

一种综合纹理和边缘信息的多尺度图像融合方法

刘 刚, 敬忠良, 孙韶媛, 李建勋

(上海交通大学 航空航天信息与控制研究所, 电子信息与电气工程学院, 上海 200030)

摘 要: 提出了一种综合纹理和边缘信息的多尺度图像融合方法。该方法通过高斯滤波获得原始图像的金字塔分解, 考虑高斯滤波器和 Laws 纹理提取滤波器以及边缘梯度滤波器之间的线性关系, 采用奇异值分解法求出纹理和边缘图像的对应系数; 利用各尺度图像的这些特征, 对分解后图像的各层进行表示, 并采用基于相似性测度和显著性测度的融合策略进行融合。为了衡量融合结果, 采用了一个客观图像融合性能评价测度对融合结果进行评价。最后用若干组图像数据对该算法进行了仿真。试验表明, 该方法比传统的梯度金字塔分解和基于纹理的金字塔分解方法具有更好的融合效果。

关键词: 图像融合; 图像金字塔分解; 纹理

中图分类号: TN951.2 **文献标识码:** A

1 引 言

近年来, 多传感器图像融合技术在机器视觉、遥感、医学、军事等领域得到了广泛的关注^[1,2]。多传感器图像融合是指多个传感器采集的关于同一目标或场景的图像数据, 根据某种算法进行适当的综合处理, 产生一幅满足某种需求的新图像^[3]。

目前具有代表性的图像融合方法有基于塔形变换的方法^[1]、基于子波变换的方法^[2]等, 是基于多尺度的融合方法, 而且都取得了良好的效果。图像多尺度分解技术与人类视觉系统中观察事物的过程十分相似, 图像的多尺度分解技术包括图像的小波变换、多速滤波器表示以及金字塔变换。其中, 基于金字塔变化的融化方法可能成为最有希望的融合方法^[4]。尽管小波在图像表示中展现了很多优越性, 如在正交性表示、方向敏感性以及降噪性能方面都超过了金字塔分解方法。但是小波在位移不变性方面的性能较差, 从而影响了图像融合效果。因而本文研究重点转向基于金字塔分解图像融合方法。

多尺度图像融合的过程可以参见图 1。

本文重点研究了多尺度分解的图像融合方法, 对边缘梯度金字塔方法^[4]和 Barron 等人提出的纹理金字塔方法^[5]进行了研究。文献[4]中提出的方法是基于边缘细节信息的显著性测度进行融合的; 而纹理金字塔融合方法是基于纹理信息的显著性测度进行融合的。文献[4]仅考虑了图像不同尽度的边缘特征, 忽略了图像的纹理特征。文献[5]对其进行修改, 将梯度金字塔转换成纹理金字塔。但在融合过程中仅考虑了图像不同尽度的纹理特征, 又忽略了图像的边缘信息。本文将梯度滤波器和纹理滤波器结合起来, 提出了一种综合图像纹理信息和边缘信息的图像融合方法。该方法通过简单的高斯滤波获得对图像的金字塔分解, 考虑高斯滤波器与 Laws 纹理提取滤波器和边缘梯度滤波器之间的线性关系, 采用奇异值分解法求出纹理图像对应的系数, 使得金字塔的各层的纹理和边缘信息都能够表示出来。最后采用基于相似性测度和显著性测度的融合策略进行融合。融合结果采用了 Xydeas 等提出的客观评价融合指标^[6]对所采用的融合方法进行了定理的评价。

收稿日期: 2003-12-23; 修订日期: 2004-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(160375008), 上海市科技发展基金重点项目(015115038), 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20020248029), 航空科学基金(02D57003)、航天科技创新基金和航天支撑技术基金资助项目。

