

多传感器图像融合效果综合评价研究

何贵青 陈世浩 田 运 郝重阳

(西北工业大学电子与信息工程研究所 西安 710072)

(西北工业大学中德联合信息技术研究所 西安 710072)

摘 要 针对图像融合效果评价问题,利用灰色关联分析的小样本特性和整体比较机制,结合先验知识和量化评价,提出了一种基于多层次灰色关联分析的图像融合效果综合评价方法,评价结果易于定量表示,更加精确、客观,区分度大、可靠性高.该方法不仅可以从整体上进行综合评价,还可以从某个侧面进行特殊性需要的评价,兼顾了实际评价工作中的通用性和特殊性要求.实验结果表明,该评价方法具有较好的实时性和准确性,对于实现具有反馈的图像融合过程,进一步丰富和完善图像融合理论框架具有启发意义和实用价值.

关键词 图像融合;效果评价;综合方法;多层次;灰色关联分析

中图法分类号 TP391

Synthesis Performance Evaluation of Multi-Sensor Image Fusion

HE Gui-Qing CHEN Shi-Hao TIAN Yun HAO Chong-Yang

(Institute of Electronic Information Engineering of Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

(Sino-German Institute of Information Technology of Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract To resolve the evaluation issue of image fusion, this paper proposes a novel multi-hierarchical synthesis approach using the Grey Relational Analysis mechanism which has the merits of small-sized sample and unitary comparing. The proposed approach combines the apriori knowledge and quantization evaluation. This paper first gives a six-step procedure for performance evaluation of a single level of hierarchical grey relational analysis and then, based on the single level analysis, gives a four-step procedure for performance evaluation of hierarchical grey relational analysis. Therefore it gets the synthetic evaluation results, which is more quantitative and comprehensive than the conventional objective measures such as correlation coefficient and average gradient. The novel approach gives not only overall performance but also required special performance evaluation. Extensive experimental analysis shows that the proposed approach performs better on quantization, precision, objectivity, reliability and real-time. The advantages above make it apply properly to fusion system with feedback capability and it enriches and perfects the image fusion system.

Keywords image fusion; performance evaluation; synthesis method; hierarchical; grey relational analysis

1 引 言

图像融合是多传感器信息融合的重要分支,在

遥感、医学、天气预报、军事目标识别等诸多领域有着重要而广泛的应用前景.近年来,人们提出了许多方法用以解决多光谱、多时相、多分辨率、多传感器平台等多源图像的融合问题,包括 IHS 变换法、

收稿日期:2007-06-01;最终修改稿收到日期:2007-11-18. 本课题得到国家教育部博士点基金(20040699015)、西北工业大学青年科技创新基金(5210102-0800-M016206)资助. 何贵青,女,1977年生,博士生,讲师,主要研究方向为图像处理、数据融合和模式识别. E-mail: guiqing_he@nwpu.edu.cn. 陈世浩,男,1979年生,博士研究生,主要研究方向为图像处理、医学图像分割、虚拟现实等. 田 运,男,1980年生,博士研究生,主要研究方向为数字图像处理与医学可视化. 郝重阳,男,1940年生,教授,博士生导师,主要研究领域为图像处理、计算机图形学、模式识别和虚拟现实.

PCA 变换法、HPF 法、小波变换法和基于上述传统算法的多种改进算法^[1]. 相对于图像融合算法研究的多样性,关于图像融合效果的评价研究相对较少,而全面、客观的评价不仅可以比较各个融合算法的优劣,还对现有融合算法的改进和研究新的融合算法具有重要的指导意义和参考价值.

本文在总结、讨论图像融合效果评价的常用方法的基础上,重点分析基于客观评价指标的综合评价方法,并引入灰色系统理论中的灰色关联分析概念,结合其小样本特性和整体比较机制,提出一种基于多层次灰色关联分析的图像融合效果综合评价方法. 该方法采用先验知识与量化评价相结合的思路,实现对融合图像效果优劣的综合评价. 评价结果易于定量表示,更加精确、客观,可靠性高、实时性好. 该评价方法能为计算机或智能图像融合系统自动、及时地比较和分析各个融合图像性能并选取适合当前图像、效果最佳的融合算法提供依据.

