

文章编号:1004-4213(2011)10-1560-6

# 一种多尺度边缘测度融合加权 HD 算法

曲圣杰, 潘泉, 程咏梅, 赵春晖, 凌志刚

(西北工业大学 自动化学院, 西安 710072)

**摘 要:**一般的边缘加权 Hausdorff 算法, 由于单尺度边缘检测算子本身对噪音敏感, 会造成真实和虚假边缘显著性差异小, 从而加权后对噪音鲁棒性改善有限. 为此, 提出了一种基于多尺度边缘测度融合加权的 Hausdorff 景象匹配算法. 对图像提取多尺度边缘测度后, 引入证据推理理论, 提出一种双向指数基本置信指派构造方法, 并构造出多尺度边缘测度的基本置信指派函数, 然后采用冲突再分配 DS<sub>m</sub>T 组合规则进行融合. 为了进一步区别真实边缘与高频噪音, 对加权 Hausdorff 公式进行了一些改进, 给出了更为有效利用融合后边缘测度的加权 Hausdorff 公式. 对可见光和 SAR 景象的匹配实验证明: 本文算法所提取边缘在抑制噪音的同时保留了大量景象细节信息, 并通过横向对比验证本文算法提高了噪音鲁棒性.

**关键词:**加权 Hausdorff 距离; 证据推理; 多尺度边缘; 景象匹配

**中图分类号:** TN911.73

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20114010.1560

## 0 引言

景象匹配技术由于定位准确度高和自主性强等优点受到重视, 利用景象匹配技术修正惯导累积误差, 实现精确的组合导航是近年来的研究热点<sup>[1-4]</sup>. 国内外学者在景象匹配算法上开展了大量的研究工作, 其中基于边缘特征的 HD (Hausdorff Distance) 算法由于计算简捷, 得到广泛应用. 经典的 HD<sup>[5]</sup> 对出格点和遮挡非常敏感, 学者们又陆续提出了平均 HD、加权 HD 和部分 HD 等改进算法<sup>[6-8]</sup>. 但这些改进算法只能一定程度上地克服零均值高斯噪音的影响, 而在景象匹配过程中, 一方面成像过程中产生并随机散布在图像各部分的并非单纯的零均值高斯噪音, 另一方面由于景象匹配图像往往地物特征复杂, 噪音极易与细小地物目标掺杂在一起, 使得图像信噪比下降, 影响边缘特征的提取以及匹配效果. 这些原因导致单一尺度下的边缘检测算子对噪音仍然敏感. 用单尺度边缘测度构造加权 HD 算法权重, 真实和虚假边缘显著性差异小, 加权匹配对噪音鲁棒性改善效果有限.

多尺度边缘检测算法被证明是有效的<sup>[9-10]</sup>. 在小尺度上可以对景象细节进行检测, 大尺度上能很好地抑制噪音. 如果采用多个尺度融合后边缘测度构造加权 HD 的权重, 就可以在保留景象细节信息

的基础上提高 HD 对噪音的鲁棒性. 由于受到成像机理以及噪音的影响, 任何边缘检测算子都存在不确定性, 多尺度边缘测度之间也存在一定的冲突. 多尺度边缘测度的融合可以看作存在不确定和冲突的信息融合过程, 证据推理理论被证明可以更好地处理具有不确定、冲突和模糊的多源信息融合问题.

本文提出一种多尺度边缘测度融合加权 HD 算法. 首先计算多尺度边缘测度响应, 然后引入证据推理理论, 将多尺度边缘测度作为证据推理的证据体. 采用文中给出的双向指数法构造多尺度边缘测度的基本置信指派 (Basic Belief Assignment, BBA), 然后利用新近提出的冲突再分配 DS<sub>m</sub>T (Dezert-Smarandache Theory) 算法对多尺度边缘测度进行融合. 最后为了进一步增强真实边缘的显著性, 抑制高频噪音影响, 对加权 HD 公式进行了改进, 给出了更有效利用融合后 BBA 构造权重的加权 HD 公式. 通过与文献<sup>[3]</sup>单一尺度下边缘测度加权部分 HD 算法和分支点加权 HD 算法的对比仿真实验验证了本文算法的有效性.

