

- 937-946.
- [8] ZHANG Y. Texture-integrated classification of urban treed areas in high-resolution color-infrared imagery [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2001, 67(12):1359-1365.
- [9] WANG R S, HU Yong, ZHANG X M. Extraction of road networks using pan-sharpened multispectral and panchromatic quickbird images [J]. *Geomatica*, 2005, 59(3):263-273.
- [10] SHI W Z, MIAO Z L, DEBAYLE J. An integrated method for urban main-road centerline extraction from optical remotely sensed imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 52(6):3359-3372.
- [11] CHAUDHURI D, MURHTY C A, CHAUDHURI B B. A modified metric to compute distance [J]. *Pattern Recognition*, 1992, 25(7):667-677.
- [12] 雷小奇, 王卫星, 赖均. 一种基于形状特征进行高分辨率遥感影像道路提取方法 [J]. *测绘学报*, 2009, 38(5):457-465.
- LEI X Q, WANG W X, LAI J. A method of road extraction from high-resolution remote sensing images based on shape features [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, 38(5):457-465. (in Chinese)
- [13] MIAO Z L, SHI W Z, ZHANG H, et al. Road centerline extraction from high-resolution imagery based on shape features and multivariate adaptive regression splines [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(3):583-587.

作者简介:



孙可(1979—),男,山东滕州人,博士研究生,副编审,2010年于沈阳师范大学获得硕士学位,主要进行高分辨率遥感影像信息提取的研究。E-mail: 13B905034@hit.edu.cn

导师简介:



张钧萍(1970—),女,黑龙江哈尔滨人,哈尔滨工业大学信号与信息处理学科教授,博士生导师,IEEE会员,中国图象图形学会会员,主要从事遥感影像处理的研究。E-mail: zhangjp@hit.edu.cn

文章编号 1004-924X(2015)增-0516-07

基于局部方差和互信息的融合图像质量评价

王宇庆*

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘要:图像融合不仅涉及信息的量化传递,还要考虑传递信息的类型是否符合人眼视觉特性。为了能够正确评价融合图像中人眼敏感信息的增量,本文设计了一种基于局部方差和奇异值分解的融合图像客观评价方法。将局部方差用于表示图像的结构信息;考虑到局部方差对于图像的细节信息过于敏感,用奇异值分解的方法来得到能够表示局部方差分布的能量矩阵;用互信息的方法度量源图像与融合图像能量矩阵的结构差异。最后,将比较结果作为融合图像算法的质量评价结果。实验结果表明,该方法对融合图像的质量评价结果与人眼视觉特性的一致程度以及算法的稳定性都要高于传统方法,两组典型实验中对于小波和金字塔等性能较优的融合方法的评价结果为 2.879 0 和 1.922 5 以及 2.629 8 和 1.910 3,均优于传统融合评价算法。

关键词:图像融合;质量评价;局部方差;奇异值分解

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152313.0516

收稿日期:2015-05-18;修订日期:2015-06-22.

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 61201368)

Fusion image assessment based on local variance and singular value decomposition

WANG Yu-qing*

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: wyq7903@163.com

Abstract: Image fusion is not only relative to the transfer of quantized information, but also should take if the information transfer can be accepted by human vision into account. Therefore, this paper designs a fusion image objective assessment method based on local variance and singular value decomposition to combine various human visual system sensitive information into an image. In order to assess the improvement of information, the local variance was used to describe the structure information of the image. As the local variance was sensitive to image details greatly, the singular value decomposition was used to obtain a energy matrix to display the local variance distribution. Then the mutual information was taken to measure the structure difference of source image and fusion image. Finally, the comparison above mentioned was taken as the assessment results. Experiment results show that the proposed method gives the best performance for the wavelet and pyramid methods, and the assessment results are 2.879 0, 1.922 5 and 2.629 8, 1.910 3, respectively, which has better consistency as compared with those of traditional human visual systems.

