

文章编号:1002-3682(2015)04-0069-08

## 基于互信息和相关比算法的声呐图像配准\*

宋树军<sup>1</sup>, 侯雪<sup>1</sup>, 唐秋华<sup>2</sup>

(1. 广东省国土资源测绘院, 广东 广州 510500; 2. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

**摘要:**针对互信息算法在配准图像过程中易陷入局部极值的问题,提出了一种新的算法,即将互信息和相关比按一定的标准组合在一起,生成一种新的测度算法,并将该算法应用到了多波束图像和侧扫声呐图像的配准中。该组合算法可以改善互信息测度易陷入局部极值的弊端,稳定性更强。通过实验验证,新的组合算法是准确的,可以较好地实现存在较大畸变的多波束和侧扫声呐图像的配准,配准速度和精度优于互信息算法和相关比算法,新的组合算法是对原有算法的改进和优化。

**关键词:**多波束声呐图像;侧扫声呐图像;互信息

**中图分类号:** TP391    **文献标识码:** A    **doi:** 10.3969/j.issn.1002-3682.2015.04.009

多波束测深系统(Multi-beam Echo Sounder, MBES)不但能够获取高精度水深地形数据,而且能够获取海底地貌图像信息,其图像位置精度较高,但分辨率较低;侧扫声呐系统(Side Scan Sonar, SSS)获取的海底地貌图像具有较高分辨率,但位置精度较差。对二者的图像进行配准和融合,可获取具有较高分辨率和位置精度的图像,便于对海底进行准确的定性、定量分析和全面解释<sup>[1]</sup>。

图像配准是图像融合的前提,只有使两幅图像在几何位置上对齐,对这两幅图像进行融合才有意义。基于互信息(Mutual Information, MI)测度的图像配准算法是目前热门的算法,该算法对图像变形的鲁棒性强,可以实现多源图像的配准,被广泛应用于多模医学图像和遥感图像的配准中,本文尝试将互信息测度应用于多波束和侧扫声呐图像的配准中。互信息测度是基于图像灰度统计相关性的测度,缺乏图像内在的特征信息,因此在配准时容易产生局部极值。为了克服这个问题,一些学者尝试将空间结构信息,如区域互信息、梯度互信息等加入互信息当中生成新的相似性测度<sup>[2-3]</sup>,但这些方法应用于声呐条带的配准中,效果并不明显<sup>[4]</sup>。因此,本文尝试将存在优势互补的互信息测度和相关比测度(Correlation Ratio, CR)进行组合,生成一种新的组合算法,该算法可以改善互信息测度在配准过程中产生局部极值的问题。

\* 收稿日期:2015-06-04

作者简介:宋树军(1971-),男,高级工程师,主要从事航测遥感方面研究. E-mail:13802997670@139.com

(王 燕 编辑)

## 1 新的相似性测度函数的建立

### 1.1 基于互信息测度的图像配准

互信息是信息理论中的一个概念,由 Viola 和 Wells 首次应用到了医学图像配准中<sup>[5]</sup>。互信息没有假设图像中灰度值存在线性或二次相关关系,能够解决多模态图像的配准问题,具有鲁棒性好、精度高的特点;而且无需在配准前对图像进行特征的提取或者分割,计算简单。

两幅图像的互信息可以表示为

$$MI = H(A) + H(B) - H(A, B) = \sum_{A, B} p(A, B) \log \frac{p(A, B)}{p(A)p(B)} \quad (1)$$

式中,  $H(A)$  和  $H(B)$  分别是图像  $A$  和  $B$  的熵,  $H(A)$  和  $H(B)$  可以分别通过边缘概率密度函数  $p(A)$  和  $p(B)$  求得:  $H(A) = -\sum_A p(A) \log p(A)$ ,  $H(B) = -\sum_B p(B) \log p(B)$ ;  $H(A, B)$  为图像  $A$  和  $B$  的联合熵。

当两幅图像达到最佳配准时,联合熵最小,互信息最大。

### 1.2 基于相关比测度的图像配准

利用相关比测度对图像进行配准时,不要求图像的灰度之间存在线性相关或者二次相关,该测度被广泛用于医学领域的多模态图像配准中,并取得了好的效果<sup>[6]</sup>。

