

文章编号: 1001-3806(2013)05-0690-06

改进的小波变换算法在图像融合中的应用

高颖¹, 王阿敏¹, 王凤华¹, 郭淑霞²

(1. 西北工业大学 航海学院, 西安 710072; 2. 西北工业大学 无人机特种技术重点实验室, 西安 710065)

摘要: 为了改善传统图像融合方法在精确制导武器系统中对目标检测模糊、识别率低与实时性差等缺陷, 采用了一种将小波变换与 Canny 算子相结合的图像融合的新方法。该方法的具体改进在于首先对源图像在垂直和水平方向上进行了适合图像重构的 3 层小波分解, 并依据各分解层不同频率分量的自身特性, 采用独特的融合规则, 即对低频分量采用加权平均融合算法, 对高频分量采用 Canny 算子与局部区域均方差准则结合法改变图像的小波系数, 最后对融合后的小波系数进行逆变换, 得到重构的目标图像。结果表明, 利用该方法不仅降低了融合图像的边缘模糊性, 突出了目标色彩, 达到良好的视觉效果, 而且计算效率高、实时性好, 特别有助于伪装目标的检测与识别, 具有较好的应用价值。

关键词: 图像处理; 图像融合; 边缘检测; 小波变换; 图像评价

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.05.028

Application of improved wavelet transform algorithm in image fusion

GAO Ying¹, WANG A-min¹, WANG Feng-hua¹, GUO Shu-xia²

(1. School of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Science and Technology on UAV Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to overcome the defects of fuzzy detection, low recognition rate and poor real-time of traditional fusion methods used in precision-guided weapons systems, a new image fusion algorithm was proposed combining wavelet transform with Canny operator. Firstly, the source image was decomposed into 3 layers in vertical and horizontal directions, which are suitable for image reconstruction; then due to its own characteristics of the different frequency components, a unique fusion rule was used to change wavelet coefficients of images, that is, for the low frequency components, the weighted average fusion algorithm was adopted, and for the high-frequency components, wavelet coefficients were changed using Canny operator and the local area variance criteria method. Finally, images were reconstructed using the inverse wavelet transform for different components. Results show the improved method not only reduces the fuzziness of edge, highlights target color, gets better visual effects, but also makes computational efficiency high, real-time good, particularly can detect and recognize pretend targets. It has better theoretical research and application value.

Key words: image processing; image fusion; edge detection; wavelet transform; image evaluation

引言

在某些情况下, 由于受光照、环境因素(如烟雾、云、雨、噪声等)、目标位置(如远近、障碍物等)、目标状态(如运动、密集目标、伪装目标等)以及传感器固有特性等因素的影响, 通过单一传感器所获得的图像信息不足以用来对目标或场景进行更好的

检测、分析以及理解, 因此便产生了多源图像融合技术, 它能够将来自不同传感器探测到的多特征图像综合利用, 充分考虑图像之间的冗余与互补信息, 从而获得比任何单一图像更为清晰、准确的图像^[1]。

由于人类视觉系统能够直接感受到的就是图像的边缘, 边缘包含了物体的有价值的边界信息, 它是区别目标的重要依据, 也是图像的最基本特征, 利用边缘信息可以有效地降低图像识别及分析处理的数据量。图像融合之前, 首先对图像中目标的边缘进行检测提取。参考文献[2]中采用 Sobel 算子对目标边缘进行检测, 该方法简单, 可检测边缘及其方向, 但对噪声敏感, 且对目标边缘的定位精度不够

基金项目: 航天科技创新基金资助项目(CASC201102)

作者简介: 高颖(1965-), 男, 副教授, 现主要从事虚拟现实技术、多源信息融合技术及人工智能的研究。

E-mail: gaoying@nwpu.edu.cn

收稿日期: 2012-12-20; 收到修改稿日期: 2013-03-07

高^[2];参考文献[3]中提到的 Laplacian 算子只能部分定位边缘位置,且去噪能力差,目标几乎被噪声覆盖;参考文献[4]中采用差分边缘检测算法,由于要求很强的方向性,导致计算过于繁琐、实用性差^[4]。因此,一种既能滤去噪声又能保持边缘特性的边缘检测最优滤波器成为了首选,Canny 算子应运而生。该理论实质是在图像中寻找具有局部最大梯度幅值的像素点,同时由于 Canny 算子的方向特性使其不仅能准确对目标定位、抑制噪声,而且计算简便、实时性好。目前被认为是最优的边缘检测算子。