作者简介: 刘 刚(1977—)男, 上海交通大学博士研究生, 主要研究方向为目标识别、图像融合、信号处理。

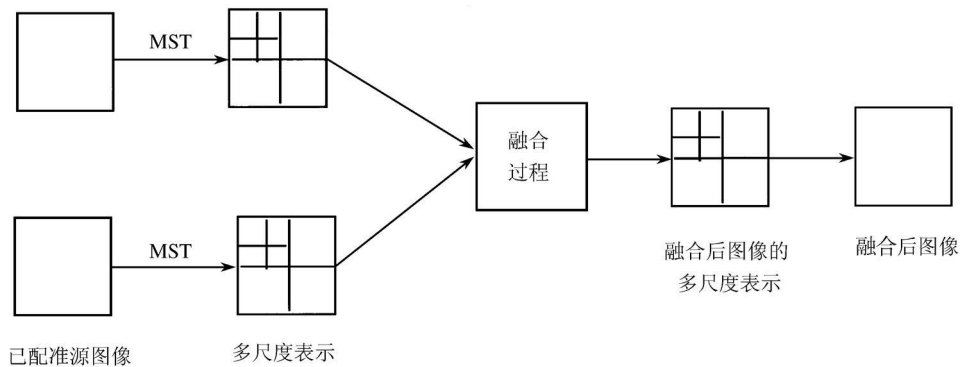


图 1 多分辨率图像融合结构图

Fig. 1 Block diagram of a generic multi-resolution image fusion

2 基于纹理和边缘特征的金字塔分解

基于纹理和边缘的金字塔分解方法是通过改进梯度金字塔方法获得的。采用纹理提取滤波器模板和边缘梯度滤波器模板分别对高斯金字塔的每层进行滤波,生成一系列纹理和边缘图像。金字塔能够通过这些图像完全表示。

在设计金字塔算法是,应该首先考虑分解后的图像是否能够重构,也就是重构的条件。这主要在于所选用的纹理和边缘滤波器模板与金字塔分解所用的二项滤波器必须保证图 2 中的虚线框中的部分作用相同,从而推出必须满足公式(1)。

$$(1 - w_{\text{new}} = \sum_{i=1}^{25} t_i T_i \cdot T_i + \sum_{i=1}^4 c_i D_i \cdot D_i) \quad (1)$$

