

基于小波变换的图像融合方法*

王红梅, 张科, 李言俊

(西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072)

摘要:提出了一种基于小波变换的改进图像融合方法。对小波分解后的高频分量使用图像区域内像素的最大绝对值作为该区域中心像素的活性测度以得到融合图像的高频分量,对分解后的低频分量通过度量其图像块的质量来确定融合图像的低频分量。实验结果表明,该方法得到的融合图像清晰度和对比度都较好,是一种有效的图像融合算法。

关键词:图像融合; 小波变换; 空间频率; 对比度; 熵

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2005)03-0328-04

Image fusion algorithm based on wavelet transform*

Wang Hong-mei, Zhang Ke, Li Yan-jun

(College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract:An improved image fusion algorithm based on wavelet transform is presented. The image is decomposed into high-frequency image and low-frequency image. The maximum absolute value within the window of high-frequency image is used as an activity measure associated with the center pixel to get the fused high-frequency image. The quality of the blocks within the low-frequency image is measured to determine the fused low-frequency image. The experimental result shows that clarity and contrast of the fused image are improved. The proposed algorithm is verified effective for image fusion.

Key words:Image fusion; Wavelet transform; Spatial frequency; Contrast; Entropy

0 引言

对于同一目标或场景,由多个不同特性的传感器获取的图像信息是有差异的,即使采用相同的传感器,在不同观测时间或不同观测角度获得的信息也不同,从多个传感器获得的信息中包含了冗余信息和互补信息。因此,通过图像融合技术把这些来自多传感器数据的信息互补合成一幅能提供比原图像视觉信

息更丰富的新图像就显得十分重要。

图像融合可以分为像素级融合、特征级融合和决策级融合。在像素级融合中,多分辨率图像融合算法是应用广泛且极其重要的一类算法。根据分解形式的不同,多分辨率图像融合算法又可分为拉普拉斯金字塔、梯度金字塔、比率低通金字塔等多分辨率金字塔法^[1,2]和小波变换法^[1,2]。拉普拉斯金字塔、梯度金字塔和比率低通金字塔等方法的缺点是层间具有相关性,

收稿日期:2004-08-08; 修订日期:2004-09-15

* 基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金项目(20020699014)

作者简介:王红梅(1977-),女,宁夏灵武人,博士生,主要研究方向为图像融合、模式识别和计算机视觉等。

导致融合结果不够理想。小波变换将原始图像分解成一系列具有不同空间分辨率和频域特性的子图像,充分反映原始图像的局部特征变化,利用分解后的塔形结构,将被融合图像各自携带的特征与细节在多个分解层、多个频带上进行融合。Campbell 和 Robson^[3]的实验表明,人的视网膜是在不同的频道中进行治疗的,因而基于小波变换的图像融合方法可获得与人的视觉特性接近的融合结果。本文提出了一种基于小波变换的改进图像融合方法,它是对低频分量融合策略的改进,即使用图像的空间频率^[4]和对比度^[5]两个指标选择小波分解的低频图像块,接着对选出的图像块进行一致性检测,从而确定融合图像的低频分量;对于图像分解的高频分量则采用参考文献[2]中的方法,即将区域内像素的最大绝对值作为该区域中心像素的活性测度,选择活性测度较大的像素并进行一致性检测以得到融合图像的高频分量;最后对融合后的低频分量和高频分量进行小波重构得到融合图像。

1 图像的小波分解

小波变换由于其在频域与时域同时具有良好的局部化特性而广泛应用于图像处理与分析中。它能较好地解决传统的 Fourier 变换在时域和频域的矛盾,有“数字显微镜”之称。Mallat 提出的小波变换快速分解与重构算法利用两个一维滤波器实现对二维图像的快速小波分解,再利用两个一维重构滤波器实现图像的重构。Mallat 算法在 $j-1$ 尺度下的分解公式为:

$$\begin{cases} C_j = H_r H_c C_{j-1} \\ D_j^1 = H_r G_c C_{j-1} \\ D_j^2 = G_r H_c C_{j-1} \\ D_j^3 = G_r G_c C_{j-1} \end{cases} \quad (j=0, -1, \dots, -J) \quad (1)$$