2 图像融合效果评价常用方法

目前,对图像融合效果进行评价一般涉及定性评价或者统计指标单因素、多因素定量评价,即主观评价和客观评价^[2]. 主观评价方法以人作为融合图像的观察者,是一种主观性较强的目测方法,评价结果易受观察者的经验、兴趣、心理因素及其观察条件等影响,评价结论可能出现较大差异. 客观评价又称定量评价,该评价方法通常分为单因素评价方法和联合单因素评价方法,前者通过融合图像与参考图像之间的量化公式(如平均梯度)对融合图像效果进行定量分析和判断,提高判断的准确性和速度;后者采用多量化判据来弥补各单因素评价方法的片面性,得到更准确的结论. 目前,根据客观评价指标与融合图像质量的关系,我们将其分为“越大越优型”、“越小越优型”和“适当型”三类指标^[3]. 如表 1 所示.

表 1 客观评价指标		
越大越优型	越小越优型	适当型
标准差	偏差度	均值
熵	光谱扭曲度	
平均梯度	标准偏差	
相关系数	均方误差	
联合熵	交叉熵	
互信息	偏差熵	
信噪比		
峰值信噪比		

3 图像融合效果综合评价方法

上述单因素评价方法和联合单因素评价方法是图像融合评价体系的基本方法,而综合评价方法是图像融合评价体系的发展方法. 该方法是指在智能图像处理系统中,利用非线性方法或者智能计算的方法将单因素评价指标综合起来的一种客观评价方法,此类方法并不局限于只对图像数据本身进行分析,而是重视主观与客观相结合,适当引入先验知识,能为计算机或智能图像融合系统自动、及时地比较和分析各个融合图像性能并选取适合当前图像、效果最佳的融合算法提供依据.

3.1 加权求和法综合评价

加权求和法的综合评价结果可表示为

$$S = \sum_{i=1}^n h_i g_i \tag{1}$$

其中, $i=1,2,\cdots,n$, g_i 为单因素评价指标, h_i 为相应的权值. 该方法中提供的评价指标的变化是线性的,在粗略评价时不失是一种简单易行的方法,其中关键是各因素权重的确定.

3.2 D-S 证据理论综合评价

证据理论可处理由不知道所引起的不确定性,它采用信任函数而不是概率作为度量. 通过对一些事件的概率加以约束以建立信任函数,而不必说明精确的难以获得的概率,当约束限制为严格的概率时,就进而成为概率论. D-S 证据理论要求证据独立,这在实际中很难实现. 此时可选用 D-S 理论推广方法,将相关证据转化为相应的独立证据,其中关键是基础概率的选取.

3.3 粗糙集理论综合评价^[2,4]

粗糙集理论是一种刻划不完整性和不确定性的新型数学工具,主要用于知识的简化和知识依赖性的分析. 其特点是:无需借助于数据以外的先验信息就可对数据进行比较客观的处理,这是此理论与证据理论、模糊理论的最主要区别. 根据粗糙集理论提出的综合评价方法,就是利用粗糙集方法的突出优势,即能表达和处理不完备信息,直接从给定问题的描述集合出发,通过不可分辨关系和不可分辨类确定问题的近似域,求得知识的最小表达,识别、评估数据之间的依赖关系,从而找出问题中的内在规律. 其中关键是原始样本的选取和离散化方法的选取.

3.4 模糊积分综合评价^[5-7]

设 X 为论域, $m: \sigma \rightarrow [0,1]$ 是模糊测度, $A \in \sigma$, h

是 σ 可测的,则 h 在 A 上的模糊积分定义为

$$S = \int_A h(x) \circ m(\cdot) = \sup_{\lambda \in [0,1]} [\lambda \wedge m(A \cap H_\lambda)] \tag{2}$$

其中, $H_\lambda = \{x \mid h(x) \geq \lambda\}$. 上式为关于模糊测度 m 的 Sugeno 模糊积分.

