

文章编号:1007-2780(2016)03-0331-07

一种改进的基于区域梯度——能量的图像融合方法

赵 康, 吴 谨*
(武汉科技大学 信息科学与工程学院, 湖北 武汉 430081)

摘要:针对区域梯度法、区域能量法重构图像峰值信噪比较低、均方根误差较高的现象,提出了一种改进的基于区域梯度-能量的压缩感知图像融合方法。该方法首先构造正交小波变换矩阵,并使用小波变换使图像稀疏化,然后采用哈达玛矩阵作为测量矩阵对稀疏信号进行测量得到测量值,分别计算测量值对应的梯度值及能量值,依据绝对值取大法及加权平均法对测量值进行融合,最后对融合后的测量值进行图像重构。实验结果表明,该方法比单独使用区域梯度法或区域能量法具有较好的图像融合效果。

关 键 词:压缩感知;图像融合;区域梯度;区域能量
中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163103.0331

Improved image fusion algorithm based on regional gradient and regional energy

ZHAO Kang, WU jin*
(*Department of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China*)

Abstract: According to the phenomenon that the peak signal to noise ratio is low and the root-mean-square error is high corresponding to the reconstructed fusion image based on the regional gradient method and the regional energy method, this paper proposes an improved compressive sensing image fusion algorithm based on both gradient method and regional energy method. Firstly, a orthogonal wavelet transform matrix should be constructed, and we should use wavelet transform to make image sparse. Secondly, hadamard matrix is used as the measurement matrix to get measurement value of sparse signal, and then gradient values and energy values are calculated corresponding to the measured values. Thirdly, we fuse the measurement values according to absolute value method and weighted average method. Finally, image is constructed according to the measured value of fused. The experiments results show that this algorithm can obtain better effect of image fusion compared to single regional gradient method or regional energy method.

Key words: compressive sensing; image fusion; regional gradient; regional energy

1 引言

图像融合的算法研究一直是图像处理的研究热点之一。融合后的图像质量及效果的提升将有利于对图像进行更加深入的研究、理解及应用。目前,图像融合在卫星遥感图像处理、计算机视觉、视频处理、医学图像处理以及军事领域等都有着广泛的运用^[1]。

图像融合根据处理层次的不同,其融合方法分为 3 类^[2]:像素级图像融合、特征级图像融合和决策级图像融合。其中,像素级图像融合是目前应用最为广泛的一类。常用的像素级图像融合方法有加权平均法、金字塔图像融合法、小波变换法等。

由压缩感知理论可知,如果信号在稀疏或是可压缩的情况下,则可以用少量的采样测量值重构原始信号,有效减少计算成本及存储空间。研究表明,基于区域梯度的压缩感知图像融合算法能有效减少模糊区域的高频信息对融合效果所造成的影响,但由于其只考虑到高频系数的变化程度,因而不能很好地反映图像信息的丰富程度,造成图像高频信息的缺失。而基于区域能量的压缩感知图像融合算法则可以有效保证图像高频信息的丰富程度,确保了图像清晰度^[3],但其无法考虑到图像高频信息的变化程度,因而在一定程度上会引入大量存在于模糊区域的高频信息,从而影响融合效果^[4]。本文针对单独使用区域梯度法或区域能量法重构图像时峰值信噪比较低、均方根误差较高的情况,提出了一种基于区域梯度-能量的压缩感知图像融合方法,以提高图像的融合质量。该方法首先构造正交小波变换矩阵,并使用小波变换使图像稀疏化,然后采用局部哈达玛矩阵作为测量矩阵对稀疏信号进行测量得到测量值,分别计算测量值对应的梯度值及能量值,根据绝对值取大法和加权平均法对测量值进行融合,最后使用融合后的测量值对图像进行重构。

2 压缩感知理论(CS 理论)

