

多光谱图象的真实感融合

金剑秋 王章野 江照意 彭群生

(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要 多光谱信息融合是指将从多光谱探测器获得的同一场景的多光谱信息特征组合到一起, 并利用它们在时空上的相关性及信息上的互补性, 以得到对景物更全面、清晰的描述, 其真实感成像是指融合后的图象能保留原多光谱图象目标在特定条件下的光谱特征. 针对用同一种方法来融合不同场景图象存在的问题, 通过分析现有融合方法的优缺点和它们适用的场合, 提出了一种综合的图象融合方法. 该方法对相关较弱, 且互补性明显的图象对, 采用一种新的基于人类视觉系统 HVS 的自适应加权平均的融合方法来进行融合, 这样能突出目标的光谱特性; 而对于相关性较强的图象对, 则根据场景目标距离的远近, 分别采用小波变换和主成份分析来进行融合. 实验表明, 该方法能适合于不同类型的场景, 其得到的融合结果优于用单种方法进行融合的结果, 也有利于对目标的探测和识别.

关键词 多光谱融合 真实感成像 HVS 小波变换 主成份分析

中图分类号: TP751.1 TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2002)09-0926-06

The Realistic Fusion of Multi-spectral Images

JIN Jian-qi, WANG Zhang-ye, JIANG Zhao-yi, PENG Qun-sheng

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

Abstract Multi-spectral information fusion is the combination of information acquired from multi-spectral sensors in the same scene to acquire clearer description about the scene by using the temporal and spacial correlation, and their complementarity. The realistic fusion refers to the conservation of spectral features from original multi-spectral images in certain case in the new fused image. In this paper we propose a new image fusion method by analyzing advantage and disadvantage of several common methods and studying those applicable environments. This method integrates several fusion methods according to those applicable environments. Besides we propose a new HVS based image fusion which is suitable for little correlation among the multi-spectral images. The HVS based method can extrude target spectral character. When the correlation among multi-spectral images is strong, the wavelet transform-based or PCA method is used according to the distance of the targets. Experiments show that our integrated method can be suitable for different type scene, and the fusion results are better than that using single fusion method and the result is advantageous to the detection and recognition for targets.

Keywords Multi-spectral information fusion, Realistic imaging, Human Vision System method, Wavelet transform, PCA method

0 引言

多光谱信息融合及真实感成像技术在遥感、国

土探测与规划、地理信息系统、反恐怖安全检查、军事国防方面的目标探测识别和精确定位、农业产量评估、医学图象分析、环境保护和灾情检测与预报等领域的^[1]有着重要的意义。

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(60021201); 国家自然科学基金(69873039);
国防科技重点实验室基金(00JS66. 6. 1. JW0404)

收稿日期: 2002-06-13; **改回日期:** 2002-07-05

多光谱信息融合 (Multi-spectral Information Fusion) 是指将从多光谱探测器获得的同一场景的多谱图象的信息特征组合到一起, 并利用它们在时空上的相关性及信息上的互补性来得到对景物更全面、清晰的描述。众所周知, 多光谱各波段图象之间具有互补性, 比如: 对人眼来说, 可见光图象虽具有丰富的细节和敏锐的色感, 但它在恶劣的气候条件下, 对大气的穿透能力较差, 且夜间的成像能力也较差; 红外光 (IR) 正好相反, 它在有云雾存在的气象条件下, 穿透能力相当强; 在夜间, 由于不同景物之间存在着温度差, 因此其所成的像仍能显示景物的轮廓, 但其成像的分辨率则较低。若对这些多光谱信息进行适当的融

合, 则可消除因大气衰减、衣物阻挡等引起的影像模糊和消失, 进而可获得清晰度增强的目标图象, 这就提高了对目标的探测和识别能力。

多光谱图象的真实感融合是指融合图象能保留原多光谱图象目标在特定条件下光谱特征的一种融合方法。多光谱图象, 是指由电磁波谱所包含的所有波段 (见图 1) 所成的图象, 包括可见光、红外线、紫外线、毫米波、X 射线、 γ 射线等所成的像。遥感图象 (如多光谱、高光谱、超光谱及 TM、Pan 等图象) 亦在其中; 广义地说, 还应包括声波及医学图象, 如 CT、MRT (核磁共振) 和 PET (正电子发射断层扫描) 等所成的图象。