当论域 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为有限集合,且 $h(x_1) \geq h(x_2) \geq \dots \geq h(x_n)$,由式(2)可得到 h 在 X 上的 Sugeno 积分定义为

$$S = \int_X h(x_i) \circ m(\cdot) = \bigvee_{i=1}^n [h(x_i) \wedge m(X_i)] \tag{3}$$

其中, $X_i = \{x_1, x_2, \dots, x_i\}$. 由于模糊测度 $m(X_i)$ 计算的复杂性,根据构造 g_λ 测度的办法,进一步得到 Sugeno 积分的计算公式为

$$S = \int_X h(x_i) \circ m(\cdot) = \bigvee_{i=1}^n [h(x_i) \wedge H(x_i)] \tag{4}$$

其中, $H(x_1) = g_1, H(x_i) = g_i + H(x_{i-1}) + \lambda g_i H(x_{i-1})$.

此外,Murofushi 与 Sugeno 发展了 Sugeno 积分的理论,提出了关于 F 测度的 Choquet 积分:

$$C = \int_A h dg = \int_0^{+\infty} g(H_\lambda \cap A) \tag{5}$$

其中, $H_\lambda = \{x \mid h(x) \geq \lambda\}$.

当论域 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为有限集合,且 $h(x_1) \leq h(x_2) \leq \dots \leq h(x_n)$,由式(5)可得 h 在 X 上关于 g 的 Choquet 积分计算公式为

$$C = \int_X h dg = \sum_{i=1}^n g(H_{\lambda_i})(h(x_i) - h(x_{i-1})) \tag{6}$$

其中, $H_{\lambda_i} = \{x_i, x_{i+1}, \dots, x_n\}, h(x_0) = 0$.

利用模糊积分进行综合评价时,模糊测度可以表征各单因素评价指标的重视程度,而模糊测度的确定是该评价方法的关键.

3.5 基于多层次灰色关联分析的图像融合效果综合评价方法

3.5.1 灰色关联分析^[8-10]

灰色关联分析(Grey Relational Analysis, GRA)是灰色系统理论的重要组成部分,灰色系统指信息不完全或不完全确定的系统,贫信息、小样本建模的独特优点使灰色系统理论得到了广泛的应用. 灰色关联分析,简称灰关联分析或关联分析,它根据灰色系统因素之间发展趋势的相似或相异程度来衡量因素间的接近程度,对实验样本数量没有要求,不需要样本具备典型的分布规律,通过序列建模,生成现实规律,计算量小,其整体比较机制使得

它能以较强的分辨力研究系统中的各种复杂关系,具体计算步骤如下.

① 确定参考数列 $x_0(k)$ 和待比较数列 $x_r(k)$,其中, $k=1,2,\dots,N \in$ 整数,为序列的第 k 项, $r=1,2,\dots,I \in$ 整数,为待比较序列的序列号;

② 计算各比较数列 $x_r(k)$ 与参考数列 $x_0(k)$ 之间的灰色关联系数 ξ_{0r} ,

$$\xi_{0r}(k) = \frac{\Delta \min + \zeta \Delta \max}{\Delta 0r(k) + \zeta \Delta \max}, \tag{7}$$

$r = 1, 2, \dots, I, k = 1, 2, \dots, N$

其中,

$$\begin{aligned} \Delta \min &= \min_r \min_k |x_0(k) - x_r(k)|, \\ \Delta \max &= \max_r \max_k |x_0(k) - x_r(k)|, \\ \Delta 0r(k) &= |x_0(k) - x_r(k)|, \end{aligned}$$

分辨系数 ζ 是一个事先取定的常数(常取 $\zeta=0.5$),以保证 $\xi_{0r} \in (0, 1]$.

③ 计算各比较数列 $x_r(k)$ 与参考数列 $x_0(k)$ 之间的灰色关联度

$$R_{0r} = \sum_{k=1}^N \xi_{0r}(k) \times \omega(k), k = 1, 2, \dots, N \tag{8}$$

其中, $\omega(k)$ 是序列中第 k 项的重要程度,其取值越大,说明序列中的第 k 项越重要.