## 1 多尺度边缘测度融合加权 HD 算法

### 1.1 多尺度边缘测度提取

对 SAR 图像来说, 均值比 (Ratio Of Average, ROA) 算子更适应相干斑噪音的乘性性质. 设区域 I

**基金项目:**国家自然科学基金 (No. 60634030, No. 61074155) 和航空科学基金 (No. 20100853010) 资助

**第一作者:**曲圣杰 (1982-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为景象匹配、信息融合. Email: qushengjie@163.com

**导师 (通讯作者):**潘泉 (1961-), 男, 教授, 主要研究方向为复杂系统建模、信息融合、图像处理等. Email: quanpan@nwpu.edu.cn

**收稿日期:** 2011-04-12; **修回日期:** 2011-07-29

和区域 II 是中心点被直线分成的两部分,  $\lambda_{1\alpha}$ 、 $\lambda_{2\alpha}$  分别是区域 I 和区域 II 的像素灰度均值,  $\alpha$  为中心线与底边的夹角, 如图 1.

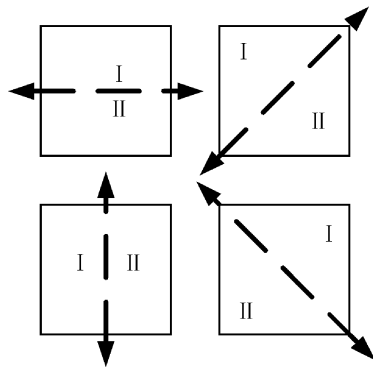


图 1 ROA 算子示意图

Fig. 1 ROA schematic diagram

ROA 算子定义为

$$R = \min_{\alpha} \left\{ \min \left[ \frac{\lambda_{1\alpha}}{\lambda_{2\alpha}}, \frac{\lambda_{2\alpha}}{\lambda_{1\alpha}} \right] \right\}, 0^{\circ} \leq \alpha \leq 180^{\circ} \quad (1)$$

输出响应  $R$  反映了相邻区域的差异程度,  $R$  越大说明中心点边缘特性越明显, 反之则说明该点更趋向位于均匀区域. 通过改变区域的大小可以构造不同尺度下的 ROA 算子.

对光学图像则采用多尺度高斯梯度算子. 高斯梯度算子利用二维高斯导函数对图像进行滤波得到. 高斯梯度算子对零均值高斯噪声具有较好的抑制作用, 通过改变高斯导函数的方差  $\sigma$  取值, 可以得到不同尺度下的高斯梯度算子.

## 1.2 基于证据推理的多尺度边缘测度融合

由于受到成像机理以及噪音的影响, 任何边缘检测算子都存在不确定性. 本文将边缘检测过程作为像素的不确定推理过程, 在同时包含不确定信息和冲突的 DSmT 框架下加以讨论. 将边缘检测框架定义为  $\{A, B, \Theta, A \cap B\}$ , 分别表示 {边缘, 非边缘, 不确定信息, 冲突信息}. 将多个尺度下的边缘检测算子作为证据融合的证据体, 构造基本置信指派后加以融合. 证据推理理论给出了证据融合公式, 但对于 BBA 的构造始终没有统一的方法. 通过实验发现许多噪音点由于与细琐边缘连接, 使得噪音与真实边缘的测度差异不明显, 所以提出一种双向指数边缘测度 BBA 构造方法, 采用双向指数函数进行投影, 使得噪音点与真实边缘的 BBA 差异更加明显.