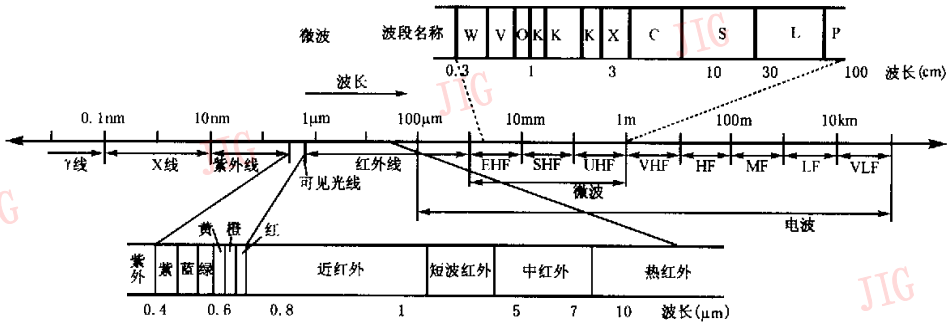


图 1 电磁波谱图

1973 年, 在美国国防部资助开发的声纳信号理解系统中, 融合技术得到了最早的体现^[2]。20 世纪 80 年代, 美国三军总部对多光谱信息融合技术和战略监视系统一直给予高度重视, 美国国防部从海湾战争中, 体会到该技术的巨大应用潜力, 此后逐年增加投资力度, 在 C3I 系统中又增加了计算机, 建立了以数据融合为核心的 C4I 系统; 1985 年, Cliche 等人将 SPOT 卫星图象中的全色光通道同多光谱模式结合到一起, 以增强图象的敏锐效果^[3]; 1994 年, 美国开发出战场便携式实时多光谱成像融合和景物区分系统^[4]; 同年, Li 等人提出将小波变换方法用于图象融合^[5]; 1998 年, Stevens 等建立了一种基于多传感器模型的目标识别和可视化系统^[6], 系统内部包含各传感器的仿真模型, 基于三种传感器图象进行信息融合。1999 年, Aguilar 等人基于人类彩色视觉原理, 开发出的夜视系统装置能将微光 CCD 相机和非冷却式热红外相机拍摄到的图象进行实时融合^[7], 其融合视频的帧速达到 30 帧/s; 2001 年, Scheunders 等又提出了一个基于多尺度基本形式小波表示的多谱图象融合方法^[8]。在国内, 近年来也

开展了对多光谱图象进行配准和融合的研究^[9~11], 但现有算法离真实感实时处理尚有不少距离。

但由于上述方法大都是用同一种图象融合方法来处理不同的场景, 因此有时效果并不佳。本文则从真实感融合的思想出发, 对不同的场景采用不同的融合方法来进行图象融合。

1 融合方法简介

信息融合可以在信号、像素、特征及符号推理级上进行, 本文讨论的都是指像素级融合。现有的融合方法有高通滤波器 (HPF) 模型、小波变换模型、代数模型、Brovey 变换 (BT) 模型、主成份分析 (PCA) 模型、色度-强度-饱和度 (HIS) 模型和多通道彩色分量模型等。下面着重介绍、分析基于小波变换、PCA 和 HIS 变换的融合方法。

1.1 小波变换融合方法

基于小波变换的融合方法大致上可以分为如下两种形式: 一是经典小波分解算法, 另一种是基于冗余的小波分解算法 (à trous algorithms)^[8]。其中, 基

于 à trous algorithms 的融合方法是首先将图象分解成多尺度的边缘图象,然后按一定规则融合这些多尺度边缘图象,最后通过重构算法得到融合图象;而基于经典小波分解的融合算法,其基本步骤是:首先将各图象作小波分解,得到 $3L+1$ 个频带,然后对分解得到的各频带,通过制定一定的融合规则来进行融合.其中的一种融合策略是对低频部分求平均,而对高频部分取两个频带的最大值.用式子表述如下:

$D_{vis}^i, D_{ir}^i (i=1, \dots, 3L+1)$ 分别为可见光,红外图象的小波分解的各个频带, $i=1$ 为低频部分,其中, L 为分解层数.