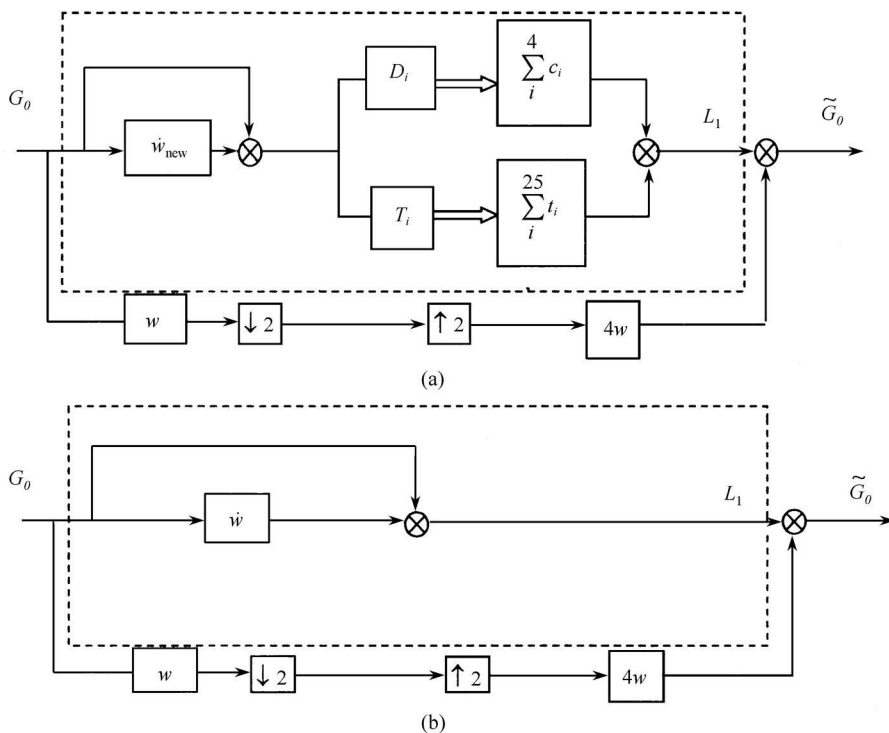


图 2 金字塔一层分解和重构示意图

(a)本文采用的金字塔分解方法;(b)传统的金字塔分解方法

Fig. 2 Block diagram of a pyramid decomposition and reconstruction

(a)The proposed pyramid method;(b)The traditional pyramid method

其中, t_i 和 c_i 是通过奇异值分解得到的纹理滤波器和边缘梯度滤波器系数; T_i 为纹理提取滤波器, D_i 为边缘梯度滤波器, 我们统称为特征提取滤波器。该式将特征提取滤波器(边缘和纹理)与高斯二项滤波器之间建立起了一个关系, 这样使得基于边缘和纹理特征的金字塔分解的每一层的总体特性与传统的基于梯度的金字塔分解方法一样, 并且得到了每一层分解的边缘和纹理信息。此外, 为了保证等式两边的维数相等, 必须将二项滤波器 \dot{w} 和方向梯度滤波器 d_i 通过卷积方式进行扩维, 如公式(2)和公式(3)。

$$\dot{w}_{\text{new}} = (\dot{w} * \dot{w}) * (\dot{w} * \dot{w}) \quad (2)$$

$$D_i = d_i * d_i \quad (3)$$

得金字塔的生成核:

$$w = \dot{w}_{\text{new}} * \dot{w}_{\text{new}} \quad (4)$$

纹理滤波器采用 Laws^[5] 的 5 个提取纹理的核向量经过卷积得到:

$$\begin{aligned} l_5 &= [1 \quad 4 \quad 6 \quad 4 \quad 1] \\ e_5 &= [-1 \quad -2 \quad 0 \quad 2 \quad 1] \\ s_5 &= [-1 \quad 0 \quad 2 \quad 0 \quad -1] \\ u_5 &= [-1 \quad 2 \quad 0 \quad -2 \quad 1] \\ r_5 &= [1 \quad -4 \quad 6 \quad -4 \quad 1] \end{aligned}$$

方向滤波器 d_i 分别为:

$$\begin{aligned} d_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; d_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.5 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \\ d_3 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; d_4 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}; \end{aligned}$$

将梯度滤波器进行维数扩展, 如(3)式得到 9×9 的滤波器, 与纹理滤波器共同组成 29 个滤波器 F_l ($l=1, 2, \dots, 29$)。金字塔分解过程可采用公式(5)。

$$L_{kl} = f_l(F_l * F_l * [G_k + \dot{w}_{\text{new}} * G_k]) \quad (5)$$

其中 F_l 和 f_l 分别为特征提取滤波器和其相应的系数; L_{kl} 是分解后的特征图像。

重构时, 必须先将分解后的金字塔组合成 FSD (Filter-subtract-decimate) 金字塔, 然后通过 FSD 金字塔进行重构, 如公式(6)

$$L_{kl} = \sum_{i=1}^{29} L_{kli} \quad (6)$$

3 融合策略

图像分解成基于纹理和边缘的多尺度形式后,

融合方法采用 Burt 提出的基于相似性测度和显著性测度进行融合的策略。标记第 k 层第 l 方向的图像为 L_{kl} 。

首先计算两幅图像金字塔分解系数的活性测度, 设两组分解系数的显著性测度分别为 $A(\mathbf{p})$ 和 $B(\mathbf{p})$, 采用基于窗口的测度, 窗口大小为 3×3 , 窗口模板系数为:

$$\alpha = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \frac{1}{16}$$

则显著性测度为

$$S(\mathbf{p}) = \sum_{s \in S, t \in T} \alpha(s, t) L_{kl}(m+s, n+t, k, l)^2 \quad (7)$$

