

# 基于联合最佳基小波包的图像融合方法

薛庆增, 刘倩, 郝小健, 陈光辉

(中国北方车辆研究所, 北京 100072)

**摘要:** 基于联合最佳基小波包理论提出了一种新的图像融合方法。该方法首先将所有图像进行小波包分解, 得到各自对应的二叉树, 将各二叉树节点对应系数平方相加得到一个新的二叉树, 利用此平方和二叉树搜索联合最佳基。将待融合图像基于联合最佳基分解, 把分解系数加权处理得到融合系数, 利用融合系数进行逆变换即得到融合图像。该方法对所有待融合图像的分解都是最佳分解, 解决了先前最佳小波包融合方法只能最佳分解一方待融合图像的问题。将该方法与其他主要图像融合方法进行了比较分析, 结果表明基于联合最佳小波包基的图像融合方法是非常有效的。

**关键词:** 图像融合; 小波包变换; 联合最佳基; 融合算法; 融合结果评价

中图分类号: TP751

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2014)12-0069-03

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2014.12.017

## Image Fusion Method Based on Wavelet Packets with Joint Best Base

XUE Qing-zeng, LIU Qian, HAO Xiao-jian, CHEN Guang-hui

(China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

**Abstract:** A new image fusion method based on joint best basis wavelet packets is proposed. Images to be fused are first organized as a quadtree to a specified depth. Then the squares of these quadtree are summed into a sum-of-squares quadtree. The sum-of-squares quadtree is searched for best basis called joint best basis. Images to be fused are then decomposed with the joint best basis. The decomposition coefficients are dealt with weighted method and reconstructed into a fused image. Based on the joint best basis decomposition of all the images to be fused is the best. However, for previous image fusion ways with best wavelet packets, the decomposition is best only for either images. The method is analyzed and compared with other major image fusion methods. The result validates that the new image fusion method is very effective.

**Key words:** image fusion; wavelet packet transform; joint best basis; fusion algorithm; fusion result evaluation

## 0 引言

在目标探测等领域, 人们往往不再局限于使用单一传感器, 而是使用多个传感器以求得到更丰富的信息, 更准确的检测结果。例如人们广泛使用了可见光探测器和红外探测器, 以及偏振探测器和高光谱探测仪器等。因此如何充分利用各传感器探测的信息就成了研究的重要内容, 也就是人们常说的信息融合问题。对于成像传感器来说, 信息融合主要指图像融合, 就是将不同传感器得到的图像使用某种算法进行综合处理, 融合后的图像保留每幅图像的基本信息和重要细节以获得对同一场景或目标更为全面、更为可靠的图像描述。这也利于显示。如果多种图像同时显示则需要多个显示器、较大的空间, 这在某些空间狭小的场合, 如装甲车内部, 几乎是不可能的。图像融合也能够

应用于多聚焦图像以及不同光圈曝光下的图像融合, 前者相当于增加了相机焦深, 后者可改善相机的动态范围。

人们研究图像融合已经很久了, 一些行之有效的方法在某些领域已经得到应用。例如 IHS (Intensity-Hue-Saturation) 法<sup>[1-2]</sup>、PCA (Principal Component Analysis) 法<sup>[3]</sup>、拉普拉斯金字塔法<sup>[4-5]</sup>。近年来, 研究者们利用小波(包)变换进行图像融合并取得了很好的效果<sup>[6-8]</sup>。小波(包)变换除了与拉普拉斯金字塔一样具有多分辨率分析之外, 还具有良好的细节表现能力及完善的重构特性。文中在小波包变换的基础上, 使用联合最佳基的概念对红外图像与可见光图像的融合进行了讨论。

收稿日期: 2014-03-03

修回日期: 2014-06-06

网络出版时间: 2014-10-23

基金项目: 总装备部装备预先研究项目(40401020103)

作者简介: 薛庆增(1972-), 男, 山东梁山人, 高级工程师, 研究方向为目标探测技术。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20141023.1124.040.html>

