

基于HVS的小波图像融合新算法

周礼^{1),(2)} 王章野¹⁾ 金剑秋^{1),(2)} 彭群生^{1),(2)}

¹⁾(浙江大学CAD&CG国家重点实验室,杭州 310027) ²⁾(浙江大学数学系,杭州 310027)

摘要 目前的大多数基于小波变换的图像融合算法,由于并没有细致考虑人眼的视觉特性,因而得到的融合效果有时并不理想。为了提高图像的融合效果,提出了一种新的基于人类视觉系统(HVS)的小波图像融合新算法。该算法充分考虑了人类视觉系统的特点,首先在多尺度小波分解的基础上,计算出每层每个像素邻域的纹理和边缘亮度相关量;然后自适应地求得加权融合系数;最后采用多层次迭代法来产生融合图像。实验结果表明,该算法不仅能使图像融合结果有较大的改善,而且有利于人眼对目标的探测和识别。

关键词 图像融合 HVS 小波变换 加权融合 多层次迭代融合

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)09-1088-07

A New Wavelet Image Fusion Algorithm Based on Human Visual System

ZHOU Li^{1),(2)}, WANG Zhang-ye¹⁾, JIN Jian-qiu^{1),(2)}, PENG Qun-sheng^{1),(2)}

¹⁾(State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

²⁾(Department of Mathematics, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract Most of current algorithms of image fusion are based on wavelet transform and the visual characteristics of eyes of human being are not sufficiently taken into account, thus failing to get perfect fusion effect in some circumstances. In this paper, we propose a new wavelet image fusion algorithm based on human visual system. In our algorithm we fully considers the characteristics of human visual system and calculate the relative terms of neighbor region's texture and edge luminance of each pixel at each level to adaptively acquire the weighted fusing coefficients. By using the method of multi-level iterative fusion, improved fused images are thus generated. Experiments show that our algorithm can achieve quite better fusion effect and is advantageous for human eye to detect and recognize targets.

Keywords image fusion, human visual system(HVS), wavelet transform, weighted fusing, multi-level iterative fusion

1 引言

近年来,图像融合(image fusion)技术得到迅速发展,在遥感探测、安全导航、医学图像分析、反恐检查、环境保护、交通监测、清晰图像重建、灾情检测与预报等领域^[1~3]都有着重大的应用价值。

图像融合是用特定的算法将两幅或多幅图像合成一幅新的图像。融合结果由于能利用两幅(或多

幅)图像在时空上的相关性及信息上的互补性,并使融合后得到的图像对场景有更全面、清晰的描述,从而更有利于人眼的识别和机器的自动探测。

用于融合的源图像可以是来自同一探测器(或称传感器)的同一波段图像,如同一可见光相机对同一场景不同部位聚焦所拍得的两幅照片,或者是同一场景不同时间序列的多幅图像等;或者是来自同一探测器的不同波段图像,如遥感探测分析中常用的多波段高光谱图像;也可以是不同探测器获得的同一场景的

多幅图像,如由不同探测器对同一场景摄得的可见光、红外不同波段及毫米波等多波段图像,或常用于医学诊断的同一患病部位的CT和MRI图像等。

小波变换是20世纪80年代后期快速发展起来的数学分支,而把小波变换理论引入工程应用,特别是信号处理领域,并起着重大作用的,则是以Mallat等为代表的法国学者^[4,5],目前小波方法已是图像处理各领域广为流行的有效算法。由于小波变换具有多尺度分析的特点,在时频两域都有表征信号局部特征的能力,因此被誉为信号分析处理的“数学放大镜”。小波变换方法在图像融合处理中也发挥出很大的作用。