相似性测度为

$$M_{AB}(\mathbf{p}) = \frac{2 \sum_{s \in S, t \in T} \alpha(s, t) L_{kl}^A(m+s, n+t, k, l) L_{kl}^B(m+s, n+t, k, l)}{S_A^2(\mathbf{p}) + S_B^2(\mathbf{p})} \quad (8)$$

如果相似性测度 $M_{AB} \geq \alpha$, 则 $w_A = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left(\frac{1 - M_{AB}}{1 - \beta} \right)$,

且 $w_B = 1 - w_A$

如果相似性测度 $M_{AB} < \alpha$, 则

$$\begin{cases} w_A = 1 & \text{如果 } S_A > S_B, \\ w_A = 0 & \text{其他,} \end{cases} \quad \text{且 } w_B = 1 - w_A \quad (9)$$

最后得融合策略:

$$L_{kl}^F(\mathbf{p}) = w_A(\mathbf{p}) L_{kl}^A(\mathbf{p}) + w_B(\mathbf{p}) L_{kl}^B(\mathbf{p}) \quad (10)$$

利用公式(10)所求出的 L_{kl} 进行基于纹理和边缘的金字塔反变换即可得到融合图像。

4 试验结果

本文采用两种评价指标, 一个是由 Xydeas 和 Petrovic^[6] 在 2000 年提出的图像融合客观评价测度 (Object Measure), 这里为了方便起见, 简称 OM; 另一个评价指标是传统的熵值。

考虑到图像融合的一个目的是为了在输出图像中尽量保留输入图像的重要信息, 一个客观评价测度就应当满足两个条件:(1)提取输入图像的所有重要特征;(2)测量融合后的图像是否能够精确的反应输入图像的这些信息。这样 OM 测度将图像的边缘和纹理信息视为“重要”信息, 通过衡量输入图像的

边缘和纹理等信息变换到输出图像的程度,就可以得到这种客观测度。OM 的值越大,融合图像包含重要信息越多,从而说明融合效果越好。

本试验分别对 LDTV 和 FLIR 图像、红外与 SAR 图像以及多聚焦图像进行了仿真,分别采用了边缘梯度金字塔方法,基于纹理的金字塔方法以及本文所述的方法进行了测试。融合性能采用 OM 测度和熵值进行评价。

图 3 表示的是 IR 红外图像和 SAR 合成孔径雷达图像以及融合结果。图 3(a)IR 图像中可以清楚地看到对比度较大的机场跑道,图 3(b)SAR

图像中,在右上角和左下角可以看到一些比较清晰的城区以及左上角的 3 个地洞。图 3(c)–(e)中可以看到融合结果将这些比较重要的信息融合在一幅图像中。本文提出的方法较前两种方法有一些改善。表 1 的评价指标显示出本文的方法较前两种方法的 OM 测度有比较明显的提高,这说明融合图像包含了更多的重要信息(纹理和边缘信息)。表 1 中的熵值也有一些提高,这说明融合后图像在平均信息量增加的同时提高了重要信息的保留程度。

