

# 数字融合图像质量的视觉信息保真度客观评价方法

华 东<sup>1</sup> 余宏生<sup>2</sup>

(温州职业技术学院电气电子工程系 温州 325035)<sup>1</sup> (湖北理工学院数理学院 黄石 435000)<sup>2</sup>

**摘 要** 在实时数字图像融合系统中需要对融合图像的质量进行客观评价。针对传统客观评价方法存在与人眼视觉系统(Human Visual System, HVS)主观评价结果不相符的缺陷,提出了一种基于视觉信息保真度(Visual Information Fidelity, VIF)的融合图像质量客观评价方法。在假设图像源符合 GSM(Gaussian Scale Mixture, GSM)模型,并将图像融合处理作为图像信号失真通道,而且考虑人眼视觉噪声特性的前提下,建立了基于 VIF 的数字融合图像质量客观评价理论模型,提出了一种融合图像质量评价指标 FVIF。实验结果表明:该方法能够对融合图像质量进行综合评价,与其它方法相比, FVIF 客观评价方法的性能更好,其评价结果与主观评价结果基本一致。

**关键词** 融合图像质量评价,视觉信息保真度,高斯尺度混合模型,人眼视觉系统

中图分类号 TP391.4 文献标识码 A

## Digital Fusion Image Quality Objective Assessment Method Based on Visual Information Fidelity

HUA Dong<sup>1</sup> YU Hong-sheng<sup>2</sup>

(Department of Electric and Electronic Engineering, Wenzhou Vocational & Technical College, Wenzhou 325035, China)<sup>1</sup>

(School of Mathematics and Physics, Hubei Polytechnic University, Huangshi 435000, China)<sup>2</sup>

**Abstract** Objective quality assessment of fusion image is of fundamental necessary in real-time digital image fusion system. A fusion image quality objective assessment method based on visual information fidelity (VIF) was proposed considering the assessment results of traditional objective assessment methods are disagree with the human subjective assessment results. Assuming that the image sources meet Gaussian scale mixture model, regarding image fusion processing as image signal distortion channel, and considering human visual noise characteristics, VIF digital image fusion objective quality assessment model was established, and an image fusion quality evaluation index—FVIF was derived also. The experient indicated that the method can evaluate fusion image quality comprehensively and is better than other methods. The results of FVIF method are consistent with the human subjective assessment results.

**Keywords** Fusion image quality assessment, Visual information fidelity(VIF), Gaussian scale mixture(GSM), Human visual system(HVS)

## 1 引言

针对单一图像源易受光学系统、成像机理、天候环境等因素限制的弊端,利用图像融合技术可将可见光及红外等不同波段的传感器获取的图像信息进行综合,获得更适于人眼观察和判读的融合图像。如何对融合图像的质量进行科学的评价具有重要的研究价值。

全参考融合图像质量客观评价方法通过计算失真图像与参考图像之间基于“像素”的相似性评价失真图像的质量,如图像信息熵(Information Entropy, IE), Q 质量因子,互信息(Mutual Information, MI), 结构相似性(Structure SIMilarity, SSIM)<sup>[1]</sup>等。这些评价方法都是将单一“理想图像”作为参考图像,通过测量图像像素间的失真程度或者统计直方图评价图像的质量。国内外一些学者对这些评价方法进行改进,使之适合于融合图像的质量评价。Xydeas 等<sup>[2]</sup>提出了融合图

像的信息熵  $IE^{AB/F}$  及 Q 质量因子  $Q^{AB/F}$ ; Shutao Li 等<sup>[3]</sup>提出了改进的互信息  $MI^{AB/F}$ ; C. Yang 等<sup>[4]</sup>提出了基于结构相似性的融合图像评价指标 FSSIM。这些方法没有考虑人眼视觉系统(Human Visual System, HVS)对图像质量感知的影响,无法对融合图像中不同图像源的信息量大小及其均衡性进行准确的测量,往往无法与主观评价结果保持一致。

H. R. Sheikh<sup>[5]</sup>基于自然场景统计模型和信息理论,通过对人眼视觉失真通道和信号失真通道的成功建模,提出了视觉信息保真度(Visual Information Fidelity, VIF)图像质量评价方法。本文利用 VIF 方法建立融合图像质量评价理论模型,提出了融合图像质量的信息保真度客观评价方法。首先,基于 VIF 理论建立融合图像质量的客观评价理论模型;然后,根据该模型构造融合图像质量的评价指标(Fusion Image Quality Index Based on VIF, FVIF);最后,通过大量实际融合图像测试该评价指标的区分度及其与主观评价结果的一致