设  $h_0$  表示边缘检测阈值,  $h_i$  表示尺度  $\sigma$  下  $i$  点的边缘测度,  $m_{\sigma}(A_i)$ 、 $m_{\sigma}(B_i)$ 、 $m_{\sigma}(\Theta_i)$  分别表示尺度  $\sigma$  下  $i$  点的边缘 BBA、非边缘 BBA、不确定性 BBA, 容易知道像素点  $i$  的边缘 BBA 构造需要服从 3 点原则: 1) 当边缘测度  $h_i$  大于阈值时,  $i$  点属于边缘的

BBA 大于非边缘 BBA, 即  $h_i > h_0$ ,  $m_{\sigma}(A_i) > m_{\sigma}(B_i)$ ; 2) 当边缘测度  $h_i$  小于阈值时,  $i$  点属于非边缘的 BBA 大于边缘 BBA, 即  $h_i < h_0$ ,  $m_{\sigma}(A_i) < m_{\sigma}(B_i)$ ; 3)  $h_i$  越远离  $h_0$ ,  $m_{\sigma}(\Theta_i)$  取值越小,  $h_i$  越接近  $h_0$ ;  $m_{\sigma}(\Theta_i)$  取值越大, 当  $h_i = h_0$  时,  $m_{\sigma}(\Theta_i)$  取到最大值. 根据这 3 点原则, 将边缘测度采用双向指数函数进行投影, 可得

1) 当  $h_i > h_0$ ,

$$m_{\sigma}(A_i) = (1 - \alpha) \cdot e^{\beta | h_i - h_0 |}, m_{\sigma}(B_i) = (1 - \alpha) \cdot e^{-\beta | h_i - h_0 |} \quad (2)$$

2) 当  $h_i < h_0$

$$m_{\sigma}(A_i) = (1 - \alpha) \cdot e^{-\beta | h_i - h_0 |}, m_{\sigma}(B_i) = (1 - \alpha) \cdot e^{\beta | h_i - h_0 |} \quad (3)$$

3) 在计算  $m_{\sigma}(\Theta_i)$  时, 首先将前面得到的  $m_{\sigma}(A_i)$ 、 $m_{\sigma}(B_i)$  进行归一化处理, 然后根据式 (4) 进行计算

$$m_{\sigma}(\Theta_i) = \alpha(1 - m_{\sigma}(A_i))(1 - m_{\sigma}(B_i)) \quad (4)$$

对上述 BBA 值进行归一化处理, 以满足其定义的要求. 其中  $\alpha$  为噪音系数, 当无噪音时,  $\alpha = 0$ , 当噪音完全淹没了目标时,  $\alpha = 1$ ;  $\beta$  为显著性系数, 与图像特性相关, 通过增大  $\beta$  取值, 可以增强真实边缘的测度优势, 但一味地增大  $\beta$  值可能带来边缘提取的失真, 需要在实际应用中适当选取. 图 2 所示为  $\alpha = 0$ 、 $\beta = 2$ 、 $h_0 = 0.3$  时, 边缘测度的 BBA 分配.

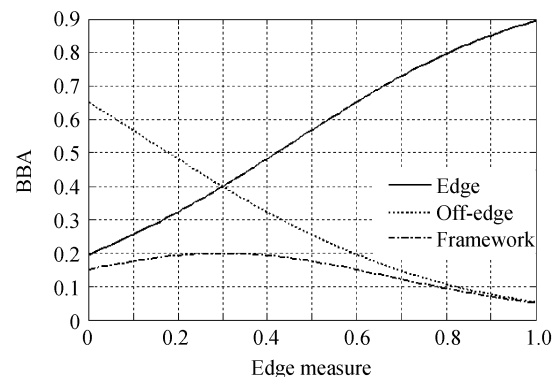


图 2 边缘测度基本置信指派分配

Fig. 2 Edge measure basic belief assignment

不同尺度下边缘测度会存在较大冲突, 而 Dempster 理论在处理高冲突问题时, 会出现 Zadeh 悖论和 BBA 分配不合理情况<sup>[11]</sup>, DSmT 在多证据融合下, 主焦点基本置信指派难以收敛, 因此采用新近提出的冲突再分配 (Conflict-Redistribution DSmT, CR-DSmT) 组合规则<sup>[12]</sup>. 该组合规则在 DSmT 辨识框架下, 对冲突按一定原则再分配, 解决 Zadeh 悖论的同时相对较好地处理了主焦点 BBA 收敛问题. 假设辨识框架为  $2^{\Theta}$ ,  $\{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \dots\}$  为证据中的焦点, 则

