

小波域结构相似度融合图像质量评价方法

张 勇^{1,2} 金伟其¹

(¹北京理工大学光电学院, 北京 100081)
(²机械技术研究所, 河北 石家庄 050000)

摘要 针对融合图像质量评价问题,分析了图像质量评价与融合图像质量评价的关系,给出了融合图像质量评价方法的一般表达公式,指出构造实际并不存在的参考图像是解决融合图像质量评价问题的关键。在此基础上,基于空域结构相似度评价方法,对输入源图像和融合图像分别进行小波分解,利用输入源图像小波分解系数构造参考图像小波系数,然后根据人眼视觉敏感度带通特性对参考图像和融合图像的各小波频带进行加权,从而得到整幅图像的小波域结构相似度评价指标,利用目标可探测性、细节可分辨能力和图像整体舒适性构成主观评价指标分别和交互信息量、基于空域的结构相似度比较。实验结果表明,相比于传统的客观评价方法,提出的方法所得结果与主观评价结果的一致性更好。

关键词 图像处理;融合;评价;小波域结构相似度;人类视觉系统

中图分类号 TP391.41 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s109007

Assessment Method of Fusion Image Quality in Wavelet Domain Structural Similarity

Zhang Yong^{1,2} Jin Weiqi²

(¹School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)
(²Mechanical Engineering Institute, Shijiazhuang, Hebei 050000, China)

Abstract For the fusion image quality evaluation, the relationship between fusion image quality assessment and image quality assessment is analyzed, and the general expression of fusion image quality assessment is provided. Meanwhile, it is explained that the key of fusion image quality assessment is to construct the reference image that is inexistent actually. Based on the above analysis and the space domain structural similarity evaluation method, wavelet decomposes input source images and fusion image respectively and structure reference image wavelet coefficient is obtained based on the wavelet decomposition coefficient of input source images. Afterwards, by weighing different levels of wavelet frequency band according to the human eye sensation characteristics, the wavelet domain structural similarity metrics to the whole fusion image are created. Comparing the mutual information and space domain structural similarity evaluation method with the subjective assessment index using target detectable ability, detail resolvable ability and whole comfortable ability as a reference, experimental results show that wavelet domain structural similarity method agrees with human visual features and its objective results. It is more consistent with the subjective assessment results than traditional methods.

Key words image processing; fusion; assessment; wavelet domain structural similarity; human visual system

OCIS codes 100.7410; 100.2000; 100.4994

1 引 言

图像融合针对单一图像来源光学系统、成像机

理、天候环境等因素限制,将不同类型传感器获取的信息进行有效综合和集成,一定程度上提高了图像

收稿日期: 2011-09-22; **收到修改稿日期**: 2011-11-04

基金项目: 总装备部基金资助课题。

作者简介: 张 勇(1974—),男,博士研究生,高级工程师,主要从事融合图像质量评价方面的研究。

E-mail: bit10701159@163.com

导师简介: 金伟其(1960—),男,博士,教授,主要从事微光与红外成像技术方面的研究。E-mail: jinwq@bit.edu.cn

承载信息量和空间分辨率。针对图像融合系统开展融合图像质量评价方法研究,不仅可比较融合算法的性能优劣,还可根据融合效果对硬件系统进行改进和完善,具有重要的参考价值^[1]。

融合图像质量客观评价方法通过数学建模对图像质量进行判断。参照图像质量评价方法,将融合图像质量评价分为无参考(NR)或盲评价方法、全参考评价方法(FR)和弱参考或减少参考(RR)评价方法^[2]。NR评价方法无需参考图像参与,但要抓住反映图像质量的最本质特征,由于现有基于自然图像的统计学模型还过于简单,构建一套通用目的的NR评价体系较为困难。FR评价方法需借助标准参考图像实施,而实际应用的融合系统常无法获得,所以此类方法研究较少(在能够获得标准参考图像的条件下,融合图像质量评价问题退化为图像质量评价问题)。RR评价方法通过计算融合图像与源图像的信息量变化或特征差异来进行评判,是解决融合图像质量评价的重要途径,常用方法有基于信息理论的评价方法^[3],基于结构相似度(SSIM)的评价方法^[4]以及基于人类视觉系统(HVS)仿生理论的评价方法^[5]等。