华东(1964—),男,副教授,主要研究方向为光电显示与数字图像处理技术;余宏生(1968—),男,博士,教授,主要研究方向为光电成像与数字图像处理技术。

性,并将其性能与其它评价方法进行比较。

## 2 融合图像质量的 VIF 客观评价理论模型

VIF 图像质量评价方法依赖于自然场景统计模型、图像信号失真通道和人眼视觉失真模型<sup>[5]</sup>。假设图像源的统计分布满足 GSM 模型,图像的小波域系数分块之间互不相关,且各小波子带相互独立,并将人眼视觉失真解释为内部神经元的噪声特性,将图像融合处理建模为图像信号失真通道,建立融合图像质量的 VIF 客观评价理论模型。如图 1 所示。

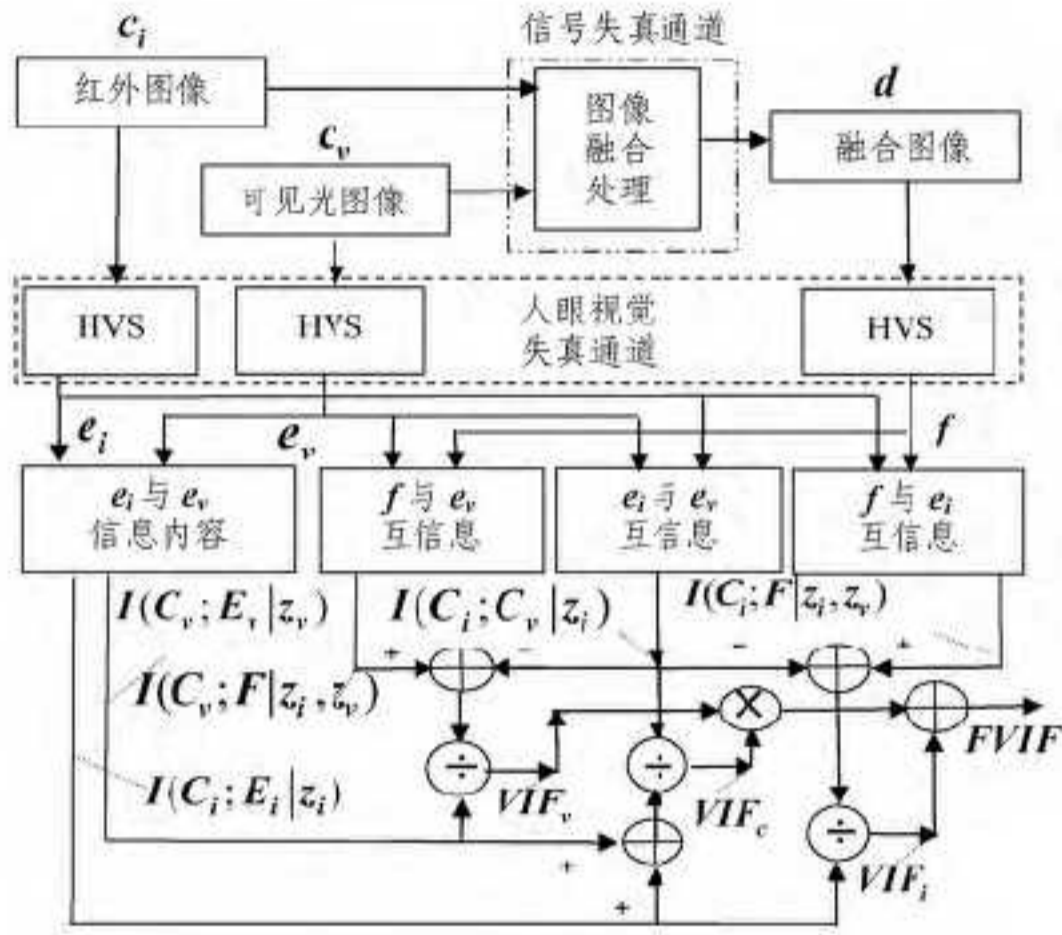


图 1 融合图像质量的 VIF 客观评价理论模型

### 2.1 图像源模型

图像融合系统的图像源包括红外图像和可见光图像。假设图像源符合 GSM 分布,从红外图像和可见光图像的小波子带的不重叠块中提取的小波系数  $c_i, c_v$  是 GSM 模型中的随机向量<sup>[6]</sup>,则:

$$c_i = \sqrt{z_i} u_i \quad (1)$$

$$c_v = \sqrt{z_v} u_v \quad (2)$$

其中,  $u_i, u_v$  是零均值的高斯向量,而  $\sqrt{z_i}, \sqrt{z_v}$  是独立的标量随机变量。向量  $c_i, c_v$  具有相同的协方差结构  $C_{iu}, C_{vu}$ , 每一个子带的小波系数被分成  $M$  个不重叠块。由于块不重叠,当乘数  $\sqrt{z_i}, \sqrt{z_v}$  已知时,假设系数块之间不相关,块内系数之间的线性相关性通过在 GSM 模型中协方差矩阵  $C_{iu}, C_{vu}$  建模。

### 2.2 失真模型

将图像融合处理作为图像信号失真通道。融合图像可视为红外图像和可见光图像在小波域的信号经过衰减或增强后的输出信号与附加噪声叠加的结果。

$$d = g_i c_i + g_v c_v + \eta \quad (3)$$

其中,  $c_i, c_v$  分别表示红外图像和可见光图像的子带的随机系数向量场,  $d$  表示融合图像相应子带的随机向量场,  $g_i, g_v$  表示确定的标量增益场,而  $\eta$  是独立的固定零均值白噪声场,协方差为  $C_\eta = \sigma_\eta^2 I$ 。

### 2.3 人眼视觉失真模型

视觉失真解释为人眼内部神经元噪声<sup>[5]</sup>。视觉失真模型在小波变换域中简单地建模为固定的零均值附加白高斯噪声<sup>[6]</sup>:

$$e_i = c_i + n \quad (4)$$

$$e_v = c_v + n \quad (5)$$

$$f = d + n \quad (6)$$

其中,  $e_i, e_v$  和  $f$  分别表示人眼视觉感知红外图像、可见光图像和融合图像的相同小波子带的随机系数向量;  $n$  表示在协方差矩阵为  $C_n = \sigma_n^2 I$  的小波系数中独立的白高斯噪声。

### 2.4 图像源互信息

图像源互信息是指输入的红外图像和可见光图像之间的共有信息。图像源互信息体现了可见光图像和红外图像之间的信息相关性,计算融合图像对单一图像源的信息保真度时,为了消除信息相关性的影响,必须在 HVS 从融合图像特定子带中提取的信息总量中去除图像源的互信息。假设

$$c_v = g_o c_i + o \quad (7)$$

$g_o$  表示确定的标量增益场,而  $o$  是独立的固定 0 均值白噪声场,协方差为  $C_o = \sigma_o^2 I$ 。

$$e_i = c_i + n \quad (8)$$

$$e_v = c_v + n \quad (9)$$

其中,  $e_i, e_v$  分别表示人眼视觉感知红外图像、可见光图像的相同小波子带的随机系数向量;  $n$  表示在协方差矩阵为  $C_n = \sigma_n^2 I$  的小波系数中独立的白高斯噪声。

## 3 融合图像质量评价指标 FVIF

令  $C_i = \{c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{iN}\}, C_v = \{c_{v1}, c_{v2}, \dots, c_{vN}\}$  表示随机向量场  $c_i, c_v$  的  $N$  个实现的集合。这些向量能够从小波子带的不重叠的块中提取。利用式(3)~式(6)中的  $d, e_i, e_v, f$  相似地定义  $D, E_i, E_v$  和  $F$ ,且令  $Z_i = \{z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{iN}\}, Z_v = \{z_{v1}, z_{v2}, \dots, z_{vN}\}$ 。同时,假设模型参数  $g_i, g_v, g_o, \sigma_\eta^2, \sigma_o^2$  和  $\sigma_n^2$  均已知。