小波融合方法的基本思想是先利用小波变换来得到图像的多尺度表示,然后在不同尺度上分别实施融合,其最一般的方法是选择绝对值大的小波系数作为融合图像的小波系数。Li等采用小波变换来处理多探测器图像之间的融合^[6];Burt等在用小波变换进行图像融合处理时,采用加权平均的方法来处理两幅图像的融合系数^[7],但其表达式较为简单;Zhang等将像素领域的绝对值之和作为活动尺度标准来融合图像^[8];Wang等则采用了以下的方法,即首先对小波多尺度分解后的低频频带做平均处理,然后统计高频部分每个像素邻域的差分,最后选择具有较大差分值的像素作为融合像素^[9]。

上述方法都是基于这样的假设,即图像中的特征都表现在小波系数绝对值大的地方,但这种假设在有的场合并不正确,而且会削弱某些目标物体的频谱特征而导致图像局部出现毛刺的现象,也破坏了融合图像的连续性;而在另一些情形下,由于多光谱源图像中的目标光谱特性在融合图像中并不够突出,从而影响了目标的探测和识别。文献^[10]研究表明,随着小波分解尺度的增大,由小波变换方法得到的融合图像会出现明显的方块效应,同时随着尺度的增大,融合图像的光谱谱信息也出现损失。当小波分解尺度达到最大时,虽然方块效应消失了,但融合图像的光谱谱信息的损失亦达最大,并从理论上证明分析了这些现象存在的原因。

人类视觉系统(human vision system,简称HVS)是用来研究人类视觉系统特性的理论。它专门研究人眼的视觉特性。对于图像处理领域而言,主要是研究人眼对图像的何种特征区域比较敏感(或不敏感)、比较感兴趣(或不感兴趣)。它在图像压缩编码、数字水印等领域^[11~13]有着出色的应用。其中

文献^[11]还利用小波分解对图像的HVS特性进行了量化估计。

但是,将HVS理论应用于图像融合的研究工作,至今很少见报道。本文提出了一种新的基于人类视觉系统(HVS)的小波图像融合新算法。该算法充分考虑了人眼视觉的特性,首先在多尺度小波分解的基础上计算出每层每个像素邻域的纹理和边缘亮度相关量,然后自适应地求得加权融合系数,最后采用多层次迭代法来产生灰度或接近真彩色的融合图像。实验结果表明,该算法不仅能使图像融合效果有较大的改善,而且有利于人眼对目标的探测和识别。

2 小波变换融合原理

图像小波变换的含义是先把某一被称为基本小波的函数 $\psi(t)$ 做位移 τ 后,再在不同尺度 j 下与待分析信号 $x(t)$ 做内积(下式中 $\psi^*(t)$ 即为 $\psi(t)$ 的共轭函数),则函数 $x(t)$ 在尺度 j 、位置 τ 的小波变换即为

$$Wf_x(j, \tau) = \frac{1}{\sqrt{j}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t - \tau}{j} \right) dt, \quad j > 0 \quad (1)$$

其等效的频域表示为

$$Wf_x(j, \tau) = \frac{\sqrt{j}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) \Phi(j\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (2)$$

式中, $X(\omega)$ 、 $\Phi(\omega)$ 分别是 $X(t)$ 、 $\psi(t)$ 的Fourier变换。

小波变换有以下特点:

(1) 具有多分辨率的特点,可以由粗及精地逐步观察分析信号;

(2) 也可以看成是在不同尺度 j 下,用基本频率特性为 $\Phi(\omega)$ 的带通滤波器对信号进行滤波处理;

(3) 选择适当的基本小波使 $\psi(t)$ 在时域上为有限支撑,由于 $\Phi(\omega)$ 在频域上也比较集中,就可以使小波变换在时、频两域都具有表征信号局部特征的能力,也有利于检测信号的瞬态或奇异点。

正因为小波分析变换具有能根据被分析的对象自动调节有关参数的“自适应性”,并能依据观察对象自动“调焦”,以取得人们满意的较理想的效果,故小波分析变换在各种应用中成为有力的分析工具,有取代以前盛行的Fourier分析变换方法的趋势。这里以著名的Mallat算法为例来说明小波变换方法在图像融合中的应用过程。