## 1 联合最佳基小波包

小波包变换能对图像的低频和高频同时进行逐级分解,实现对图像的精细分解。图像的小波包分解形式可用四叉树表示,每一个节点对应不同频率的子图像,每一个子图像代表着原图像的不同信息。一般来讲,低频表示图像的光谱信息,高频表示细节。选择适当的融合规则,将子图像重新组合,进行小波包反变换即得到融合图像。

根据小波包结构形式,对于一个给定的正交小波,对图像的小波包分解有很多种形式,但是在某种熵标准下它存在一个最佳的分解方式,即最佳分解树结构或最佳小波包基<sup>[9-10]</sup>。图 1 表示图像的四叉树分解,其中灰色图块表示的是最佳分解结构。可以看出,在分解过程中有的子图像没有必要继续分解下去。

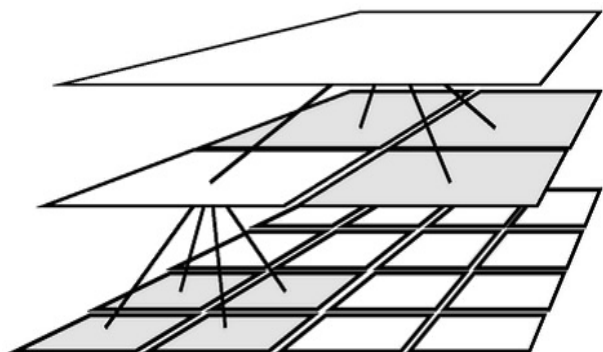


图 1 图像的最佳小波包分解

一般来讲,不同的图像会有不同的最佳分解方式,其对应的分解树也就不同,若按先前一些文章介绍的融合方法可能会无法重构新的分解树。如果采用一种图像的最佳基去分解与其相融合的图像则未必是最佳分解。为解决这一矛盾,可采取联合最佳基小波包的算法<sup>[11-12]</sup>。

所谓联合最佳基就是先把一组样本图像分别进行小波包分解,然后计算所有图像对应节点的系数平方和得到一个新的四叉树,利用最佳基搜索算法计算该树的最佳分解形式,其对应的小波包称为联合最佳基小波包。图 2 表示最佳基搜索过程。

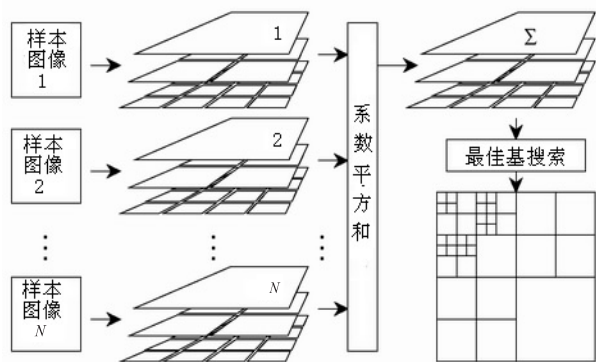


图 2 求解联合最佳基示意图

## 2 融合算法

图像融合的主要目的就是在保留图像基本信息的前提下增强图像的细节信息,抑制甚至去除冗余信息,提高图像的可观察性,并且有利于进一步的分析和处理,如目标检测、识别等。这也是目前人们多采用像素级融合的原因。联合最佳基融合算法的优势在于对相融合的两种图像的分解是最佳的。由于最佳分解使得子图像之间的相关性小,有利于图像融合。

联合最佳基融合算法原理及过程如图 3 所示。

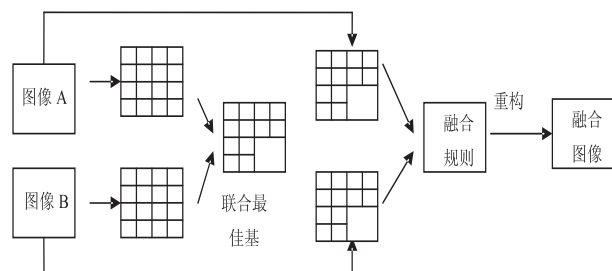


图 3 联合最佳基融合算法示意图

具体步骤为:

- (1) 将样本图像进行小波包分解;
- (2) 根据联合最佳基算法,搜索小波包变换的联合最佳基;
- (3) 利用联合最佳基对源图像进行小波包分解,得到各图像的分解四叉树;
- (4) 根据融合规则将对应两图像的四叉树组合成一个新的四叉树;
- (5) 利用该四叉树进行小波包反变换即得到融合后的图像。

融合规则是融合效果的关键。一般采取系数取大法或系数加权法,系数取大法通常认为大的系数值对应的图像信息量也大,但是可见光图像和红外图像毕竟反映不同的光谱信息,而且目前红外图像的细节表现能力还比不上可见光图像,因此系数取大法的融合效果有时并不能令人满意。文中采取系数加权法,计算量小,可根据需要或融合结果调节权重以增强或抑制某一方面的信息,改善融合结果,这一点对非实时的融合分析尤其有用。

设分解四叉树对应节点的系数分别为  $c_1, c_2$ , 则融合系数为  $c = \omega(\omega_1 c_1 + \omega_2 c_2)$ , 其中  $0 < \omega \leq 1, 0 \leq \omega_1, \omega_2 \leq 1.5$ 。  $\omega, \omega_1, \omega_2$  是权重,由样本图像确定。调节  $\omega$  能够改变融合图像的亮度,调节  $\omega_1, \omega_2$  可以突出某种细节。

## 3 图像融合结果

依据上文提到的方法,对一些图像进行了融合实验。为了便于对比融合方法的优劣,待融合图像选自公开发表的文章。图 4(c)是可见光图像(a)和红外图

像(b)的融合结果。融合使用的联合最佳基是基于 Haar 小波函数构建的。

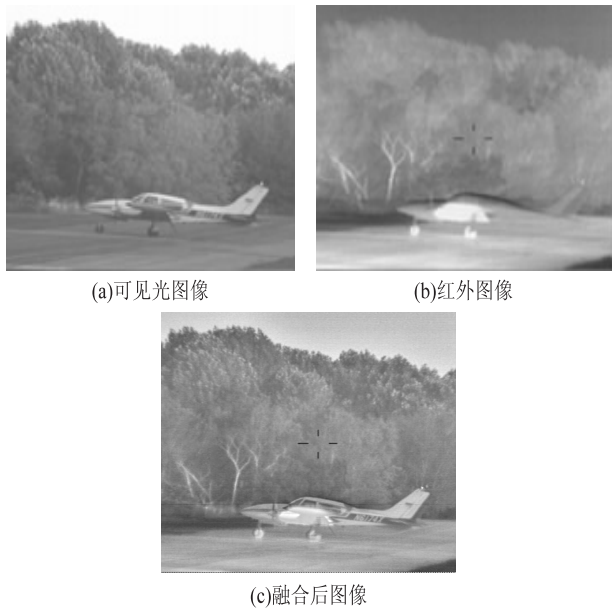


图 4 融合实验

从可见光图像中可以清楚地看到一架停着的飞机,几乎能看到机身上的图案。从红外图像虽只能看到飞机模糊的轮廓,但是红外图像同样能反映出一些重要信息:从发热的发动机和起落轮胎可以判断飞机正在起飞或执行任务刚回来。融合图像保留了源图像的重要信息。

同样地,利用联合最佳小波包基融合算法对其他红外图像和可见光图像以及多聚焦图像进行了融合实验,结果都是令人满意的。

4 融合结果评价

图像融合多用人眼观察,因此主观评价是图像融合的重要评价方法。国际上规定了五级质量尺度和妨碍尺度对融合图像进行打分评级。主观评价方法受到人的视觉特性、心理因素以及图像类型、观察环境和条件等多方面的影响,对图像评价结论的差异有时会很 大。因此,应当结合客观评价指标对融合图像进行综合评价。

常用的客观评价指标<sup>[13-14]</sup>有平均值、标准偏差、信息熵、平均梯度、平均交叉熵(MCE)和均方根交叉熵(RCE)等。融合图像的熵值越大,说明图像中所包含的信息越多,融合效果越好;平均梯度反映图像的清晰度,其值大表示融合结果好;MCE 和 RCE 的值越小,说明融合后的图像从参加融合的图像中提取的信息越多,融合效果会越好。