图像融合的算法基本可分为 3 个层次,即像素级融合、特征级融合和决策级融合。由于像素级融合是其它两级融合的基础,能够补充和强化融合图像中的有用信息,使其更符合人或者机器的视觉特征,并且有利于对图像的进一步分析和处理,加上操作简单、实时性好,因此国内外研究大多集中在这一层次。参考文献[5]中采用亮度(或强度)、色调、饱和度(intensity, hue, saturation, IHS)变换法对图像进行融合,此方法多用于特征增强和特征差异大的数据间融合,能够提高多光谱图像的空间分辨率,适合于彩色图像处理,但光谱失真较大且识别精度低^[5];参考文献[6]中提出传统小波变换法,其采用区域算法改变低频系数,并用平均梯度选大法改变高频系数,虽然此方法能够增强融合图像的一些结构信息,但不能很好地保持源图的光谱成分,彩色信息也会有失真且细节表现能力差^[6]。为了改善上述不足,本文中提出了新型小波变换法,该方法以其优越的时频局部化特性对图像进行多尺度不同方向分解,在保证图像融合质量的前提下,不仅提高了图像分辨率,增强了光谱色彩和细节信息,而且融合结果更利于对目标的识别与发现。

1 Canny 算子

图像最基本的特征就是边缘,它是辨别物体的主要依据,同时也是图像分割所依赖的最重要的特征,其包含了纹理特征的重要信息源,普遍存在于目标与目标、目标与背景区域之间。

目前关于图像边缘检测的方法大致可分为两类:基于梯度变化的图像边缘检测(如 Sobel 算子、Robert 算子和 Prewitt 算子)和基于拉普拉斯变换的边缘检测(Laplacina 算子和 Marr-Hildreth 算子)。其中前者是利用图像 1 阶导数的极大值和极小值点来检测图像的边缘;而后者是通过寻找

图像的 2 阶导数的零点来确定图像边缘的^[4,6]。由于这些算子普遍对噪声敏感,通常把噪声当做边缘点检测出来,而把真正的目标淹没。因此选择合适的边缘检测算子是非常重要的,其不仅应该具有良好的抑制噪声边缘能力,而且应具有保持目标边缘完备性的特征。

Canny 边缘检测算子也称高斯算子,对噪声最不敏感,在检测弱边界时性能最好,正好补充了上述的不足。它采用若干方向的模板,利用高斯滤波函数 $G(x, y)$ 对图像 $f(x, y)$ 进行卷积处理,得到平滑图像,然后计算平滑后图像的梯度幅度和方向,同时引进非极大值抑制过程,最后采用双阈值法对上一步图像进行处理^[7]。结果显示该方法能够对边缘细化,在保证了边缘的唯一性和单线性的同时,对噪声产生了一定的抑制能力,是一种较好的边缘检测算法,其处理流程如图 1 所示。

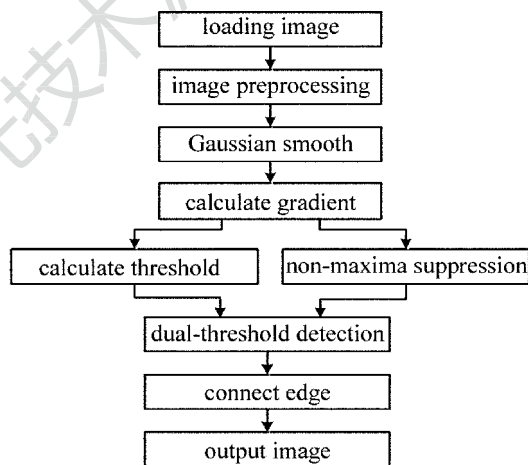


Fig. 1 Edge detection flowchart with Canny operator

这里结合实例给出具体效果图,图 2 是一幅空中飞机灰度图和一幅地面坦克灰度图,图 3 利用 Canny 算子对其边缘进行检测;图 4 分别根据文中所提到的其它方法对其进行边缘检测。从视觉效果可以看出:Canny 算子提取的边缘线性连接程度最好,对于有噪声的图像而言,不仅滤去了噪声,保留了有效信息的完整性,而且图像定位精度较高,达到