此外,对系统进行灰色关联分析时,由于系统中各因素的物理意义不一定相同,计量单位也不一定相同,从而导致数据的量纲和数量级可能不同,因此,进行灰色关联分析之前,需要对数据序列进行无量纲化预处理(或称归一化处理). 同时,当数据的级差小于1时,此举还可以增大数据的离散度. 令序列 $x_i = \{x_i(j) \mid j=1, 2, \dots, N\}$,则预处理方法有^[3]

$$x'_i(j) = \begin{cases} \frac{x_i(j) - \min_i x_i(j)}{\max_i x_i(j) - \min_i x_i(j)}, & \text{越大越优型} \\ \frac{\max_i x_i(j) - x_i(j)}{\max_i x_i(j) - \min_i x_i(j)}, & \text{越小越优型} \\ 1 - \frac{|x_i(j) - c_i|}{\max_i |x_i(j) - c_i|}, & \text{适当型} \end{cases} \tag{9}$$

其中, $\min_i x_i(j)$ 和 $\max_i x_i(j)$ 分别为 $i=1, 2, \dots, I$ 时,数据序列 x_i 在第 j 项的最小值和最大值, c_i 为数据序列 x_i 在第 j 项的某一标准参考值.

3.5.2 基于多层次灰色关联分析的图像融合效果综合评价方法

基于单层次灰色关联分析的评价方法可用图1

表示.

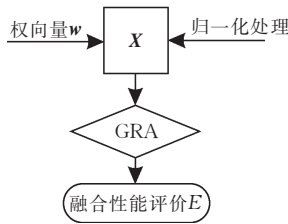


图 1 单层次灰色关联分析效果评价

图 1 中, \mathbf{X} 为待评价融合算法的评价指标值组成的矩阵.

- 其计算步骤如下:
- (1) 根据融合目的、专家经验、研究兴趣等先验知识,选择融合图像熵值、平均梯度、相关系数等 N 个性能评价指标 $u_j (j=1,2,\cdots,N)$,并计算相应的权值 ω_j ;
 - (2) 设待评价的融合算法有 I 个,那么由各待评价融合算法的评价指标组成比较序列 $x_i(j) (i=1,2,\cdots,I)$,其中 $x_i(j)$ 代表第 i 个待评价融合算法在第 j 项融合性能评价指标 u_j 下的值;
 - (3) 从 N 个性能指标的 I 组取值中分别选取最优特征,组成参考序列 $x_0(j)$;
 - (4) 融合图像的性能指标作为灰色关联分析对象时,需对原始数据序列进行归一化处理;
 - (5) 计算各个比较序列与参考序列间的灰色关联度;
 - (6) 由灰色关联度进行灰关联排序,并由此确定各个融合算法的性能排序.

基于多层次灰色关联分析的综合评价方法首先应确定系统的层次结构,如图 2 所示.

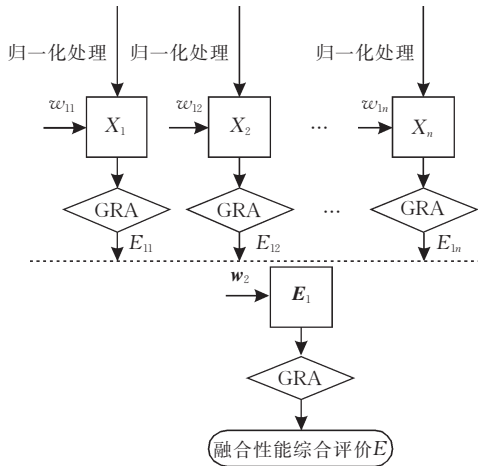


图 2 多层次灰色关联分析效果综合评价

图 2 中, X_1, X_2, \cdots, X_n 表示将指标集 X 划分为

n 个子集,且 $\sum_{i=1}^n X_i = \mathbf{X}$. 若对 X_i 再做划分,可得到三层以至更多层次的综合评价模型. $\omega_{11}, \omega_{12}, \cdots, \omega_{1n}$ 表示相应的权向量, $E_{11}, E_{12}, \cdots, E_{1n}$ 分别表示一级单层次评价中各子系统的评价结果向量.

- (a) 确定系统层次结构、指标体系;
- (b) 依据单层次评价方法,分别计算 3.5.2 节步骤(1)~(5),根据计算所得的灰色关联度进行灰关联排序,从而确定各单层次中系统因素的优劣排序;
- (c) 计算层间权向量值;
- (d) 计算多层次灰色关联度,并进行灰关联排序,由此确定各个融合算法的综合性能排序.