2 图像质量评价与融合图像质量评价

融合图像质量评价属于图像质量评价研究范畴。图像质量评价可理解为源图像经某种失真通道后降质程度的度量,而融合图像相比于源图像,常可改善视觉效果,提高图像质量,可理解为源图像经某种增强通道后像质改善程度的度量;图像质量评价的源图像为单一图像,可作为标准参考图像与失真图像进行比较,而融合图像质量评价的源图像为多幅图像,一般无标准参考图像(多聚焦融合系统除外);另外,实际应用的图像融合系统常带有明显的视觉任务或视觉目的,如同源光学传感器实现多聚焦场景理解以改善图像分辨能力^[6]、异源光学传感器实现昼夜观测以增强目标探测识别能力^[7]等。图像质量评价与融合图像质量评价的一般公式可表示为

$$\lambda = \{Q_{T(x,y)}, Q_{R(x,y)}\}_E. \quad (1)$$

针对图像质量评价, $T(x,y), R(x,y)$ 分别表示失真图像和输入图像,且有 $T(x,y) = C \cdot [R(x,y)] + n(x,y)$, C 为失真通道, n 为加性白噪声。 $Q_{T(x,y)}, Q_{R(x,y)}$ 表示以 E 为图像质量评价指标获得的失真图像质量和输入图像质量。针对融合图像质量评价, $T(x,y)$ 表示融合图像, $R(x,y)$ 为构造的实际并不存在的参考图像,融合图像与参考图像之间

也由失真通道表示,代表融合图像在不同融合策略下向参考图像逼近。根据以上分析,构造参考图像是实现融合图像质量评价的重要环节。参考图像不同于标准参考图像,它是从多幅源图像中通过一定规则提取的信息或特征的集合,且能够对每幅源图像进行充分表示。

3 小波域结构相似度评价方法

SSIM评价方法依据自然图像高度的“结构性”以及图像信号之间高度的“相关性”,通过设计和检测能典型代表图像特性的单个或多个特征参数来体现图像质量。设两幅待比较图像同一位置图像块分别为 $\{x_i | i = 1, 2, \dots, N\}, \{y_i | i = 1, 2, \dots, N\}$, 其空域内结构相似度定义为^[8]

$$S(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}, \quad (2)$$

式中 $\mu_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2, \sigma_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)$, 常数 C_1, C_2 为小的非负常量。对所有图像块评价结果求均值后可得两幅图像的平均结构相似度(MSSIM)为

$$f_{\text{MSSIM}}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_{\text{SSIM}}(x_i, y_i). \quad (3)$$

由以上过程可知,SSIM评价方法通过比较标准参考图像和失真图像的结构相似度获得客观评价结果,属于FR评价方法。将SSIM评价方法应用于融合图像质量评价,需构造实际并不存在的参考图像,在假设SSIM评价方法有效的前提下,结合(1)式,可得融合图像质量评价的一般表达式:

$$f_{\text{FMSSIM}}(f, \sum_{i=1}^N \{I_{x,i}(m, n), I_{y,i}(m, n)\}_M) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_{\text{SSIM}}(f_i, \{I_{x,i}(m, n), I_{y,i}(m, n)\}_M), \quad (4)$$

式中 f 为融合图像, $I_{x,i}(m, n), I_{y,i}(m, n)$ 为输入源图像同一位置图像块, M 为参考图像构造方法。

SSIM评价方法利用局部统计特性表征测量结构信息的改变,评价结果与人眼感知图像质量的变化非常接近,其主要原因包括三个方面:1) 全局统计图像特征常表现出明显的空间不稳定性;2) 依赖于局部统计特性的SSIM指标具有空间不变性;3) 在典型的观察距离上,仅有图像的局部区域在给定瞬间能够被观察者以高分辨率感知。然而,空域内SSIM评价方法对平移、缩放、旋转或其他类型的未