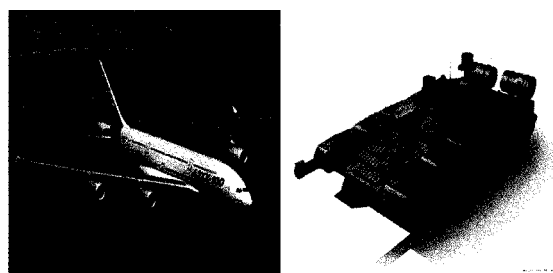


Fig. 2 Source image detected

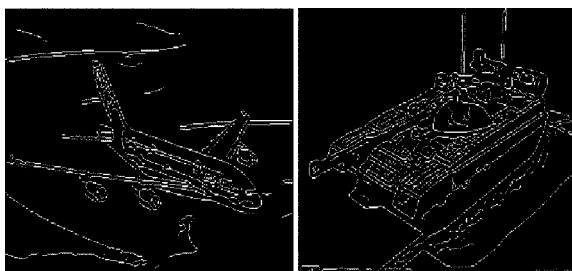


Fig. 3 Effect of detection used Canny operator

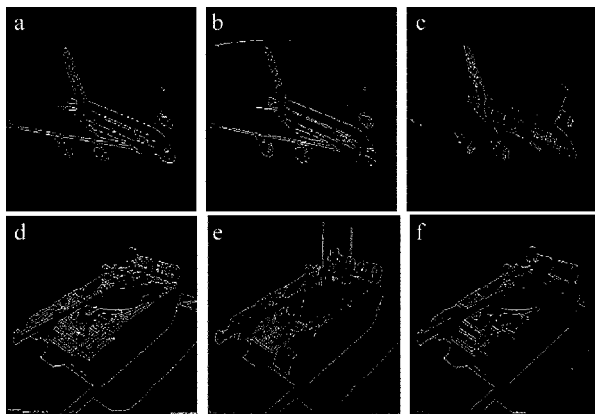


Fig. 4 Effect of detection used other operators

a—Sobel operator b—Laplacian operator c—Robert operator d—Sobel operator e—Laplacian operator f—Robert operator
了“非极大值抑制”的效果。

2 小波变换对图像的分解与重构

小波算法来源于 MALLAT 对图像分解与重构的塔式算法启发, MALLAT 根据多分辨率理论提出了小波分解与重构算法——Mallat 快速算法^[8], 这种算法通过在各层的特征域上进行有针对性的融合, 来提取原始图像的结构信息和细节信息, 另外, 由于它是一种多尺度、多分辨率且非冗余的分解, 所以图像经过小波变换之后数据的总量不会增大, 加之, 小波变换具有方向性这一独特性质, 可以获得视觉效果更佳的融合图像。

一般的图像可看作为 2 维信号, 采用小波算法进行图像融合处理时, 可使用 2 维小波图像分解法, 其分解算法可表示为:

$$\begin{cases} C_{j+1} = H_r H_c C_j \\ D_{v,j+1} = H_r G_c C_j \\ D_{h,j+1} = G_r H_c C_j \\ D_{d,j+1} = G_r G_c C_j \end{cases} \quad (1)$$

与之相对应的 2 维图像重构算法可表示为:

$$C_j = H_r^* H_c^* C_{j+1} + H_r^* G_c^* D_{v,j+1} + G_r^* H_c^* D_{h,j+1} + G_r^* G_c^* D_{d,j+1} \quad (2)$$