4 实验结果与分析

为了验证本文提出的融合图像综合评价方法,而不是对融合算法进行研究,本文选用文献[11]的融合数据进行实验,采用的单因素及联合单因素评价指标如表 2 所示. 其中选取的融合算法有加权平均法(AV)、拉普拉斯金字塔法(LP)、比率金字塔法(RP)、对比度金字塔法(CP)和小波变换法(DWT).

表 2 运动模糊坦克图像的融合图像性能指标						
	交叉熵	互信息	均方误差	均方根误差	峰值信噪比	排序
AV	0.0137	4.3929	17.4754	4.1804	35.7065	3
LP	0.0051	4.4126	2.4301	1.5589	44.2746	1
RP	0.0116	4.3928	17.5838	4.1933	35.6797	3
CP	0.0050	4.4134	2.6213	1.6191	43.9456	2
DWT	0.0035	4.4233	2.4656	1.5702	44.2116	1

考虑到 D-S 证据理论综合评价法计算复杂,并且如何选取基础概率分配是一个需要再解决的问题;又由于粗糙集理论综合评价法:(1)所选取的样本数据要有代表性且不能太少,否则数据挖掘的结果具有很大的片面性;(2)所选取的离散化方法应进行对比性研究,用以确定一个合理的数据离散方法,否则离散化处理对评价结果将带来一定的干扰. 鉴于图像融合及其评价体系的实时性、可靠性和客观性要求,因此,本文主要选取加权求和法、模糊 Choquet 积分法^[7]、模糊 Sugeno 积分法^[6]来和本文方法进行比较. 此外,在融合图像的综合评价中,权重也是一个重要参数,其确定方法一般有专家估测法、加权统计法、频数统计法、模糊协调决策法和模糊关系方程法等,为了检验评价方法在等权值时的抗失效性(不灵敏性),故以等权,即 $\forall j, \omega_j = \frac{1}{N}$ 计算

综合评价结果. 所有算法和实验均在 MATLAB7.0 上实现.

4.1 本文方法实验结果与分析

应用基于多层次灰色关联分析的图像融合效果综合评价方法, 详细计算步骤及结果如下所示.

首先进行一级单层次评价分析, 即表 2 中“越大越优型”、“越小越优型”和“适当型”评价指标的评价分析. 依据 3.5.2 节中“基于单层次灰色关联分析的评价方法”, 对于“越大越优型”指标: 互信息、峰值信噪比的评价分析有:

(1) 确定权值 $\omega_j = \left\{ \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right\}$;

(2) 由各算法的评价指标组成各个比较序列:

$$\begin{aligned} x_1 &= \{4.3929, 35.7065\}, \\ x_2 &= \{4.4126, 44.2746\}, \\ x_3 &= \{4.3928, 35.6797\}, \\ x_4 &= \{4.4134, 43.9456\}, \\ x_5 &= \{4.4233, 44.2116\}; \end{aligned}$$

(3) 由最优特征组成参考序列:

$$x_0 = \{4.4233, 44.2746\};$$

(4) 由式(9), 对上述 6 个序列进行归一化处理, 得

$$\begin{aligned} x'_0 &= \{1, 1\}, \\ x'_1 &= \{0.0033, 0.0031\}, \\ x'_2 &= \{0.6492, 1\}, \\ x'_3 &= \{0, 0\}, \\ x'_4 &= \{0.6754, 0.9617\}, \\ x'_5 &= \{1, 0.9927\}; \end{aligned}$$

(5) 根据式(7)、式(8), 计算得各个比较序列与参考序列的关联度分别为

$$\{0.3341, 0.7938, 0.3333, 0.7676, 0.9928\};$$

(6) 经灰关联排序, 得出基于运动模糊图像的 6 种融合算法所得结果图像关于第一类评价指标的优劣排序为

$$DWT > LP > CP > AV > RP.$$

同理, 关于“越小越优型”评价指标: 交叉熵、均方误差、均方根误差, 有

(1) 确定权值 $\omega_j = \left\{ \frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3} \right\}$;

