

聚类分析的红外与可见光融合质量指标相似性研究^①

朱亚辉

(陕西学前师范学院 数学系, 西安 710077)

摘要: 为了研究红外与可见光图像融合质量评价指标相关性, 提出了聚类分析的红外与可见光图像融合质量评价指标相似性研究. 本文列举了 11 个常用的图像融合质量客观评价指标, 分别采用斯皮尔曼等级相关系数和灰色关联度建立相关矩阵, 通过分析阈值变化率选取最优聚类阈值, 对相似程度较高的评价指标给出合理的聚类. 在实验中, 以 10 组红外与可见光图像融合为评价对象, 通过聚类分析将 11 个评价指标分为 6 类, 该聚类结果可以作为选取合理的红外与可见光图像融合质量评价指标集的依据.

关键词: 红外图像; 可见光图像; 质量评价; 聚类分析

引用格式: 朱亚辉. 聚类分析的红外与可见光融合质量指标相似性研究. 计算机系统应用, 2018, 27(2): 216-222. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/6161.html>

Similarity of Infrared and Visible Fusion Quality Index Based on Cluster Analysis

ZHU Ya-Hui

(Department of Mathematics, Shaanxi Xueqian Normal University, Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to study the correlation between infrared and visible image fusion quality evaluation indexes, the similarity of the fusion quality evaluation indexes of infrared and visible images based on cluster analysis is put forward. In this paper, eleven evaluation indexes are listed, and correlation matrix are respectively established by using Spearman rank correlation coefficient and grey correlation degree. Through the analysis of change rate of threshold, the optimal clustering threshold is selected and the evaluation index of the degree of similarity is given. In the experiment, 10 groups of commonly used infrared and visible fusion images are respectively evaluated by 11 evaluation indicators, and then 11 evaluation indicators are divided into 6 categories by cluster analysis method. The results can be used as the basis for selecting a reasonable objective evaluation index set.

Key words: infrared image; visible image; quality evaluation; cluster analysis

红外与可见光图像融合在公共安全方面均有广泛的应用, 特别是在国家和社会安全监控等民用领域^[1]. 图像融合评估有助于研究人员设计出更为科学、精度更高的图像融合方法. 图像融合质量评价分为主观评价和客观评价^[2]. 主观评价是由观察者的主观感觉和统计结果对融合图像的优劣做出主观定性评价. 例如, Petrovixc^[3]建立一个包含 120 组图像的数据集, 其中 110 组为遥感图像融合, 6 组为红外与可见光融合, 4 组

为可见光与可见光图像融合, 每组图像包含 2 幅源图像和 2 幅融合图像, 并提供组内两幅融合图像获得的投票数, 客观评价采用数学公式定量评价图像融合质量. 常用的客观评价指标有很多种, 大致分为四类: 1) 基于统计特性的评价指标; 2) 基于信息论的评价指标; 3) 基于结构相似度的评价指标; 4) 基于人眼视觉系统的评价指标.

张小利等人^[4]在 Petrovixc 图像融合数据库的基础

^① 基金项目: 陕西省教育厅科学研究计划项目 (16JK1183); 陕西学前师范学院引进人才科研启动基金 (2015DS02)

收稿时间: 2017-04-14; 修改时间: 2017-05-02; 采用时间: 2017-05-10

上,研究了评价指标的正确率排名,结果表明:大部分评价指标的正确率排名均小于0.8,故单个评价指标很难完成准确评估融合质量的任务,需要进行综合评价.因此面临的主要问题在于:所选的评价指标必须满足非冗余性原则.虽然文献[4]研究了融合图像质量评价指标的相关性,但结合红外与可见光图像融合质量评价,该研究存在以下不足:1) Petrovic 图像融合主观数据库中遥感图像的个数占91.7%,文献[4]侧重分析遥感图像融合质量评价指标的相关性;2) 文献[4]采用的融合方法比较陈旧,已经无法满足现阶段融合方法质量评价的需求;3) 文献[4]采用阈值分类对评价指标进行聚类分析,所选阈值具有随机性,无法保证分类的有效性.

借鉴文献[4]总结的融合图像质量评价指标,本文从斯皮尔曼等级相关系数和灰色关联分析理论研究评价指标在红外与可见光图像融合质量评价的相关性.