式中, H (低通), G (高通)为两个 1 维镜像滤波算子, 其下标 r, c 分别对应图像的 row 数和列数, C_{j+1} , $D_{v,j+1}$, $D_{h,j+1}$, $D_{d,j+1}$ 分别代表相对于源图像 C_j 的低频成分(用 LL 表示)、垂直方向上的高频成分(用 LH 表示)、水平方向上的高频成分(用 HL 表示)、对角方向上的高频成分(用 HH 表示)。 H^*, G^* 分别代表 H, G 的共轭转置矩阵。

一般对 2 维图像进行 N 层的小波分解, 可得 $3N + 1$ 个不同的频带, 其中包含 $3N$ 个高频带和 1 个低频带^[9]。图 5 是一个 2 维图像的一层小波分解示意图。

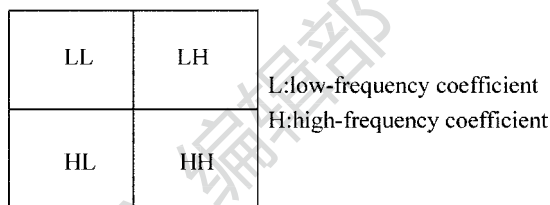


Fig. 5 Wavelet decomposition diagram

若要进行新的一层小波分解, 仅仅对当前图像左上角低频图像重新分解为 4 块子图, 其中 1 块对应的是平滑版图, 其余 3 块对应细节版图, 图 6 中分别是空中战斗机的 1, 2, 3 层小波分解图。从图中看出: 小波变换的层数越多, 融合结果的细节信息就越丰富, 但随着分解层数的增加, 图像的结构信息量损失变大, 而这些信息量均是小波逆变换所不能恢复的, 因此基于小波分解的层数不宜过高, 一般 N 取 2~5 层, 本系统选取分解层为 3。

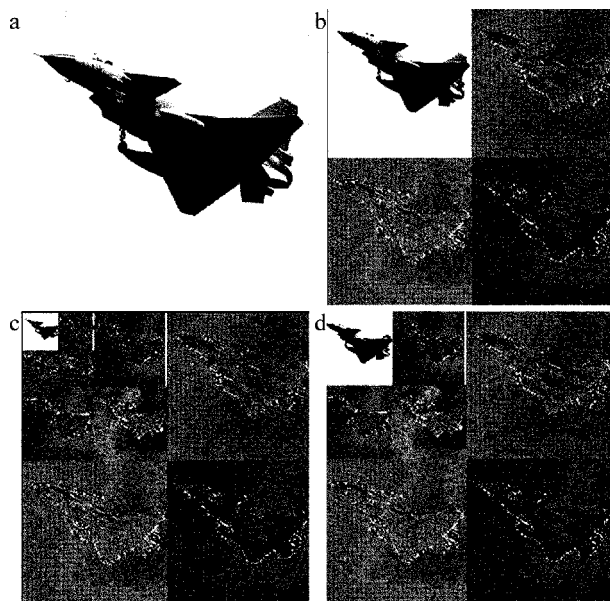


Fig. 6 Decomposition diagrams about the air fighter

a—air fighter b—a layer of wavelet decomposition diagram c—two layers of wavelet decomposition diagram d—three layers of wavelet decomposition diagram

3 融合规则

由图6可以看出,对图像进行小波分解时,不同频率分量的子图像包含着不同的特征信息^[10],所以,必须采用适合各自图像特征的融合规则对图像进行处理,从而最有效地利用互补信息的优势,达到良好的视觉效果。

3.1 低频子图像融合规则

图像的低频部分大都反映图像的主要结构信息,对两幅图像进行融合时,所包含的结构信息大多相同,所以采用加权平均法对其低频系数进行融合^[11-12]。

设A和B为待融合的两幅图像,经过N层小波分解后得到两幅图像的最低频子带的分解系数分别为 $L_{A,N}(x,y)$ 与 $L_{B,N}(x,y)$,若融合后的系数用 $L_{F,N}(x,y)$ 表示,则对于低频子带系数的加权平均法见下式:

$$L_{F,N}(x,y) = a_1 L_{A,N}(x,y) + a_2 L_{B,N}(x,y) \quad (3)$$

式中, (x,y) 表示图像经过N层分解所对应的像素点; a_1 和 a_2 为加权系数,并且 $a_1 + a_2 = 1$,由于两幅图像的低频子图像包含信息量大体一致,所以这里取 $a_1 = a_2 = 0.5$ 。采用此方法可最大限度减少计算量,且融合效果显著。