式中 H 和 G 为两个一维镜像滤波算子,其下标 r 和 c 分别表示对矩阵的行操作和列操作,相应的二维图像重构算法为:

$$C_{j-1} = \overset{\cdot}{H}_r \overset{\cdot}{H}_c C_j + \overset{\cdot}{H}_r \overset{\cdot}{G}_c D_j^1 + \overset{\cdot}{G}_r \overset{\cdot}{H}_c D_j^2 + \overset{\cdot}{G}_r \overset{\cdot}{G}_c D_j^3 \quad (j=-J, -J+1, \dots, -1) \quad (2)$$

式中 $\overset{\cdot}{H}$ 和 $\overset{\cdot}{G}$ 分别为 H 和 G 的共轭转置矩阵; C_j 是

原始图像在 2^{-j} 分辨率上的近似(图像低频部分); D_j^ε ($\varepsilon=1,2,3$)为这种近似的误差(图像高频部分)。

2 基于小波变换的图像融合方法

在图像融合中,融合规则的选取非常重要。陶观群^[6]总结了四种基于小波变换的融合规则,这些方法对图像分解后的低频子图像大都采用加权平均法,使得融合图像清晰度和对比度降低,尤其在图像分解层数较低时图像降质比较明显。本文提出使用图像的空间频率和对比度来确定融合图像的低频分量。

2.1 空间频率

空间频率反映了一幅图像空间的总体活跃程度。对于一个 $M \times N$ 的图像块 F ,在位置 (m,n) 处的灰度值为 $F(m,n)$,空间频率的定义如下:

$$SF = \sqrt{(RF)^2 + (CF)^2} \quad (3)$$

式中 RF 和 CF 分别为行频率和列频率:

$$RF = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=2}^N [F(m,n) - F(m,n-1)]^2} \quad (4)$$

$$CF = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{n=1}^N \sum_{m=2}^M [F(m,n) - F(m-1,n)]^2} \quad (5)$$

2.2 对比度

图像的对比度 C 定义为:

$$C = (I - I_B) / I_B = I_H / I_B \quad (6)$$

式中 I 表示图像亮度; I_B 表示图像的低频部分; I_H 是图像的高频部分。本文对待融合图像小波分解后的低频子图像 L 计算对比度。首先对 L 进行低通滤波,得到 L_B ,然后用 L 减去 L_B 即可得到高频分量 L_H ,进而计算 L 的对比度。

2.3 图像融合步骤

本文提出的改进融合方法步骤如下:

- (1) 设 A 和 B 为两幅(可以扩展到多幅图像)已配准的待融合图像,对其进行小波分解;
- (2) 对于 A 和 B 分解后的高频分量采用参考文献[2]中提出的策略进行融合;

(3) 对于低频分量,首先将其分解成 $m \times n$ 大小的图像块,分别记为 A_{Lk} 和 B_{Lk} 。设 W_1 和 W_2 为加权因子,满足 $W_1 + W_2 = 1$, 计算 A_{Lk} 和 B_{Lk} 的空间频率 SF_{Lk} 和对比度 C_{Lk} , 将 $D_{Lk} = W_1 SF_{Lk} + W_2 C_{Lk}$ 作为第 k 个图像块质量的度量($i=A,B$), 融合图像低频分量的第 k 块由下式确定:

$$F_{Lk} = \begin{cases} A_{Lk}, & D_{Ak} > D_{Bk} \\ B_{Lk}, & D_{Ak} \leq D_{Bk} \end{cases} \quad (7)$$

对选出的图像块进行一致性检测得到融合图像的低频分量;

(4) 对步骤(2)和(3)中确定的高频分量和低频分量进行小波重构得到最终的融合图像。

3 实验结果与评价

在传统的基于小波变换的图像融合中,对低频分量大都采用平均法,本文提出了一种新的确定融合图像低频分量的方法,并选择多幅图像进行了验证。在待融合图像进行小波分解后,对高频分量都采用参考文献[2]中的方法;对于低频分量,分别采用平均法(称为方法 1)和本文提出的方法(称为方法 2)得到对比结果。方法 1 和方法 2 中使用相同的小波滤波器,其系数如表 1 所示。其中 Lo_D 为低通分解滤波器;Hi_D 是高通分解滤波器;Lo_R 是低通重构滤波器;Hi_R 为高通重构滤波器。进行了从 2~8 层小波分解