由 CS 理论可知,当信号可压缩或具有稀疏性时,通过随机提取相对较少的信号测量值就可以实现原始信号的精确或近似重构,突破了奈奎斯特采样定理对采样频率的限制。由于信号是稀疏的,可以在远低于奈奎斯特采样频率的情况下对信号进行采样,并在信号采样的同时进行压缩

编码。其采样得到的测量值不是信号本身,而是信号经过高维到低维的投影值。它的解码过程是根据稀疏信号的重构方法,通过求解 $L1$ 最少范数或 $L0$ 最多范数最优化问题,实现信号的精确重构。压缩感知理论主要包含信号的稀疏化表示、测量矩阵的设计以及信号重构算法。

2.1 信号的稀疏化表示

信号稀疏化^[5]指的是信号中绝大部分元素值为 0 或接近于 0。而常见的信号是不满足稀疏性的,但是通过某些变换(如小波变换)则可以使信号具有稀疏性。

假设离散时间信号 x ,其长度为 N ,元素为 $x(n)$, $n = 1, 2, \dots, n$ 。信号 x 在 Ψ 域内的表达式如下:

$$x = \psi s = \sum_{i=1}^N s_i \varphi_i \quad (1)$$

其中, $s = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ 由加权系数 $s_i = \langle x, \varphi_i \rangle = \varphi_i^T x$ 组成的 N 维向量, $\psi = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N]$ 是一个 $N \times N$ 的矩阵, φ_i 为矩阵 ψ 的列向量。当 s 绝大多数元素都为零或都接近于零的时候,即当 s 仅有 K ($K \ll N$) 个非零元素的时候,称 s 为信号 x 的 K 稀疏表示, ψ 也被称为信号 x 的稀疏基。

信号的稀疏表示是 CS 理论的基础与前提,只有选择合适的稀疏基才能保证信号的稀疏性,经过变换后的信号的稀疏性越强,则越能减少信号在传输中所需要的资源空间^[6]。

2.2 测量矩阵设计

测量矩阵的作用是将原始信号从高维降到低维^[7],将信号 x 投影到一组测量向量 $\Phi = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_M]$ 上,得到测量值 y ,表示为式(2):

$$y = \Phi x \quad (2)$$

表达式中 x 是 $N \times 1$ 的矩阵, y 是 $M \times 1$ 的矩阵, Φ 为 $M \times N$ 的测量矩阵。从某种意义上来说, s 与 x 是等价的。显然式(2)中测量值 y 的维数低于信号 x 的维度,也就是说方程的个数是小于未知数的个数的,因而方程组的解是不唯一的,于是构成了 NP-hard 问题^[8]。

将式(1)代入式(2)中,可得:

$$y = \Phi x = \Phi \psi s \quad (3)$$

其中 $\Theta = \Phi \psi$, 为 $M \times N$ 的投影矩阵。则有:

$$y = \Theta s \quad (4)$$

y 可以理解成稀疏信号 s 在投影矩阵 Θ 上的测量值。而对于投影矩阵来说,必须要满足约束等距性条件,也就是 RIP 条件^[9]时,才能对原始信号

进行精确重构。而为了降低满足 RIP 条件问题难度,则可以找一个与此等同的条件,即稀疏基 ψ 与测量矩阵 Φ 不相关。在信号稀疏化的时候,稀疏矩阵 ψ 是固定的,只能改变测量矩阵 Φ 来满足 RIP 条件。而高斯随机矩阵几乎与任何稀疏基都不相关,可以设计一个 $M \times N$ 的高斯随机测量矩阵来进行重构信号。除了高斯随机测量矩阵外,一致球矩阵、二维随机矩阵、局部傅里叶矩阵、局部哈达玛矩阵和托普利兹矩阵等也可作为测量矩阵并满足 RIP 条件^[10]。

2.3 信号的重构

重构信号实质上就是将低维的信号 y 通过某种算法重建出原始高维信号 x 的过程。信号的重构方法大体上分为两种,一种是求解 L_0 最优化问题,另一种是求解 L_1 最优化问题。常用的基于 L_0 范数的信号重构算法包括正交匹配追踪法(OMP)、正则化正交匹配追踪法(ROMP)等^[11]。 L_1 最优化问题也称为基于 L_1 范数的基追踪法,如 BP 算法^[12]。