3.2 高频子图像融合规则

图像的高频部分一般包含了源图像的边缘、区域边界特性等细节信息,对其处理的主要目的是保留边缘和更丰富的细节信息。一般的,图像可被看成由不同灰度等级的区域构成,物体的边缘表现为灰度差。对于高频部分而言,其局部区域特征突显不一致。因此可以先利用Canny算子提取出高频图像的边缘,然后以边缘建立区域窗口 $3\text{cm} \times 3\text{cm}$,再根据局部区域特征比较区域方差的大小,区域方差的大小反映图像包含的细节(纹理)信息^[6],换句话说,区域方差越大,图像就越清晰。综上所述:可利用Canny算子与局部区域方差准则对图像的高频系数进行融合^[11],这里首先给出局部方差的表示为:

$$D = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [H(x,y) - \mu]^2 \quad (4)$$

式中, $H(x,y)$ 表示图像的高频子系数, μ 表示图像的区域方差均值。

设源图A,B在各个方向上的局部方差表示为 $D_{A_i,N}(x,y)$, $D_{B_i,N}(x,y)$,由(4)式定义可得:

$$D_{A_i,N}(x,y) = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [H_{A_i}(x,y) - \mu]^2 \quad (5)$$

$$D_{B_i,N}(x,y) = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [H_{B_i}(x,y) - \mu]^2 \quad (6)$$

式中, H_{B_i} 表示经过Canny算子处理的高频系数,其中 $i=1,2,3$ 分别代表水平、垂直、对角线方向的系数, $D_{A_i,N}(x,y)$ 代表图像A经过N层分解i方向上的局部方差。

对融合后图像F的高频系数 H_{F_i} 求解,这里引入 W_1, W_2 分别代表归一化处理后的局部方差:

$$\begin{cases} W_1 = \frac{D_{A_i,N}(x,y)}{D_{A_i,N}(x,y) + D_{B_i,N}(x,y)} \\ W_2 = \frac{D_{B_i,N}(x,y)}{D_{A_i,N}(x,y) + D_{B_i,N}(x,y)} \end{cases} \quad (7)$$

当 $W_1 \gg W_2$ 时, $H_{F_i}(x,y) = H_{A_i}(x,y)$;否则 $H_{F_i}(x,y) = H_{B_i}(x,y)$ 。

4 基于小波变换的图像融合步骤

为了研究方便,这里选取已配准的红外图像A和可见光图像B作为研究对象,并加以解释说明:(1)对A,B图像进行小波分解,得到对应的低频和高频子图;(2)对上述图像的低频子图分别提取低频系数,然后利用加权平均法对经过N层分解后的最低频系数 $L_{A,N}(x,y), L_{B,N}(x,y)$ 进行融合,得到 $L_{F,N}(x,y)$ 作为融合图像在该尺度上的低频近似分量;(3)对步骤(1)中3个方向上的高频子图的高频分量采用Canny算子进行边缘检测,保证良好的定位性能以及目标边缘唯一性,利用该边缘信息产生区域段,最终形成区域图;(4)在 $3\text{cm} \times 3\text{cm}$ 的区域窗口中,利用(5)式、(6)式求出A,B图像各方向上的区域方差 $D_{A_i,N}(x,y), D_{B_i,N}(x,y)$;(5)对各个方向上的区域方差进行归一化,得到归一化因子 W_1, W_2 ,比较其大小