1 客观评价指标

根据图像融合质量评价原理,将图像融合质量评价方法分为4类:基于统计特性的评价指标、基于信息论的评价指标、基于结构相似度的评价指标、基于人眼视觉系统的评价指标.

设 A, B 分别表示两源图像,采用融合算法将两源图像进行融合,得到融合图像 F , 图像的大小均为 $M \times N$, 图像中的灰度级数为 L .

1.1 基于统计特性评价指标

本文主要介绍常用的统计特性评价指标,包括:平均梯度 (Average Gradient, AG)、空间频率 (Spatial Frequency, SF)、均方误差 (Mean Square Error, MSE)、峰值信噪比 (peak signal to noise ratio, PSNR)、相关系数 (Correlation Coefficient, CC). 其中, AG 反映图像微小细节变化与纹理变化的反差特征, SF 反映图像灰度的变化率, MSE 反映变量之间的差异, PSNR 衡量有效信息与噪声之间的比率, CC 衡量变量间相关关系密切的程度. 上述评价指标的计算公式详见文献[4].

1.2 基于信息论的评价指标

信息熵作为图像融合质量评价指标,用于衡量融合图像信息丰富程度. 但该指标只是衡量了融合图像自身的信息量,无法衡量源图像传递给融合图像的信息量,评价结果具有片面性. 互信息用于衡量融合图像保留源图像信息量的多少,较为准确地反映图像融合

质量. 故本文介绍源图像与融合图像间的互信息及其改进算法.

(1) 互信息

对于图像 X, Y , 它们间的互信息计算公式如下:

$$I_{X,Y} = \sum_{x,y} p_{XY}(x,y) \log_2 \frac{p_{XY}(x,y)}{p_X(x)p_Y(y)}$$

式中, $p_{XY}(x,y)$ 是图像 X, Y 间的归一化联合灰度直方图, $p_X(x)$ 和 $p_Y(y)$ 分别为图像 X, Y 的概率密度分布.

在已知源图像 A, B 和融合图像 F 的基础上,基于互信息的融合质量评价指标计算公式如下:

$$M_{A,B}^F = I_{F,A} + I_{F,B}$$

融合图像的互信息越大,融合图像质量越优,反之,则融合图像质量越差.

(2) Taillis 熵

Cvejic^[5]利用 Taillis 熵改进了互信息,其计算公式如下所示:

$$M_{F,A,B}^\alpha = I_{F,A}^\alpha + I_{F,B}^\alpha$$

这里,

$$I_{F,A}^\alpha(f,a) = \frac{1}{1-\alpha} \left(1 - \sum_{f,a} \frac{(p_{F,A}(f,a))^\alpha}{(p_F(f,a)p_A(a))^{\alpha-1}} \right)$$

$$I_{F,B}^\alpha(f,b) = \frac{1}{1-\alpha} \left(1 - \sum_{f,b} \frac{(p_{F,B}(f,b))^\alpha}{(p_F(f,a)p_B(b))^{\alpha-1}} \right)$$

融合图像的 Taillis 熵越大,则融合图像质量越优,反之,则融合图像质量越差.

1.3 基于结构相似度的图像融合评估指标

结构相似度理论是一种关于图像质量评价的新思想. 它自顶向下地模拟 HVS 整体功能,使得测量结构信息的改变与感知图像质量的变化非常接近. 图像 X, Y 间的结构相似度表达式如下:

$$SSIM(X,Y) = \frac{2\mu_X\mu_Y + C_1}{\mu_X^2 + \mu_Y^2 + C_1} \frac{2\sigma_X\sigma_Y + C_2}{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + C_2} \frac{2\sigma_{XY} + C_3}{\sigma_X\sigma_Y + C_3}$$

这里, $\mu_X, \mu_Y, \sigma_X, \sigma_Y$ 分别为图像 X, Y 的均值和标准差, σ_{XY} 是图像 X, Y 的协方差, C_1, C_2, C_3 为常数.

在此基础上, Picalla^[6]提出了三个融合图像质量评价指标: Q, Q_w, Q_E . 融合图像的评价指标 Q, Q_w, Q_E 值越大,表明融合图像质量越优;反之,则评价指标质量越差.