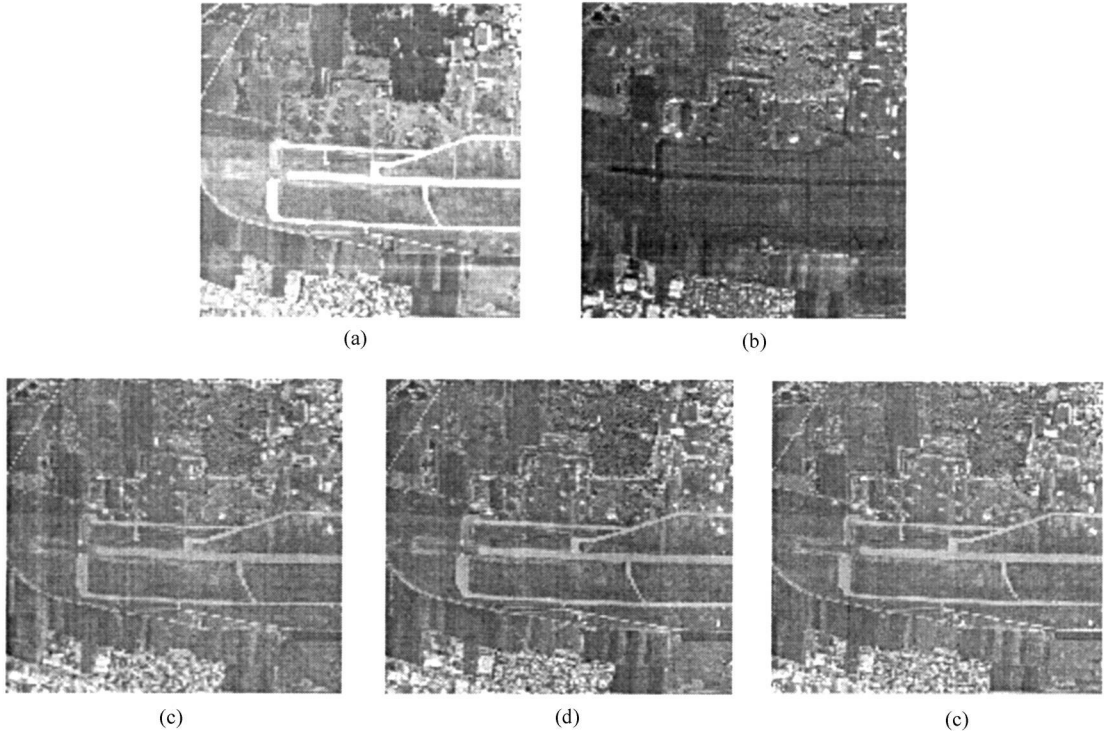


图 3 IR 和 SAR 图像的融合

(a)IR 图像:(b)SAR 图像:(c)采用边缘梯度金字塔方法融合:(d)采用基于纹理的金字塔方法融合:(e)本文所采用的方法

Fig. 3 IR and SAR image fusion

(a) IR image:(b)SAR image:(c) Fusion based on edge gradient pyramid method;
(d) Fusion based on texture component pyramid method:(e) The proposed method

图 4 表示的是对多聚焦图像的融合结果。图 4 (a),(b)是分别对图像不同部分聚焦成像的结果,图 4(c)–(e)是不同融合算法的融合结果。图像的融合效果无法通过肉眼区分其优劣。表 2 展示了图像的性能评价结果。本文所采用方法的 OM 测度较传统的基于方向梯度的图像融合方法有所下降,熵值有所上升。而且随着分解层数的增加,融合评价指标下降。

试验表明,该方法在融合不同种类传感器图像,

尤其是对 SAR 和红外图像融合时比基于梯度的金字塔算法和基于纹理的金字塔算法有更好的融合效果。但是,对于同类传感器的多聚焦 CCD 图像,融合性能有所下降,原因是对于试验所采用的 CCD 图像,它们的纹理信息并不显著,而采用基于纹理和边缘特征融合方法的过程中,所求取的纹理信息在计算融合测度时已起到了相当的作用,使得边缘特征的作用减小。而采用基于纹理的金字塔分解方法在融合过程中完全失去了对边缘信息的控制。因此,