Key words: image fusion; quality assessment; local variance; singular value decomposition

1 引言

无论在信息融合领域还是在图像处理领域,图像融合都是一个重要的分支。图像融合的基本过程是综合利用多个传感器输出的图像信息,采用光学或者图像处理方法获得单一的输出图像。图像融合并不是简单地将输入图像信息进行合并处理,而是要使融合图像的信息量较源图相比有一定程度的增加。图像信息的最终接收者是人眼以及相应的脑神经系统,故高质量图像的基本要求是满足人眼的视觉特性。图像融合技术研究和应用的最基本问题是利用输出融合图像的质量评价相应融合过程的合理性,即融合图像的质量评价问题。

目前流行的融合图像质量评价方法都是以信息论中的信息传递为基本理论,将图像融合的物理过程理解为一般意义上的信息传递过程,从信息论的角度通过评价输出融合图像信息量的大小来评价融合过程以及相应融合算法的优劣^[1-2]。实际上,人眼对于图像质量的感知是一个下意识的过程,该过程本身是在自组织行为的主导下完

成的,目前还没有一个明确的数学模型可以描述这个过程的基本原理。采用简单的信息论方法描述图像融和过程虽然易于实施和解释,但是并不能完整地描述人眼的视觉感知过程,不是一种完善的图像质量评价机制。在对目前已有的融合图像质量评价方法优缺点进行全面深入分析和研究的基础上,本文设计了一种基于局部方差和奇异值分解的融合图像客观评价方法。利用局部方差分布能够详细描述图像细节信息的特点,将融合图像质量评价的信息论方法与奇异值分解以及图像的局部方差分布结合,同时也深入研究了图像局部方差分布和互信息的特点,设计了相应的图像结构信息传递局部方差表示和相应的奇异值分解方法,从而使得传递的信息量中人眼敏感的成分增加。

2 信息论在融合图像质量评价中的应用

和一般的图像质量评价方法不同,融合图像质量评价的最终目的并不仅仅是评价输出图像质

量的优劣,而是在保证良好视觉效果的前提下对传递信息量的数量进行评价。基本过程如图 1 所示。

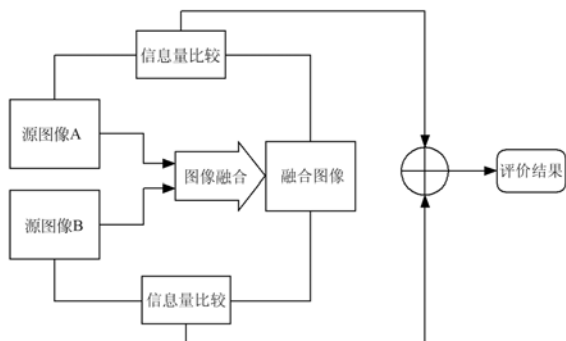


图 1 融合图像的质量评价过程

Fig.1 Quality assessment of fusion image

信息论中信息熵的概念是融合图像质量评价中最常用到的概念,也是重要的基本理论之一。信息熵的概念最早由现代信息论的创始人香农于 1948 年提出,即平均信息量与统计热力学的熵具有相同的数学概率表达式,也就是可以将平均信息量定义为信息熵。在图像处理技术中,如果不考虑人眼视觉特性的重要作用,可以直接应用信息熵的概念。对于输入的测试灰度图像 I 来说,可以认为该灰度图像中各像素的灰度值是样本,而且可以假设这些样本都是相互独立的,从而可以得到该灰度图像 I 的直方图分布为 $P = \{p_0, p_1, \dots, p_{L-1}\}$,其中, P_i 为灰度图像矩阵中灰度值等于 i 的图像像素数的总和。将上述灰度图像直方图进行归一化处理,可以得到每一坐标点上表示的像素数的总和与图像总像素数的比值,这里表示为 $P = \{p'_0, p'_1, \dots, p'_{L-1}\}$ 。图像融合要综合利用多个传感器信息。因此,和融合前的源图像相比,理论上,融合后的图像内容应该更加丰富,像素分布表示的图像结构信息应该更加复杂。由上面的分析可以将一幅灰度图像的信息熵定义为:

$$E = \sum_{i=0}^{L-1} p'_i \log_2 p'_i. \quad (1)$$

从信息论的角度分析可知,如果融合图像具有较大的信息熵,则代表该算法实现了较好的融合效果。

融合图像的信息量增加是相对于输入源图像而言的,因此,信息量的增量要有直接比较的相关

对象。融合图像的质量评价是评价融合算法性能的过程,而不是仅仅评价输出图像的视觉效果。相对熵(也叫交叉熵)就是通过反映两图像灰度分布差异对二者信息传递量进行度量的一种融合图像评价指标。对于两源图像 I 和 J ,首先需要计算其归一化后的灰度直方图 $P = \{p'_0, p'_1, \dots, p'_{L-1}\}$ 以及 $Q = \{q'_0, q'_1, \dots, q'_{L-1}\}$,这里把相对熵定义为:

$$D = \sum_{i=0}^{L-1} p'_i \log_2 \frac{p'_i}{q'_i}. \quad (2)$$

对于输入源图像 I 和 J 以及融合后的输出图像 M ,基于相对熵融合算法的评价指标可以描述为:

$$D_{MJ} = \frac{D_{IM} + D_{JM}}{2}. \quad (3)$$

相对熵越小,说明相应的融合算法在融合过程中传递给融合图像的信息量越大,融合效果越好。但是值得注意的是,上述概念完全是基于信息论的基本理论,其图像的接收者为人眼。在融合图像质量评价领域,另外一种真正得到广泛应用的评价指标是互信息。对于两输入的源图像 A 和 B ,输出的融合图像 F 与 A 和 B 之间的互信息可以描述为^[2]:

$$MI_{FA} = \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{i=0}^{L-1} p_{FA}(k, i) \log_2 \frac{p_{FA}(k, i)}{p_F(k) p_A(i)}$$

$$MI_{FB} = \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} p_{FB}(k, j) \log_2 \frac{p_{FB}(k, j)}{p_F(k) p_B(j)}. \quad (4)$$

互信息的评价方法更加完善,同样,在公式(1)中, p_A , p_B 和 p_F 分别是输入灰度图像矩阵 A 、 B 和 F 的直方图分布,而 $p_{FA}(k, i)$ 和 $p_{FB}(k, j)$ 分别代表两组灰度图像矩阵的归一化联合灰度直方图分布。通常的做法是计算交互信息量之和,即将 MI_{FA} 和 MI_{FB} 之和作为融合图像质量的评价结果,即:

$$MI_F^{AB} = MI_{FA} + MI_{FB}. \quad (5)$$

从信息论的角度分析融合过程,评价信息融合算法效果的一个重要指标是融合过程中传递信息量的大小。前面分析的互信息是信息论中的一个重要概念和理论基础,可以将其作为两个变量之间相关性的量度,或者一个变量对另一个变量包含程度的量度,可以用其更合理地评价融合图像的质量。

3 局部方差分布与融合图像质量评价

图像质量评价的最终目的是评价图像中人眼敏感图像信息的类型、数量以及质量是否满足人眼视觉特性的需要。公式(1)、公式(3)以及公式(5)都没有考虑人眼视觉特性的需要,片面而单一地认为图像的像素信息代表了图像的全部内容。实际上,人眼对于图像信息的感知并不时逐点逐像素进行的,其是一个下意识的过程,过程本身并没有集中的协调者和控制者。对于图像质量的评价,无论是主观评价还是客观评价,都需要考虑图像中人眼敏感结构信息的变化程度对于图像质量的影响。图像是以结构为单位被人眼感知的,图像结构是人眼感知图像信息的重要单元。对于图像结构的描述,像素是最基本的单元,但是像素信息有各种不同的分布,例如局部方差、梯度等。文献[3]认为,图像的局部方差分布能够较好地描述灰度图像的结构信息,尤其是图像中人眼敏感的细节信息。根据文献[4]知,图像的局部方差可以表示为:

$$\text{Var}(I_{i,j}) = \frac{1}{L} \sum_{p=1}^L (\eta_p - \bar{I}_{i,j})^2, \quad (6)$$

式中: $\bar{I}_{i,j} = \frac{1}{L} \sum_{p=1}^L \eta_p$, 图像分块 $I_{i,j}$ 的内部像素为 η_p , 共 L 个像素。根据文献[4]的研究有,实际应用中还需要计算每一分块的加权值,将公式(6)修改为:

$$\text{Var}(I_{i,j}) = \frac{\sum_{p=1}^L \omega_p (\eta_p - \bar{I}_{i,j})^2}{\sum_{p=1}^L \omega_p}, \quad (7)$$

其中: $\bar{I}_{i,j} = \frac{\sum_{p=1}^L \omega_p \eta_p}{\sum_{p=1}^L \omega_p}$, ω_p 为加权系数。

但是文献[3]也认为,图像的局部方差对于图像结构信息的描述并不全面,为了平衡局部方差中的图像细节信息与未知图像结构信息,采用奇异值分解方法分析局部方差矩阵的能量信息,从而获取图像结构信息的特征值矩阵。根据矩阵论的基本理论可知,对于任意一个秩为 r 的实数矩阵 $\mathbf{A} \in H^{N \times M}$, 必存在两个酉矩阵 \mathbf{U}, \mathbf{V} , 使得:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Sigma}_r & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{V}^H,$$