对于红外图像,给定  $Z_i, C_i$  和  $E_i$  间的互信息为

$$\begin{aligned} I(C_i; E_i | z_i) &= \sum_{j=1}^N I(c_{ij}; e_{ij} | z_{ij}) \\ &= \sum_{j=1}^N [h(c_{ij} + n_j | z_{ij}) - h(n_j | z_{ij})] \\ &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \log_2 \left( \frac{|z_{ij} C_{iu} + \sigma_n^2 I|}{|\sigma_n^2 I|} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

式中,  $h(c)$  表示连续随机向量的熵微分。同理,对于可见光图像,有

$$\begin{aligned} I(C_v; E_v | z_v) &= \sum_{j=1}^N I(c_{vj}; e_{vj} | z_{vj}) \\ &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \log_2 \left( \frac{|z_{vj} C_{vu} + \sigma_n^2 I|}{|\sigma_n^2 I|} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

对于融合图像:

$$\begin{aligned} I(C_i; F | z_i, z_v) &= \sum_{j=1}^N [h(g_{ij} c_{ij} + g_{vj} c_{vj} + v_j + n_j | z_{ij}) - h(g_{vj} c_{vj} + v_j + n_j | z_{ij})] \\ &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \log_2 \left( \frac{|g_{ij}^2 z_{ij} C_{iu} + g_{vj}^2 z_{vj} C_{vu} + (\sigma_{\eta,j}^2 + \sigma_n^2) I|}{|g_{vj}^2 z_{vj} C_{vu} + (\sigma_{\eta,j}^2 + \sigma_n^2) I|} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

同理:

$$I(C_v; F | z_i, z_v) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \log_2 \left( \frac{|g_{ij}^2 z_{ij} C_{iu} + g_{vj}^2 z_{vj} C_{vu} + (\sigma_{\eta,j}^2 + \sigma_n^2) I|}{|g_{ij}^2 z_{ij} C_{iu} + (\sigma_{\eta,j}^2 + \sigma_n^2) I|} \right) \quad (13)$$

$$I(C_i; C_v | z_i) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \log_2 \left( \frac{|g_{vj}^2 z_{vj} C_{vu} + (\sigma_{\eta,j}^2 + \sigma_n^2) I|}{|(\sigma_{\eta,j}^2 + \sigma_n^2) I|} \right) \quad (14)$$

由于协方差矩阵  $C_{iu}, C_{vu}, C_{ou}$  是对称的,它们可写成  $C_{iu} = Q_i \Lambda_i Q_i^T, C_{vu} = Q_v \Lambda_v Q_v^T, C_{ou} = Q_o \Lambda_o Q_o^T$ ; 其中  $Q_i, Q_v, Q_o$  是标准正交矩阵,而  $\Lambda_i, \Lambda_v, \Lambda_o$  是对角矩阵,其对角线上是一组特征值  $\lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \dots, \lambda_{iM}, \lambda_{v1}, \lambda_{v2}, \dots, \lambda_{vM}, \lambda_{o1}, \lambda_{o2}, \dots, \lambda_{oM}$ <sup>[7]</sup>, 于是

$$I(C_i; E_i | z_i) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \log_2 \left( 1 + \frac{z_{ij} \lambda_{jk}}{\sigma_n^2} \right) \quad (15)$$

$$I(C_v; E_v | z_v) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \log_2 \left( 1 + \frac{z_{vj} \lambda_{vk}}{\sigma_n^2} \right) \quad (16)$$

$$I(C_i; C_v | z_i) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \log_2 \left( 1 + \frac{g_{ij}^2 z_{ij} \lambda_{jk}}{\sigma_{\eta,j}^2 + \sigma_n^2} \right) \quad (17)$$

$$I(C_i; F | z_i) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \log_2 \left( 1 + \frac{g_{ij}^2 z_{ij} \lambda_{jk}}{g_{vj}^2 z_{vj} \lambda_{vk} + (\sigma_{\eta,j}^2 + \sigma_n^2)} \right) \quad (18)$$

$$I(C_v; F | z_v) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \log_2 \left( 1 + \frac{g_{vj}^2 z_{vj} \lambda_{vk}}{g_{ij}^2 z_{ij} \lambda_{jk} + (\sigma_{\eta,j}^2 + \sigma_n^2)} \right) \quad (19)$$