3 基于区域梯度及区域能量的图像融合

基于压缩感知的图像融合,就是将原始图像进行稀疏化,然后进行测量采样,再将融合规则运用于经过上述处理过的数据,通过重构算法得到融合图像的过程。本文将 192×256 的局部哈达玛矩阵作为测量矩阵,其算法流程如图 1 所示。

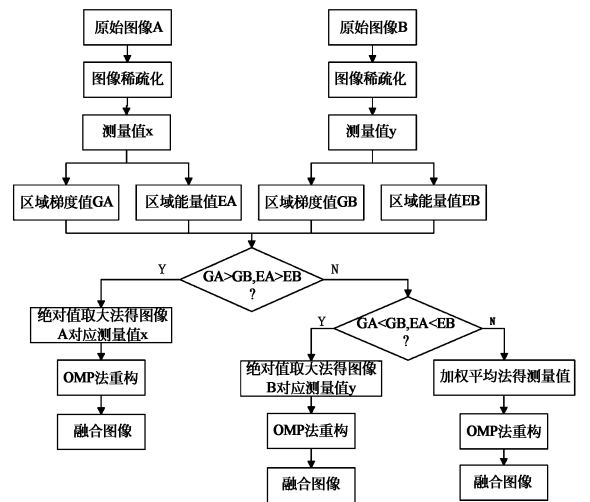


图 1 算法流程图
Fig. 1 Diagram of the algorithm

- 其融合规则为:
- (1) 本文选取 3×3 区域,分别计算测量值 A 、 B 对应的梯度值,记作 GA 、 GB 。
 - (2) 分别计算出测量值 A 、 B 对应的 3×3 区域能量值,分别记作 EA 、 EB 。
 - (3) 判断 $(EA > EB) \& (GA > GB)$,若满足此条件,则在图像融合时,选取对应位置上数值大的测量值作为融合后的测量值。
 - (4) 若不满足上述条件,则判断 $(EA < EB) \& (GA < GB)$,若满足此条件,则在图像融合时,选择对应位置上数值大的测量值作为融合后的测量值。
 - (5) 若上述两个条件都无法满足,则融合后的测量值为 $Y = a * Y_1 + b * Y_2$,其中:

$$a + b = 1,$$
$$a = \frac{GA}{GA + GB},$$
$$b = \frac{GB}{GA + GB}.$$

4 实验结果与分析

分别采用图像融合区域梯度法、图像融合区域能量法及本文提出的方法在 MATLAB 7.0 平台上对不同的图像进行了实验。Lena 图像的格式为 JPEG,大小为 256×256 ,Cameraman 图像的格式为 BMP,大小为 256×256 ;Pepsi 的格式为 BMP,大小为 512×512 ,其采样率为 0.5。

图像融合实验结果分别如图 1、图 2、图 3 所示。由图 1~3 可知,单独使用区域梯度法或区域能量法进行融合的图像要么只考虑到高频系数的变化程度,要么只保证高频信息的丰富程度,而图像的高频信息主要对应图像的边缘和轮廓^[13]。单独使用区域梯度法会增强边界信息,使肉眼观察时会出现较为严重的条纹现象,图像轮廓^[14-15]不够清晰,单独使用区域能量法会增强亮度。而本文提出的融合方法可以有效地减少条纹。

对图像融合结果采用峰值信噪比(PSNR)和均方根误差(RMSE)进行客观评价^[16-20]。其中:

$$PSNR = 10 \times \log \left(\frac{255^2}{MSE} \right),$$
$$MSE = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}},$$
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n}}, i = 1, 2, 3, \dots, n.$$