2.1 小波分解与重构

在采用 Mallat 算法来进行快速小波变换中,小波变换可以表达为信号与两组滤波器的卷积过程,其中一组用于分解,另一组用于重构。记两组滤波器分别为 $\tilde{h}, \tilde{g}, h, g$, 二维可分离小波变换如图 1、图 2 所示。

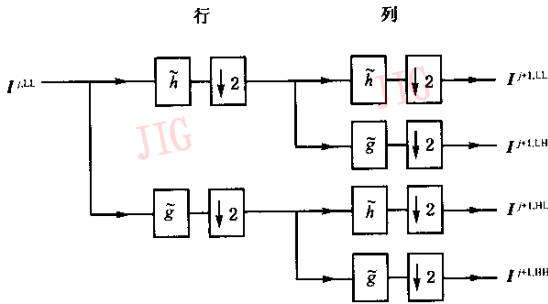


图 1 可分离小波分解算法

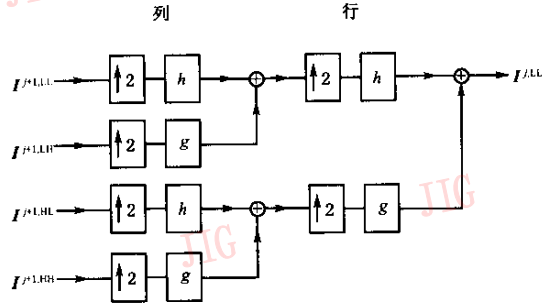


图 2 可分离小波重构算法

这一过程通常需递归执行多次,图 3 是对一幅图像执行两次小波分解的示意图。每次小波分解都是对 LL 频带进行的,将这一频带一分为四,即得到下一层的 LL、HL、LH、HH 频带。LL 是指水平、垂直方向均为低通的部分,HL 是指水平高通,垂直低通的部分(依次类推 LH、HH)。

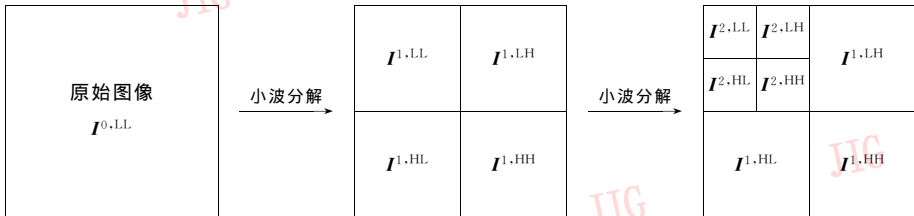


图 3 多尺度次小波分解

小波重构是小波分解的逆过程,而进行小波逆变换重构得到的图像即为融合图像。若分解得到的信号没有改变,则 Mallat 算法理论上可保证重构过程能精确恢复原来的信号。

2.2 融合规则

小波分解后得到各图像在不同尺度下的系数,必须采用一定的规则对它们进行融合。常用的融合规则有:

(1)绝对值最大原则——选择相同位置系数中绝对值较大的那个系数,因为系数绝对值较大意味着相应的源图像在该位置有着更明显的特征。此融合规则在一些场合有很好的表现,但在另一些场合则可能会导致局部出现一些毛刺的现象,其原因是各局部融合的系数来自不同的图像,这就会破坏融合图像的连续性,甚至产生毛刺。

(2)加权平均——选择或自适应计算加权系数,用于加权平均待融合的各图像频带。这种方式不会破坏图像的连续性,但关键是权系数如何得到。通常采用以下两类方法来自适应地计算权系数:一种是通过统计一点其邻域的某些特征来计算该点的权系

数,比如统计该邻域的方差,让权值同方差成正比;另一种方式是仅考虑该点的系数值,而不考虑其邻域的信息。

(3)上述两种融合规则的组合,如在绝对值最大原则中,采用基于邻域的方法,而在加权融合规则中,则综合考虑多个频带在这个位置的信息来计算权值等。

Coifman 等曾对低频部分做平均处理,而对高频部分采取不同的融合规则^[14],其理由是小波分解的高频部分包含图像的边缘信息,因此一般取能量较大的小波系数作为融合图像的小波系数,只有这样才能保留图像的边缘信息,其优点是能对图像进行多尺度的分解和融合,但是由于低频部分的平均化处理和高频部分不一致的融合规则破坏了图像的连续性,因此即使选用较为光滑的小波基作小波分解,这种现象也很明显。