表 1 小波滤波器系数

Tab.1 Coefficients of wavelet filter

Filter name	Coefficients of filter						
Lo_D	-0.1768	0.3536	1.0607	0.3536	-0.1768	0	0
Hi_D	0	0	-0.3536	0.7071	-0.3536	0	0
Lo_R	0	0	0	0.3536	0.7071	0.3536	0
Hi_R	0	-0.1768	-0.3536	1.0607	-0.3536	-0.1768	0

的实验。图 1(a)和(b)是大小为 480×640 、聚焦点不同的两幅原始图像,(c)给出的是方法 1 在 4 层小波分解时的融合结果(它的最佳小波分解层数为 5 层)(d)为方法 2 在最佳小波分解层(4 层)时的结果,为便于进

行对比;图 2(a)是一幅红外图像,(b)是一幅可见光图像,(c)是小波分解层数为 4 时采用方法 1 的结果(它的最佳小波分解层数为 7 层), (d)是采用方法 2 在最

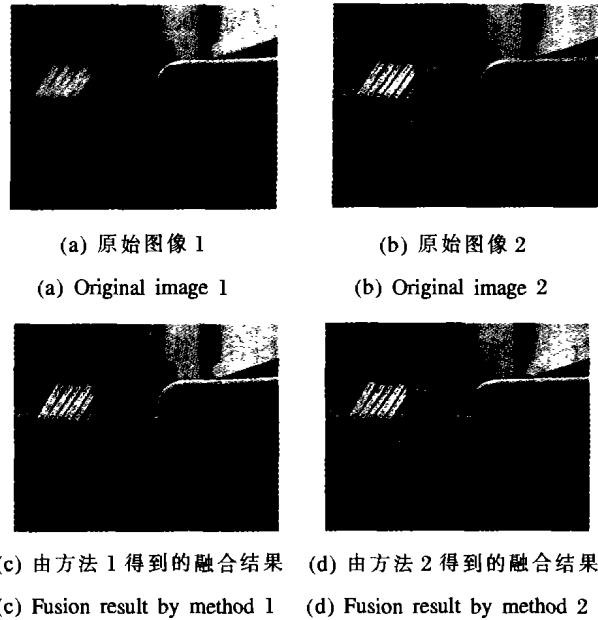


图 1 两幅聚焦点不同的图像融合结果

Fig.1 Fusion result of multi-focus images

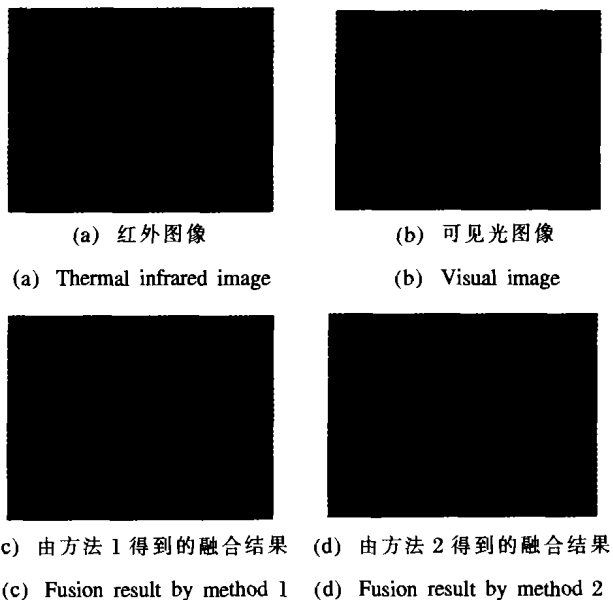


图 2 可见光图像和红外图像融合结果

Fig.2 Fusion result of thermal infrared image and visual image

佳小波分解层(4 层)时的结果。在方法 2 中确定融合图像的低频分量时,图像块的大小都取为 5×5 , W_1 和 W_2 是经验值,分别取为 0.3 和 0.7。