基于相关比测度的配准方法,考虑了体素在表现图像空间结构时的一定灰度值范围的近似量化,在配准过程中易于保证得到全局最优值<sup>[7]</sup>。

参考图像  $R$  的某一个灰度值  $r$  或者浮动图像  $F$  的某一个灰度  $f$ , 对应的边缘概率密度为

$$\begin{aligned} p(r) &= \sum_f p(r, f) \\ p(f) &= \sum_r p(r, f) \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $p(r, f)$  表示参考图像和浮动图像的联合概率分布。对于给定的几何变换  $T$ , 浮动图像  $F_T$  和参考图像  $R$  之间的相关比相似性测度可以表示为<sup>[7]</sup>

$$CR(R, F_T) = 1 - \frac{1}{\text{Var}(F_T)} \sum_m \frac{n_m}{N} \text{Var}(F_T^m) \quad (3)$$

式中,  $F_T$  表示经过几何变换后的浮动图像;  $\text{Var}(F_T)$  表示浮动图像的方差, 即  $\text{Var}(F_T) = \sum_f f^2 p(f) - [E(F_T)]^2$ ,  $E(F_T)$  表示浮动图像的均值,  $E(F_T) = \sum_f f p(f)$ 。经过变换后的浮动图像和参考图像会有重叠, 在重叠区域上,  $F_T^m$  表示当参考图像灰度固定为  $m$  时浮动图像的所有像素集;  $n_m$  表示该像素集的个数,  $N = \sum_m n_m$ ;  $\text{Var}(F_T^m)$  表示该像素集的方差,  $\text{Var}(F_T^m) = \frac{1}{p(m)} \sum_f f^2 p(m, f) - [E(F_T^m)]^2$ ;  $E(F_T^m)$  表示该像素集的均值,  $E(F_T^m) = \frac{1}{p(m)} \sum_c c p(m, f)$ 。

图像相关程度越大, 则相关比的函数值越大。相关比测度的函数值范围为 0 到 1, 当

两幅图像完全相关时,相关比的值为 1。

### 1.3 新的相似性测度函数的建立

相关比测度在低分辨率下配准效果较互信息效果好,而互信息测度在高分辨率下配准效果更好,将两种相似性测度结合起来,可以将二者的优势集中在一起,更适于多模态图像的配准<sup>[8]</sup>。相关比测度考虑了体素在表现图像空间结构时的一定灰度值范围的近似量化,在配准过程中易于保证得到全局最优值,将相关比与互信息结合,可以弥补互信息因为缺乏内部特征结构而导致容易陷入局部最优的问题;将互信息测度和相关比测度结合的方法已经在红外卫片的分类中得以应用,实验证明将两者组合,算法的统计特性会更加稳固。因此,本文尝试将互信息测度和相关比测度进行结合,其具体公式为

$$MI\&CR = CR(X,Y) \times \sqrt{1 - \exp(-2MI(X,Y))} \quad (4)$$

式中, $MI\&CR$  为新生成的组合测度; $X$  为参考图像; $Y$  为浮动图像; $CR$  为相关比测度; $MI$  为互信息测度。由于相关比测度的取值范围为 $[0,1]$ ,因此在进行两种相似性测度的组合之前,为了均衡两种相似性测度在公式中所起的作用,需将互信息测度进行归一化,使其取值范围也变成 $[0,1]$ 。

之所以按照式(4)进行互信息和相关比的组合,是因为当  $X$  和  $Y$  均为高斯分布时, $CR(X,Y)$  和  $MI(X,Y)$  最直接的关系为<sup>[9]</sup>

$$CR = \sqrt{1 - \exp(-2MI(X,Y))} \quad (5)$$

当  $X$  和  $Y$  为高斯分布这种特殊情况时, $CR$  和  $MI$  可以通过互相计算而得到,新的相似性测度  $MI\&CR$  不会因为组合而带来任何冗余信息。事实上,真实的多波束图像和侧扫声呐图像的灰度分布直方图会存在多个峰值,新的算法不会失去组合的意义,而会在一定程度上减少冗余信息。

## 2 图像配准过程

图像配准就是根据相似性测度对空间几何变换参数的最优化搜索过程。首先参考图像保持不变,待配准图像进行几何变换,计算两幅图像之间的相似性测度。然后利用搜索算法搜索使相似性测度达到极值的几何变换参数,根据几何变换参数对待配准图像进行变换,即可实现参考图像和待配准图像在几何位置上的对齐。在对图像进行几何变换时,会出现变换后的点不在整数像素上,因此需要对这些点进行插值,常用的插值方式有最近邻插值、双线性插值和双三次插值。其中双线性插值是计算效率和效果都较为适中的一种方法<sup>[10]</sup>,所以本文采用双线性插值方式,如图 1 所示。图像配准的具体流程如图 2 所示。