对准等几何失真具有高度敏感性,而这些失真往往由图像采集设备造成,并不是由于视觉场景中的物体结构变化所引起的。为将 SSIM 评价方法应用于实际的图像融合系统,提出小波域结构相似度评价方法,具体过程如下:在小波域内对输入源图像和融合图像分别进行小波分解,同一个小波子带下同一空间位置提取的小波系数分别为 $c_x = \{c_{x,i} \mid i = 1, 2, \dots, N\}$, $c_y = \{c_{y,i} \mid i = 1, 2, \dots, N\}$, $c_f = \{c_{f,i} \mid i = 1, 2, \dots, N\}$ 。根据前面的论述,融合图像质量评价需构造实际并不存在的参考图像,参考图像越能反映输入源图像的有效信息或典型特征,则获得的评价结果越接近人眼的主观感受。图像低频部分表征图像滤除细节后的基本信息,将其加权平均作为参考图像低频子带的小波系数,高频部分表征图像的大部分细节特征,绝对值大的小波系数对应着显著的亮度变化,选择绝对值大的小波系数作为参考图像高频子带的小波系数。参考图像低频部分 $c_{r1,i}$ 和 高频部分 $c_{r2,i}$ 的小波子带构造方法为

$$c_{r1,i} = (c_{x,i} + c_{y,i})/2, \quad (5)$$

$$c_{r2,i} = \{ |c_{x,i}|, |c_{y,i}| \}_{\max}. \quad (6)$$

利用和空域 SSIM 评价方法相似的表达式表示小波域结构相似度评价方法,则用于融合图像质量评价的小波域结构相似度评价指标为^[9]

$$\tilde{S}(c_r, c_f) = \frac{2 \left| \sum_{i=1}^N c_{r,i} c_{f,i}^* \right| + K}{\left| \sum_{i=1}^N c_{r,i} \right|^2 + \left| \sum_{i=1}^N c_{f,i} \right|^2 + K}, \quad (7)$$

式中 K 为小的非负常量, c^* 表示 c 的复共轭。

小波域结构相似度评价方法不包含对图像亮度的比较,局部图像特征的结构信息主要以相对相位形式包含在小波分解系数中,而相位平移并不改变图像局部特征的结构信息比较结果。为更好地实现评价结果的主客观一致性,引入人眼视觉敏感度带通特性,利用对比度敏感函数(CSF)表示人眼视觉

敏感度带通特性^[10],虽然不同实验获得的 CSF 形式各异,但基本上可以认为 HVS 的对比度敏感是空间频率的函数,且具有各向异性的带通滤波器性质。常用 CSF 函数表达式为

$$A(f) = 26 \times (0.192 + 0.114f) \times \exp[-(0.114f)^{11}]. \quad (8)$$

分析(8)式可知,人类视觉系统对中频区域表现出较为敏感的特性,对低频和高频区域敏感度有所下降。另外,不同频率成分对形成图像结构的贡献不同,低频部分表征图像的基本信息,高频成分形成图像的次要边缘和细节,二者对图像结构的决定作用较小,中频成分形成图像的主要边缘和细节特征,决定了图像的基本内容或基本结构,为此可利用 CSF 函数将人眼最为敏感的中频区域赋予较大权值,将低频和高频部分赋予较小权值,设定不同频段的权值为 λ_i ,则基于 HVS 特性的融合图像小波域结构相似度评价指标(DWTFMSSIM)为

$$f_{\text{DWTFMSSIM}}(c_r, c_f) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \cdot \frac{2 \left| \sum_{i=1}^N c_{r,i} c_{f,i}^* \right| + K}{\left| \sum_{i=1}^N c_{r,i} \right|^2 + \left| \sum_{i=1}^N c_{f,i} \right|^2 + K}. \quad (9)$$