下面对三个指标进行描述:

(1) 评价指标 Q

评价指标 Q 的计算思想: 首先分别计算融合图像 F 和源图像 A, B 在局部窗口 w 内的结构相似度 $SSIM(A, F|w)$ 和 $SSIM(B, F|w)$; 然后利用输入图像的局部显著度构成归一化局部权重系数 $\lambda(w)$, 表示源图像之间的相对重要程度; 最后通过加权乘法获得融合图像质量. 其表达式如式 (1).

$$Q(A, B, F) = \frac{1}{|W|} \sum_{w \in W} \lambda(w) SSIM(A, F|w) + (1 - \lambda(w)) SSIM(B, F|w) \quad (1)$$

其中, $|W|$ 是 W 的基数. $\lambda(w)$ 是源图像的局部显著度构成的归一化权重, 其表达式如下:

$$\lambda(w) = \frac{s(A|w)}{s(A|w) + s(B|w)}$$

这里, $s(A|w), s(B|w)$ 分别表示图像 A, B 在窗口 w 的显著性.

(2) 评价指标 Q_w

Piella 考虑到窗口重要性不同, 对式 (1) 进行改进, 得到加权结构相似度 $Q_w(A, B, F)$:

$$Q_w(A, B, F) = \sum_{w \in W} c(w) [\lambda(w) SSIM(A, F|w) + (1 - \lambda(w)) SSIM(B, F|w)]$$

其中, $c(w)$ 是图像块 w 在整个图像中的重要程度:

$$c(w) = \frac{C(w)}{\sum_{w \in W} C(w)}, C(w) = \max \{s(A|w), s(B|w)\}$$

(3) 评价指标 Q_E

考虑到图像质量优劣与边缘的完整度、清晰度有关, Piella 在获得评价指标 $Q_w(A, B, F)$ 的基础上, 分别获取源图像和融合图像的边缘图像 A, B, F , 然后求出 $Q_w(A, B, F)$, 得到基于边缘结构相似指标 Q_E :

$$Q_E = Q_w(A, B, F)^{1-\alpha} + Q_w(A, B, F)^\alpha$$

1.4 基于人眼视觉系统的评价指标

基于人眼视觉系统的评价指标是模仿人眼对像素层绝对差值的认知机制, 通过掩盖低于人眼感知能力的差异修正评测结果. 该类指标主要被划分为 2 部分: 1) 基于显著性几何评价指标; 2) 基于边缘保持度的评价指标.

1.4.1 基于显著性几何评价指标

Luo 等人^[7]利用图像区域显著性对结构相似度进行改进, 提出了基于显著性几何评价指标. 该指标的计

算过程如下:

首先, 分别计算源图像 A, B 的显著性, 将所得结果存入到 S_A, S_B 中, 当源图像 A, B 在点 (x, y) 处的显著性大于阈值 t , 则认为此处是显著性位置; 否则, 认为是非显著性位置.

然后, 分别统计源图像 A, B 与融合图像 F 在显著性区域、非显著性区域的相似度. 以源图像 A 和融合图像 F 为例, 计算方法如下所示:

$$S_{SSIM}(F, A) = \frac{1}{m_1} \sum_{S_{A(x,y)} \geq t} |SSIM_{FA}(x, y)|$$

$$L_{SSIM}(F, A) = \frac{1}{m_2} \sum_{S_{A(x,y)} < t} |SSIM_{FA}(x, y)|$$

式中, m_1, m_2 分别表示显著性区域、非显著区域中像素的个数.

其次, 将它们进行整合, 得到源图像 A 和融合图像 F 的整体相似度为:

$$FIQRO(F, A) = [S_{SSIM}(F, A)]^\alpha [L_{SSIM}(F, A)]^{1-\alpha}$$

同样, 获得源图像 B 和融合图像 F 的整体相似度 $FIQRO(F, B)$.

结合 $FIQRO(F, A)$ 和 $FIQRO(F, B)$, 基于显著性几何评价指标表达式为:

$$FIFQ = 1 - \sqrt{\frac{(a_1 - FIQRO(F, A))^2 + (a_2 - FIQRO(F, B))^2}{2}}$$

其中, a_1, a_2 为参数, 通常取 $a_1 = a_2 = 1$.