$I(C_i; E_i | z_i), I(C_v; E_v | z_v)$  表示红外图像和可见光图像的信息内容;  $I(C_i; F | z_i, z_v), I(C_v; F | z_i, z_v)$  表示 HVS 从融合图像特定子带中提取的信息;  $I(C_i; C_v | z_i)$  表示图像源互信息。假设各小波子带是互相独立的, 于是将互信息扩展到  $K$  个子带求和, 分别求出融合图像对于红外图像、可见光图像及图像源互信息的信息保真度  $VIF_i, VIF_v$  及  $VIF_c$ :

$$VIF_i = \frac{\sum_{l=1}^K [I(C_i; F^l | z_i^l, z_v^l) - I(C_i; C_v^l | z_i^l)]}{\sum_{l=1}^K [I(C_i; E_i^l | z_i^l)]} \quad (20)$$

$$VIF_v = \frac{\sum_{l=1}^K [I(C_v; F^l | z_i^l, z_v^l) - I(C_i; C_v^l | z_i^l)]}{\sum_{l=1}^K [I(C_v; E_v^l | z_v^l)]} \quad (21)$$

$$VIF_c = \frac{\sum_{l=1}^K I(C_i; C_v^l | z_i^l)}{\sum_{l=1}^K [I(C_i; E_i^l | z_i^l)] + \sum_{l=1}^K [I(C_v; E_v^l | z_v^l)]} \quad (22)$$

其中,  $l$  是子带数,  $I(C_i; E_i^l | z_i^l), I(C_i; F^l | z_i^l)$  和  $I(C_i; C_v^l | z_i^l)$  是第  $l$  个子带相应的互信息测量值。

根据融合图像质量的 VIF 客观评价理论模型, 融合图像的质量可定义为从所有图像源传递到融合图像中能够被人眼视觉感知的信息量大小的度量。融合图像中包含图像源的信息量越大, 不同图像源的信息量越均衡, 融合图像的质量越好。由此, 构造融合图像质量评价指标 FVIF:

$$FVIF = \frac{2VIF_i \cdot VIF_v}{\sqrt{(VIF_i^2 + VIF_v^2)/2}} + VIF_c \quad (23)$$

要计算 FVIF, 首先必须对模型参数进行预估计。分别对红外图像、可见光图像及融合图像进行 3 级小波变换, 并将小波子带分成  $3 \times 3$  不重叠的系数块, 从小波系数块中提取小波系数分别构成向量  $c_{ij}, c_{vj}$  和  $d_j$ 。根据式(1)~式(9), 可求出  $C_{iu}, C_{vu}, C_{ou}$  及  $g_{ij}, g_{vj}, g_{oj}, \sigma_{\eta,j}, \sigma_{o,j}$  的估计值[8]。

## 4 实验结果与分析

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等研究机构在网络上提供的可见光(微光)和红外图像, 测试融合图像质量客观评价指标 FVIF 的区分度及 FVIF 评价指标与主观评价结果的一致性, 并与其他评价方法的结果进行比较。

### 4.1 FVIF 评价方法与其它客观评价方法的比较

在图像库中选择 11 组红外图像和可见光图像, 其中两组图像如图 2 所示。在小波域采用加权融合算法分别对各组图像进行融合, 为了使融合图像的质量具有明显的变化, 融合时在  $0 \sim 1$  之间间隔 0.1 选取加权系数  $W$ , 融合图像的质量在加权系数  $W=0.5$  附近时最佳, 加权系数偏离中值时, 图像质量

逐渐变差。测量融合图像的 FVIF 指标, 并与信息熵  $IE^{AB/F}$ 、Q 质量因子  $Q^{AB/F}$ 、互信息  $MI^{AB/F}$  及结构相似性 FSSIM 等方法的评价结果进行比较。为了便于比较, 将 11 组图像的测试数据全部归一化到  $[0, 1]$ 。