$$D_{fusion}^1 = (D_{vis}^1 + D_{ir}^1) / 2$$

$$D_{fusion}^j(u, v) = \max(D_{vis}^j(u, v), D_{ir}^j(u, v)) \\ (j=2, \dots, 3L+1)$$

然后利用 $D_{fusion}^i (i=1, 2, \dots, 3L+1)$ 作小波逆变换,其重构得到的图象即为融合图象.文献[5]对低频部分作平均处理,而对高频部分则采取不同的融合规则.这样融合的理由是因为小波分解的高频部分包含图象的边缘信息,融合时,一般取能量较大的小波系数作为融合图象的小波系数,这样才能保留图象的边缘信息.其优点是能对图象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象的连续性,因此即使选用较为光滑的小波基来进行小波分解时,这种图象不连续现象也很明显.

1.2 PCA 融合方法

主成分分析(PCA)算法^[12](类似于图象压缩领域的 K-L 变换)是一种线性变换,用其进行图象融合也可视为一种图象压缩,即将两幅图象融合(或称压缩)成一幅图象,其算法可简述如下:

将各种光谱图象分别视为一个随机变量,融合时,首先求它们的协方差矩阵的特征值和特征向量,然后将特征向量,按对应特征值的大小,从大到小排列来得到变换矩阵,并用其对多光谱图象作变换后,按应用的目的和要求取前面几个图象(但究竟应该取多少图象数目,应制定出一个合适准则)来进行图象融合.从上面算法的描述可以看到,一旦变换矩阵已经求得,剩下的就是对图象作线性变换.其优点是融合合成速度较快;不足之处是,由于它对图象中的所有像素一视同仁,不管是重要的目标,还是不感兴趣的背景,因此它往往会淹没小的、在图象中能量比重小的目标.

1.3 多通道彩色分量融合方法

彩色融合方法分为伪彩色融合和真彩色融合两种.其中伪彩色融合方法广泛用于多光谱图象融合,其最简单的一种方式是将多个光谱图象分别指定为一种颜色(彩色通道)分量,比如一幅 RGB 可见光图象和红外图象的融合,可以将红外图象数据指定为红色,而将可见光图象中的红色分量指定为绿色,将原来的绿色和蓝色分量作线性组合(或舍弃蓝色)作为蓝色,这样融合成的图象即为伪彩色的,因为它不符合人们的视觉习惯,即它的色调与实际地物色调不一致.实际上,前面介绍的 PCA 方法也是一种伪彩色融合方法.大多数伪彩色融合方法具有运算简单,丢失的信息少(如 PCA 方法)等特点.真彩色融合方法是以融合的图象要符合人们的视觉习惯为目标之一,这种图象上的影像与原图象中的地物颜色基本一致.本文提出的“真实感融合”就是要求能保留原光谱图象目标的光谱特性,且要边缘清楚、层次分明,并不要求一定用真彩色融合方法,即亦可采用多通道分量的伪彩色融合方法,该方法的优点是融合图象中的目标特征显著.

2 基于 HVS 的自适应加权平均融合方法

多光谱图象真实感融合的目标是要求尽可能地保持目标的光谱特性和充分保留图象的边缘信息.人类视觉系统(Human Vision System,简称 HVS)模型是研究人类视觉系统特性的理论,它在图象压缩,图象数字水印有广泛的应用.根据 HVS 的理论^[13],人眼视觉具有如下一些特性:①对不同灰度具有不同敏感性,通常对中等灰度等级最为敏感,向低灰度和高灰度两个方向呈非线性下降;②对图象平滑区域的噪声敏感,而对纹理区域的噪声不敏感;③由于边缘信息对于人眼非常重要,因此必须尽量保持图象的边缘信息.但对于图象融合,则不是考虑人们对图象噪声的敏感程度,而是考虑人们对多光谱图象中的哪些区域感兴趣和它们各自的统计特性.

