

基于多分辨率奇异值分解的图像融合

戚 曹¹, 朱桂斌², 赵 林¹, 朱国庆¹

(1. 重庆通信学院 应急通信重庆市重点实验室, 重庆 400035;
2. 重庆通信学院 信息资源管理应用教研室, 重庆 400035)

摘 要:提出一种新的基于多分辨率奇异值分解(MSVD)图像融合算法。算法对源图像进行MSVD处理,使其分解为互不相关的平滑和细节分量,并对平滑分量进行多层次的分解与处理。类似于小波变换,多分辨率奇异值分解的基本思想是在平滑分量的每一层上用奇异值分解(SVD)来取代滤波,最终利用融合规则对图像进行MSVD融合。利用5种评价算子来评价算法,得到的融合效果很好。与基于小波分解的算法相比,算法计算简单、实时性突出,对复杂、高像素图像处理更简单方便。

关键词:多分辨率;奇异值分解;图像融合

中图分类号:TP301.6

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)11-0096-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.11.024

Image Fusion Based on Multi-resolution Singular Value Decomposition

QI Cao¹, ZHU Gui-bin², ZHAO Lin¹, ZHU Guo-qing¹

(1. Chongqing Key Laboratory of Emergency Communication, Chongqing Communication Institute, Chongqing 400035, China;
2. Department of IT, Chongqing Communication Institute, Chongqing 400035, China)

Abstract: A novel image fusion algorithm based on multi-resolution singular value decomposition has been presented and evaluated. The images are processed with the MSVD algorithms and decomposed into unrelated smooth and detail components, and the smooth components are processed by the multi-level decomposition. Similar to the wavelet transform, the basic idea of the multi-resolution singular value decomposition is to replace the filter with the Singular Value Decomposition (SVD) on each layer of the smooth components. Finally MSVD integration is used with the image fusion rules. Five evaluation metrics are presented to evaluate the algorithm, and the algorithm achieves great performance. Compared with the algorithm based on wavelet decomposition, the algorithm presented is computing simply and its highlight is real-time performance, especially for high-pixels and complex images processing, which is more simple and convenient.

Key words: multi-resolution; singular value decomposition; image fusion

0 引 言

图像融合^[1-2]是指将多分辨率或多介质图像数据通过空间配准和图像信息互补产生新的图像的综合分析技术。图像融合一般分为像素级、特征级和决策级融合,而多分辨率图像融合算法则是一类非常重要的像素级融合算法。

对多分辨率图像融合的研究,最初始于文献[3]中Burt和Adelson提出的拉普拉斯金字塔算法。金字塔分解符合人眼视觉系统在处理视觉信号时具有多分辨率的特性,但其层间分解量之间具有相关性,且没有

严格的理论基础的支撑。随着小波变换理论^[4-5]的提出和完善,小波变换在图像融合领域得到了广泛的应用。文献[6]中Li Hui等提出小波变换应用于图像融合的代表性方法。文献[7]中Chipman等提出采用离散小波变换进行图像融合处理。文献[8-9]都提出了基于小波的图像融合算法,文献[10]在文献[3,9]的基础上提出了基于金字塔的多曝光图像融合。

由于离散小波变换在提取图像低频信息的同时,又能获得三个方向的高频细节信息,在理论上比传统的金字塔融合方法具有更好的效果,且在分解层次上

收稿日期:2014-01-09

修回日期:2014-04-17

网络出版时间:2014-09-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61272043)

作者简介:戚 曹(1987-),男,硕士研究生,研究方向为图像融合、图像超分辨率;朱桂斌,博士,教授,研究方向为图像处理、信息安全。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140929.1339.008.html>

会提供方向信息;并且小波变换在不同的分辨率中都含有独特的信息,具有良好的时域和频域局部性以及多分辨率性。但是基于离散小波分解的图像融合算法缺乏平移不变性,这使得融合结果中出现了伪影,降低了融合图像的质量。小波变换的冗余度非常高,这是小波固有的缺陷。同时,小波基的选取^[11]也是小波变换的难点之一。

文中提出一种新的基于多分辨率奇异值分解(MSVD)的算法融合源图像,用 MSVD 得到的结果与基于小波图像融合的结果进行比较。

1 SVD 的多分辨率形式

在离散二进制小波变换中,信号分别用低通和高通滤波器进行滤波,每个结果也由两个元素抽取。整个过程在抽取后的低通输出上进行循环重复,直到得到理想的分解层数和理想效果。多分辨率奇异值分解类似于小波变换,其基本思想是在平滑分量的每一层上用奇异值分解(SVD)来取代滤波^[12]。