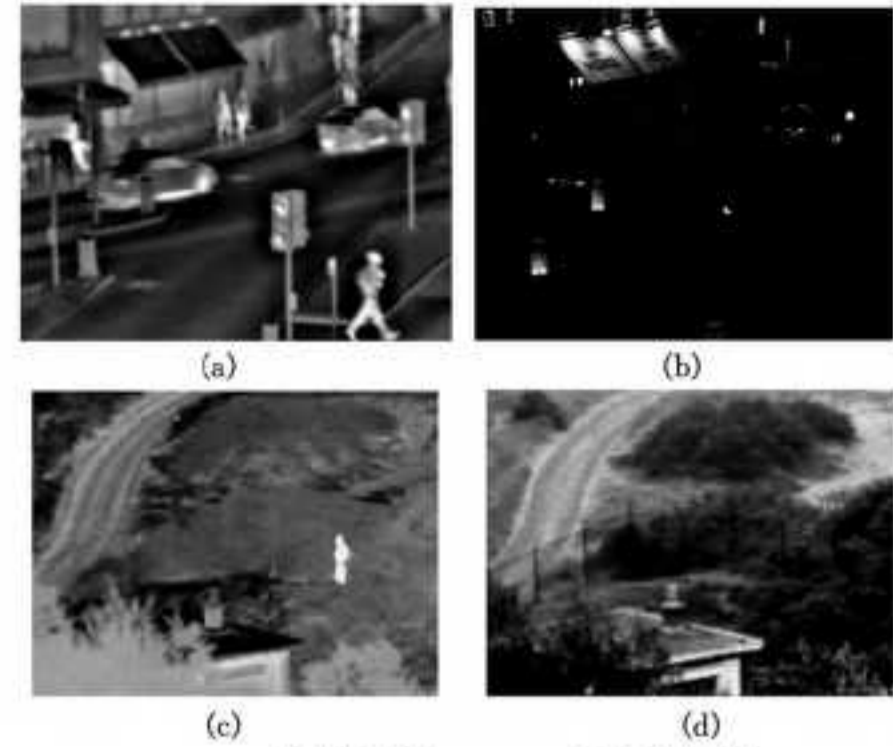


图 2 测试图像

图 3 为图 2(a) 及图 2(b) 的融合图像客观评价指标测试结果。图 4 为图 2(c) 及图 2(d) 的融合图像客观评价指标测试结果。

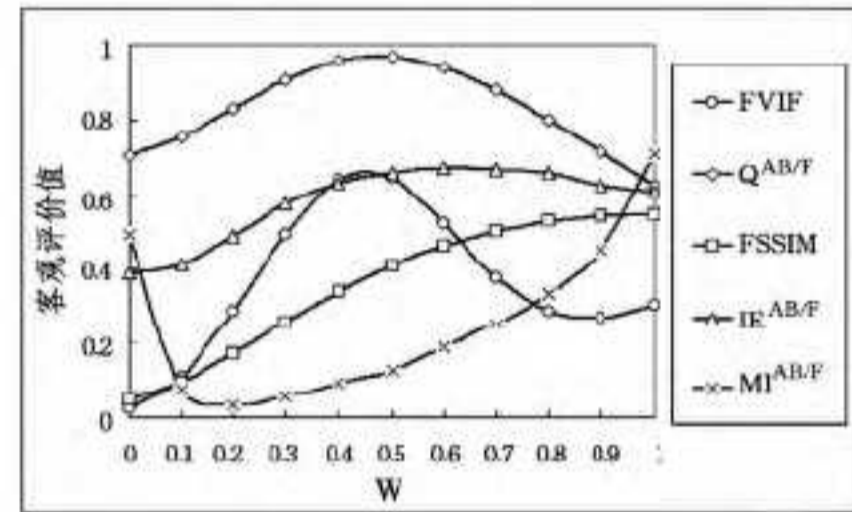


图 3 图 2(a) 及图 2(b) 的融合图像质量的客观评价结果

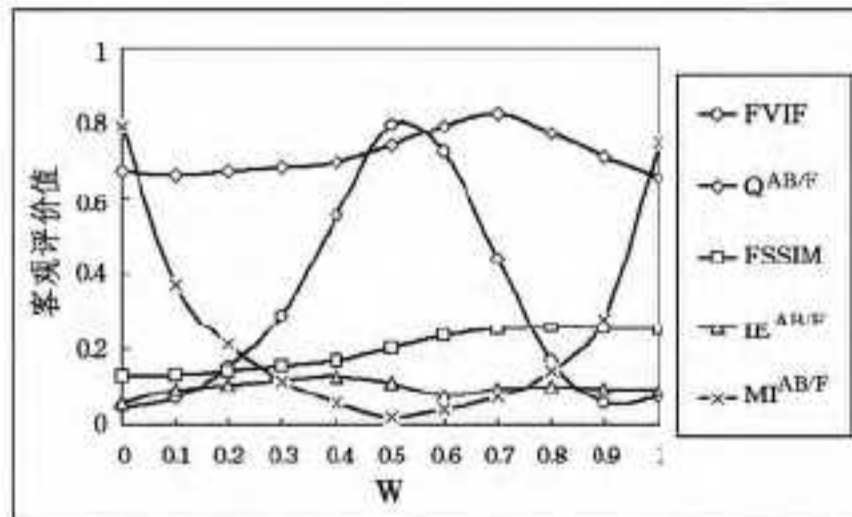


图 4 图 2(c) 及图 2(d) 的融合图像质量的客观评价结果

分析 11 组图像的测试数据, 并以图 2(a)、(b) 及图 2(c)、(d) 两组图像的测试数据为例(见图 3 及图 4), 可以发现: 与信息熵  $IE^{AB/F}$ 、Q 质量因子  $Q^{AB/F}$  及结构相似性 FSSIM 等方法的评价结果相比, FVIF 客观评价结果对图像质量的区分度最佳, 当图像质量变化时, 其单调性最好, 评价结果与图像实际质量相符, 互信息  $MI^{AB/F}$  方法的评价结果与融合图像的实际质量不相符, 说明该方法评价融合图像质量存在局限性。

### 4.2 FVIF 评价结果与主观评价结果的一致性

选取 21 组城市建筑物、山林及海天背景的红外图像和可见光图像, 分别使用连续小波变换、离散小波变换及拉普拉斯金字塔分解等 9 种方法进行融合, 获得 189 幅融合图像, 测量其 FVIF 指标与主观评价结果的一致性, 并与其它评价指标进行比较。由 20 名经过训练的观察者分别给每幅融合图像评分, 评分时采用相同的设备、光照和视角条件。主观评价平

(下转第 261 页)

- [3] Barnes E R. An Algorithm for partitioning the nodes of a graph [J]. SIAM J. Alg. Disc. Meth, 1982, 4(3): 541-550
- [4] Girvan M, Newman M E J. Community structure in social and biological networks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2001, 99: 7821-7826
- [5] Leicht E A, Newman M E J. Community structure in directed networks[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(11): 118703
- [6] Newman M E J. Modularity and community structure in networks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2006, 103(23): 8577-8582
- [7] Nicosia V, Mangioni G, Carchiolo V, et al. Extending the definition of modularity to directed graphs with overlapping communities[J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2009: 1742-5468
- [8] Chauhan S, Girvan M, Ott E. A network function-based definition of communities in complex networks[J]. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 2012, 22(3): 033129