式中: 符号“ H ”表示共轭转置; 此外, $\boldsymbol{\Sigma}_r = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r)$, $\sigma_i (1 \leq i \leq r)$ 为实数, 称之为 \mathbf{A} 的奇异值, \mathbf{U}, \mathbf{V} 分别被称为矩阵 \mathbf{A} 的左、右奇异值矩阵。

这里, 设 $\mathbf{x} = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r, 0, \dots, 0)^T$, 则称 \mathbf{x} 为矩阵 \mathbf{A} 的奇异值特征向量。在完成局部方差矩阵的计算后, 采用文献[4]的方法对源图像 \mathbf{A}, \mathbf{B} (或者其亮度分量) 以及输出的灰度融合图像 \mathbf{M} 的局部方差矩阵进行分块处理, 对于每一分块进行奇异值分解, 从而得到相应的奇异值特征矩阵。然后采用公式(5)评价输出融合图像与输入的融合图像之间以及局部方差矩阵的互信息(Local Variance Based Singular Value Decomposition, LVSVD)。具体算法的流程图如下。

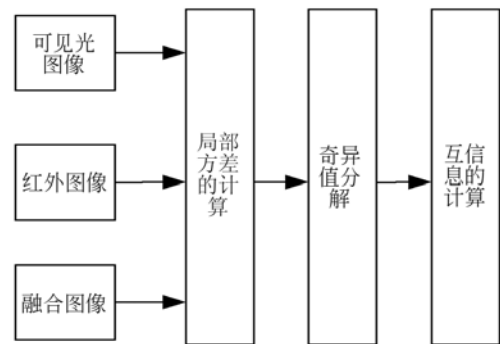


图 2 算法流程图

Fig. 2 Framework of proposed method

4 实验结果

为了验证本文所提算法性能, 采用已配准的标准的融合图像进行验证。目前关于融合图像质量评价, 还没有大规模的验证数据库, 这主要因为

融合图像的质量评价并非仅仅评价图像的主观视觉质量,还需要考虑图像的信息传递数量。采用大规模的主观观测实验难度极大,因为人眼在下意识的情况下只能首先判断图像视觉质量的优劣,对于感知结果的量化则需要较长时间的主观分析和判断才能实现,因此,从视觉感知的角度分析融合图像的质量很难准确判断出图像的信息传递数量。

为了使得研究更有代表性,本文的实验对象主要针对红外图像和可见光融合图像。因此,实验中采用目前在图像融合领域普遍采用的 OCTEC 实验室的红外和可见光实验图像验证本文所提出的融合图像评价算法的性能。该实验室提供的全系列的融合图像和源图像已经在拍摄过程中进

量的合处合质能,主观是性能的一致,为了使实验结果尽可能清晰明

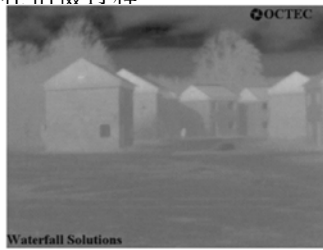
确,中采算法方法提供的实验应的

研究和验证所提算法的性能,在融合图像的质量评价过程中同样也采用了多种方法,例如传统的互信息方法以及文献 [1] 的融合评价方法。各种实给出

对于的方大部文方色图持颜色空法结



(a) 可见光源图像
(a) Visible Source image



(b) 红外源图像
(b) IR source image



(c) 采用均值方法得到的融合图像
(c) Average method



(d) 采用PCA方法得到的融合图像
(d) PCA method



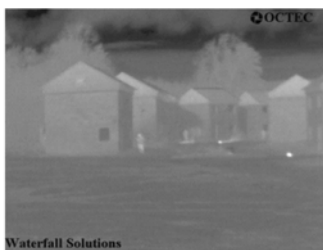
(e) 采用金字塔方法得到的融合图像
(e) Pyramid method



(f) 采用小波方法得到的融合图像
(f) DWT method



(a) 可见光源图像
(a) Visible Source image



(b) 红外源图像
(b) IR source image



(c) 采用均值方法得到的融合图像
(c) Average method



(d) 采用PCA方法得到的融合图像
(d) PCA method



(e) 采用金字塔方法得到的融合图像
(e) Pyramid method



(f) 采用小波方法得到的融合图像
(f) DWT method

表 1 评价结果比较

Tab.1 Comparison of fusion results

图 3(e)	图 3(f)	图 4(c)	图 4(d)	图 4(e)	图 4(f)	图 5(c)	图 5(d)	图 5(e)
0.653 6	0.625 7	0.439 4	0.614 9	0.509 3	0.481 1	0.365 9	0.512 7	0
2.608 2	2.542 1	2.390 3	6.905 1	2.247 0	2.296 4	1.375 5	4.053 9	1
2.629 8	2.879 0	1.784 6	1.763 3	1.910 3	1.922 5	1.037 7	1.389 9	2