从多光谱图象的成像原理可以发现,可见光、红外光和毫米波(包括雷达)图象各有优势:如可见光图象能有丰富的几何和纹理细节;红外光、雷达波的穿透力强;红外光成像则根据物体表面的温度高低,能从背景中区分发现重要目标;雷达波对金属和硬物散射较敏感,但其成像强度相对较弱.在进行多光谱图

象融合时,应当根据其光谱特性的互补性各取其所长,即应当保留可见光图象中的纹理部分,而保留红外和毫米波(包括雷达波)图象中特别亮和特别暗的部分(通常是人们所要探测的目标),而且应尽可能保留各图象的边缘.图象的平滑及纹理边缘区域有不同的统计属性,如平滑区域对应的熵值较小;纹理部分则对应的熵值较大、方差较小;而边缘部分则有较大的熵值和方差.另外,可以通过统计红外、雷达图象中一些像素邻域的能量来判断这些图象中特别亮(暗)的部分.基于此,构造了新的自适应加权平均融合方法.其思路是通过统计像素邻域的能量、方差、熵来计算各自的加权系数.下面以可见光图象和毫米波(雷达波)图象为例来说明这个算法的融合过程:

符号:

- (1) I_V, I_R, I_F 分别为可见光、雷达和融合图象;
 m_V, m_R 分别是 I_V, I_R 的数学期望;
 (2) $N_k(u, v, n)$ 是以点 (u, v) 为中心的 $n \times n$ 大小的邻域,一般 n 取为奇数,其中下角 k 代表 R、V, 分别表示雷达、可见光图象;

(3) $E_k(u, v, n)$ 表示邻域 $N_k(u, v, n)$ 的能量.

$$E_k(u, v, n) = \left(\sum_i \sum_j (N(i, j) - m_k)^2 \right)^{1/2} / (n \times n)$$

(4) $\sigma_k(u, v, n)$ 表示邻域 $N_k(u, v, n)$ 的方差.

(5) $S_k(u, v, n)$ 表示邻域 $N_k(u, v, n)$ 的熵值.

(6) a_k, b_k, c_k 为常量.

计算过程如下:

Begin 遍历图象的每个像素 (u, v)

计算, $E_k(u, v, n), \sigma_k(u, v, n), S_k(u, v, n)$;

$$W_k(u, v) = a_k \times E_k(u, v, n) + b_k \times \sigma_k(u, v, n) + c_k \times S_k(u, v, n)$$

$$I_F(u, v) = \frac{W_V(u, v) \times I_V(u, v) + W_R(u, v) \times I_R(u, v)}{W_V(u, v) + W_R(u, v)};$$

END

其中, W_k 为加权系数,可根据各图象统计属性确定.

为了突出雷达图象的目标,应当选取 $a_V < a_R$, $b_V > b_R$, $c_V < c_R$. 实验表明,通过统计,图象上一点邻域的能量、方差和熵值可以有效地区分目标和背景.

3 多光谱图象的真实感融合

由前面的讨论可知,对于不同的场景和不同的探测波段的图象融合来说,要得到真实感多光谱图象的融合效果,必须针对其特点,采用不同的融合算法.其完整的步骤应包括融合前的预处理,而预处理

通常包括图象的配准和图象的增强.

在上述的融合方法中,基于 HVS 的方法因能突出目标的光谱特性,故它适用于相关性较弱,且互补性明显的多光谱图象对的融合;由于 PCA 方法对各像素一视同仁,无法突出特定目标的光谱特性,因此它不适用于相关性较弱的图象对,但它对于具有较强相关性的多光谱图象对,则有较好的融合效果;基于小波分解的融合方法虽可以融合各图象在不同尺度下的边缘信息(高频部分),但也很大程度上破坏了图象的光滑性,即生成的融合图象边缘有明显的毛刺,且视觉效果不佳.故这种方法比较适用于比较平滑、目标较小的多光谱图象对.

上述的定性讨论,在执行时,可以定量化,即相关性可用相关系数表达,图象的光滑程度可以用总变差度量,这些都可以通过设定适当的阈值来取得较好的效果.