1.1 一维情况

令 $X = [x(1), x(2), \dots, x(N)]$ 表示一个有限长度的一维信号。假设 $L \geq 1$, 且 N 可以整除 2^L 。对矩阵中的值进行重新排列,使得矩阵第一行包含奇数项值,第二行包含偶数项值。令重排后的矩阵表示为 X_1 :

$$X_1 = \begin{bmatrix} x(1)x(3)\cdots x(N-1) \\ x(2)x(4)\cdots x(N) \end{bmatrix} \quad (1)$$

令 U_1 为特征矩阵,并且将散布矩阵 $T_1 = X_1 X_1^T$ 变换为对角形式: $U_1^T T_1 U_1 = S_1^2$, 其中 $S_1^2 = \text{diag}\{s_1(1)^2, s_1(2)^2\}$ 包含两个奇异值的平方,并且 $s_1(1) \geq s_1(2)$ 。令 $\hat{X}_1 = U_1^T \bar{X}_1$, 使得 $\bar{X}_1 = U_1 \hat{X}_1$ 。 \hat{X}_1 的最顶行,即 $\hat{X}_1(1, \cdot)$, 包含对应于最大特征值的近似或平滑分量。 \hat{X}_1 的最底行,即 $\hat{X}_1(2, \cdot)$, 包含对应于最小特征值的细节分量。设 $\Phi_1 = \hat{X}_1(1, \cdot)$, $\Psi_1 = \hat{X}_1(2, \cdot)$ 分别代表平滑和细节分量。 \hat{X}_1 各行具有零均值,并且 $\hat{X}_1 \hat{X}_1^T = S_1^2$, 因此 Φ_1 和 Ψ_1 不相关。故一维信号 X 可被分解为不相关的平滑和细节部分。

下一层的 MSVD 重复上述过程,但是用平滑分量 Φ_1 取代 X , 并且重复 L 次。

令 $\Phi_0(1, \cdot) = X$, 使初始平滑分量是原始信号。

对于每层 l , 向量 Φ_l 有 $N_l = N/2^l$ 元素, 表示如下:

$$\Phi_l = [\varphi_l(1), \varphi_l(2), \dots, \varphi_l(N_l)] \quad (2)$$

l 层的 MSVD 是由式(3)~式(7)所列方程定义的:

$$X_l = \begin{bmatrix} \varphi_{l-1}(1)\varphi_{l-1}(3)\cdots\varphi_{l-1}(2N_l-1) \\ \varphi_{l-1}(2)\varphi_{l-1}(4)\cdots\varphi_{l-1}(2N_l) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\bar{X}_l = X_l H_{N_l} \quad (4)$$

$$T_l = \bar{X}_l \bar{X}_l^T = U_l^T S_l^2 U_l \quad (5)$$

$$\hat{X}_l = U_l^T \bar{X}_l \quad (6)$$

$$\Phi_l = \hat{X}_l(1, \cdot), \Psi_l = \hat{X}_l(2, \cdot) \quad (7)$$

将低分辨率的平滑分量、细节分量和特征向量矩阵 U_l 存储在一维空间中。因此,可以将多分辨率奇异值分解写成如下变换:

$$X \rightarrow \{\Phi_L, \{\Psi_l\}_{l=1}^L, \{U_l\}_{l=1}^L\} \quad (8)$$

1.2 二维情况

多分辨率奇异值分解可以在二维或更高维的形式上呈现^[13]。本节详细介绍在二维中多分辨率奇异值分解的过程。

假设 X 是一个 $M \times N$ 矩阵, 将 X 分成不重叠的 2×2 块, 并且通过堆叠列, 以形成矩阵 X_1 , 并将每个块排列成 4×1 的向量。 4×4 散布矩阵的特征分解是 $T_1 = \bar{X}_1 \bar{X}_1^T = U_1^T S_1^2 U_1$, 并将奇异值以降序的形式来排列: $s_1(1) \geq s_1(2) \geq s_1(3) \geq s_1(4)$ 。