图 1 Cameraman 图像融合的效果对比图

Fig. 1 Contrast figure of the effect of image fusion based on cameraman



图 2 Lena 图像融合的效果对比图

Fig. 2 Contrast figure of the effect of image fusion based on lena

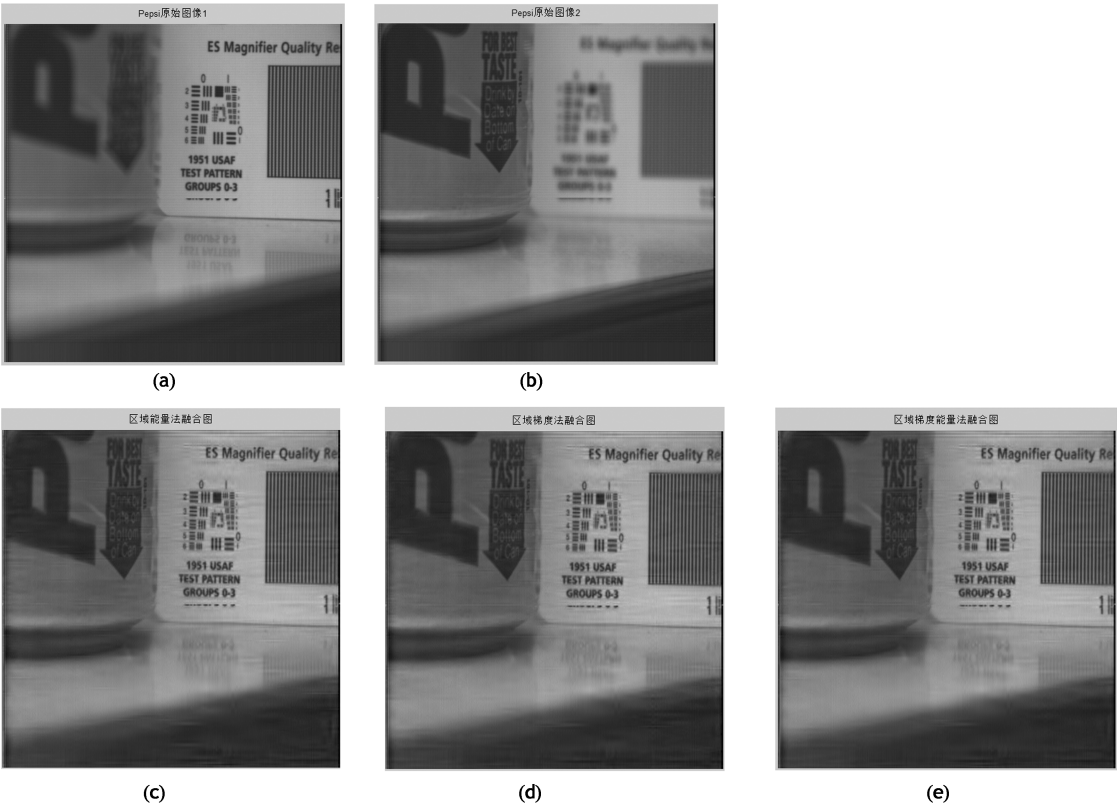


图 3 采样率为 0.5 的 Pepsi 图像融合的效果对比图
Fig. 3 Contrast figure of the effect of image fusion based on Pepsi

表 1、表 2 分别给出了采用区域梯度-能量法、区域能量法、区域梯度法进行图像融合的峰值信噪比 (PSNR) 及均方根误差 (RMSE) 的对比情况。

表 1 峰值信噪比实验结果对照表
Tab. 1 Comparison table of PSNR

	区域能量	区域梯度	区域梯度-能量
cameraman	27.008 2	27.289 2	27.525 7
lena	27.556 6	27.910 6	28.099 1
Pepsi	32.883 1	32.667 9	33.093 7

表 2 均方根误差实验结果对照表
Tab. 2 Comparison table of RMSE

	区域能量	区域梯度	区域梯度-能量
cameraman	11.424 4	11.060 6	10.763 6
lena	10.725 4	10.297 0	10.075 9
Pepsi	5.808 8	5.954 5	5.669 6