$$\begin{cases}
 m(\varphi) = 0; \\
 m(A) = \sum_{\substack{X_1, X_2, \dots, X_k \in D^\theta \\ X_1 \cap X_2 \cap \dots \cap X_k = A}} \prod_{i=1}^k m_i(X_i), \\
 \text{当组合的焦元中不包含冲突焦元时;} \\
 m(U) = \sum_{\substack{X_1, X_2, \dots, X_k \in D^\theta \\ U \triangleq u(X_1) \cup u(X_2) \cup \dots \cup u(X_k)}} \prod_{i=1}^k m_i(X_i), \\
 (u(X) \text{ 是组成 } X \text{ 的所有 } \theta_i \text{ 的并集}) \\
 \text{当冲突焦元之间相互组合以及冲突焦元} \\
 \text{与不确定信息焦元组合时;} \\
 m(U) = \sum_{\substack{X_1, X_2, \dots, X_k \in D^\theta \\ U \triangleq X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_k}} \prod_{i=1}^k m_i(X_i), \\
 \text{当冲突焦元与涉及产生该冲突的单焦元组合时.}
 \end{cases} \quad (5)$$

融合后根据边缘的 BBA 采用下述判决原则对该点是否为边缘进行判决:该像素点的边缘 BBA 大于非边缘和不确定信息的 BBA;边缘与非边缘的 BBA 差值大于某一阈值  $T_1$ ;不确定和冲突的 BBA 小于某一阈值  $T_2$ .当融合后的边缘测度 BBA 满足上述判决准则时,初步认定该点为边缘点,经过极大值抑制和细化处理得到最终的边缘,保存融合后的边缘 BBA,用以构造加权 HD 算法的权重.

### 1.3 改进的加权 HD 算法

一般的加权 HD 算法在对真实边缘、高频噪音、虚假边缘点权重给定过程中,区分不够明显,使得直接采用边缘测度加权效果不理想.对加权 HD 算法进行一定改进,在权重构造过程中进一步凸显真实边缘的显著性,抑制虚假边缘和高频噪音的影响.一般的加权 HD 算法计算公式为

$$H(A, B) = \max(h_{\text{WHD}}(A, B), h_{\text{WHD}}(B, A)) \quad (6)$$

式中  $h_{\text{WHD}}(A, B) = \frac{1}{N_A} \sum_{a \in A} \omega(a) \cdot d(a, B)$  称为  $A$  到  $B$  的有向加权 HD 距离.  $A, B$  为两个特征点集,  $N_A$  为点集  $A$  中特征点总数,  $a$  是属于  $A$  的一个特征点,  $d(a, B)$  是点集  $A$  中特征点  $a$  到点集  $B$  的距离, 而  $\omega(a)$  表示特征点  $a$  到点集  $B$  距离的权重.

当两幅图像完全配准时,匹配边缘点之间不仅具有最小的 HD 距离,而且应该具有相同或最大相

似度的边缘测度.为此,定义实测图像与基准图像中匹配点之间的相似一致性函数为

$$S(a, b, A, B) = |m_A(a) \cdot m_B(b)| \quad (7)$$

式中,  $m_A(a), m_B(b)$  分别为融合后的图像  $A$  中边缘点  $a$  与图像  $B$  中边缘点  $b$  的边缘测度 BBA.

$S(a, b, A, B)$  取值范围为  $[0, 1]$ ,  $S(a, b, A, B)$  越大,说明图像相似性越强;反之则反.因此定义点  $a$  到点集  $B$  基于融合边缘测度的有向 HD 距离  $d'(a, B)$  为  $d'(a, B) = [1 - S(a, b, A, B)] \times [d(a, B) + \epsilon]$  (8) 式中,  $\epsilon$  为较小常量,以消除  $d'(a, B)$  为零,而边缘测度函数极不相似的影响.