令 $\hat{X}_1 = U_1^T \bar{X}_1$ 。 \hat{X}_1 第一行包含对应于最大特征值的近似或平滑分量。 \hat{X}_1 的剩余行, 包含对应于最小特征值的细节分量。每行中的元素可以被重新排列形成一个 $M/2 \times N/2$ 的矩阵。对 $\hat{X}_1(1, \cdot)$ 进行重排, 形成 $M/2 \times N/2$ 的矩阵, 表示为 Φ_1 。从本质上讲, Φ_1 表示图像的平滑成分。以类似方式, 将剩余三行 $\hat{X}_1(2, \cdot)$, $\hat{X}_1(3, \cdot)$, $\hat{X}_1(4, \cdot)$, 重新排列成 $M/2 \times N/2$ 矩阵, 分别表示为 $\Psi_1^V, \Psi_1^H, \Psi_1^D$ 。

下一层变换将 Φ_1 替换 X 。分解过程使用方程(3)~(7), 重复 L 层。整个分解过程可以描述如下:

$$X \rightarrow \{\Phi_L, \{\Psi_l^V, \Psi_l^H, \Psi_l^D\}_{l=1}^L, \{U_l\}_{l=1}^L\} \quad (9)$$

图 1 展示了三层 MSVD 分解的结构。

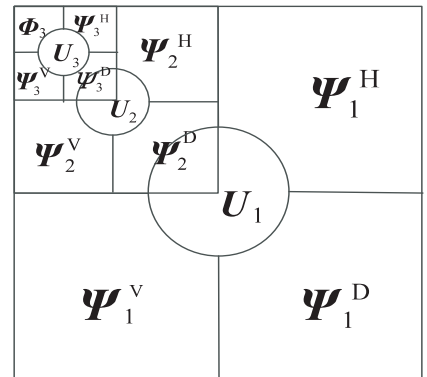


图 1 三层 MSVD 分解结构示例

利用经典参考图像(pepper 图)做两层的 MSVD

处理,其分解示意图如图 2 所示。为增加可视性,子图像经过对比度拉伸处理。

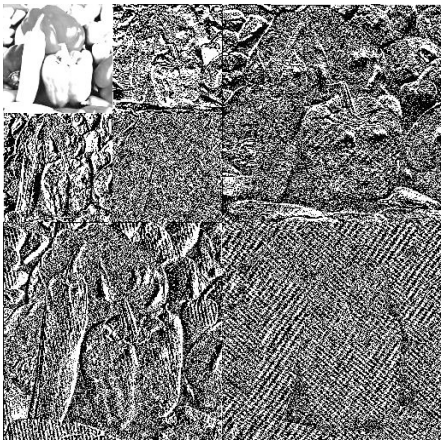


图 2 分解示意图

2 融合规则

MSVD 图像融合方案如图 3 所示。

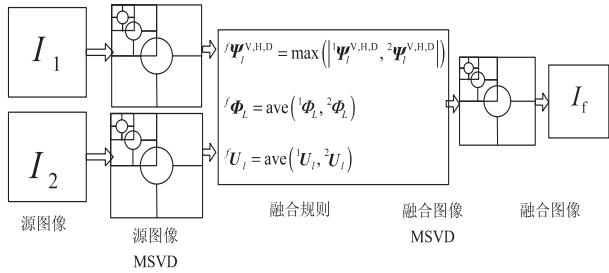


图 3 MSVD 图像融合方案

文中算法的改进是使用 MSVD,而不是小波或金字塔。被融合的图像 I_1 和 I_2 分别用 MSVD 分解为 l 层 ($l=1,2,\cdots,L$)。在每个分解层次中,细节分量系数对应于图像中更尖锐的亮度变化,如边缘图像等。而较大的奇异值能更好地保持原始低分辨率图像的有用信息,因此融合规则将选择两个 MSVD 细节分量的较大值^[14]。对于底层($l=1$),融合规则取 MSVD 平滑分量系数的平均值,因为底层的平滑分量系数是原始图像的平滑和亚采样版本。融合图像可如下得到:

$$I_f \rightarrow \{ \{^f\Phi_L, \{^f\Psi_L^V, ^f\Psi_L^H, ^f\Psi_L^D\}_{l=1}^L, \{^fU_l\}_{l=1}^L \} \quad (10)$$