由表 1 可知,本文所采用方法的 PSNR 较单独采用区域能量法、区域梯度法高,表明图像融合失真较少。

由表 2 可知,本文所采用方法的 RMSE 较单独采用区域能量法、区域梯度法小,表明图像融合偏离原始图像程度小。

5 结 论

本文提出了一种改进的基于区域梯度-能量的压缩感知图像融合方法,采用小波变换使图像稀疏化,利用哈达玛矩阵进行测量,计算其对应的梯度值及能量值,将区域梯度法和区域能量法进行结合,依据绝对值取大法及加权平均法对测量值进行融合并重构融合图像。实验结果表明,其融合效果比单独使用区域梯度法或区域能量法效果好,较好地解决了融合图像有条纹噪声、轮廓不清晰^[21-23]的问题,融合效果得到了改善。

参 考 文 献:

- [1] 黄晓生,戴秋芳,曹义亲.一种基于小波稀疏基的压缩感知图像融合算法[J]. 计算机应用研究,2012,29(9): 3581-3583.
HUANG X S, DAI Q F, CAO Y Q. Compressive sensing image fusion algorithm based on wavelet sparse basis [J]. *Application Research of Computers*, 2012, 29(9): 3581-3583. (in Chinese)
- [2] 张建勋,谢婷婷.基于小波区域梯度的图像融合新算法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2012,26(10):51-55.
ZHANG J X, XIE T T. A new fusion algorithm based on local gradient [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2012, 26(10): 51-55. (in Chinese)
- [3] 宋亚军,倪国强,高昆.基于小波-Contourlet 变换的区域能量加权图像融合算法[J]. 北京理工大学学报,2008,28(2):168-172.
SUN Y J, NI G Q, GAO K. Regional energy weighting image fusion algorithm by wavelet based contourlet transform [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2008, 28(2): 168-172. (in Chinese)
- [4] 朱辉,江卓斌,胡斌杰.一种改进的基于方向区域能量的多聚焦图像融合算法[J]. 传感器与微系统,2011,30(9): 131-134.
ZHU H, JIANG Z B, HU B J. An improved algorithm of multi-focused image fusion based on directional region-energy [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2011, 30(9): 131-134. (in Chinese)
- [5] 沈瑜.一种改进小波变换的图像融合方法[J]. 自动化与仪器仪表,2013(5):202-204.
SHEN Y. An improved fusion algorithm based on wavelet transform [J]. *Automation & Instrumentation*, 2013 (5): 202-204. (in Chinese)
- [6] 杜鑫.压缩感知在多源图像融合中的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报,2013,11(4):614-618.
DU X. Application of compressed sensing in multi-source image fusion [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2013, 11(4): 614-618. (in Chinese)
- [7] 魏超,刘智,王番,等.压缩感知理论及其在图像融合中的应用[J]. 测绘工程,2013,22(2):30-33.
WEI C, LIU Z, WANG F, et al. Application of compressed sensing theory to fusion [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2013, 22(2): 30-33. (in Chinese)
- [8] 杨扬,刘哲,张萌.一种基于全变差模型的欠采样图像重构方法[J]. 红外与毫米波学报,2012,31(2):153-158.
YANG Y, LIU Z, ZHANG M. A new undersampling image reconstruction method based on total variation model [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2012, 31(2): 153-158. (in Chinese)
- [9] 朱明,高文,郭立强.压缩感知理论在图像处理领域的应用[J]. 中国光学,2011,4(5):441-447.
ZHU M, GAO W, GUO L Q. Application of compressed sensing theory in image processing [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(5): 441-447. (in Chinese)
- [10] 张伟,曾凡仔,曾庆光.基于压缩感知理论的图像融合方法[J]. 计算机工程与应用,2012,48(12):194-197.
ZHANG W, ZENG F Z, ZENG Q G. Method of image fusion based on compressed sensing [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2012, 48(12): 194-197. (in Chinese)
- [11] 李新,秦世引.基于压缩感知原理的图像融合新方法[J]. 高技术通讯,2012,22(1):35-41.
LI X, QIN S Y. A new image fusion method based on compressive sensing principle [J]. *Chinese High Technology Letters*, 2012, 22(1): 35-41. (in Chinese)
- [12] 韦瑶,刘婵婷,陈庆春.基于压缩感知的多聚焦图像融合方法[J]. 通信技术,2013,46(7):106-108.
WEI Y, LIU C Z, CHEN Q C. A multi-focus image fusion algorithm based on compressive sensing [J]. *Communications Technology*, 2013, 46(7): 106-108. (in Chinese)
- [13] 杨奕堂.基于压缩感知理论的图像融合方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2012:12-16.
YANG Y T. *The method research of image fusion based on compressed sensing*[D]. Xi'an: Xidian University, 2012: 12-16.
- [14] XU T, WANG W W. A compressed sensing approach for underdetermined blind audio source separation with sparse representation[C]. *IEEE Transaction on Statistical Signal Processing*, Cardiff: IEEE, 2009: 493-496.
- [15] WILLETT R M, MARCIA R F, NICHOLS J N. Compressed sensing for practical optical imaging systems: a tu-