(2) 由各算法的评价指标组成各个比较序列:

$$\begin{aligned} x_1 &= \{0.0137, 17.4754, 4.1804\}, \\ x_2 &= \{0.0051, 2.4301, 1.5589\}, \\ x_3 &= \{0.0116, 17.5838, 4.1933\}, \\ x_4 &= \{0.0050, 2.6213, 1.6191\}, \end{aligned}$$

$$x_5 = \{0.0035, 2.4656, 1.5702\};$$

(3) 由最优特征组成参考序列:

$$x_0 = \{0.0035, 2.4301, 1.5589\};$$

(4) 由式(9), 对上述 6 个序列进行归一化处理, 得

$$\begin{aligned} x'_0 &= \{1, 1, 1\}, \\ x'_1 &= \{0, 0.0072, 0.0049\}, \\ x'_2 &= \{0.8431, 1, 1\}, \\ x'_3 &= \{0.2059, 0, 0\}, \\ x'_4 &= \{0.8529, 0.9874, 0.9772\}, \\ x'_5 &= \{1, 0.9977, 0.9957\}; \end{aligned}$$

(5) 根据式(7)、式(8), 计算得各个比较序列与参考序列的关联度分别为

$$\{0.3342, 0.9204, 0.3510, 0.9015, 0.9956\};$$

(6) 经灰关联排序, 得出基于运动模糊图像的 6 种融合算法所得结果图像关于第二类评价指标的优劣排序为

$$DWT > LP > CP > RP > AV.$$

由此, 关于融合图像的二级综合评价, 有

(1) 确定权值 $\omega_j = \left\{ \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right\}$;

(2) 由各单层次灰色关联分析评价结果组成比较序列:

$$\begin{aligned} x_1 &= \{0.3341, 0.3342\}, \\ x_2 &= \{0.7938, 0.9204\}, \\ x_3 &= \{0.3333, 0.3510\}, \\ x_4 &= \{0.7676, 0.9015\}, \\ x_5 &= \{0.9928, 0.9956\}; \end{aligned}$$

(3) 由最优特征组成参考序列:

$$x_0 = \{0.9928, 0.9956\};$$

(4) 由式(9), 对上述 6 个序列进行归一化处理, 得

$$\begin{aligned} x'_0 &= \{1, 1\}, \\ x'_1 &= \{0.0012, 0\}, \\ x'_2 &= \{0.6983, 0.8863\}, \\ x'_3 &= \{0, 0.0254\}, \\ x'_4 &= \{0.6585, 0.8577\}, \\ x'_5 &= \{1, 1\}; \end{aligned}$$

(5) 根据式(7)、式(8), 计算得各个比较序列与参考序列的关联度分别为

$$\{0.3335, 0.7192, 0.3362, 0.6863, 1\};$$

(6) 经灰关联排序, 得出基于运动模糊图像的 6 种融合算法所得结果图像关于二级综合评价指标的优劣排序为

$DWT > LP > CP > RP > AV$.

综上所述,从“越大越优型”评价指标分析, $DWT > LP > CP > AV > RP$,即性能排序为 4,2,5,3,1;从“越小越优型”评价指标分析, $DWT > LP > CP > RP > AV$,即性能排序为 5,2,4,3,1;从两类指标的二级综合评价结果看,即性能排序为 5,2,4,3,1.此结论与文献[11]的结论,即性能排序为 3,1,3,2,1 相吻合,因此本文方法更加精确、客观,增加了融合性能的区分度,且评价过程能在毫秒级时间内

完成,显示出本文方法的优越性和适应性——不仅可以从整体上进行综合评价,又可以根据需要从某个侧面进行特殊性需要的评价,兼顾了实际评价工作中的通用性和特殊性要求.

4.2 各种方法比较与分析

依据本文第 3 节中关于加权求和法、文献[7]中关于模糊 Choquet 积分法、文献[6]中关于模糊 Sugeno 积分法的相应计算公式,选用文献[11]的融合数据进行实验,并和本文方法进行比较,如表 3 所示.