1.4.2 基于边缘保持度的评价指标

根据视觉系统特性, Xydeas 等人^[8]提出了一种衡量边缘信息量从源图像到融合图像多少的客观评价指标. 其实质是通过 Sobel 算子分别计算输入、输出图像的边缘信息, 得到边缘信息传递的量化值, 然后对源图像的边缘保持度加权求和得到最终值. 其计算步骤如下:

Step 1. 计算源图像 A, B 到融合图像 F 的边缘信息保留值 $Q_{AF}(x, y)$ 和 $Q_{BF}(x, y)$.

以 $Q_{AF}(x, y)$ 的计算过程为例进行说明.

首先, 应用式 (2) 计算源图像 A 和融合图像 F 在点 (x, y) 处的边缘强度 $g_A(x, y)$ 和 $g_F(x, y)$:

$$\begin{cases} g_A(x, y) = \sqrt{S_x^A(x, y)^2 + S_y^A(x, y)^2} \\ g_F(x, y) = \sqrt{S_x^F(x, y)^2 + S_y^F(x, y)^2} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $S_x^A(x, y), S_y^A(x, y)$ 分别为应用 Sobel 算子对源图像 A 进行 x 方向和 y 方向滤波的结果.

再应用式 (3) 计算源图像 A 和图像 F 在点 (x, y) 处

的边缘方向 $\alpha_A(x,y), \alpha_F(x,y)$:

$$\begin{cases} \alpha_A(x,y) = \arctan \frac{S_y^A(x,y)}{S_x^A(x,y)} \\ \alpha_F(x,y) = \arctan \frac{S_y^F(x,y)}{S_x^F(x,y)} \end{cases} \quad (3)$$

然后,应用式(4)计算源图像 A 相对于融合图像 F 的相对边缘强度 $G_{AF}(x,y)$ 和边缘方向 $A_{AF}(x,y)$:

$$\begin{cases} G_{AF}(x,y) = \begin{cases} g_F(x,y), & \text{if } g_A(x,y) > g_F(x,y) \\ g_A(x,y), & \text{otherwise} \end{cases} \\ A_{AF}(x,y) = \frac{|\alpha_A(x,y) - \alpha_F(x,y) - \pi/2|}{\pi/2} \end{cases} \quad (4)$$

应用式(5)得到源图像 A 到融合图像 F 的边缘信息保留值 $Q_{AF}(x,y)$:

$$Q_{AF}(x,y) = \frac{Q_g^{AF}(x,y) Q_\alpha^{AF}(x,y)}{1 + e^{k_g(G_{AF}(x,y) - \sigma_g)} + e^{k_\alpha(A_{AF}(x,y) - \sigma_\alpha)}} \quad (5)$$

其中, $\Gamma_g, k_g, \sigma_g, \Gamma_\alpha, k_\alpha, \sigma_\alpha$ 均为常量。

同样,应用式(2)至式(5)得到源图像 B 到融合图像 F 的边缘信息保留值 $Q_{BF}(x,y)$ 。

Step 2. 计算基于边缘保持度的质量评价指标 $Q_{AB/F}$ 。

$$Q_{AB/F} = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (Q_{AF}(x,y) \omega_A(x,y) + Q_{BF}(x,y) \omega_B(x,y))}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (\omega_A(x,y) + \omega_B(x,y))} \quad (6)$$

这里, $\omega_A(x,y)$ 和 $\omega_B(x,y)$ 分别是源图像 A, B 的边缘强度,其表达式分别为:

$$\omega_A(x,y) = (g_A(x,y))^L, \quad \omega_B(x,y) = (g_B(x,y))^L$$

式中, L 是常数。

Xydeas 等人^[9]在进一步考虑人眼视觉感知性能后,通过对融合图像与源图像之间各像素点上的边缘强度添加阈值 T_g 和计算各邻域内像素方向的一致性程度来分辨融合图像中出现的噪声和边缘情况,在此基础上,改进了加权系数 $\omega_A(x,y)$ 和 $\omega_B(x,y)$, 具体表达式见式(7)。

$$\begin{cases} \omega_A(x,y) = \begin{cases} \omega_{\min}^A, & g_A(x,y) \leq T_g \\ g_A(x,y) \times c_A(x,y), & g_A(x,y) > T_g \end{cases} \\ \omega_B(x,y) = \begin{cases} \omega_{\min}^B, & g_B(x,y) \leq T_g \\ g_B(x,y) \times c_B(x,y), & g_B(x,y) > T_g \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $c_A(x,y)$ 和 $c_B(x,y)$ 表示图像 A, B 邻域内像素方向一致性程度。为方便起见,均记为 $c(x,y)$, 表达式如式(8)。

$$c(x,y) = \frac{\sum_{(x^*,y^*) \in W^*} g(x^*,y^*)}{\sum_{(x^*,y^*) \in W} g(x^*,y^*)} \quad (8)$$