本文用熵、空间频率、平均梯度和标准差对方法

1 和方法 2 进行比较,如表 2 和表 3 所示。

表 2 图 1 中方法 1 和方法 2 的性能比较

Tab.2 Performance comparison between method 1 and method 2 used in Fig.1

Guideline for evaluation		Entropy	Spatial frequency	Mean gradient	Standard deviation
Two level	Method 1	5.0298	14.171	5.2919	45.094
	Method 2	5.0677	15.573	5.6911	46.949
Three level	Method 1	5.0678	15.359	5.6585	46.17
	Method 2	5.0749	15.651	5.6947	46.743
Four level	Method 1	5.0866	15.6	5.6961	46.792
	Method 2	5.0746	15.653	5.7025	47.034
Five level	Method 1	5.1004	15.646	5.6992	47.115
	Method 2	5.097	15.645	5.7035	47.405

表 3 图 2 中方法 1 和方法 2 的性能比较

Tab.3 Performance comparison between method 1 and method 2 used in Fig.2

Guideline for evaluation		Entropy	Spatial frequency	Mean gradient	Standard deviation
Four level	Method 1	4.0955	6.1987	3.3107	16.968
	Method 2	4.3666	6.372	3.3863	28.564
Five level	Method 1	4.1693	6.2945	3.3555	19.1
	Method 2	4.3618	6.3729	3.3867	28.509
Six level	Method 1	4.2764	6.3427	3.3733	22.49
	Method 2	4.4069	6.3671	3.3835	29.213
Seven level	Method 1	4.3122	6.3338	3.3682	23.87
	Method 2	4.3991	6.3552	3.3758	28.238

(1) 熵

图像的熵是衡量图像信息丰富程度的重要指标。根据 Shannon 信息论原理,一幅图像的信息熵为:

$$E = - \sum_{i=0}^{L-1} P_i \log_2(P_i) \quad (8)$$

式中 P_i 为图像第 i 级灰度值的概率; L 为图像的总灰度级。

(2) 平均梯度

平均梯度可敏感地反映图像对微小细节反差表

达的能力,可用来评价图像的清晰程度,设 F 是大小为 $M \times N$ 的图像, F 在位置 (m,n) 处的灰度值为 $F(m,n)$,平均梯度计算方法如下:

$$\bar{G} = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} \sqrt{\frac{(\frac{\partial F(m,n)}{\partial m})^2 + (\frac{\partial F(m,n)}{\partial n})^2}{2}} \quad (9)$$

通常, \bar{G} 越大,图像越清晰。

(3) 标准差

标准差反映了图像灰度相对于灰度平均值的离散情况。在某种程度上,标准差可以用来评价图像反差的大小。若标准差大,则图像的对比如度大,图像包含更多的信息;标准差小,图像反差小,则对比如度小。标准差的定义为:

$$\sigma = \sqrt{\left(\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (F(m,n) - \mu)^2 \right) / (M \times N)} \quad (10)$$

式中 μ 是图像的均值; $F(m,n)$ 是图像 F 在 (m,n) 处的灰度值,图像大小为 $M \times N$ 。

从实验结果得出:

(1) 在基于小波变换的图像融合中存在一个最优分解层数,且最优分解层数与融合策略是有关的。对融合图像质量的评价应从定量和定性两个方面来考虑。在图 1 的多聚焦图像融合中,方法 1 和方法 2 得到的评价指标值大多数都随着分解层数的增加而增加(只是增加的程度越来越小),但从视觉上看融合图像会在某一分解层时达到一个最佳结果;对于图 2,用方法 1 和方法 2 得到的融合图像只需从评价指标值就可得到最佳分解层数,并与视觉观察结果一致;

(2) 当小波分解层数较低时(1~3 层),方法 2 得到的融合图像的对比如度和清晰度都明显优于方法 1;

(3) 方法 2 在最佳小波分解层时的融合结果接近或优于方法 1 在最佳小波分解层时的结果。

4 结论

根据小波变换多分辨率图像分析理论的特点,提出了一种基于小波变换的改进图像融合方法。融合图像的低频分量采用一种新颖的图像块度量方法来确

定,采用参考文献[2]中提出的方法得到融合图像的高频分量,视觉效果和实验数据表明本文方法得到的融合图像清晰度和对比度都较好,是一种可行有效的多传感器图像融合方法。

参考文献:

- [1] 刘贵喜.多传感器图像融合方法研究[D].西安:西安电子科技大学,2001.
- [2] Li Hui,Manjunath B S,Mitra S K.Multi-sensor image fusion using

the wavelet transform[A].IEEE International Conference On Image Processing[C].1994,1.51-54.