选择信息熵、平均梯度、MCE 和 RCE 对几种图像融合方法进行比较(融合图像的熵值越大,说明图像中所包含的信息越多,融合效果越好;平均梯度反映图

像的清晰度,其值大表示融合结果好;MCE 和 RCE 的值越小,说明融合后的图像从参加融合的图像中提取的信息越多,融合效果会越好),得到结果如表 1 所示。之所以选择这几个指标,主要是因为这四个指标与图像融合的目的及人们的主观评价一致。

表 1 几种图像融合方法的比较

融合方法	信息熵	MCE	RCE	平均梯度
简单平均	4.459 4	0.272 8	0.296 3	1.930 5
灰度值选小	4.195 2	0.363 2	0.586 9	2.426 6
灰度值选大	4.492 7	0.784 1	0.945 3	2.321 2
高斯金字塔	4.466 6	0.296 7	0.309 2	1.941
小波分解	4.458 5	0.270 6	0.291 4	1.923 9
小波包分解	4.540	0.370 3	0.382 9	3.206
联合最佳基	4.617 7	0.361 0	0.403 7	4.081 2

从表中所列的数据可以看出,联合最佳基图像融合结果在信息熵和平均梯度两个评价指标上表现很好,说明融合图像所含信息量较多,而且清晰,这与主观评价结果一致。但 MCE 和 RCE 二值相对较大(灰度值选大和灰度值选小法除外)。这说明基于联合最佳基的融合方法特别适合于人眼观察的场合,这正是大部分图像融合的目的所在。

5 结束语

理论上利用小波包算法能对图像进行无限细分,但是随着分解层数的增加,每个子图像包含的信息变得很少,没有必要继续分解下去。不过如何选择恰当的分解层次目前并没有什么依据,只能根据试验和经验来定。一般分解 3 层就可以了。

基于像素的融合归根结底还是像素叠加问题,因此有时会带来融合图像对比度下降的问题,由于图像信息主要集中在低频子图像中,提高低频子图像权重可以适当改善对比度。

红外图像有时会出现局部区域很暗的情况,造成可见光的某些细节在融合图像中可视性可能变差,通过提高可见光图像高频系数的权重可以增强融合图像的细节。在实际工作中,由于目前红外相机的分辨率还比较低,细节表现能力相对差一些,融合时可见光图像高频系数的权重往往要大于红外图像高频系数的权重。

参考文献:

[1] Dupta V K,Neog A,Katiyar S K. Analysis of image fusion techniques over multispectral and microwave SAR images [C]//Proc of international conference on communication and signal processing. India:[s. n. ],2013:1037-1042.



三种表示方法的具体实现过程以及每一种数据结构中四种基本操作的时间复杂度。当巡回路径用数组表示时,  $\text{Next}(a)$ 、 $\text{Prev}(a)$  和  $\text{Between}(a, b, c)$  操作能够在常数时间内完成,  $\text{Flip}(a, b, c, d)$  操作在最坏情况下的时间复杂度是  $O(n)$ , 不适用于大规模的旅行商问题。当巡回路径用伸展树表示时, 每个操作的平摊时间复杂度为  $O(\log n)$ , 适用于极大规模的旅行商问题。当巡回路径用两级树表示时,  $\text{Prev}(a)$ 、 $\text{Next}(a)$  和  $\text{Between}(a, b, c)$  操作都能够在常数时间内完成, 而  $\text{Flip}(a, b, c, d)$  操作在最坏情况下的时间复杂度是  $O(n^{1/2})$ , 适用于大规模的旅行商问题。下一步将用 C 语言编程实现这三种数据结构, 并通过仿真实验分析这三种数据结构对 Lin-Kernighan 算法等局部搜索算法在求解旅行商问题时性能的影响。