同时,匹配图像中其边缘测度 BBA 越大,可以认为其相对其它匹配点越稳定,越不易受噪音干扰,在图像匹配过程对应权值  $\omega$  应该比较大,反之越小.因此定义权值  $\omega$  计算公式为

$$\omega(a) = \frac{|m(a)|}{\max_{a \in W} |m(a)|} + 1 \quad (9)$$

为了消除出格噪音点的干扰,借鉴部分 HD 距离的思想,将点集  $A$  中所有特征点到点集  $B$  的距离  $d'(a, B)$  从小到大排序,并取前面  $k$  个距离最小的特征点 ( $k = f \times N_A, 0 < f < 1$ ),改进的 HD 算法可以表示为

$$\begin{cases}
 h_{\text{FE-WHD}}(A, B) = \frac{1}{N_A} \sum_{a \in A} \omega(a) d'(a, B) \\
 d'(a, B) = [1 - S(a, b, A, B)] \times [d(a, B) + \epsilon] \\
 \omega(a) = \begin{cases} \frac{|m(a)|}{\max_{a \in W} |m(a)|} + 1 & d'(a, B) \leq d'(a, B)_k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}
 \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可以看出,改进的 HD 算法不仅考虑边缘点之间的几何距离,同时集合了匹配点之间的边缘测度差异和边缘点测度 BBA 显著性对有向距离的影响,从而可很大程度地消除由于噪音点和出格点所引起的误匹配,提高匹配准确度.

## 2 仿真实验与分析

为了验证本文算法有效性,分别用 SAR 和光学图像进行匹配实验.基准图像和部分实测图像如图3.

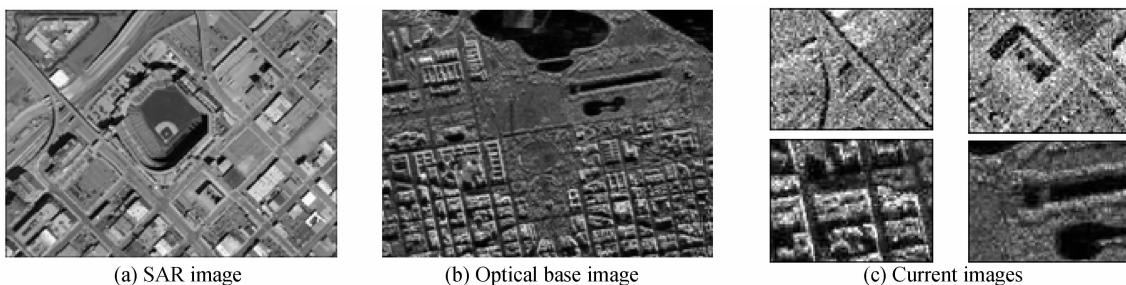


图3 SAR 和光学基准图及部分实测图  
Fig. 3 SAR and optical base and current images

基准图像大小为  $300 \times 400$ , 实测图像大小为  $61 \times 81$ , 实验平台采用主频为 Pentium Dual 1.6 GHz, 内存为 1G, 运行 Windows XP 的 PC 机, 编程语言为 Matlab2010a. 基准图像处理中参量  $f$  设为 0.8, 实测图像处理中参量  $f$  设为 0.75, 对光学图像选择高斯尺度  $\sigma$  为 1, 2 时融合; 对 SAR 图像选择尺度为 3, 5 时的边缘测度进行融合.  $\alpha$  根据定义, 取值为与高斯噪声方差或斑点噪声密度相关值,  $\beta=2$ .

### 2.1 多尺度融合边缘提取效果实验

首先采用本文算法提取边缘, 分别与融合单尺度提取的边缘进行对比, 验证本文算法提取边缘对噪声抑制以及图像细节保留的效果. 图 4 所示为施

加高斯噪声或斑点噪声后信噪比为 1 的光学和 SAR 图像边缘提取情况. 图 4(b) 和 (f) 是较小尺度算子提取的边缘, 图 4(e) 和 (g) 是较大尺度提取的边缘, 图 4(d) 和 (h) 是按照本文算法融合后提取的边缘. 可以看出, 由于噪声的影响, 小尺度边缘提取过程中产生了大量的琐碎和虚假边缘; 尺度较大时, 虽然对噪声和琐碎边缘进行了有效地抑制, 但代价是牺牲了图像中的细节信息, 不利于精确的图像匹配. 进行测度融合后的提取的边缘不仅有效地抑制了噪声干扰, 而且保留了图像细节信息, 边缘提取更加准确.