这里, W 是中心处在 (x,y) , 且大小为 $k \times l$ 的窗口, 窗口 $W^* = W \cap [\alpha(x,y) - \delta, \alpha(x,y) + \delta]$, δ 为常数。

将新的权重系数 $\omega_A(x,y)$ 和 $\omega_B(x,y)$ 代入式(6), 获得基于改进的边缘保持度图像融合质量评价指标。

2 相关性指标

本文采用斯皮尔曼等级相关系数和灰色关联理论分析图像融合质量评价指标在红外与可见光图像融合中的相关性。

2.1 基于灰色关联度的相关性分析

灰色系统理论对样本数据量的要求不高、设计思路相对简单,能够解决因统计资料不足而造成的信息不完善的问题。灰色关联分析理论是灰色系统理论的重要组成部分,它通过各个样本序列的曲线几何形状的相似度来判断序列之间的关系。

向量 $x = (x_i)_{1 \times N}$ 和 $y = (y_i)_{1 \times N}$ 间的灰色绝对关联度表达式如式(9)。

$$r_{xy} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{1 + |(x_{i+1} - x_i) - (y_{i+1} - y_i)|} \quad (9)$$

2.2 斯皮尔曼相关系数

设两变量 X 和 Y , 它们的长度均为 N 。 X 和 Y 均按降序排列后分别记为 X_{sort} 和 Y_{sort} 。 X' 和 Y' 分别记录 X 和 Y 中元素在 X_{sort} 和 Y_{sort} 中的位置, 并称其为秩次。记 $d_i = X(i) - Y(i)$, 斯皮尔曼相关系数 ρ_s 表示为式(10)。

$$\rho_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N d_i^2}{N(N^2 - 1)} \quad (10)$$

ρ_s 反映客观评价指标的单调性, $\rho_s \in [-1, 1]$ 。当 $\rho_s = 1$ 时, 表示 X 和 Y 秩次完全相同; 当 $\rho_s = -1$ 时, 表示 X 和 Y 的秩次完全相反; 当 $\rho_s = 0$ 时, X 和 Y 不相关。当 ρ_s 越接近 1, 表明客观评价指标单调性越好。

2.3 选取聚类阈值

通过计算两两评价指标间的相关度得到对角线为 1 的相关矩阵 $R = (r_{ij})_{N \times N}$ 。将 R 中除了对角线元素以

外的所有互不相同的元素按照从大到小的顺序编排,表示为:

$$1 = \theta_1 > \theta_2 > \theta_3 > \dots \quad (11)$$

取阈值 $\theta = \theta_k$, 当 $r_{ij} \geq \theta_k (i \neq j)$, 则认为指标 u_i 和指标 u_j 具有相同特性并将其分为一类.

设 B_1, B_2 是聚类阈值为 θ_k 时的两个类, 若 $B_1 \cap B_2 \neq \emptyset$, 称它们是相似的, 将所有相似的类合并成一个类, 最后得到的分类就是阈值 θ_k 时的等价分类.

Zhang^[10]采用 θ 的变化率 C_i 确定聚类阈值 θ :

$$C_i = \frac{\theta_{i-1} - \theta_i}{n_i - n_{i-1}} \quad (12)$$

其中, i 为 θ 从大到小的聚类次数, n_i 和 n_{i-1} 分别为第 i 次

和第 $i-1$ 次聚类的对象个数, θ_i 和 θ_{i-1} 分别为第 i 次和第 $i-1$ 次聚类时的阈值, 若

$$C_i = \max_j (C_j) \quad (13)$$

则认为第 i 次聚类对应阈值为最优聚类阈值.

从公式(12)可以看出: 阈值 θ 的变化率 C_i 越大, 表明类别之间的差异越大, 类与类之间的边界就越明显. 因此, 取最大 C_i 对应的 θ_i 为最优聚类阈值.