表 3 图像融合效果综合评价结果比较

文献[11]排序		加权求和法		模糊 Choquet 积分法		模糊 Sugeno 积分法		本文方法	
		评价值	排序	评价值	排序	评价值	排序	评价值	排序
AV	3	0.0037	5	0.0037	5	0.0023	5	0.3335	5
LP	1	0.8985	2	0.8985	2	0.6745	3	0.7192	2
RP	3	0.0412	4	0.0412	4	0.0412	4	0.3362	4
CP	2	0.8909	3	0.8909	3	0.6824	2	0.6863	3
DWT	1	0.9972	1	0.9972	1	0.9927	1	1	1

表 3 中,在 1.8 GHz Pentium 4 PC, Windows XP, Matlab 7.0 编程环境下,上述评价方法的运行时间分别为 0.0156 s,0.0469 s,0.0625 s,0.0313 s.

实验结果显示,上述方法评价结果均与文献[11]的结论,即性能排序 3,1,3,2,1 相吻合,并且融合图像性能优劣的区分度更加明显.其中,加权求和法运行速度最快,在粗略评价是不失是一种简单易行的方法,但是该方法随某单指标的变化是线性的,而人的主观感受是非线性的.模糊 Choquet 积分法能在毫秒级时间内完成评价过程,并且能够利用先验知识确定论域中各单因素评价指标的隶属函数和模糊测度,如文献[7]所述,从而得到更加全面客观的评价结果;但是从式(6)容易看出,该方法随某单指标的变化也是线性的.模糊 Sugeno 积分法能够利用非线性方法将单因素评价指标综合起来,其变化随某单指标的变化是非线性的,符合人的主观评价习惯;此外,该方法使用的计算模型为 $M(\cdot, V)^{[5]}$,虽然对单因素评价指标的微小变化较为敏感,但是该计算模型为“主因素突出型”,可能存在信息丢失现象,因而所得结果有些粗糙,且该方法运行速度较其它几种方法最慢.本文方法利用灰色系统理论中的灰色关联分析方法,结合先验知识与量化评价,实现对融合图像效果优劣的综合评价,运行过程只比加权求和法稍慢;同时,灰色关联分析的小样本特性和整体比较机制使得评价过程中不会忽略某些重要信息,尤其对于待评价融合算法个数较多、客观评价指标数值较为接近甚至数值分布叠合、交叉的问题,本文方法评价结果客观、精确,可靠性高、区

分度大、实时性好.

5 结 论

本文将灰色系统理论中的灰色关联分析思想应用到图像融合效果评价为代表的图像信息处理多因素评价领域中,结合先验知识与量化评价,实现了对各个融合图像效果优劣的综合评价,评价结果易于定量表示,更为精确、客观,可靠性高、区分度大、实时性好.该方法不仅可以从整体上进行综合评价,还可以根据需要从某个侧面进行特殊性需要的评价,兼顾了实际评价工作中的通用性和特殊性要求.由本文的初步实验,进一步改进权重的计算方法,将使评价结果更加智能、可靠.此外,将图像融合评价的信息加入到融合规则和参数的选取过程中,可以更加合理、充分地利用信息源提供的信息,实现具有反馈的图像融合过程,而本文方法的特性,对于实现这一过程,进一步丰富和完善图像融合理论框架具有良好的启发意义和实用价值.

参 考 文 献

[1] Pohl C, Van Genderen J L. Multisensor Image fusion in remote sensing: Concept, methods and applications. *INT J Remote Sensing*, 1998, 19(5): 823-854

[2] Xia Ming-Ge, He You, Huang Xiao-Dong. Performance measure rules of multi-sensor image fusion. *Electronics Optics and Control*, 2003, 10(2): 31-35(in Chinese)