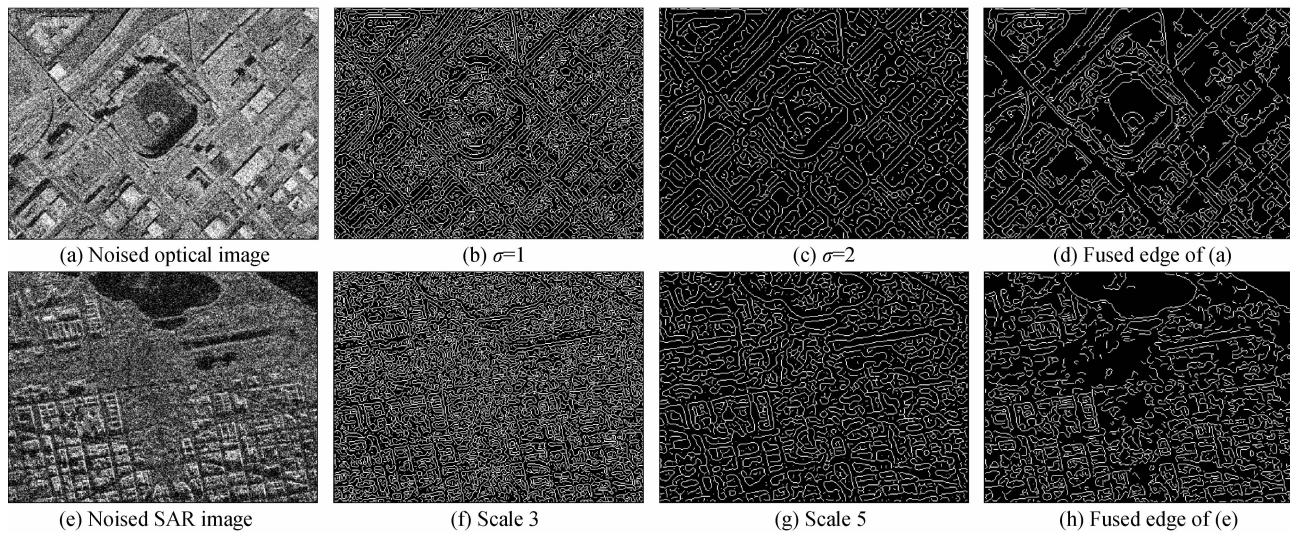


图 4 边缘提取效果对比

Fig. 4 Edges extracted by different scales and the fused edges

### 2.2 噪音情况下的匹配效果对比实验

为验证本文算法在景象匹配过程中对噪声鲁棒性改善效果, 分别采用图 3 所示的光学和 SAR 图像, 施加不同强度的高斯或斑点噪声, 与文献[3]采

用单尺度边缘测度加权的 EM-WHD 算法以及文献[2]给出的分支点加权 HD 算法进行横向横向比较. 表 1 和表 2 分别是光学和 SAR 图像匹配结果, 表中信噪比为负值表示噪声强度大于原始图像. 从表中

表 1 可见光景象匹配结果

Table 1 Optical image match result

Image type	Right position	Noise variance( $\times 10^{-2}$ )	SNR/dB	EFWHD	Ref. [3]	Ref. [2]
Optical image	(120,70)	5	-3.075 4	(120,70)	(120,70)	(120,70)
	(120,70)	10	-5.422 1	(120,70)	(120,70)	(199,166)
	(120,70)	12	-5.966 1	(120,70)	(120,70)	(197,167)
	(120,70)	14	-6.280 3	(120,70)	(120,70)	(189,163)
	(120,70)	16	-6.759 9	(120,70)	(120,70)	(194,166)
	(120,70)	18	-6.891 6	(120,70)	(120,70)	(191,165)
	(120,70)	20	-7.167 9	(120,70)	(251,284)	(194,156)
	(230,260)	5	-1.846 1	(230,260)	(230,260)	(201,155)
	(230,260)	10	-4.223 7	(230,260)	(230,260)	(191,160)
	(230,260)	12	-4.729 4	(230,260)	(247,283)	(201,155)
	(230,260)	14	-5.013 7	(230,260)	(147,109)	(201,166)
	(230,260)	16	-5.427 4	(230,260)	(150,111)	(190,164)
	(230,260)	18	-5.765 5	(230,260)	(156,114)	(195,164)
	(230,260)	20	-5.962 4	(230,260)	(168,109)	(252,286)
Average completion time/s				82.09	81.72	101.84