4 实验分析

实验图像选自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上提供的可见光(微光)和红外图像。融合算法分别采用取大平均法(MAX)、主成分分析法(PCA)、拉普拉斯金字塔(LP)和离散小波变换(DWT)。图 1 是采用上述融合算法获得的融合图像。由 6 名观察者在相同设备和视角条件下给每幅融合图像评分,评分采用相对尺度,即由观察者将一批图像由好到坏进行分类,在视觉无法确定两幅图像质量优劣时,尽可能

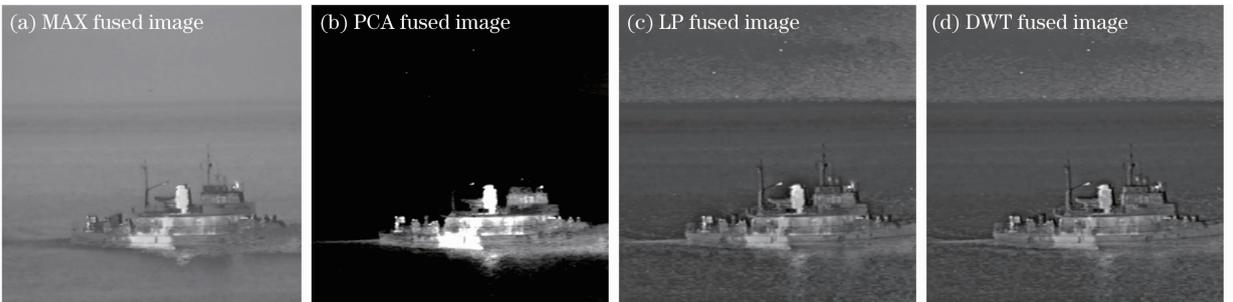


图 1 采用不同融合算法获得的融合图像

Fig. 1 Different fusion images by different fusion algorithms

采用相同分数以避免分数的不确定性。主观评价过程中要求测试者根据不同的融合图像,从“目标可探测性(TDA)”、“细节可分辨能力(DRA)”和“图像整体舒适性(WCA)”等三个方面依次给出分值^[11,12]。评价结果取三者均值(AS),评分依据见表1。

表1 相对评价尺度与分值

7	6	5	4	3	2	1
Good		Fair		Poor		

为验证文中提出方法对图像几何失真的适应能力,构造一组测试图像,将图1输入源图像中的红外图像每次向右水平平移1 pixel形成一幅新的红外图像,可见光图像保持不变(为保证输入图像尺寸相

表2 水平平移误差和评价结果

Table 2 Different horizontal translating errors and evaluation results

LP fusion algorithm								
Horizontal translating pixels	0	1	2	3	4	5	6	7
FMSSIM	0.6037	0.6036	0.6020	0.6012	0.6011	0.6014	0.6009	0.6011
DWTFMSSIM	1.9649	1.9706	1.9604	1.9667	1.9679	1.9710	1.9699	1.9622
DWT fusion algorithm								
Horizontal translating pixels	0	1	2	3	4	5	6	7
FMSSIM	0.6131	0.6129	0.6112	0.6103	0.6094	0.6098	0.6090	0.6084
DWTFMSSIM	1.9982	2.0064	1.9962	1.9939	1.9951	1.9901	1.9887	1.9944

由表2可知,FMSSIM指标对于水平平移引入的配准误差呈轻微下降趋势,而DWTFMSSIM指标基本保持了评价结果的稳定性。选择水平平移误差验证FMSSIM、DWTFMSSIM指标的主要思路是,实际应用的图像融合系统,多源传感器之间的旋转、缩放畸变可通过系统调整得到解决,而采用共光轴光学系统的图像融合系统,其图像之间的平移误