结果与融合图像质量的变化趋势与互信息方法是一致的。每一组测试图像均由可见光图像和红外图像组成,如图 3~5 所示,共 3 组图像,其中 2 组来源于 Octec 数据库,另外 1 组为经典的 CAMP 灰度图像。

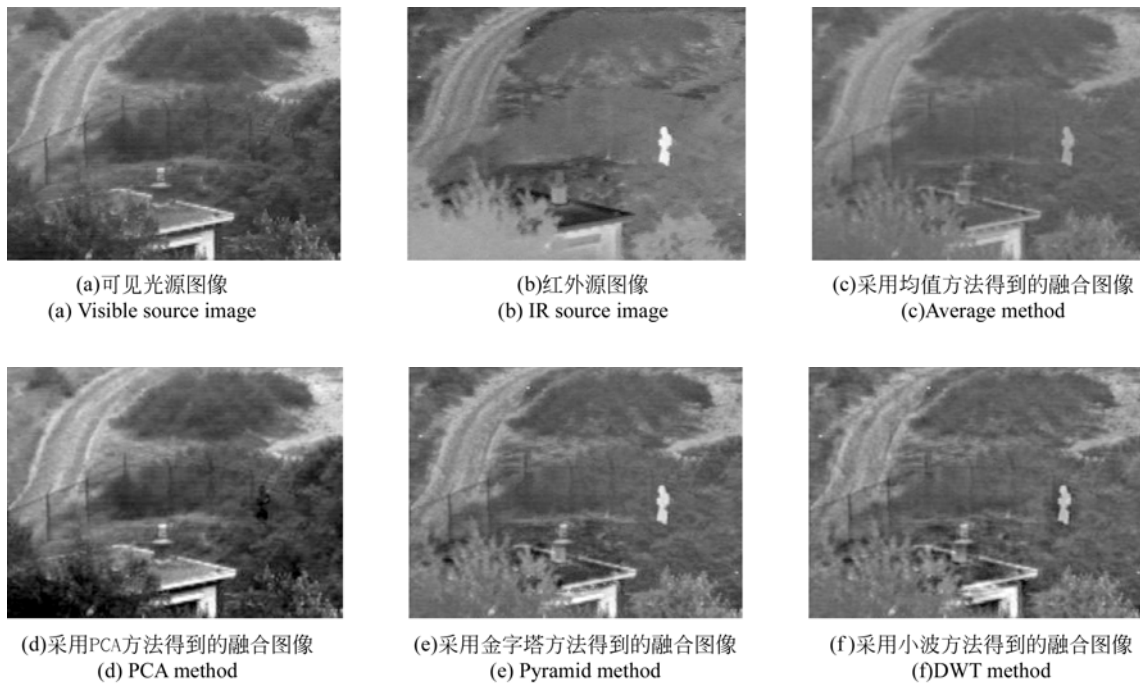


图 5 用于测试的融合图像 3

Fig. 5 Fusion image 3 for test

对于图像融合质量评价的研究,难点在于研究过程既不能像无参考图像质量评价那样完全依靠与 HVS(Human Visual System)的一致程度进行评价,也不能采用类似于全参考图像质量评价中对两图像直接进行比较的方法。原因在于,融合图像质量评价需要考虑多方面因素,除了传递信息的类型外,还要考虑信息量的数量,在此基础上,还要结合人眼视觉特性研究传递到终端的融合图像是否符合人眼视觉特性,即,所传递的信息对于人眼来说是否为可以感知的有意义信息。这是一个验证主观感知与信息量化传递之间匹配关系的复杂问题。从视觉感知的角度来讲,实验都是有局限性的,数据的规模与实验结果的可靠性之间有着直接关系。在本文的实验中,采用的 4 种融合算法具有明显的视觉可区分度,无论从算法的原理还是从融合效果都可以明显区分相关算法的优劣。更重要的是,从融合图像的视觉效果也可以看到各种算法之间的区别。