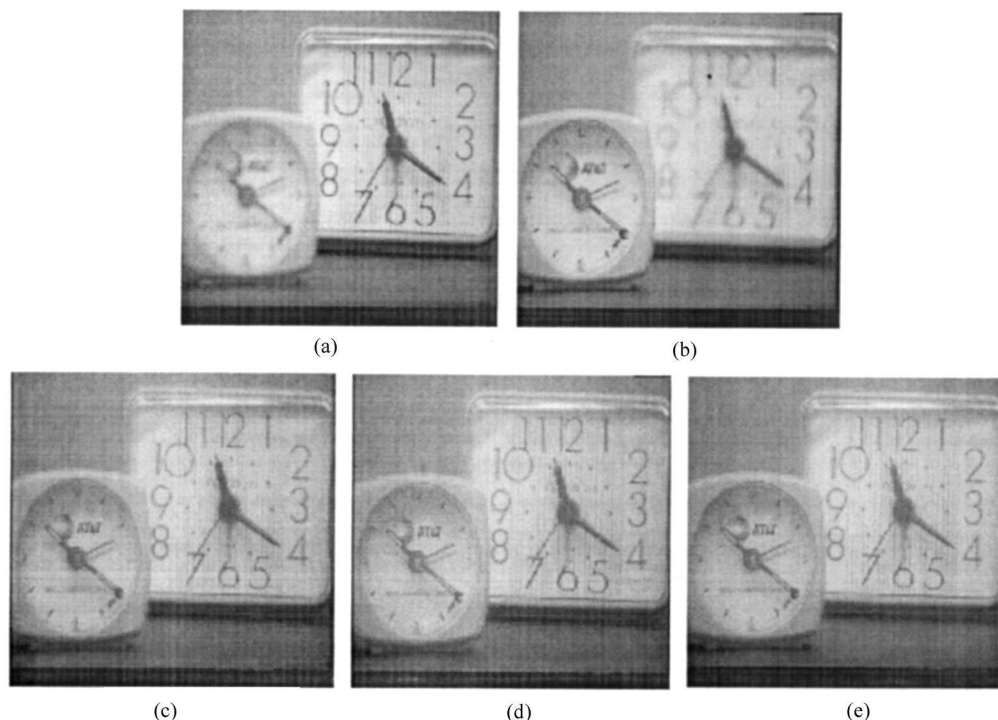


图 4 多聚焦图像的融合

(a)多聚焦图像 A;(b)多聚焦图像 B;(c)采用边缘梯度金字塔方法融合;(d)采用基于纹理的金字塔方法融合;(e)本文所采用的方法

Fig-4 Multifocus image fusion

(a) Multifocus image A;(b) Multifocus image B;(c) Fusion based on edge gradient pyramid method;
(d) Fusion based on texture component pyramid method;(e) The proposed method

该方法的主要缺点是在对图像进行多尺度分解后的表示是一种过完全的表示,从而影响了计算速度。在主频 Pentium 566、内存 128M 的计算机上融合两幅 512×512 的图像运算时间比较见表 3。可以通过适当选择金字塔分解层数来提高运算速度。

(如 IR 红外图像和 SAR 合成孔径雷达图像)进行融合时采用 3 层分解比较合适,因为在超过 3 层以上的分解,其融合性能的提高并不是很大。在对多聚焦图像进行融合时,采用一层分解就可以达到较好的效果。如表 1、2。

通过试验可以看出,在对不同种类传感器图像

表 1 红外与 SAR 图像融合效果

Table 1 IR and SAR image fusion performance

分解层数	边缘梯度金字塔分解方法		基于纹理的金字塔分解方法		本文所采用的多尺度方法	
	OM	熵值	OM	熵值	OM	熵值
1	0.3948	4.5884	0.4447	4.6865	0.4564	4.6866
2	0.4393	4.6097	0.4574	4.7100	0.4591	4.7110
3	0.4509	4.6236	0.4597	4.7202	0.4716	4.7200
4	0.4532	4.6321	0.4602	4.7310	0.4721	4.7320
5	0.4537	4.6448	0.4604	4.7446	0.4722	4.7447
6	0.4538	4.6644	0.4604	4.7769	0.4722	4.7780