图 1 中  $I(x,y)$  表示待插值点,其插值公式见式(6)。

$$I(x,y) = I(0,0)(1-x)(1-y) + I(1,0)x(1-y) + I(0,1)(1-x)y + I(1,1)xy \quad (6)$$

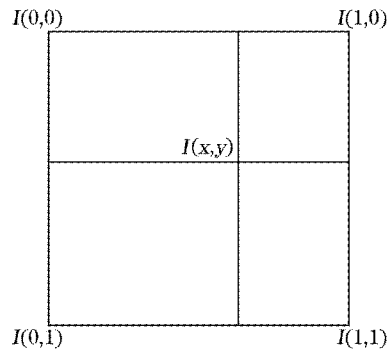


图 1 双线性插值方式

Fig. 1 Bilinear Interpolation

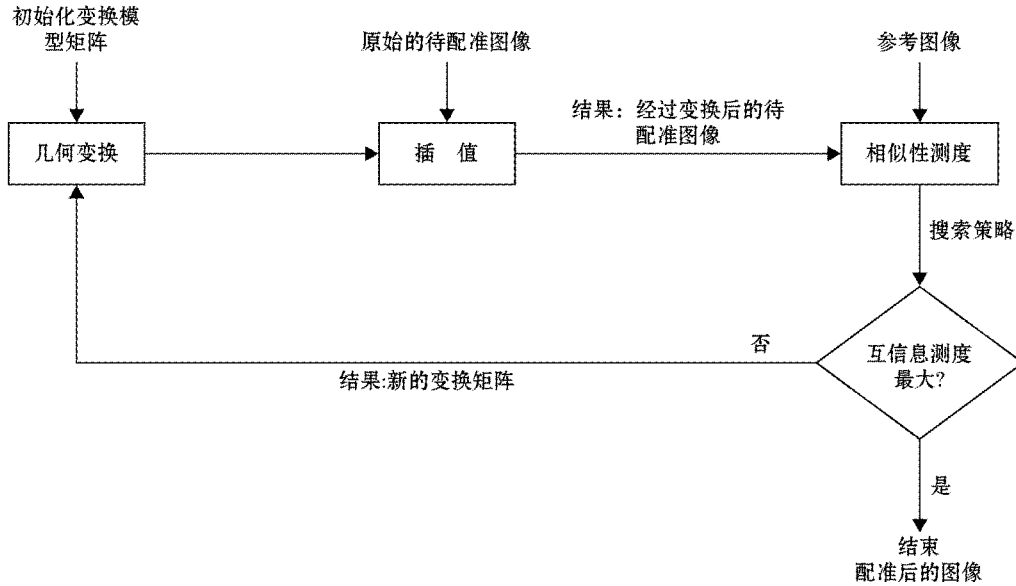


图2 图像配准流程图

Fig. 2 The flow diagram of image registration

### 3 实验与分析

为了验证本文提出的算法的可行性,进行了二组对比实验。第一组实验的图 3a 和图 3b 为普通相机得到的灰度图像,图 3b 是对图 3a 分别沿  $x, y$  轴平移 15 和 5 个像素(以左上角为原点)并逆时针旋转  $15^\circ$  得到的,图像大小为  $300 \times 377$ 。第二组实验的图 4a 和图 4b 来自加利福尼亚大学海图实验室,图 4a 为侧扫声呐图像,图 4b 为多波束图像,图像分辨率均为  $315 \times 613$ 。本算法所用代码是在 MATLAB 2012b 中编写完成。