3 基于 HVS 的小波图像融合算法

针对上述小波图像融合中出现的不足,本文拟采用 HVS 方法对小波融合算法加以改进。HVS

(human vision system)是用来研究人类视觉系统特性的理论。在图像处理领域,它专门研究人的眼睛究竟对图像的哪些区域会比较敏感、感兴趣,HVS理论目前较为公认的结论有:

(1) 人眼对图像的低分辨率频带较为敏感,而对高分辨率的频带不大敏感;

(2) 人眼对图像的水平或垂直频带较为敏感,而对斜向的频带较不敏感;

(3) 人眼对图像中等亮度区域的灰度变化较为敏感,而对高亮度及低亮度区域的灰度变化不大敏感;

(4) 人眼对图像平滑及边缘区域的噪声较为敏感,而对纹理区域的噪声不大敏感;

(5) 人眼对彩色图像的敏感度和分辨率大大高于相应的灰度图像;

由于加权平均融合的关键在于是否能较好地区分各源图像中观察者感兴趣的区域,故应当赋予其恰当的权重。本文所说的小波域上的HVS分析是指在小波域上分析人的视觉特性,并针对不同细节的图像区域给出不同的权值。融合图像质量的好坏,主要是指融合图像能否突出其源图像光谱特征、是否能实现图像之间的信息互补、图像是否光滑自然(是否有明显的毛刺)等。本文通过小波域上的HVS经验模型来刻画图像的边缘、纹理、高亮区域,并首先自适应地计算权系数,然后在小波域上通过加权平均来完成图像融合。

另外,同一场景的多光谱图像各有优势,比如可见光图像含有丰富的几何和纹理细节;红外光、毫米波的穿透力强;红外成像能根据物体表面的温差特性而很容易地从背景中将重要目标区分开来;毫米波对金属和硬物散射较敏感,但其成像亮度相对较弱。总的说来,对于红外及毫米波波段的图像,人们感兴趣的往往是与背景具有不同的亮度等级,比背景要亮(或暗)得多的目标;对于可见光图像,人们则希望保留其丰富的纹理细节。基于以上的讨论,本文利用已有的小波域HVS分析的结果^[8,11],构造了基于HVS小波变换的融合算法,简述如下:

(1) 先采用小波变换得到各源图像的多尺度表示;

(2) 在各个尺度上,利用HVS度量各自感兴趣的目标;

(3) 计算各自的加权系数;

(4) 在小波域上完成融合,并通过小波重构来得到融合图像。

算法具体过程描述如下:

3.1 权系数计算

本文以 L, T 来分别表示高亮度区域和纹理区域相关量的值,则 L, T 分别由以下公式计算^[11]:

$$L(r, x, y) = 3 + \frac{1}{256} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 I^{3,LL}(i+1+x/2^{3-r}, j+1+y/2^{3-r}) \quad (3)$$

$$T(r, x, y) = \sum_{k=1}^{3-r} 16^{-k} \sum_s^{LH,HH,HL} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 (I^{k+r,s}(i+x/2^k, j+y/2^k))^2 + 16^{3-r} \text{var}(I^{3,LL}(\{1,2\}+x/2^{3-r}, \{1,2\}+y/2^{3-r})) \quad (4)$$

其中, r 为小波分解的层次数, (x, y) 为像素坐标,上标 k 表示分解的层次, s 表示每一层次中的非低频分量。 L 是用来计算每个像素 (x, y) 的边缘亮度值的函数,它通过计算小波分解至 r 层后,其高频区域对应于 (x, y) 位置邻域的边缘亮度变化,最终即可得到 (x, y) 像素的边缘亮度值;同样, T 是用来计算每个像素 (x, y) 包含的纹理信息量的函数,所不同的只是其计算子层的范围在低频区域中而已。