(夏明革,何友,黄晓东.多传感器图像融合效果评价方法研

- 究. 电光与控制, 2003, 10(2): 31-35)
- [3] Di Yu-Chun. The performance evaluation of image segmentation based on grey system analysis [Ph. D. dissertation]. Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 1999(in Chinese) (狄宇春. 基于灰色系统分析的图像分割性能评估[博士学位论文]. 上海交通大学, 上海, 1999)
- [4] Zhang Wen-Xiu, Wu Wei-Zhi, Liang Ji-Ye. Theory and Method of Rough Set. Beijing: Science Press, 2001(in Chinese) (张文修, 吴伟志, 梁吉业. 粗糙集理论与方法. 北京: 科学出版社, 2001)
- [5] Cao Bing-Yuan. Applying Fuzzy Mathematics and System. Beijing: Science Press, 2005(in Chinese) (曹炳元. 应用模糊数学与系统. 北京: 科学出版社, 2005)
- [6] Yang Xuan, Pei Ji-Hong, Yang Wan-Hai. Fusion evaluation using Sugeno's integral. Chinese Journal of Computers, 2001, 24(8): 815-818(in Chinese) (杨烜, 裴继红, 杨万海. 基于模糊积分的融合图像评价方法. 计算机学报, 2001, 24(8): 815-818)
- [7] Xu Bao-Chang, Chen Zhe. Image fusion effect evaluation based on fuzzy Choquet integration. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(11): 42-46(in Chinese)

(徐宝昌, 陈哲. 基于模糊 Choquet 积分的图像融合效果评价. 光电工程, 2004, 31(11): 42-46)

- [8] Deng Ju-Long. The Basic Method of Grey System. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1996 (in Chinese) (邓聚龙. 灰色系统基本方法. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996)
- [9] Ma Miao, Hao Chongyang et al. A survey on grey image processing//Proceedings of the 5th IEEE World Congress on Intelligent Control and Automation. Hangzhou, China, 2004: 4141-4145
- [10] Ma Miao, Hao Chong-Yang, Han Pei-You, Fan Yang-Yu, Li Xin-Wu. Image fidelity criterion based on grey relational analysis. Journal of Computer Aided Design and Computer Graphics, 2004, 16(7): 978-983(in Chinese) (马苗, 郝重阳, 韩培友, 樊养余, 黎新武. 基于灰色关联分析的图像保真度准则. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(7): 978-983)
- [11] Liu Gui-Xi. Research on multi-sensor image fusion [Ph. D. dissertation]. Xidian University, Xi'an, 2001(in Chinese) (刘贵喜. 多传感器图像融合方法研究[博士学位论文]. 西安电子科技大学, 西安, 2001)



HE Gui-Qing, born in 1977, Ph. D. candidate, lecturer. Her current research interests include image processing, data fusion and pattern recognition.

CHEN Shi-Hao, born in 1979, Ph. D. candidate. His current research interests include image processing, medical

image segmentation and virtual reality.

TIAN YUN, born in 1980, Ph. D. candidate. His current research interests are digital image processing and medical volume visualization.

HAO Chong-Yang, born in 1940, professor, Ph. D. supervisor. His current research interests include image processing, computer graphics, pattern recognition and virtual reality.

Background

As an important branch of multi-sensor information fusion, image fusion has found wide applications in many areas such as remote sensing, medicine, weather forecast and military object identification etc. During the past years, many algorithms such as IHS transform, PCA, HPF, wavelet transform and their modifications have been proposed to solve the fusion issue of multi-spectra, multi-phase, multi-resolution and multi-sensor problems. However, research on the all-sided and objective performance evaluation of image fusion is relatively less, though it can make a comparison among these different fusion algorithms, and thus to provide instructions on both the modification of presents algorithms and the proposal of new algorithms.

Current basic method for evaluation system of image fusion usually includes subjective and objective evaluation. Subjective evaluation is mainly through visual judging, that is to say, one looks at the image and gives out the results such as: Is the image much more clearer? Is there any distortion in image spectrum? Objective evaluation is executed mainly

through the combination of statistics analysis such as correlation coefficient, variance and entropy etc. By contrast, the developing method for evaluation system, synthesis evaluation, integrates the objective criteria with non-linear theories or intelligent computing algorithms. In this paper, a novel multi-hierarchical synthesis evaluation approach is proposed, using the Grey Relational Analysis which has the merits of small-size sample and unitary comparing mechanism. The proposed approach combines the apriori knowledge and quantization evaluation, gives not only overall performance but also required special performance evaluation. Extensive experimental analysis shows that the proposed approach performs better on quantization, precision, objectivity, reliability and real-time.

This work is supported by a grant for the Ph. D. Programs Foundation of Ministry of Education of China under grant No. 20040699015 and Youth for NWPU teachers Scientific and Technological Innovation Foundation under grant No. 5210102-0800-M016206.