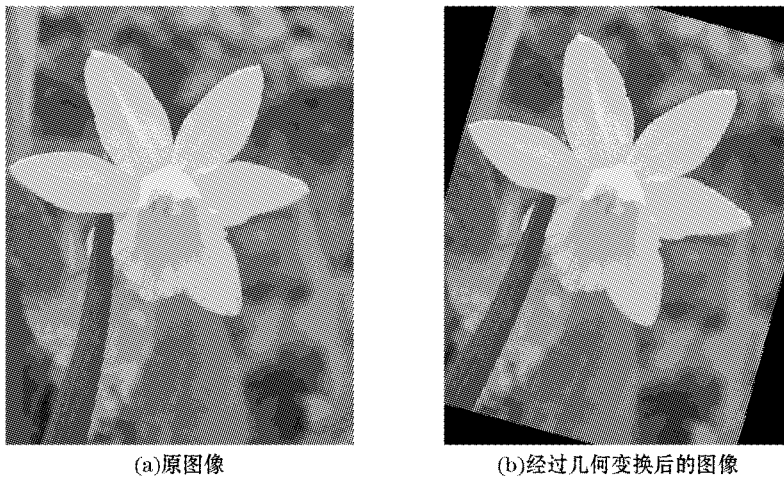


图3 相机获取的灰度图像

Fig. 3 Images of gray scale obtained with camera

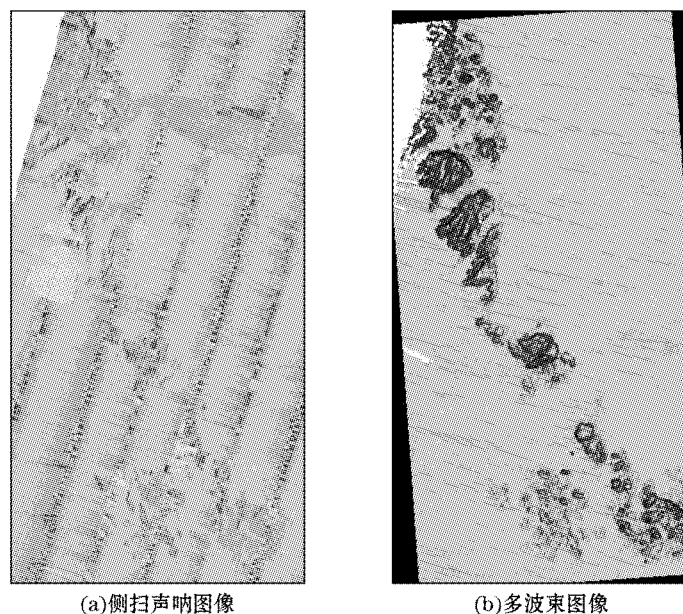


图 4 声呐图像

Fig. 4 Sonar images

实验一对同源的灰度图像 3a 和图 3b 进行配准。配准方法分别采用互信息算法、相关比算法和  $MI&CR$  算法,由于本实验采用的图像均是区块图像,所以采用刚性变换模型;插值方法采用效率和精度均适中的双线性插值,互信息算法、相关比算法和  $MI&CR$  算法中的优化算法采用粒子群算法,算法迭代结束的条件为满足最大迭代次数 100 次或者每次迭代得到的相似性测度误差小于 0.001。各种算法的配准效果图如图 5 所示。配准的参数和迭代时间如表 1 所示。

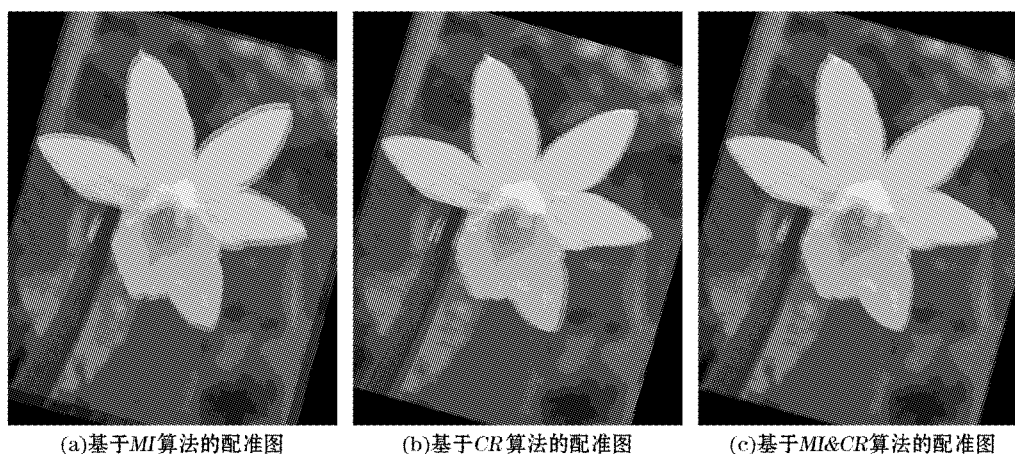


图 5 配准后的图像

Fig. 5 Images after registration

表1 图3a和图3b的变换参数值

Table 1 Transformation parameter values for Fig. 3a and Fig. 3b

相似性测度	$x$ 轴平移量/像素	$y$ 轴平移量/像素	旋转角度/ $^{\circ}$	整个算法运行时间/s	相似性测度差值
MI	17.1	4.8	15.5	33.0	0.000 6
CR	14.6	7.4	15.6	22.7	0.000 7
MI&CR	15.8	5.9	14.6	22.4	0.000 7