- [9] Newman M E J. Community detection and graph partitioning [J]. Europhys. Lett., 2013, 103: 28003
- [10] Blondel V D, Guillaume J L, Lambiotte R, et al. Fast unfolding of communities in larger networks[J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2008, 10: P10008
- [11] Chen D B, Shang M S, Lv Z H, et al. Detecting overlapping communities of weighted networks via a local algorithm[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2010, 389(19): 4177-4187
- [12] Liu H T, Qin X, Yun H F, et al. A Community Detecting Algorithm in Directed Weighted Networks [J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2011, 98: 11-17
- [13] 陈端兵, 尚明生, 李霞. 重叠社区划分的两阶段策略[J]. 计算机科学, 2013, 40(1): 225-228
- [14] Newman M E J, Girvan M. Finding and evaluating community structure in networks [J]. Physical Review E, 2004, 69(2): 026113
- [15] Leskovec J, Huttenlocher D, Kleinberg J. Predicting Positive and Negative Links in Online Social Networks [C]// Proceedings of the 19th international conference on World Wide Web. ACM, 2010: 641-650
- [16] Leskovec J, Kleinberg J, Faloutsos C. Graph evolution: Densification and shrinking diameters [J]. ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data, 2007, 1(1): 2
- [17] Ripeanu M, Foster I, Iamnitchi A. Mapping the Gnutella Network: Properties of Large-Scale Peer-to-Peer Systems and Implications for System Design [J]. IEEE Internet Computing Journal, 2002, 6: 50-57
- [18] Holme P, Saramäki J. Temporal networks [J]. Physics Reports, 2012, 519: 97-125

(上接第 226 页)