表 2 SAR 景象匹配结果  
Table 2 SAR image match result

Image type	Right position	Noise variance( $\times 10^{-2}$ )	SNR/dB	EFWHD	Ref. [3]	Ref. [2]	
SAR image	(100,240)	40	-2.119 4	(100,240)	(100,240)	(257,307)	
	(100,240)	100	-4.767 5	(100,240)	(247,245)	(187,134)	
	(100,240)	200	-6.449 3	(100,241)	(192,82)	(170,82)	
	(100,240)	300	-7.153 7	(100,241)	(178,300)	(156,290)	
	(100,240)	400	-7.666 6	(100,241)	(190,122)	(198,306)	
	(100,240)	500	-7.884 0	(100,240)	(169,58)	(240,153)	
	(100,240)	600	-8.109 5	(97,256)	(201,360)	(190,112)	
	(230,120)	40	0.746 8	(230,120)	(230,120)	(230,120)	
	(230,120)	100	-1.534 9	(230,120)	(230,120)	(230,120)	
	(230,120)	200	-2.602 2	(230,120)	(230,120)	(230,120)	
	(230,120)	300	-3.217 7	(230,120)	(230,120)	(230,120)	
	(230,120)	400	-3.437 8	(230,120)	(230,120)	(230,120)	
	(230,120)	500	-3.753 7	(230,120)	(230,120)	(230,120)	
	(230,120)	600	-4.038 6	(230,120)	(230,120)	(230,120)	
	Average completion time/s				85.08	80.45	95.16

可以看出,EFWHD 在可见光高斯噪声方差小于  $20 \times 10^{-2}$ 、SAR 斑点噪声密度小于 5 时均给出了正确的匹配结果,而文献[3]和文献[2]的算法在噪声大于一定程度时出现匹配错误.值得一提的是,由于在匹配过程中,参考图像的边缘提取过程可以离线处理,实时只需要对较小的实测图像提取边缘,所以多尺度融合本身增加计算量不大.

以匹配误差小于 2 个像素为正确匹配,在对可见光高斯噪声方差小于  $20 \times 10^{-2}$  时进行 100 次试验中,EFWHD 成功率为 99%,对 SAR 图像噪声密度小于 5 时 100 次试验中,EFWHD 成功率达到 98%.

### 3 结论

本文提出了一种多尺度边缘测度融合加权的 HD 算法,给出了算法实现过程中 BBA 构造、融合判决规则以及改进 HD 权重构造等各个步骤的具体实现公式.该算法在对噪声抑制方面体现出巨大优势,且在多尺度融合过程增加计算量小、工程实现简单、实用性较强.但在采用景象匹配辅助惯性导航的应用中,不仅存在噪声干扰,而且由于惯性导航系统的航向漂移误差,易造成实测图与参考图之间有不同程度的旋转变形. HD 距离本身对旋转情况的鲁棒性一直是存在的问题,本课题组下一步将展开同时对噪声鲁棒以及旋转具有不变性的匹配算法研究.