4 结果分析

下面以 3 个场景为例来说明本文算法的融合效果.场景之一为远处正在行驶的汽车、飞机和山岭图象.图 2(a)为可见光图象,图 2(b)为相应的红外图象.由于红外光有穿透烟雾的强大能力,即烟雾后的一些目标亦能成像,因此红外图象上,烟雾后的一些目标亦可辨认,汽车的前部(发动机)和飞机的引擎,因其温度较高,故在图象中显得较亮,但目标其他细节显示不如可见光图象.图 2(c)至图 2(d)为融合效果图.从融合图象中可看出,两原图信息的互补性得到了充分的体现:如在原可见光图象中不可见的一些目标,如飞机引擎、雾后面的物体都呈现出来,而红外成像图中原来看不清楚的汽车后部细节,在融合图象中清晰可见.图 2(c)为采用 PCA 方法融合的图象,图 2(d)为本文采用小波变换方法融合的图象.从图中可以看出,后者的效果要优于前者.图版 1 图 1(a)为 RGB 多通道彩色融合图,图中的目标特性亦很明显.

场景之二为海面石油开采平台.图 3(a)为该场景可见光图象;图 3(b)为相应场景长波热红外成像图.由于太阳辐射在可见光波段分布的能量极为集中,因此,在可见光图中平台上的灯塔被淹没在耀眼的太阳光芒中,水面也呈现波光潋潋的现象;由于太阳辐射在长波热红外波段分布的能量极少,故在远红外图象中无太阳成像的影子,但在该图象上,灯塔

的上部清楚可辨,正由于少了太阳影像,故在远红外图象中亦就少了时间信息.图3(c)至图3(d)为融合效果图.由于图中目标离视点相对较近,因此本文采用主成分分析(PCA)方法进行融合,其效果(见图3(d))要好于小波变换方法的融合结果(见图3(c)),图版1图1(b)为相应场景的R、G、B多通道彩色融合图象.

场景之三为安全检测图象.图4(a)为可见光图象;图4(b)为相应场景的毫米波图象.从可见光图象中只能看出坐着的3个人,其中,中间的人体膝盖上

放有一物;而毫米波图象反映的是硬目标对毫米波散射的成像结果.图4(c)至图4(d)为融合效果图,从这些融合图象中,可以马上得出判断:右边那人衣服里藏有枪支!在本例中,由于两原图象组成成分的相关性较差,因此融合时,将HVS方法应用于此场景的融合,其得到的融合结果(图4(d))比起小波变换方法的融合效果要好得多(图4(c)).图版1图1(c)为对应场景的R、G、B多通道彩色融合图象,与前两图象相比,在彩色融合图象中,摆在中间一个人的膝上之物与右边之人的藏枪可清楚地区分开来.