3 融合图像质量评价指标相关性分析

实验图像来源于美国麻省理工学院林肯实验室、荷兰人力资源研究所、美国海军研究生院在网络上提供的红外与可见光源图像, 共计10组图像, 见图1.

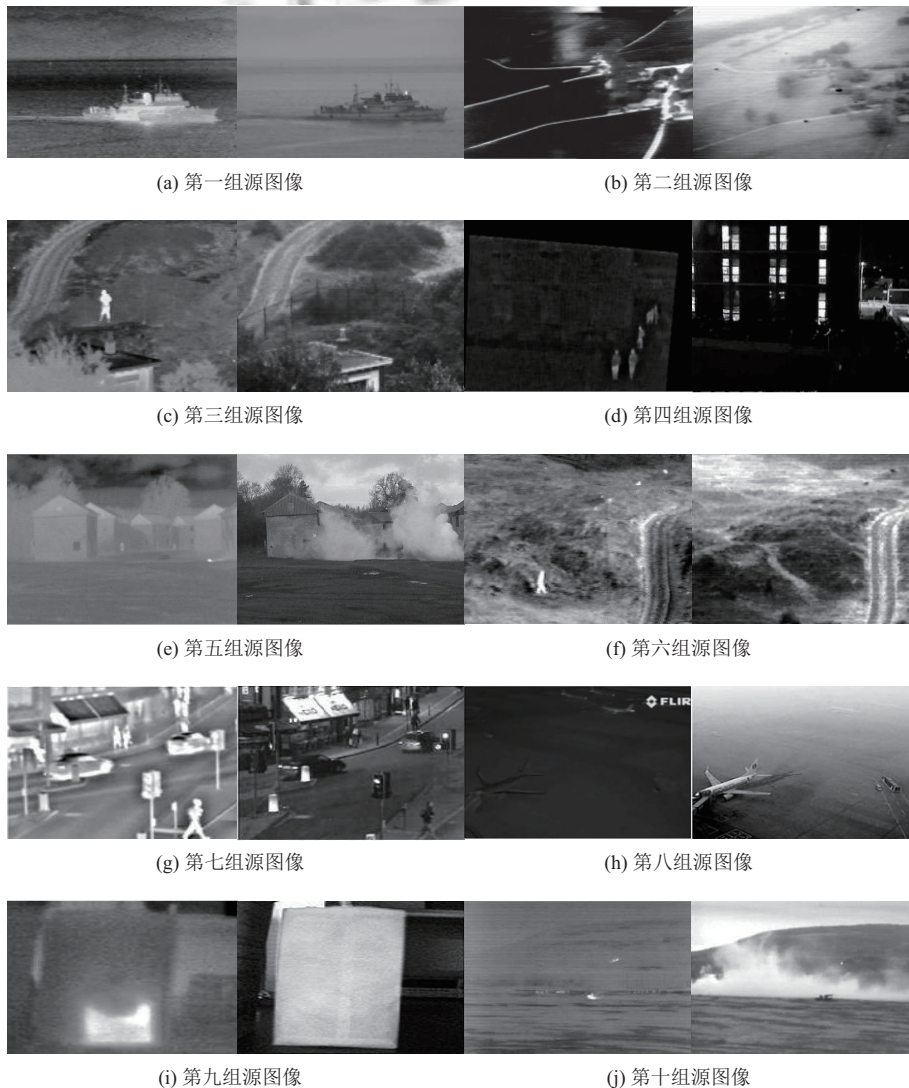


图1 10组红外与可见光源图像

本文采用融合方法包括: 基于奇异值分解的 PCNN 融合方法^[11]、基于 Tetrolet 变换的融合方法^[12]、基于非下采样 Contourlet 变换和稀疏表示的融合方法^[13]、基于对比度增强的融合方法^[14]、基于多特征的融合方法^[15]和基于剪切波变换的图像融合方法^[16]. 上述融合方法既具有代表性, 且融合效果比较好. 由于篇幅限制,

图 2 给出了第七组源图像及其融合图像.