均分数 (Mean Opinion Scores, MOS) 和融合图像客观评价结果都归一化到  $[0, 1]$ 。图 5 为 FVIF 客观评价结果与主观评价结果的一致性测试结果。

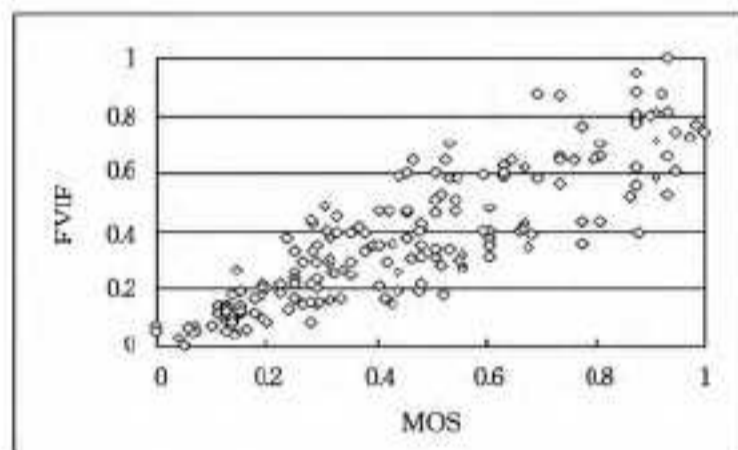


图 5 FVIF 客观评价结果与主观评价结果的一致性测试结果

分别测试各种客观评价结果与主观评价结果的线性相关系数 PLCC、均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 及斯皮尔曼等级相关系数 SRCC<sup>[9]</sup>, 如表 1 所列。

表 1 客观评价方法的性能比较

评价方法	性能参数		
	PLCC	RMSE	SRCC
$Q^{AB/F}$	0.24	0.37	0.12
FSSIM	0.31	0.32	0.48
$IE^{AB/F}$	0.42	0.29	0.51
$MI^{AB/F}$	0.08	0.58	0.01
FVIF	0.87	0.15	0.91

图 5 及表 1 中的实验数据表明, 采用 FVIF 方法的评价结果真实地反映了融合图像的视觉质量, 与主观评价的结果一致性最好。FVIF 评价方法是基于图像自然场景模型和图像信号模型, 并考虑人眼视觉失真的影响, 更能真实反映 HVS 从融合图像中提取的图像源中继承的图像信息量的大小, 而其它客观评价方法注重于评价图像源与融合图像像素灰度值或统计直方图之间的平均差异, 其评价结果有时与主观视觉质量相悖。

**结束语** 本文提出了基于视觉信息保真度的融合图像质量客观评价方法, 并构造融合图像的评价指标 FVIF, 该方法能够对融合图像的质量进行客观评价。实验表明, 该方法的评价结果与主观评价结果的基本一致, 性能优于其它评价方法。FVIF 方法对自动图像处理、实时图像处理及融合算法的评价均具有重要的实用价值。

## 参考文献

- [1] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: from error measurement to structural similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612
- [2] Xydeas C S, Petrovic V. Objective image fusion performance measure[J]. Electronics Letters, 2000, 36(4): 308-309
- [3] Li Shu-tao, Kang Xu-dong, Hu Jian-wen, et al. Image matching for fusion of multi-focus images in dynamic scenes[J]. Information Fusion, 2013, 14: 147-162
- [4] Yang C, Zhang J, Wang X, et al. A novel similarity based quality metric for image fusion[J]. Information Fusion, 2008, 9(2): 156-160
- [5] Sheikh H R, Bovik A C. Image information and visual quality [J]. IEEE Trans. Image Process., 2006, 15(2): 430-444
- [6] Wang Z, Bovik A C. A universal image quality index [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2002, 9(3): 81-83
- [7] Portilla J, Strela V, Wainwright M J, et al. Image denoising using scale mixtures of Gaussians in the wavelet domain[J]. IEEE Trans. Image Process., 2003, 12: 1338-1351
- [8] Sheikh H R, Bovik A C, de Veciana G. An Information Fidelity Criterion for Image Quality Assessment Using Natural Scene Statistics[J]. IEEE Trans. Image Process., 2005, 14(12): 2117-2128
- [9] Wang Zhou, Li Qiang. Information Content Weighting for Perceptual Image Quality Assessment[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(5): 1185-1198