#### 参考文献

- [1] CHEN Fang, XIONG Zhi, XU Yun-xi, *et al.* Research on the fast scene matching algorithm in the inertial integrated navigation[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, **30**(6): 2308-2316.  
陈方,熊智,许允喜,等. 惯性组合导航系统中的快速景象匹配算法研究[J]. 宇航学报, 2009, **30**(6):2308-2316.
- [2] LENG Xue-fei, LIU Jian-ye, XIONG Zhi. A real-time image matching algorithm for navigation system based on bifurcation extraction[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(7): 678-682.  
冷雪飞,刘建业,熊智. 基于分支特征点的导航用实时图像匹配算法[J]. 自动化学报, 2007, **33**(7):678-682.
- [3] LING Zhi-gang, PAN Qan, ZHANG Shao-wu, *et al.* A scene matching method with weighted hausdorff distance based on edge measure[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, **30**(4): 1626-1631.  
凌志刚,潘泉,张绍武,等. 一种基于边缘测度的加权 Hausdorff 景象匹配方法[J]. 宇航学报, 2009, **30**(4):1626-1631.
- [4] KONG W Y, EGAN G K, CORNALL T. Feature based navigation for UAVs[C]. Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Robots and Systems. Beijing, China, 2006.
- [5] HUTTENLOCHER D P, KLANDERMAN G A, RUCHLIDGE W J. Comparing images using the hausdorff distance[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1993, **15**(9): 850-863.
- [6] GAO Y. Efficiently comparing face images using a moolified Hausdorff distance [J]. *Vision, Image and Signal Processing*, 2003, **150**(6): 346-350.
- [7] KIM S H, PARK R H. An efficient algorithm for video sequence matching using the modified Hausdorff distance and the directed divergence[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2002, **12**(7): 592-596.
- [8] ZHAO C, SHI W, DENG Y. A new hausdorff distance for image matching[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2005, **26**(5): 581-586.
- [9] CAI Hui, ZHANG Guang-xin, ZHANG Hao. Novel edge detection method based on multiple information measures fusion[J]. *Journal of Zhejiang University*, 2008, **42**(10): 1671-1675.  
才辉,张广新,张浩. 一种新的基于多测度信息融合的边缘检测算法[J]. 浙江大学学报(工学版). 2008, **42**(10):1671-1675.
- [10] ZHANG Hao, CAI Jin-hui, ZHOU Ze-kui. Application of DS evidence theory in SAR image edge detection [J]. *Geometrics and Information Science of Wuhan University*, 2008, **33**(1): 105-108.  
张浩,蔡晋辉,周泽魁. DS 证据理论在 SAR 图像边缘检测中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, **33**(1):105-

- 108.
- [11] DEZERT J, SMARANDACHE F. On the generation of hyper-powersets for the DSMT[C]. Proc. of Fusion 2003 Conf. , Cairns, Australia, July 8-11, 2003.
- [12] QU Sheng-jie, CHENG Yong-mei, PAN Quan, *et al.*
- Conflict-redistribution dsmt and new methods dealing with conflict among evidences[J]. *Control and Decision*, 2009, **24**(12): 1856-1860.
- 曲圣杰,程咏梅,潘泉,等. 冲突再分配 DSMT 及解决证据间矛盾的新方法[J]. *控制与决策*, 2009, **24**(12):1856-1860.

## A Weighted Hausdorff Distance Algorithm Based on Multi-scale Edge Measure Fusion

QU Sheng-jie, PAN Quan, CHENG Yong-mei, ZHAO Chun-hui, LING Zhi-gang  
(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** The general edge weighted Hausdorff distance has limited effects on improving the noise robustness, because single-scale edge detection operator itself is sensitive to noise which leads to little difference between the real and false edge. A novel weighted Hausdorff distance algorithm was proposed based on multi-scale edge measure fusion (EFWHD). Multi-scale edge measure was extracted and then evidence theory was brought in. The basic belief assignment of multi-scale edge measure was constructed by a new method of bidirectional exponent and then fused by Conflict-Redistribution DSMT. To distinguish the real edge and high-frequency noise furtherly, the general weighted hausdorff distance formula was modified and the new formula was proposed which can use the fused edge measure more effectively. Simulation with both optical and SAR images shows that the edge detection method of this paper suppresses noise effectively, meanwhile preserving rich details and the contrast tests are processed to verify the efficiency of improving noise robustness.

**Key words:** Weighted Hausdorff distance; Evidence theory; Multi-scale edge; Scene match

勘误

2011 年 40 卷第 9 期 1392 页,第二作者应为:巩龙葵