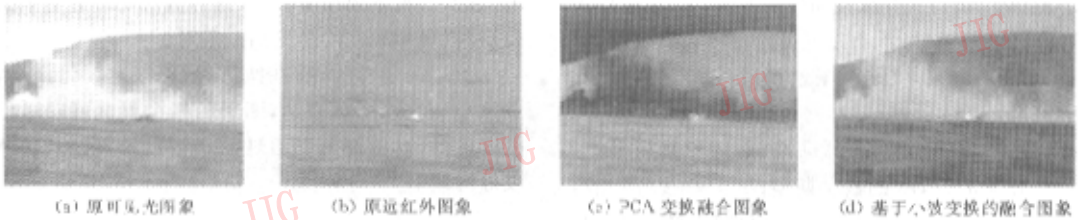


图2 远处汽车、飞机及大雾、山岭场景融合结果

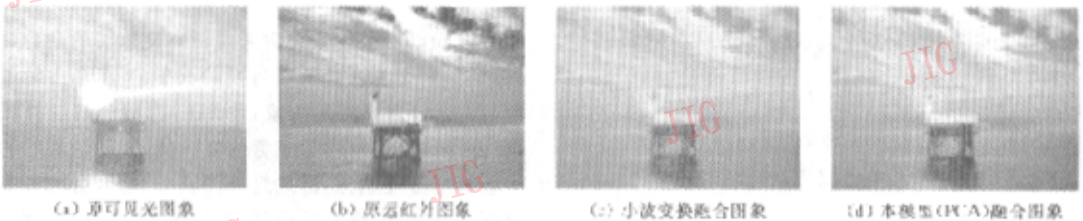


图3 海上平台场景融合结果

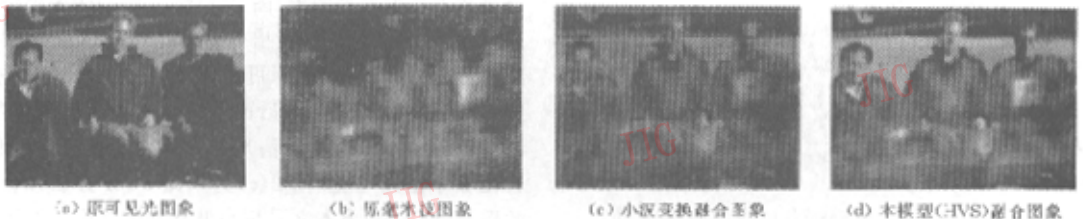


图4 安全检查场景融合结果

5 讨论

本文提出了一个新的多光谱图象真实感融合生成算法,该算法强调在融合图象中保留原多光谱图象目标在特定条件下的光谱特征.该算法首先对特征光谱图象(如红外、毫米波图象)中的目标进行边缘增强,再针对不同类型的场景采用不同的融合方法,即对相关性的图象对,采用HVS变换方法

进行融合;而对于相关性较强的图象对,则根据场景目标距离的远近,分别采用小波变换和主成份分析法进行融合.实验结果表明,该算法对不同类型场景的融合结果优于用单种方法进行融合的结果,且融合图象有利于对目标的探测和识别.本文首次提出的基于HVS原理的多光谱图象的真实感融合新方法,它对相关性较弱图象对的融合效果好于其他几种方法.由于人眼对彩色的分辨率远高于灰度,文中还对多光谱图象对作了R、G、B多通道增强型彩色

融合的尝试. 今后的研究工作, 应包括研究两幅以上的多光谱图象真实感融合快速生成算法, 以及提出多光谱图象真实感融合效果的评判标准等.

参考文献

- 1 Pohl C. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and application [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1998, 9(5): 823~854.
- 2 刘同明编著. 数据融合技术及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- 3 Cliché F, Bonn F, Teillet P. Integration of SPOT panchromatic channel into its multispectral mode for image sharpness enhancements [J]. *PE&RS*, 1985, 51: 311~316.
- 4 Evan Preston, Tom Bergman, Ron Gorenflo *et al.* Development of a field-portable multispectral imaging and classification system [R]. *Battle Columbus Laboratory*, 1994: 156~167.
- 5 Li H, Manjunath B S, Mitra S K. Multi-sensor image fusion using the wavelet transform [A]. In: *Proc. IEEE Int. Conf. Image Processing [C]*, Austin, TX, 1994, 1: 51~55.
- 6 Stevens M R, Beveridge J R, Michael E G. Visualizing multi-sensor model-based object recognition [J]. *Machine Graphics & Vision*, 1998, 6(3): 279~304.
- 7 Aguilar M, Fay D A, Ireland B *et al.* Field evaluation of dual-band fusion for color night vision [J]. *Proc. SPIE*, 1999, 3691: 168~174.
- 8 Scheunders P, De Backer S. Fusion and merging of multi-spectral images using multi-scale fundamental forms [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2001, 18(10): 2468~2477.
- 9 何国金, 李克鲁, 胡德永等. 多卫星遥感数据的信息融合: 理论与方法与实践 [J]. *中国图象图形学报*, 1999, 4A(9): 744~750.
- 10 TONG Qingxi, ZHENG Lanfen. Hyperspectral remote in China [J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4548: 1~9.
- 11 刘贵喜, 杨万海. 一种像素级多算子红外与可见光图象融合方法 [J]. *红外与毫米波学报*, 2001, 20(6): 207~210.

- 12 朱述龙, 张占陆编著. 遥感图象获取与分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- 13 Podilechuk C I, Zeng Wenjun. Image-adaptive watermarking using visual models [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1998, 16(4): 525~539.



金剑秋 1977年生, 博士生, 2001年获浙江大学数学系硕士学位. 目前主要研究方向为多光谱信息融合、图象处理和数字水印等.