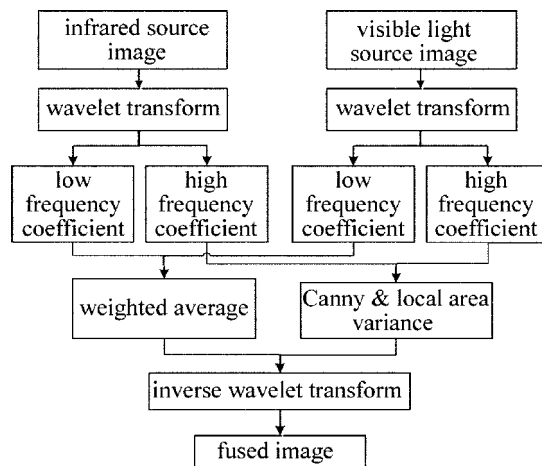


Fig.7 Fusion schematic with the wavelet transforms

并得出融合后图像 F 在各个方向上的高频子系数；(6)将步骤(2)和步骤(4)得到的低频系数和高频系数进行小波逆变换,从而得到融合后的图像^[13]。

整个处理过程如图 7 所示。

5 实验及结果分析

5.1 算法仿真

为了验证本文中所提出的图像融合算法的效果,这里分别使用红外源图和可见光源图进行融合实验,并给出了图像的性能评价。

这两幅图像大小都为 256pixel × 256pixel,且为同一视角、同一时刻(黄昏)摄取空中隐蔽飞机图片。其中图 8a 是一幅可见光图像,由于光线昏暗,只能看见一些细节信息(云朵),而目标在昏暗背景下很难辨析;图 8b 是一幅热红外图像,可以清晰辨认出目标的大致轮廓和一些太阳光辐射的热能量信息,而细节无法辨认。在 VC++ 6.0 环境下,对这两幅图像分别采用 Canny 算子法、Sobel 算子法、传统小波方法以及本文中所提出的改进方法进行比较,其效果图如图 8c、图 8d、图 8e 与图 8f 所示。通过实验可以清楚发现,本文中所采用的方法不仅色彩鲜明、轮廓清晰、背景自然,并且达到了良好的视觉效

果和快速识别目标的目的,有效解决传统方法模糊、识别率差等缺陷,提高了系统检测与识别性能。

5.2 算法性能分析

为了定量地检验算法的性能,用数字说明算法的真正优越性,这里采用通常评价图像性能的两类指标对其补充说明。由于图像的空间细节的增强与光谱信息的保持是图形融合考虑的重点^[14],故采用反映空间细节信息的参量如方差、信息熵和清晰度,以及反映光谱信息的参量(如扭曲度、偏差指数)进行评价。这里用个别参量说明问题。

熵值反映了融合图像所包含的平均信息量的多少,信息熵的对比反映图像的细节表现能力。清晰度(即空间频率)作为评价标准,值越大表明图像越清晰,空间质量越好;偏差指数是用来反映融合图像与源图像在光谱信息上的匹配程度;扭曲度则反映融合后的目标图像边缘轮廓与源图的差异程度,后两种评价指标均为越小越好^[15]。借助 MATLAB7.0 的图像处理工具箱中的相关函数,上述指标均可容易得到。表 1 中给出了评价准则值。

Table 1 Analysis of experimental results

indicators	Canny operator	Sobel operator	traditional wavelet	new algorithm
information entropy	9.2567	8.7936	8.5873	9.8432
spatial frequency	89.9672	81.2684	78.5469	94.6931
deviation index	0.3503	0.4573	0.5684	0.2046
distortion degree	0.1762	0.2152	0.4564	0.0213

无论是从视觉效果还是从客观分析方面,都可以说明本文中采用方法的优越性能以及有效性。

6 结 论

伴随着红外技术不断推进以及小波技术理论的成熟,图像融合技术将不仅在军事领域突出表现出独特的探测、跟踪、识别与反伪装性能,并且在医学成像、天气预报、计算机视觉等民用领域也会取得更好的发展前景。本文中结合红外与可见光 CCD 图像实例,验证了 Canny 算子与小波变换相组合的图像融合与边缘检测方法的优越性。该方法抑制了噪声对红外与可见光源图边缘的影响,改进了传统融合算法模糊、识别率差等缺点,在很好地保持图像边缘信息的前提下,还充分挖掘了红外和可见光源图的所有的互补及冗余信息,并且有针对性地突出和强化人们所感兴趣的特征和细节。