注:相似性测度差值为迭代过程中最后一次与上一次的差值

从图5可以看出,3种算法均实现了较好的配准。从表1可以看出,MI&CR算法的运行时间最短,CR算法和MI算法次之,说明新的组合算法MI&CR在图像配准速度上得到了提升,可以更快地逼近配准参考的理想值。这3种算法中,MI&CR算法的配准精度在亚像素级范围内,MI算法和CR算法配准精度在像素级范围内;由此可见,将MI算法和CR算法进行组合,生成的新算法MI&CR配准精度得到了明显的提高,由像素级精度提高为亚像素级精度;从算法的迭代过程中最后一次得到的相似性测度与上一次迭代得到的相似性测度的插值来看,插值均很小,说明算法的内符合精度较高。由此可以看出,新生成的组合算法MI&CR在性能上优于MI算法和CR算法。

实验二对真实的多波束和侧扫声呐图像进行配准,配准参数和所用模型与实验一相同,各种算法的配准效果图如图6所示。配准结果的参数如表2所示。

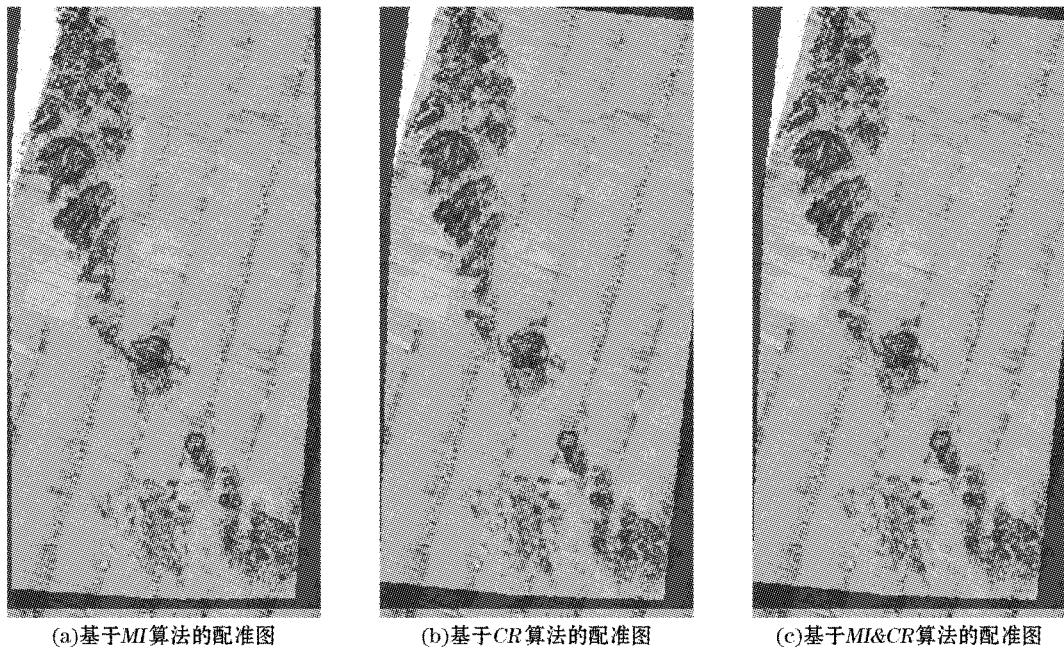


图6 各种算法的配准效果图

Fig. 6 Registration effect chart obtained by different algorithms

表 2 图 4a 和 4b 的配准参数

Table 2 Registration parameters for Fig. 4a and Fig. 4b

相似性测度	$x$ 轴平移量/像素	$y$ 轴平移量/像素	旋转角度/ $^{\circ}$	整个算法运行时间/s	相似性测度差值
MI	9.371	4.787	4.723	69.5	0.000 6
CR	13.430	1.481	5.797	63.0	0.000 2
MI&CR	12.403	1.283	5.780	50.8	0.000 5