利用 L, T 来计算加权系数的具体过程,其构建、推导如下:

$$\begin{aligned} \hat{L}_a(i, j) &= S_c(L_a(i, j), K_{\text{light}}), \\ \hat{T}_b(i, j) &= S_c(T_b(i, j), K_{\text{texture}}) \end{aligned} \quad (5)$$

式中下标 a, b 分别表示为两幅不同类型的源图像; S_c 为对数S型函数;本文采用的对数S型函数^①为 $S_c(x, h) = 2h / (1 + \exp(c(-x+h)))^2$,其中 $c > 0$,是用来控制函数在点 h 处的斜率, c 越大,则斜率越大,这里使用对数S型函数是为了对 L 和 T 做拉伸,以突出高亮部分和纹理部分; K_{light} 和 K_{texture} 分别为亮度及纹理的阈值;则 $\hat{L}_a(i, j)$ 和 $\hat{T}_b(i, j)$ 分别为拉伸后 a 图像 (i, j) 像素处的亮度及 b 图像 (i, j) 像素处的纹理,其对应的两幅图像的亮度权重系数则由下式决定:

$$\begin{aligned} W_{\text{light},a}(i, j) &= \hat{L}_a(i, j) / (\hat{L}_a(i, j) + L_b(i, j)), \\ W_{\text{light},b}(i, j) &= 1 - W_{\text{light},a}(i, j) \end{aligned} \quad (6)$$

对应的两幅图像的纹理权重系数则由下面的式(7)决定:

$$\begin{aligned} W_{\text{texture},a}(i, j) &= T_a(i, j) / (T_a(i, j) + \hat{T}_b(i, j)), \\ W_{\text{texture},b}(i, j) &= 1 - W_{\text{texture},a}(i, j) \end{aligned} \quad (7)$$

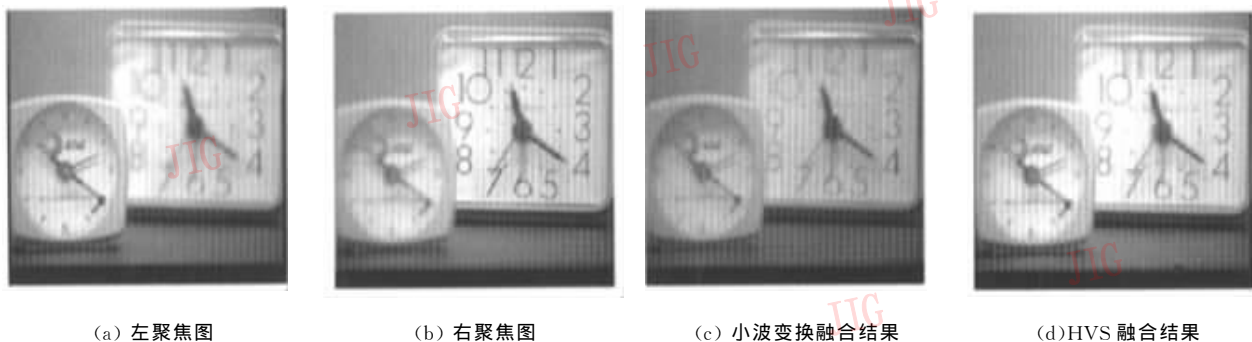
得到了上述权系数后,就可以在原先的小波变换的基础上,利用这些权系数进行加权融合。