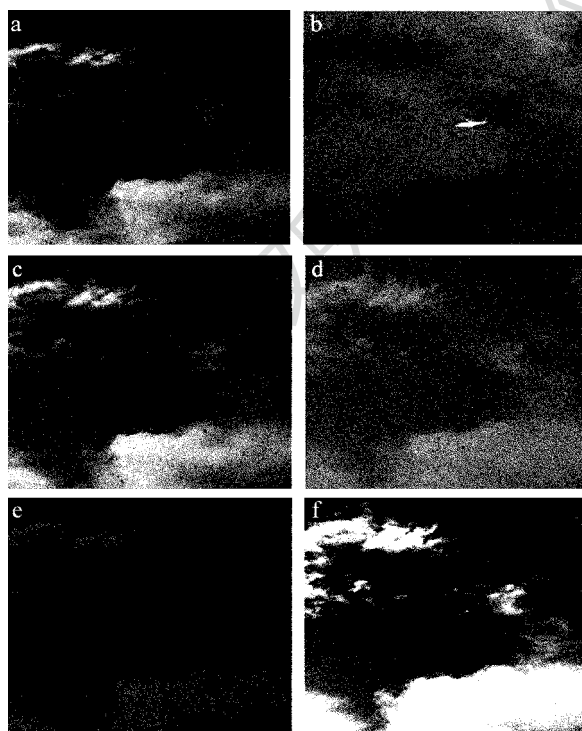


Fig. 8 Comparison of other algorithms with algorithm given in paper a—visible light source image b—infrared source image c—Canny operator method d—Sobel operator method e—traditional wavelet f—the algorithm given in paper

参 考 文 献

- [1] LIU S T, ZHOU X D. Recent development of image fusion techniques[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(8): 627-631 (in Chinese).
- [2] ZHUANG Y F. Research on image edge detection based on wavelet transform and its applications[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007; 18-26 (in Chinese).
- [3] WANG W L. On infrared image processing based on wavelet transform[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2008; 3-9 (in Chinese).
- [4] WANG X S, SONG K. The algorithm of edge detection based on multiscale wavelet transform[J]. Transactions of Shenyang Ligong University, 2008, 27(4): 16-19 (in Chinese).
- [5] ZHANG Y, HONG G. An IHS and wavelet integrated approach to improve pan-sharpening visual quality of natural colour IKONOS and quick bird images[J]. Information Fusion, 2005, 6(3): 225-234.
- [6] XIAO H. Research of infrared and visible image fusion algorithm based on wavelet transform[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2009; 23-31 (in Chinese).
- [7] DI H W, ZHANG W I. Application of wavelet edge detection based on Canny criteria in image fusion[J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32(6): 79-82 (in Chinese).
- [8] LI H H, GUO L, LIU H. Current research on wavelet-based image fusion algorithms[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5813: 360-367.
- [9] CHANG H W, LAN Sh D. Image fusion based on addition of wavelet coefficients[C]//International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition. Beijing, China; IEEE, 2007: 1585-1588.
- [10] LIAN J, WANG K, LI G X. Edge-based image fusion algorithm with wavelet transform[J]. Journal on Communications, 2007, 28(4): 18-23 (in Chinese).
- [11] ZENG H, LI Y X, WANG Q. Some applications in image procession with wavelets [C]//Proceedings of 2010 Asia-Pacific Youth Conference on Communication. Kunming, China; IEEE, 2010; 356-359.
- [12] NIU Y F, XU Sh T, HU W D. Fusion of infrared and visible image based on target regions for environment perception[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 128/129: 589-593.
- [13] DENG A, WU Ji Y Sh. An image fusion algorithm based on discrete wavelet transform and canny operator[C]//Communications in Computer and Information Science 2011. Wuhan, China: Springer, 2011, 175: 32-38.
- [14] HU L M, GAO J, HE K F. Research on quality measures for image fusion[J]. Electronics, 2004, 32(s1): 218-221 (in Chinese).
- [15] WEN C Y, CHEN J K. Multi-resolution image fusion technique and its application to forensic science[J]. Forensic Science International, 2004, 140(2/3): 217-232.