注:相似性测度差值为迭代过程中最后一次与上一次的差值

从表 2 中可以看出,MI&CR 算法运行时间最短,说明该算法可以较快的逼近理想值;通过对这 3 种算法得到的结果进行对比,发现 3 种算法得到的变换参数接近,平移量最大插值在 4 个像素范围内,旋转角度最大插值在  $1^{\circ}$  范围内,因此,从外符合精度来看,MI&CR 的配准精度是满足要求的;另外,从算法的迭代过程中最后一次得到的相似性测度与上一次迭代得到的相似性测度的插值来看,插值均很小,说明算法的内符合精度较高;由实验二我们可以看出,新的组合算法 MI&CR 可以用来配准多波束和侧扫声呐图像,且配准速度得到提升。

#### 4 结语

本文将对图像形变鲁棒性大的互信息测度和相关比测度应用到了多波束和侧扫声呐灰度图像的配准中。针对互信息测度在配准中存在的问题,提出了一种新的相似性测度 MI&CR,并将其应用于多波束和侧扫声呐图像配准中。通过实验对比发现,新的相似性测度在同源图像配准中配准速度和精度得到了提高。而应用到多波束图像和侧扫声呐图像的配准中时,可以更快的逼近理想值,运算速度较快;由于多波束图像和侧扫声呐图像之间的变换参数没有已知的准确值,通过实验中所用的 3 种配准算法进行对比发现,从外符合精度来看,3 种算法得到的变换参数接近,说明新的相似性测度 MI&CR 的配准精度是满足要求的;而且算法的内符合精度很高,说明新的相似性测度 MI&CR 是稳定的。所以本文得出的结论是:新提出的相似性测度 MI&CR 可以用于多波束和侧扫声呐等多源图像的配准,该方法是在原来相似性测度基础上的提升;可以用于存在较大畸变的多波束和侧扫声呐图像之间的配准。

#### 参考文献:

- [1] 赵建虎,刘经南.多波束测深及图像数据处理[M].武汉:武汉大学出版社,2008.
- [2] 毛璐璐,徐刚峰,陈显波.基于互信息与梯度融合的多源图像匹配技术研究[J].红外技术,2009,31(9):122-125.
- [3] RUSSAKOF D B, TOMASI C, ROHLFING T, et al. Image similarity using mutual information of regions[M]. Heidelberg:Springer Berlin, 2004:596-607.
- [4] OURSELIN S, ROCHE A, PRIMA S, et al. Block matching: A general framework to improve robustness of rigid registration of medical images[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2000, 1935: 557-566.
- [5] VIOLA P, WELLS III W M. Alignment by maximization of mutual information[J]. International

- Journal of Computer Vision, 1997, 24(2):137-154.
- [6] 秦斌杰, 庄天戈. 利用相关比相似性测度多分辨率配准 MR 和 CT 医学图像的方法[J]. 中国生物医学工程学报, 2003, 22(1):1-5, 11.
- [7] ROCHE A, MALANDAIN G, PENNEC X, et al. Multimodal image registration by maximization of the correlation ratio[R]. INRIA: Institute National De Recherche En Informatique Et En Automatique, 1998.
- [8] CHAILLOUX C, CAILLEC J M L, GUERIOD D, et al. Intensity-based block matching algorithm for mosaicing sonar images[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2011, 36(4):627-645.
- [9] COVER T M, THOMAS J A. Elements of information theory[M]. 2nd ed. New York: Wiley-Blackwell, 1991.
- [10] 卜珂. 基于 SURF 的图像配准与拼接技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.

## A Sonar Image Registration Algorithm Based on Both Mutual Information and Correlation Ratio

SONG Shu-jun<sup>1</sup>, HOU Xue<sup>1</sup>, TANG Qiu-hua<sup>2</sup>

(1. *Surveying And Mapping Institute Lands And Resource Department of Guangdong Province, Guangzhou 510500, China; 2. The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China*)

**Abstract:** For the problem that mutual information algorithm can easily fall into local extremum in the image registration, a new algorithm which combines the mutual information (MI) with the correlation ratio (CR) according to a certain standard is proposed. This new combination algorithm has been applied for the matching of multi-beam images and side scan sonar images. This algorithm can overcome the existing disadvantages of the mutual information measure and has a stronger stability. It has been verified through the experiments that the new combination algorithm is accurate and can realize the registrations both of the multi-beam and of the side scan sonar images which exist a big distortion. Both the speed and the precision of the registration are superior to the mutual information and the correlation ratio algorithms. The new combination algorithm is the improvement and optimization of the original one.

**Key words:** multi-beam image; side scan sonar image; mutual information