- torial [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(7): 072601.
- [16] 楚恒,朱维乐.基于DCT变换的图像融合方法研究[J].光学精密工程,2006,14(2):266-273.
CHU H, ZHU W L. Image fusion algorithms using discrete cosine transform [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(2): 266-273. (in Chinese)
- [17] 彭真明,景亮,何艳敏,等.基于多尺度稀疏字典的多聚焦图像超分辨率融合[J].光学精密工程,2014,22(1):169-176.
PENG Z M, JING L, HE Y M, *et al.* Superresolution fusion of multi-focus image based on multiscale sparse dictionary [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(1): 169-176. (in Chinese)
- [18] 朱秋平,颜佳,张虎,等.基于压缩感知的多特征实时跟踪[J].光学精密工程,2013,21(2):437-444.
ZHU Q P, YAN J, ZHANG H, *et al.* Real-time tracking using multiple features based on compressive sensing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(2): 437-443. (in Chinese)
- [19] 孙晓燕,常发亮.梯度特征稀疏表示目标跟踪[J].光学精密工程,2013,21(12):3191-3197.
SUN X Y, CHANG F L. Object tracking based on sparse representation of gradient feature [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(12): 3191-3197. (in Chinese)
- [20] 刘欣悦,董磊,王建立.稀疏采样傅里叶望远镜成像[J].光学精密工程,2010,18(3):521-527.
LIU X Y, DONG L, WANG J L. Fourier telescoping imaging via sparse sampling [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(3): 521-527.
- [21] 申晓华,杨国胜,张焕龙.改进的基于区域能量的图像融合方法[J].弹箭与制导学报,2006,26(4):279-281.
SHEN X H, YANG G S, ZHANG H L. Improved on the approach of image fusion based on region-energy [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2006, 26(4): 279-281. (in Chinese)
- [22] 柴勇,何友,曲长文.基于改进的区域能量特征多分辨率图像融合算法[J].火力与指挥控制,2010,35(3):5-8.
CHAI Y, HE Y, QU C W. Multiscale image fusion methods based on improved region energy rules [J]. *Fire Control & Command Control*, 2010, 35(3): 5-8. (in Chinese)
- [23] 龚昌来.基于局部能量的小波图像融合新方法[J].激光与红外,2008,38(12):1266-1269.
GONG C L. A new wavelet image fusion method based on local energy [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(12): 1266-1269. (in Chinese)

作者简介:赵康(1986—),男,湖北武汉人,硕士研究生,主要研究方向为图像处理与模式识别、像素级图像融合技术。E-mail:ericlily1992@126.com