等,图像进行了相应裁剪),利用LP、DWT融合算法获得了8幅在不同平移距离上的融合图像。利用FMSSIM、DWTFMSSIM指标对其进行评价,结果见表2。FMSSIM利用图像块标准差作为选择参考图像对应位置图像块的判据^[13],即如果输入图像A图像块a的标准差大于输入图像B对应位置图像块b的标准差,选择a作为参考图像块,反之选择b。DWTFMSSIM利用sym8小波对输入源图像和融合图像进行5层分解得到6个频带,用LL表示最低频带,H1、H2、H3、H4、H5表示各分解级的高频带,取各频带内CSF曲线的平均值,即 $\lambda_i = [1.79, 2.35, 2.87, 3.16, 2.56, 1.00]$ ^[14]。

差属于不可避免的系统误差。图2为采用不同融合算法获得的融合图像,表3是针对图2进行的交互信息量(MI)、FMSSIM、DWTFMSSIM评价指标与主观评价结果比较。表4是针对图1的测试结果,其中MI又称互信息,是两个变量之间相关性的度量,或为一个变量包含另一个变量信息量的度量。

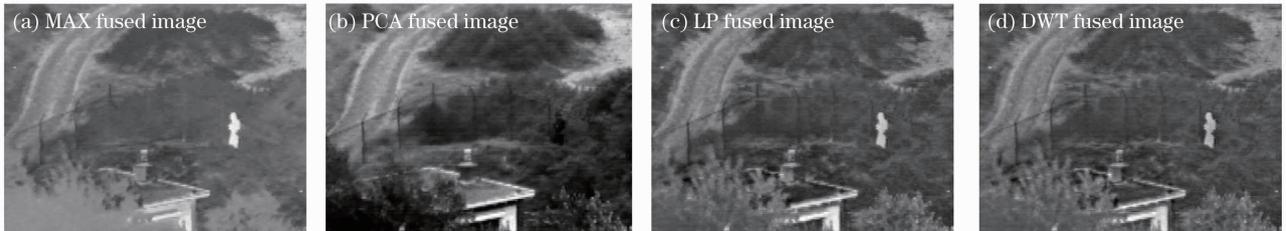


图2 采用不同融合算法获得的融合图像

Fig. 2 Different fusion images by different fusion algorithms

表3 针对图2的主观评价与客观评价结果比较

Table 3 Comparisons of subjective evaluation to objective evaluation results for Fig. 2

	MI	FMSSIM	DWTFMSSIM	TDA	DRA	WCA	AS
MAX	6.4859	0.7489	1.7524	8.2	5.1	5.5	6.3
PCA	4.3077	0.2399	1.7357	2.4	4.5	3.4	3.4
LP	1.5086	0.6930	1.9083	6.5	7.2	7.4	7.0
DWT	1.4929	0.7029	1.8888	6.3	8.6	7.1	7.3

表 4 针对图 1 的主观评价与客观评价结果比较

Table 4 Comparison of subjective evaluation to objective evaluation results for Fig. 1

	MI	FMSSIM	DWTFMSSIM	TDA	DRA	WCA	AS
MAX	6.4173	0.3544	1.6266	7.2	4.5	6.5	6.1
PCA	1.6332	0.1282	0.4167	4.3	3.1	3.2	3.5
LP	2.1948	0.5858	1.9575	8.2	8.7	6.4	7.8
DWT	2.2754	0.5798	1.9506	8.9	8.8	6.9	8.2

分析上述图表可知,MI 指标评价结果与主观评价结果存在较大差异,虽然基于信息理论的评价方法克服了全像素统计理论主观赋权的局限性,但受自然图像内容复杂性和承载信息多样性限制,图像信息量变化能否真正反映人眼对图像的理解程度还需进一步研究。而 FMSSIM 和 DWTFMSSIM 指标展示了与主观评价较好的一致性。其主要原因是,FMSSIM 在构造参考图像时,利用了标准差作为选择参考图像块的依据,标准差反映图像灰度相对于灰度均值的离散情况,一定程度上反映了图像的反差大小和活跃程度,说明基于标准差构造的参考图像较好地反映了图像源的重要特征;而 DWTFMSSIM 是在空域 SSIM 评价方法上演变而来的,评价结果在理论依据上与 FMSSIM 具有一致性,同时结合了 HVS 特性,因此和主观评价结果拟合性较好。