研究融合质量评价的难点之一是没有类似于 LIVE 的大规模融合图像数据库^[5]用于验证。在本文的实验中,4 种常见融合方法的效果有明显差别,这些差别不仅体现在相应算法的理论框架方面,也体现在具体的融合效果方面。理论结构

的先进性一般认为小波方法和金字塔方法对图像进行了多层分解,其效果应该最好,而 PCA 方法和均值方法的算法简单,仅仅是信息论的基本方法,因此其融合效果应该相对较差。图 2 和图 3 的实验图像中的结果与上述分析一致。

小波和金字塔方法对图像进行了多层次分解,在融合过程中对不同的分量采用了不同的融合系数,其过程与人眼的视觉感知过程有类似的环节,从主观感觉看,融合图像的细节也比较丰富。二者相比而言,小波分解的方法效果更好,原因在于其考虑了多分辨率的特性,同时结合了统计学的基本理论。实际上,根据人眼的主观观测也可以得到同样结果,采用小波方法得到的融合图像(图 3(f),图 4(f)以及图 5(f))的融合效果最好。基于基本的统计学方法得到的融合图像,例如 PCA 方法和均值方法是从信息论的角度对图像的信息传递过程进行分析和重构,融合效果并不理想。特别需要注意的是由 PCA 方法得到的图 3(f)、图 4(f)以及图 5(f)几乎没有从原图像中传递任何有意义的信息。

在图像质量评价的研究中^[6-7]量化评价对于分析比较算法的具体性能具有重要意义。由表 1 的量化评价结果可见,小波方法和金字塔方法的

融合效果好于其它方法。但是这与互信息等传统方法给出的评价结果并不一致。例如,对于融合效果较差的 PCA 方法以及均值方法,互信息和文献[1]的融合评价方法却给出了较好的评价结果,这显然与主观观测以及前面的分析不符。但是本文提出的 LVSVD 方法却对上述方法给出了合理的排序,这与人眼的主观观测结果也是一致的。

5 结 论

融合图像的质量评价既要考虑信息传递的数量也要考虑所传递信息对于人眼视觉特性的意

义。在本文的研究中,将能够反应图像细节信息的局部方差作为研究对象,分析其信息分布特点,采用奇异值分解方法提取局部方差矩阵的能量信息,最后采用互信息的结构框架得到了融合图像中的传递信息量。实验结果表明,所提方法可以较好地评价图像中的信息增量的数量和类型,敏感信息与人眼的视觉特性有良好的一致性。

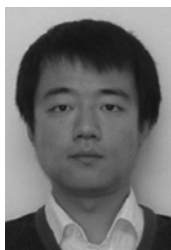
6 致 谢

向提供红外与可见光源图像(图 3(a),3(b),4(a),4(b))的 Octec 公司表示感谢!

参考文献:

- [1] XYDAES C, PETROVI V. Objective image fusion performance measure [J]. *Electronic Letters*, 2000, 36(4): 308-309.
- [2] QU G H, ZHANG D L, YAN P F. Information measure for performance of image fusion[J]. *Electronics Letters*, 2002, 37(7): 313-315.
- [3] SANTIAGO A F, SAN J E. Image quality assessment based on local variance [C]. *IEEE Int Conf. Engineering in Medicine and Biology Society, New York*, 2006: 4815-4818.
- [4] ZHOU W, BOVIC A C, SHEIKH H R, et al.. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.
- [5] SHEIKH H R, ZHOU W, CORMACK L, et al.. LIVE image quality assessment database release 2 [OL]. <http://live.ece.utexas.edu/research/quality>.
- [6] 范媛媛,沈湘衡,桑英军. 基于对比度敏感度的无参考图像清晰度评价[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(10): 2485-2493.
- FAN Y Y, SHEN X H, SANG Y J. No reference image sharpness assessment based on contrast sensitivity[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2485-2493. (in Chinese)
- [7] 袁飞,黄联芬,姚彦. 基于视觉掩盖效应和奇异值分解的图像质量评测方法[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(4): 706-713.
- YUAN F, HUANG L F, YAO Y. Image quality evaluation based on visual masking effect and singular value decomposition [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4): 706-713. (in Chinese)

作者简介:



王宇庆(1979—),男,吉林长春人,副研究员,2002年、2005年于吉林大学通信工程学院分别获得学士、硕士学位,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得光学工程专业博士学位,2008-2010年在中国科学院长春光学精密机械与物理研究所机械工程博士后流动站工作,主要研究方向:图像融合,图像质量评价,图像增强。
E-mail: wyq7903@163.com