3 融合评价算子

分别采用文献[15]中提出的均方根误差、峰值信噪比、平均梯度、标准差和文献[16]中提出的交互信息共 5 个评价算子来评价算法。其中,均方根误差越小说明融合图像与参考图像越接近;峰值信噪比越高,融合图像与参考图像越接近,并且值越大,融合效果越好;平均梯度反映图像对微小细节反差表达能力,可以用来评价融合图像的清晰程度;平均梯度越大,图像层次越多,因此也越清晰;标准差旨在测量融合图像的对比度,高对比度的融合图像有较高的标准差值。

4 讨论

文中算法在 CPU 为 2.79 G AMD Athlon (tm) X220 的计算机上运用 MatlabR2009a 实现。图 4(a) 为参考图—经典 pepper 图,像素为 512×512。图 4(b) 和图 4(c) 分别为待融合图像 I_1 和 I_2 ,其像素都为 512×512。融合结果和误差图、参数如表 1 所示。误差计算为 $I_e(x,y) = I_r(x,y) - I_t(x,y)$ 。文中所用小波分解算法为文献[4]中所提出并实现的算法。



(a)参考图 (b)待融合图像 1 (c)待融合图像 2

图 4 源图像序列

表 1 融合结果和误差图、参数

	融合效果	误差	参数
$l=1$			RMSE=4.872 5 PSNR=41.035 Grad=5.772 5 MI=1.349 8 σ =50.816
$l=2$			RMSE=4.693 4 PSNR=41.385 Grad=6.287 1 MI=1.364 3 σ =51.223
$l=3$			RMSE=4.591 3 PSNR=41.599 Grad=6.459 6 MI=1.365 6 σ =51.749
$l=4$			RMSE=4.356 7 PSNR=42.269 Grad=6.486 0 MI=1.369 3 σ =52.202 9
小波分解			RMSE=4.583 2 PSNR=41.656 Grad=6.342 9 MI=1.365 1 σ =51.554

从评价算子的参数值可以得出,随着分解层次的增加, RMSE 值的逐渐减小和 PSNR 值的逐渐增加,说明融合图像与参考图像在逐渐接近。从第一层分解得到的误差图比较清晰,说明融合图像和源图像有较大差别,但是随着分解层次的增加,误差图的像素值越来越趋近于 0,说明融合图像越来越趋近于源图像。

图 5 详细展示了 RMSE 和 PSNR 算法运行的平均时间的变化过程。基于多分辨率奇异值分解 (MSVD) 的图像融合算法利用评价算子 RMSE、PSNR 等得出的

值与基于小波分解的算法基本相近,这可以从最终融合效果看出。融合图像保留了两幅源图像中有用的信息,使用 MSVD 和小波两种方法得到的融合图像的效果基本一致。但是从算法运行的平均时间可以看到,MSVD 在算法速度上比基于小波分解的图像融合算法快很多,实时性非常突出,非常适用于高分辨率像素值图像和复杂图像。

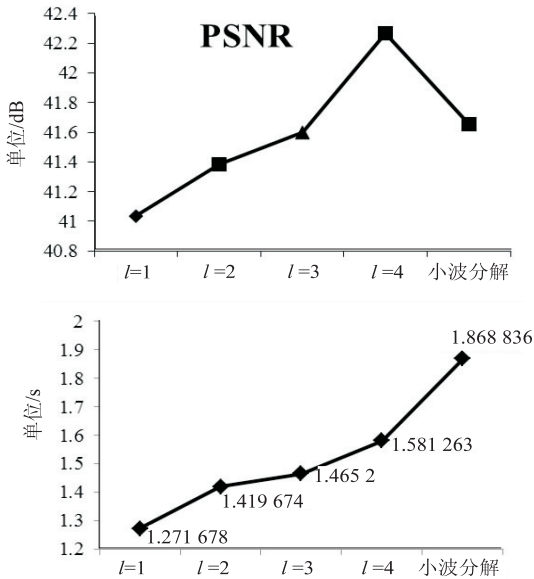


图 5 不同方法下 PSNR 值与算法运行的平均时间对比

5 结束语

文中提出一种新的 MSVD 图像融合算法并利用 5 种评价算子来评价算法,得到的融合效果很好。提出的算法与基于小波分解的算法相比,两种算法的性能接近,但是计算更简单、实时性更突出,对复杂、高像素图像处理更简单方便。

参考文献:

[1] 郭 雷,李晖晖,鲍永生. 图像融合[M]. 北京:电子工业出版社,2008.

[2] 覃 征,鲍复民,李爱国,等. 数字图像融合[M]. 西安:西安交通大学出版社,2004.