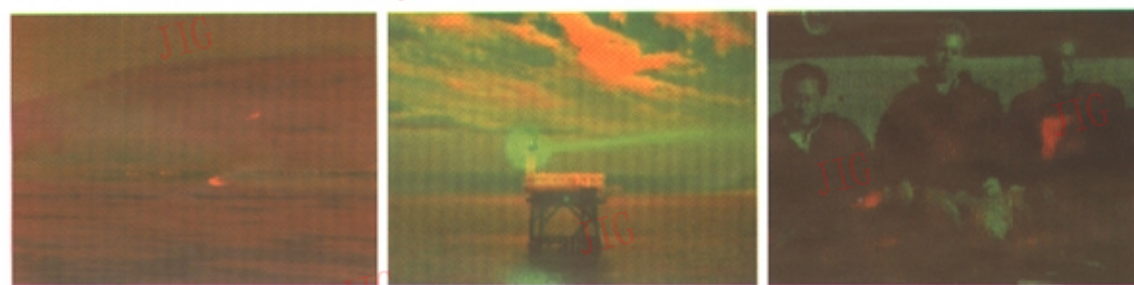
王章野 1965年生, 博士、副教授, 1990年获华东师范大学光学专业硕士学位, 2002年获浙江大学计算机图形学专业博士学位. 目前主要研究方向为红外成像仿真、多光谱信息融合和虚拟现实等. 发表论文20余篇.



江照意 1975年生, 博士生, 2001年获浙江大学能源工程专业硕士学位. 目前研究方向为红外成像仿真、多光谱信息融合等.



彭群生 1947年生, 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. 发表论文200多篇.



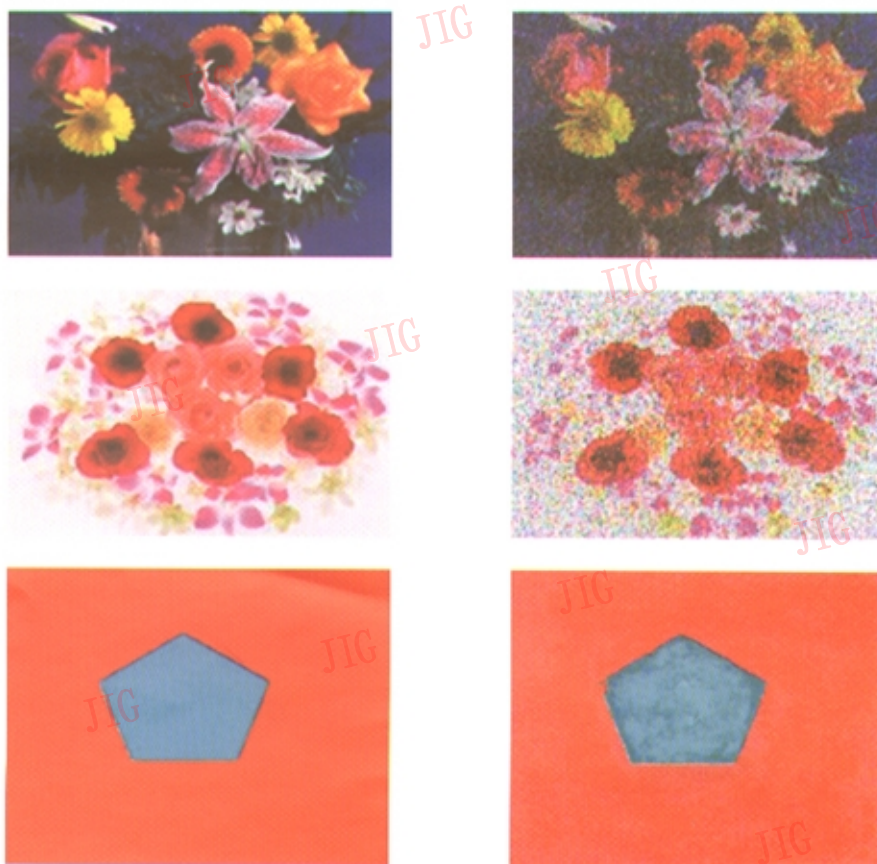
(a) 汽车、飞机、山岭大雾场景

(b) 海上平台场景

(c) 安全检查场景

图 1 多通道彩色融合结果图象

刘直芳等：基于多尺度彩色形态矢量算子的边缘检测



(a) 原始图象

(b) 添加了噪声的图象

图 1 实验用的原始图象以及添加了噪声的图象