5 结 论

将结构相似度评价方法应用于小波域,通过构造参考图像并进行小波分解,构建了基于人类视觉系统的融合图像质量小波域结构相似度评价指标,实验结果验证了该方法具有和主观评价结果较好的一致性。应该说明的是,融合图像质量评价虽然属于图像质量评价研究范畴,但相比于图像质量评价,构建通用、高效、客观的融合图像质量评价指标存在很大难度,原因包括对人眼生理特性和心理特性建模的局限性,也包括实际应用的融合系统往往带有明显的视觉任务或视觉目的,如何将明显的主观目的引入到客观评价指标中,还要对不同应用条件下的实际图像融合系统进行充分分析。考虑到考核融合图像质量客观评价指标的重要依据是主客观一致性,因此下一步应重点开展以下研究:1) 多种评价指标的综合利用;2) 由单纯的客观评价方法向主客观结合的评价方法转变;3) 构建面向具体任务的融合图像评价指标。

参 考 文 献

- 1 V. Petrović. Subjective tests for image fusion evaluation and objective metric validation[J]. *Information Fusion*, 2007, **8**(2): 208~216
- 2 Zhou Wang, Hamid R. Sheikh, Alan C. Bovik. No-reference perceptual quality assessment of JPEG compressed images[C]. *IEEE International Conference on Image Processing*, 2002, **1**: I-477~I-480
- 3 Qu Guihong, Zhang Dali, Yan Pingfan. Information measure for performance of image fusion[J]. *Electron. Lett.*, 2002, **38**(7): 313~315
- 4 Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh *et al.*. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, **13**(4): 600~612
- 5 Chris Howell, Richard Moore, Stephen Burks *et al.*. An evaluation of fusion algorithms using image fusion metrics and human identification performance [C]. *SPIE*, 2007, **6543**: 65430V
- 6 Pan Quan, Yu Ting, Cheng Yongmei *et al.*. Essential methods and progress of information fusion theory[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2003, **29**(4): 599~615
潘 泉, 于 听, 程咏梅 等. 信息融合理论的基本方法与进展 [J]. *自动化学报*, 2003, **29**(4): 599~615
- 7 A. Toet, J. K. I. Jspeert, A. M. Waxman *et al.*. Fusion of visible and thermal imagery improves situational awareness[J]. *Displays*, 1998, **18**(2): 85~95
- 8 A. Rehman, Z. Wang. Reduced-reference SSIM estimation[C]. *IEEE International Conference on Image Processing*, 2010, 289~292
- 9 Zhou Wang, Eero P. Simoncelli. Translation insensitive image similarity in complex wavelet domain [C]. *IEEE International Conference on Image Processing*, 2005, II-573~II 576
- 10 A. P. Beegan. Wavelet-Based Image Compression Using Human Visual System Models [M]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University Press, 2001. 162~165
- 11 Ken Sagawa. Visual comfort to colored images evaluated by satuation distribution [J]. *Col. Res. Appl.*, 1999, **24**(5): 313~321
- 12 Shi Junsheng, Jin Weiqi, Wang Lingxue. Study on perceptual evaluation of fused image quality for color night vision[J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*, 2005, **24**(3): 236~240
石俊生, 金伟其, 王岭雪. 视觉评价夜视彩色融合图像质量的实验研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2005, **24**(3): 236~240
- 13 G. Piella. A general framework for multi-resolution image fusion: from pixels to regions[J]. *Information Fusion*, 2003, **4**(4): 259~280
- 14 Ding Xuxing, Zhu Rihong, Li Jianxin. A criterion of image quality assessment based on property of HVS[J]. *J. Image and Graphics*, 2004, **9**(2): 190~194
丁绪星, 朱日宏, 李建欣. 一种基于人眼视觉特性的图像质量评价[J]. *中国图象图形学报*, 2004, **9**(2): 190~194

栏目编辑:马 沂