① 对数S型函数是神经网络中的术语

过观察融合图像能够获得关于两幅原始图像更多的信息。因此,交互信息量值越大,则融合结果就越好。

5 实验结果与分析

为了验证本文算法的效果,下面利用了 3 种不同



(a) 左聚焦图 (b) 右聚焦图 (c) 小波变换融合结果 (d) HVS 融合结果

图 5 同源探测器两图像的融合

图版 1 图 1 是海洋油井平台用不同探测器拍摄到同一角度的可见光和红外源图像的融合结果。由图版 1 图 1 同样可以看出,本文算法在目标突出及细节清晰度方面优于原先的小波变换融合算法。图版 1 图 1(e)为 HVS 彩色融合的结果。从中可以看出,融合图像既突出了目标(灯塔)的红外高亮信息,同时又保留了丰富的可见光细节信息,且霞光的色彩接近于真实场景。

图版 1 图 2 是图像融合用于检测枪支的应用例子。图版 1 图 2(a)是可见光图像;图版 1 图 2(b)是红外图像;图版 1 图 2(c)和图版 1 图 2(d)分别是小波变换融合和 HVS 融合结果图像。从图中可以看出,图版 1 图 2(d)中的目标(手枪)边缘更为清晰,灌木纹理细节更为丰富。图版 1 图 2(e)是本文多层次 HVS 彩色融合的结果图像。其场景物体的颜色(枪支除外)十分接近于真实情况。结果令人满意。

采用第 4 节的融合效果的两种定量评价方法,分别计算上述例子,结果如表 1 所示。从表 1 可以看出,在所有以上 3 个例子里,本文的 HVS 改进算法的交叉熵皆小于小波变换融合算法,而交互信息量皆大于小波变换算法,可见本文的算法更为有效。

表 1 融合效果评价比较

	交叉熵		交互信息量	
	小波变换融合方法	HVS 变换融合方法	小波变换融合方法	HVS 变换融合方法
图 5	4.904 6	0.633 3	$3.102 0 \times 10^5$	$5.292 6 \times 10^7$
图版 1 图 1	4.002 0	3.072 3	$7.671 5 \times 10^7$	$1.597 5 \times 10^8$
图版 1 图 2	10.680 4	9.726 4	$2.959 0 \times 10^7$	$3.271 2 \times 10^7$

类型图像进行了不同融合方法的对比实验。图 5(a)和图 5(b)是两幅来自同一相机的同一场景照片,但是其聚焦部分不同,图 5(c)和图 5(d)分别为小波变换融合的结果图像和用本文 HVS 改进算法的融合结果图像。通过对比可以看出,本文算法的效果比原小波变换方法,无论在清晰度还是细节结构方面都有较大的改进。

6 结 论

本文提出一种新的基于人类视觉系统(HVS)的小波变换图像融合新算法。该算法充分考虑了人类视觉系统的特性,首先在多尺度小波分解的基础上计算出每层每个像素邻域的纹理和边缘亮度相关量,然后自适应地求得加权融合系数,最后采用多层次迭代法产生灰度或彩色融合图像,其在一定程度上克服了原先小波变换融合方法容易产生带有“毛刺”的融合图像和减低图像对比度的缺点。由于人眼对彩色的敏感度远超过灰度,因此彩色融合结果更有利于人眼的辨识。实验结果表明,本算法能使图像融合效果有较大的改善,有利于人眼对目标的探测和识别。将来的工作包括红外与可见光双波段视频图像的实时配准与融合,以及用于安全检测的多波段图像融合系统的研制,还有基于先验知识的真彩色融合场景生成等。

参 考 文 献

- 1 Cliché F, Bonn F, Teillet P. Integration of SPOT panchromatic channel into its multispectral mode for image sharpness enhancements [J]. Photogrammetric Engineering Remote Sensing, 1985, 46(10): 1325~1334.
- 2 Hall D L, Llinas J. An introduction to multisensor data fusion [J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(1): 6~23.
- 3 Genderen C, Pohl J, Van L. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications [J]. International

Journal of Remote Sensing, 1998, **19**(5): 823~854.