- [3] Cambell F W,Robson J.Application of Fourier analysis to the visibility of gratings [J].Journal of Physiology,1968,197:551-556.
- [4] Li Shutao,Kwok J T,Wang Yaonan.Multifocus image fusion using artificial neural networks[J].Pattern Recognition Letters,2002,23(8):985-997.
- [5] 蒲恬,方庆喆,倪国强.基于对比度的多分辨图像融合[J].电子学报,2000,28(12):116-118.
- [6] 陶观群,李大鹏,陆光华.基于小波变换的不同融合规则的图像融合研究[J].红外与激光工程,2003,32(2):173-176.

(上接第 318 页)

基于结构特征采用直线段配对判别跑道的方法对机场进行识别定位。文中针对二值图像进行了算法处理,结合模式识别中的动态聚类方法,通过简单的运算,使识别算法具有高效性、应用性和稳健性,实验取得了令人满意的效果。本算法仅是针对遥感图像中机场这一特定类别目标的识别处理进行了讨论,以后我们将结合多源图像的数据融合,对类似的地物人工目标例如桥梁、港口、立交桥等的识别定位问题展开更为广泛深入的研究。

参考文献:

- [1] Halem N.Contextual image understanding of airport photographs [A].SPIE[C].1981,1521-1532.
- [2] 叶斌,彭嘉雄.基于结构特征的军用机场识别与理解[J].华中科技大学学报,2001,29(3):39-42.
- [3] Huerlas A,Cole W,Nevatia R.Detecting runways in complex airport scenes[J].Computer Vision,Graphics and Image Processing,1990,51(2):107-145.
- [4] Huerlas A,Nevatia R.Detecting buildings in aerial images[J].Computer Vision,Graphics and Image Processing,1988,41(2):131-143.
- [5] Burns B,Hanson A,Risemon E.Extracting straight lines[J].IEEE Trans Pattern Analysis Machine Intelligence,1986,8(4):78-96.
- [6] Christian Daul,Pterre Graebing,Ernest Hirsens.From the Hough transform to a new approach for the detection and approximation

of elliptical arcs[J].Computer Vision and Image Understanding,1998,72(3):215-236.

- [7] Stockman G,Agrawala A.Equivalence of Hough curve detection to template matching[J].Communication of ACM,1977,820-822.
- [8] Risse T.Hough transformation for line recognition:complexity of evidence accumulation and cluster detection[J].Computer Vision,Graphics and Image Processing,1989,46(3):327-345.
- [9] Bhattacharya P,Zhu W,Qian K. Shape recognition method using morphological hit-or-miss transform[J].Optical Engineering,1995,34(6):1728-1725.
- [10] Pal N R.On minimum cross-entropy thresholding[J].Pattern Recognition,1996,29(4):575-580.
- [11] 边肇祺,张长水,张学工.模式识别[M].北京:清华大学出版社,2001.
- [12] Geman D,Jedynak B.An active testing model for tracking roads in satellite images[J].IEEE Trans Pattern Analysis Machine Intelligence,1996,18(1):1-14.
- [13] Gerhard Roth.Extracting geometric primitives[J].CVGIP:Image Understanding,1993,58(1):1-22.
- [14] Barzohar M,Cooper D B. Automatic finding of main roads in aerial images by using geometric stochastic models and estimation[J].IEEE Trans Pattern Analysis Machine Intelligence,1996,18(7):707-721.
- [15] Michel A. Airport detection using a simple model,multi-source images and altimetric information[A]. SPIE[C].1998,2315.604-615.