表 2 多聚焦图像的融合效果

Table 2 Multifocus image fusion performance

分解层数	边缘梯度金字塔分解方法		基于纹理的金字塔分解方法		本文所采用的多尺度方法	
	OM	熵值	OM	熵值	OM	熵值
1	0.6295	4.8362	0.6509	4.8792	0.6513	4.8792
2	0.6588	4.8581	0.6523	4.8818	0.6530	4.8816
3	0.6636	4.8762	0.6436	4.8964	0.6443	4.8963
4	0.6567	4.8888	0.6360	4.8567	0.6368	4.8567
5	0.6506	4.8541	0.6340	4.8377	0.6348	4.8376
6	0.6499	4.8411	0.6339	4.7442	0.6347	4.7441

表 3 运算时间比较

Table 3 Time takes by different method

方法	边缘梯度金字塔分解方法	基于纹理的金字塔分解方法	本文所采用的多尺度方法
时间/s	13.2890	73.7210	74.8480

5 结 论

本文提出的算法在进行多尺度金字塔展开的基础上充分利用了图像的边缘和纹理信息,得到的融合图像具有较高的融合性能。该方法尽可能地将待融合图像的一些显著特征(如边缘、纹理)信息融入一幅图像中。尽管这种方法在运算时间上相对较长,但是可以通过适当选择多尺度展开的层数进行改善。通过试验和分析表明,该方法比传统的梯度金字塔分解和基于纹理的金字塔分解方法具有更好的融合效果。

参 考 文 献(References)

[1] Liu G X, Yang W H. A Multiscale Contrast Pyramid-based Image Fusion Scheme and Its Performance Evaluation[J]. *Acta Optica Sinica*,

2001, **21**(11); 1336—1342. [刘贵喜, 杨万海. 基于多尺度对比度塔的图像融合方法及性能评价[J]. *光学学报*, 2001, **21**(11); 1336—1342.]

[2] Pu T, Fang Q Z, Mi G Q. Contrast Based Multiresolution Image Fusion[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, **28**(12); 116—118.

[蒲恬, 方庆, 倪国强. 基于对比度的多分辨率图像融合[J]. *电子学报*, 2000, **28**(12); 116—118.]

[3] Zhang Z, Blum R S. A Categorization of Multiscale—Decomposition—Based Image Fusion Schemes with a Performance Study for a Digital Camera Application[J]. *Proc. IEEE*, 1999, **87**(8); 1315—1326.

[4] But P J, Koleczynski R J. Enhanced Image Capture Through Fusion [A], in Proc. 4th Int. Conf. Computer Vision[C]. Berlin, Germany, 1993, 171—182.

[5] Barron D R, Thomas O D J. Image Fusion Through Consideration of Texture Components [J]. *Electronics Letters*, 2001, **37**(12); 746—748

[6] Xydeas C S, Petrovic V. Objective Image Fusion Performance Measure [J]. *Electronics Letters*, 2000, **36**(4); 308—309.

A Multi-Scale Image Fusion Scheme with Texture and Edge Information

LIU Gang, JING Zhong-liang, SUN Shao-yuan, LI Jian-xun

(Institute of Aerospace Information and Control, School of Electronics and Information, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: A new multi-scale scheme for image fusion is presented using texture and edge information in this paper. The original images are decomposed into texture and edge maps by pyramid structures. The coefficients corresponding to the filtered texture and edge maps are solved by the singular value decomposition and the linear relationship between Gauss filter and Laws texture extract filter. The decomposed images are represented using the texture and edge features in each scale, and fused using the match and salience measures based fusion strategy. To evaluate the fusion results, objective image fusion performance metrics are used. The experiment results demonstrate by several real image data that the proposed scheme can achieve better fusion performance than the traditional pyramid decomposition methods.

Key words: image fusion; image pyramid decomposition; texture extract