[3] Burt P,Adelson E. The Laplacian pyramid as a compact image code[J]. IEEE Transactions on Communications, 1983, 31 (4):532-540.

[4] Mallat S G. A theory for multi resolution signal decomposition; the wavelet representation[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1989, 11(7):674-693.

[5] Mallat S G. Multifrequency channel decompositions of images and wavelet models[J]. IEEE Trans on Acoustics Speech and Signal Processing, 1989, 37(12):2091-2110.

[6] Li Hui,Manjunath B S,Mitra S K,et al. Multisensor image fusion using the wavelet transform[C]//Proc of IEEE international conference on image processing. Austin:[s. n.],1994: 51-55.

[7] Chipman L J,Orr T M,Graham L N. Wavelets and image fusion[C]//Proc of international conference on image processing. Los Alamitos:IEEE Computer Society, 1995:248-251.

[8] 晁 锐,张 科,李言俊. 一种基于小波变换的图像融合算法[J]. 电子学报,2004,32(5):750-753.

[9] 王 丽,卢 迪,吕剑飞. 一种基于小波方向对比度的多聚焦图像融合方法[J]. 中国图象图形学报,2008,13(1):145-150.

[10] 江 铁,朱桂斌,孙 奥. 基于金字塔变换的多曝光图像融合[J]. 计算机技术与发展,2013,23(1):95-98.

[11] 申晓华,艾 宝,王 婷. 多聚焦图像融合中小波基函数选取的研究[J]. 弹箭与制导学报,2007,27(3):231-234.

[12] Kakarla R,Ogunbona P O. Signal analysis using a multiresolution form of the singular value decomposition[J]. IEEE Trans on Image Processing,2001,10(5):724-735.

[13] Ashin R,Morimoto A,Vaillancourt R. Image compression with multiresolution singular value decomposition and other methods[J]. Mathematical and Computer Modelling,2005,41(6):773-790.

[14] Naidu V P S. Image fusion technique using multi-resolution singular value decomposition [J]. Defence Science Journal, 2011,61(5):479-484.

[15] 王茹娟. 多曝光彩色图像融合技术的研究[D]. 长春:东北师范大学,2007.

[16] Qu Guihong, Zhang Daili, Yan Pingfan. Information measure for performance of image fusion[J]. Electronics Letters,2002, 38(7):313-315.

(上接第 95 页)

[9] 康志明,金荣花,鲍媛媛,等. 基于 TIGGE 数据的我国寒潮自动识别预报方法[J]. 应用气象学报,2010,21(3):298-306.

[10] 赵晓琳,朱国富,李泽椿. 基于 TIGGE 资料识别适应性观测敏感区的应用研究[J]. 应用气象学报,2010,21(4):405-415.

[11] 世界气象组织[EB/OL]. 2003. <http://www.wmo.ch/web/www/DPS/FM92-GRIB2-11-2003.pdf>.

[12] Unidata[EB/OL]. 2013-06-24. [http://www.unidata.ucar.](http://www.unidata.ucar.edu/blogs/news/entry/ldm_6_11_6_released)

[edu/blogs/news/entry/ldm_6_11_6_released](http://www.unidata.ucar.edu/blogs/news/entry/ldm_6_11_6_released).

[13] Grosshans G H. Utilization of LDM at the storm prediction center[EB/OL]. 2002-01-17. <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/26257.pdf>.

[14] Miller L I. UCAR/Unidata, boulder, CO leveraging that works for collaborative projects[EB/OL]. 2006-01-31. <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/105100.pdf>.

[15] Kingfield D M,Magsig M A. Leveraging national weather service technology for collaboration and training[EB/OL]. 2009. <https://ams.confex.com/ams/150678.pdf>.

基于多分辨率奇异值分解的图像融合

作者:

威曹, 朱桂斌, 赵林, 朱国庆, [QI Cao](#), [ZHU Gui-bin](#), [ZHAO Lin](#), [ZHU Guo-qing](#)

作者单位:

[威曹, 赵林, 朱国庆, QI Cao, ZHAO Lin, ZHU Guo-qing\(重庆通信学院 应急通信重庆市重点实验室, 重庆, 400035\), 朱桂斌, ZHU Gui-bin\(重庆通信学院 信息资源管理应用教研室, 重庆, 400035\)](#)

刊名:

[计算机技术与发展](#)

英文刊名:

[Computer Technology and Development](#)

年, 卷(期):

2014(11)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjz201411024.aspx