- 4 Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition; the wavelet representation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, **11**(7): 674~693.
- 5 Mallat S, Zhong Sifen. Characterization of signals from multiscale edges[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, **14**(7): 710~732.
- 6 Li Hui, Manjunath B S, Mitran S K. Multi-sensor image fusion using the wavelet transform [A]. In: Proceedings of First International Conference on Image Processing [C], Austin, Texas, USA, 1994, **1**: 51~55.
- 7 Burt P J, Kolczynski R J. Enhanced image capture through fusion[A]. In: Proceedings of 4th International Conference on Computer Vision[C], Berlin, Germany, 1993:173~182.
- 8 Zhang Zhong, Blum R S. A categorization of multiscale-decomposition-based image fusion schemes with a performance study for a digital camera application [J]. Proceedings of the IEEE, 1999, **87**(8): 1315~1326.
- 9 Wang H, Peng J, Wu W. Fusion algorithm for multisensor images based on discrete multiwavelet transform[J]. Vision, Image and Signal Processing, Proceedings of the IEEE, 2002, **149**(5): 283~289.
- 10 杨旭. 小波变换方法在高分辨率多光谱图像融合存在的问题[J]. 红外与毫米波学报, 2002, **21**(1): 77~80.
- 11 Lewis A S, Knowles G. Image compression using the 2-D wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1992, **1** (2): 244~250.
- 12 Barni M, Bartolini F, Pivan A. Improved wavelet-based watermarking through pixel-wise masking[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, **10**(5): 783~791.
- 13 Jayant N J, Johnston J, Safranek R. Signal compression based on models of the human perception[J]. Proceedings of IEEE, 1993, **81**: 1385~1422.
- 14 Coifman R R, Wickerhauser M V. Entropy-based Algorithms for best basis selection[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1992, **38**(2): 713~718.
- 15 Qu Guihong, Zhang Dali, Yan Pingfan. Information measure for performance of image fusion [J]. Electronics Letters, 2002, **38**(7): 313~315.



周礼 1979年生, 2001年本科毕业于浙江大学应用数学系, 2004年在浙江大学数学系获硕士学位。主要研究领域为多光谱图像信息处理、计算机真实感图形等。



王章野 1965年生, 副教授, 1990年毕业于华东师范大学光学专业, 获硕士学位, 2002年在浙江大学获计算机图形学专业博士学位。目前主要研究方向为计算机真实感图形、多光谱图像信息处理、红外成像仿真和虚拟现实等, 发表论文40多篇。
E-mail: zywang@cad.zju.edu.cn



金剑秋 1977年生, 博士生, 2001年毕业于浙江大学数学系, 获硕士学位。目前主要研究方向为多光谱信息融合、图像处理 and 数字水印等。



彭群生 1947年生, 博士、教授、博士生导师, 1983年获英国东安格利亚大学计算机科学博士学位。主要研究方向为计算机真实感图形、红外成像仿真、计算机动画、科学信息可视化等, 已发表论文200多篇。



(a) 可见光图像



(b) 红外图像



(c) 小波变换融合结果图像

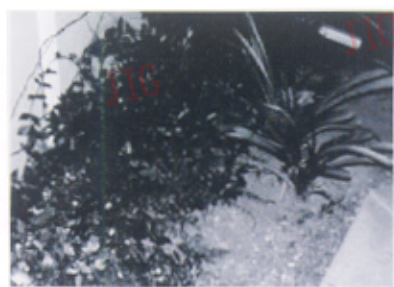


(d) HVS融合结果图像

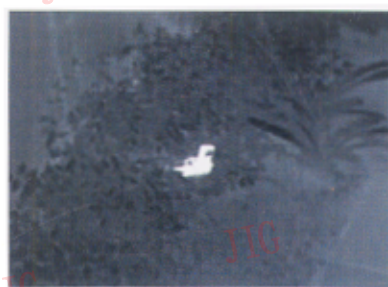


(e) 彩色融合结果图像

图1 海洋油井平台的可见光与红外图像融合实例



(a) 可见光图像



(b) 红外图像



(c) 普通小波变换融合结果图像



(d) HVS融合结果图像



(e) 彩色融合结果图像

图2 一幅含有枪支的可见光与红外图像融合实例