复率和改进的 Hausdorff 距离方法的匹配性能均好于归一化积相关以及序贯相似性检测算法 ,尤其当景象存在明显的灰度反转时(如村庄和农田图像) .当图像质量较好(特征丰富 ,信噪比较高 ,在基准图像中较少自相似区域) ,各种方法均取得了相对较高的匹配成功率 ,例如溪流和城镇试验图像的匹配 .当图像存在明显的灰度反转(例如村庄图像) ,特征不丰富 ,存在随机噪声和相似区域(例如农田图像)时 ,对于互信息、基于距离变换的特征点重复率和改进的 Hausdorff 距离方法 ,依然取得了较好的匹配性能 ,说明这些方法适应性、鲁棒性强 .而归一化积相关和序贯相似性检测算法匹配性能很差 .值得注意的是 ,互信息法匹配不需要对不同成像模式下图像灰度间的关系作任何假设 ,也不需要图像进行分割或任何预处理 ,所以被广泛应用于多模态医学图像配准中 ,是一个通用的度量准则 .本文试验也说明了这一点 .今后值得研究的问题是如何将互信息法与各种优化搜索策略相结合 ,进一步提高匹配速度 ,使之能够更好地应用于实时图像匹配 .

参考文献 :

[1] BROWN L G . A survey of image registration techniques[J] . ACM Comput Surv ,1992 24(4) 325-376 .
[2] ZITOVA B ,FLUSSER J . Image registration methods :a survey[J] . Image and Vision Computing ,2003 21 977-1000 .
[3] 安如 ,王慧麟 ,冯学智 ,等 . 基于图像尺度空间表达与鲁棒 Hausdorff 距离快速角点特征匹配方法[J] . 测绘学报 ,2005 ,34 (2) :101-107 .
[4] SIM D G ,KWON O K ,PARK R H . Object matching algorithm using robust Hausdorff distance measures[J] . IEEE Trans Image Process ,1999 8(3) 425-429 .
[5] 苏康 ,金善良 . 智能地物影像匹配定位技术研究[J] . 红外与激光工程 ,2000 29(1) :1-4 .
[6] MAES F ,COLLIGNON A ,VANDERMEULEN D ,et al . Multimodality image registration by maximization of mutual information[J] . IEEE Transactions on Medical Imaging ,1997 ,16 :187-198 .
[7] COVER T M ,THOMAS J A . Elements of information theory[M] . New York :John Wiley & Sons ,1991 .
[8] VIOLA P ,WELLS W . Alignment by maximization of mutual information[C] //Proceedings of the 5th International Conference on Computer Vision ,20-23 June Cambridge ,Los Alamitos ,CA :IEEE Computer Society Press ,1995 16-23 .
[9] 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 .
[10] CHEN H M ,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 .
[11] BARNEA D I ,SILVERMAN H E . A class of algorithms for digital image registration[J] . IEEE ,1972 ,C-2(2) :179-186 .

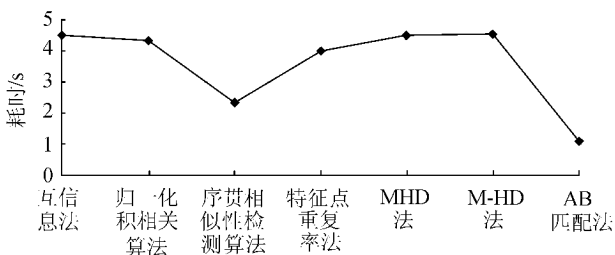


图 3 各种相似性测度匹配耗时比较

Fig. 3 Comparison of time cost among various similarity measures

[12] 丁明跃 , 吴晏 , 彭嘉雄 . 用于飞行器导航的边缘匹配方法研究 [J]. 宇航学报 , 1998 , 19 (3) : 72-78.

[13] BISHNU A , DAS S , NANDY S C , et al. Simple algorithms for partial point set pattern matching under rigid motion [J]. Pattern Recognition , 2006 , 39 : 1662-1671.

[14] DUBUISSON M P , JAIN A K. A modified Hausdorff distance for object matching [C] // Proceedings of 12th International Conference on Pattern Recognition . Jerusalem [s. n.] , 1994 : 566-568.

[15] SIM D G , KWON O K , PARK R H. Object matching algorithm using robust Hausdorff distance measures [J]. IEEE Transactions on Image Processing , 1999 , 8 (3) : 425-429.

[16] YOUNG-SEUK O H , SIM D G , PARK R H , et al. Absolute position estimation using IRS satellite images [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing , 2006 , 60 : 256-268.

Classical similarity measures for scene matching

AN Ru¹ , WANG Hui-lin² , TAO Xiao-xun¹ , ZHANG Qin¹ , CHEN Chun-ye¹ , LIU Zhi-hui¹
(1. College of Hydrology and Water Resources , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
2. Institute of Geography and Sea Sciences , Nanjing University , Nanjing 210093 , China)

Abstract : Several typical similarity criteria for the intensity-based and feature-based matching methods were studied. They included the mutual information (MI) , the normalized product correlation (NPROD) and the sequential similarity detection algorithm (SSDA) methods for the intensity-based and the edge superposition ratio based on distance transformation (EDSRBDT) , the modified Hausdorff distance (MHD and M-HD) and the accumulated buffer (AB) methods for feature-based matching. Their success rates and time cost for matching were compared and discussed using remote sensing images with different spatial resolutions captured by two kinds of sensors in different seasons. The test results indicate that the matching performance of MI , EDSRBDT , MHD and M-HD is greatly superior to that of NPROD and SSDA for various land scenes , especially the images with obvious gray reversal. Comparative studies on the similarity criteria are useful for choosing the most reasonable similarity measures in practice.

Key words : similarity measure ; scene matching ; image registration ; reliability ; performance

.....

· 简讯 ·

河海大学有 4 种期刊被收录为 2008 年中国科技论文统计源期刊

经过多项学术指标综合评定及同行专家评议推荐 ,由河海大学主办的《河海大学学报(自然科学版)》、《水利水电科技进展》、《水资源保护》、《水利经济》被收录为“中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)”。《2008 年版中国科技期刊引证报告(核心版)》(CJCR)共收录中国科技论文统计源期刊 1 765 种 ,约占我国 5 000 多种科技期刊的 1/3. 这些被收录的期刊都是经过严格的定量和定性分析选取的各个学科的重要期刊. 由河海大学主办的这 4 种期刊已连续多年被收录为“中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)” ,标志着河海大学期刊继续保持着较好的发展势头 ,这对提升河海大学学术声誉 ,促进河海大学学科建设将起到有力的推动作用.

(本刊编辑部供稿)