采用的评价指标有: 峰值信噪比(u_1)、显著性几何评价指标 $VIFF(u_2)$ 、平均梯度(u_3)、指标 $Q(u_4)$ 、互信息(u_5)、指标 $Q_w(u_6)$ 、边缘保持度 $Q_{AB/F}(u_7)$ 、指标 $Q_E(u_8)$ 、Taillis 熵(u_9)、空间频率(u_{10})、相关系数(u_{11}).



图 2 源图像与融合图像

3.1 评价指标规范化处理

图像融合质量评价指标的物理意义和计量单位不相同, 在对融合图像质量评价指标进行相关性分析时, 需要对评价指标进行规范化处理. 根据评价指标与融合图像质量的关系, 除了均方误差属于“越小越优型”外, 其它评价指标均属于“越大越优型”. 本文采用公式 (14) 对评价指标值进行规范化处理.

$$x_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - \min_i \{x_{ij}\}}{\max_i \{x_{ij}\} - \min_i \{x_{ij}\}}, & u_j \in T_1 \\ \frac{\max_i \{x_{ij}\} - x_{ij}}{\max_i \{x_{ij}\} - \min_i \{x_{ij}\}}, & u_j \in T_2 \end{cases} \quad (14)$$

这里, T_1, T_2 分别表示指标属于“越大越优型”和“越

小越优型”.

3.2 基于灰色关联度的相关性分析

本文利用数据集内 10 组融合图像, 分别计算两两客观评价指标间的灰色关联度, 并求其均值. 计算结果见表 1 所示.

图 3 给出了基于灰色关联度的动态聚类图. 由公式 (12) 和公式 (13) 确定聚类阈值 $\theta=0.9$, 由图 3 可知的聚类结果为: $\{(3, 10), (1, 11), (2, 8, 4, 6), (5, 9, 7)\}$

3.3 基于斯皮尔曼等级相关系数的分析

图 4 给出了基于斯皮尔曼相关系统的动态聚类图.

表 1 客观评价指标的相关系数

评价指标	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7	u_8	u_9	u_{10}	u_{11}
u_1	1.0000	0.7168	0.7155	0.7802	0.7247	0.6997	0.7675	0.7383	0.7231	0.7859	0.7834
u_2	0.7168	1.0000	0.7301	0.6771	0.7808	0.7600	0.7294	0.7739	0.6865	0.7930	0.7358
u_3	0.7155	0.7301	1.0000	0.7046	0.6420	0.6708	0.7082	0.7764	0.7654	0.6793	0.7049
u_4	0.7802	0.6771	0.7046	1.0000	0.6534	0.6745	0.7274	0.6819	0.6368	0.7222	0.6986
u_5	0.7247	0.7808	0.6420	0.6534	1.0000	0.7604	0.7689	0.6800	0.7897	0.7654	0.6960
u_6	0.6997	0.7600	0.6708	0.6745	0.7604	1.0000	0.7455	0.6955	0.6817	0.7845	0.7660
u_7	0.7675	0.7294	0.7082	0.7274	0.7689	0.7455	1.0000	0.6441	0.7714	0.7946	0.7276
u_8	0.7383	0.7739	0.7764	0.6819	0.6800	0.6955	0.6441	1.0000	0.7498	0.7288	0.6948
u_9	0.7231	0.6865	0.7654	0.6368	0.7897	0.6817	0.7714	0.7498	1.0000	0.6999	0.6543
u_{10}	0.7859	0.7930	0.6793	0.7222	0.7654	0.7845	0.7946	0.7288	0.6999	1.0000	0.8346
u_{11}	0.7834	0.7358	0.7049	0.6986	0.6960	0.7660	0.7276	0.6948	0.6543	0.8346	1.0000

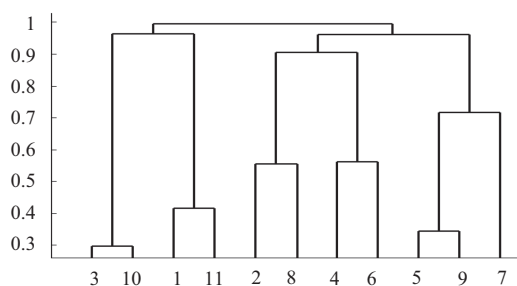


图3 动态聚类图

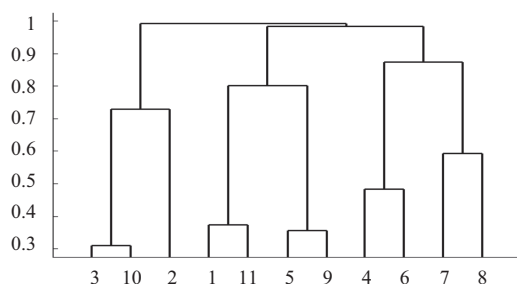


图4 动态聚类图

确定聚类阈值 $\theta=0.9$,由图4可以看出聚类结果为:

$$\{(3, 10, 2), (1, 11, 5, 9), (4, 6, 7, 8)\}$$

显然,上述两种聚类结果不一致,这是因为基于灰色关联度的聚类方法反映两变量间的相关系数;基于斯皮尔曼等级相关系数的聚类分析法反映两变量之间联系的强弱程度.结合上述两种分类结果,将上述11个评价指标分为6类,即:

$$\{(3, 10), (1, 11), (5, 9), (4, 6, 8), 2, 7\}$$

因此,在建立红外与可见光图像融合质量评价指标体系时,可以选择相关性较低的评价指标,保证了评价指标的合理性和非冗余性,既提高了综合评价的速度,同时也保证了综合评价的合理性.

4 结论与展望

红外与可见光图像融合质量评价能够进一步丰富和完善图像融合理论框架.单个评价指标往往不能准确地评价图像融合质量,需要进行综合评价.评价指标体系是进行综合评价的关键,它的建立应该满足非冗余性原则.本文选取有代表性的评价指标共计11个,采用斯皮尔曼相关等级系数和灰色关联度研究评价指标的相关程度,在此基础上分析阈值变化率选取最优聚类阈值,将评价指标进行分类.为后续研究红外与可见光图像融合质量综合评价提供理论支持.

参考文献

- 张宝辉. 红外与可见光的图像融合系统及应用研究[博士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- 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.
- Petrović V. Subjective tests for image fusion evaluation and objective metric validation. *Information Fusion*, 2007, 8(2): 208-216. [doi: 10.1016/j.inffus.2005.05.001]
- 张小利, 李雄飞, 李军. 融合图像质量评价指标的相关性分析及性能评估. 自动化学报, 2014, 40(2): 306-315.
- Cvejic N, Canagarajah CN, Bull DR. Image fusion metric based on mutual information and Tsallis entropy. *Electronics Letters*, 2006, 42(11): 626-627. [doi: 10.1049/el:20060693]
- Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion. *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Image Processing*. Barcelona, Spain. 2003. 173-176.
- Luo XY, Zhang J, Dai QH. Saliency-based geometry measurement for image fusion performance. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, 61(4): 1130-1132. [doi: 10.1109/TIM.2011.2174898]
- Xydeas CS, Petrovic V. Objective image fusion performance measure. *Electronics Letters*, 2000, 36(4): 308-309. [doi: 10.1049/el:20000267]
- Xydeas CS, Petrovic VS. Objective pixel-level image fusion performance measure. *Proceedings of SPIE 4051, Sensor Fusion: Architectures, Algorithms, and Applications IV*. Orlando, FL, USA. 2000. 89-98.
- Zhang ZG. An approach to multiple attribute group decision making for supplier selection. *Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Advanced Management Science*. Chengdu, China. 2010. 536-539.
- 陈广秋, 高印寒, 段锦, 等. 基于奇异值分解的PCNN红外与可见光图像融合. 液晶与显示, 2015, 30(1): 126-136.
- 沈瑜, 党建武, 冯鑫, 等. 基于Tetrolet变换的红外与可见光融合. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(6): 1506-1511.
- 王珺, 彭进业, 何贵青, 等. 基于非下采样Contourlet变换和稀疏表示的红外与可见光图像融合方法. 兵工学报, 2013, 34(7): 815-820.
- 周渝人, 耿爱辉, 王莹, 等. 基于对比度增强的红外与可见光图像融合. 中国激光, 2014, 41(9): 0909001.
- 杨桃, 童涛, 陆松岩, 等. 基于多特征的红外与可见光图像融合. 光学精密工程, 2014, 22(2): 489-496.
- 郑红, 郑晨, 闫秀生, 等. 基于剪切波变换的可见光与红外图像融合算法. 仪器仪表学报, 2012, 33(7): 1613-1619.