#### 参考文献:

- [1] Garey M R, Johnson D S. Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness [M]. San Francisco, USA: Freeman W H, 1979.
- [2] Croes G A. A method for solving traveling salesman problems [J]. Operations Research, 1958, 6(6): 791-812.
- [3] Lin S. Computer solutions of the traveling salesman problem [J]. Bell System Technical Journal, 1965, 44(10): 2245-2269.
- [4] Lin S, Kernighan B W. An effective heuristic algorithm for the traveling salesman problem [J]. Operations Research, 1973, 21(2): 498-516.
- [5] 宗德才, 王康康. 改进的嵌套分区算法求解旅行商问题 [J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(24): 54-57.
- [6] 陈晓峰, 宋杰. 量子人工鱼群算法 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2012, 33(12): 1710-1713.
- [7] 苏晓勤, 孙鹤旭, 潘旭华. 改进蜂群算法的旅行商问题仿真 [J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(4): 1420-1424.
- [8] 王忠英, 白艳萍, 岳利霞. 经过改进的求解 TSP 问题的蚁群算法 [J]. 数学的实践与认识, 2012, 24(4): 133-140.
- [9] 柳寅, 马良. 模糊人工蜂群算法的旅行商问题求解 [J]. 计算机应用研究, 2013, 30(9): 2694-2696.
- [10] 申铨京, 刘阳阳, 黄永平, 等. 求解 TSP 问题的快速蚁群算法 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2013, 43(1): 147-151.
- [11] Sleator D D, Tarjan R E. Self-adjusting binary search trees [J]. Journal of the Association for Computing Machinery, 1985, 32(3): 652-686.
- [12] Gamboa D, Rego C, Glover F. Data structures and ejection chains for solving large-scale traveling salesman problems [J]. European Journal of Operational Research, 2005, 160(1): 154-171.
- [13] Chrobak M, Szymacha T, Krawczyk A. A data structure useful for finding Hamiltonian cycles [J]. Theoretical Computer Science, 1990, 71(3): 419-424.
- [14] Helsgaun K. An effective implementation of the Lin-Kernighan traveling salesman heuristic [J]. European Journal of Operational Research, 2000, 126(1): 106-130.
- [15] Helsgaun K. General k-opt submoves for the Lin-Kernighan TSP heuristic [J]. Mathematical Programming Computation, 2009, 1(2-3): 119-163.
- [1] Garey M R, Johnson D S. Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness [M]. San Francisco, USA: Freeman W H, 1979.
- [2] Croes G A. A method for solving traveling salesman problems [J]. Operations Research, 1958, 6(6): 791-812.
- [3] Lin S. Computer solutions of the traveling salesman problem [J]. Bell System Technical Journal, 1965, 44(10): 2245-2269.
- [4] Lin S, Kernighan B W. An effective heuristic algorithm for the traveling salesman problem [J]. Operations Research, 1973, 21(2): 498-516.
- [5] 宗德才, 王康康. 改进的嵌套分区算法求解旅行商问题 [J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(24): 54-57.
- [6] 陈晓峰, 宋杰. 量子人工鱼群算法 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2012, 33(12): 1710-1713.
- [7] 苏晓勤, 孙鹤旭, 潘旭华. 改进蜂群算法的旅行商问题仿真 [J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(4): 1420-1424.
- [8] 王忠英, 白艳萍, 岳利霞. 经过改进的求解 TSP 问题的蚁群算法 [J]. 数学的实践与认识, 2012, 24(4): 133-140.
- [9] 柳寅, 马良. 模糊人工蜂群算法的旅行商问题求解 [J]. 计算机应用研究, 2013, 30(9): 2694-2696.
- [10] 申铨京, 刘阳阳, 黄永平, 等. 求解 TSP 问题的快速蚁群算法 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2013, 43(1): 147-151.
- [11] Sleator D D, Tarjan R E. Self-adjusting binary search trees [J]. Journal of the Association for Computing Machinery, 1985, 32(3): 652-686.
- [12] Gamboa D, Rego C, Glover F. Data structures and ejection chains for solving large-scale traveling salesman problems [J]. European Journal of Operational Research, 2005, 160(1): 154-171.
- [13] Chrobak M, Szymacha T, Krawczyk A. A data structure useful for finding Hamiltonian cycles [J]. Theoretical Computer Science, 1990, 71(3): 419-424.
- [14] Helsgaun K. An effective implementation of the Lin-Kernighan traveling salesman heuristic [J]. European Journal of Operational Research, 2000, 126(1): 106-130.
- [15] Helsgaun K. General k-opt submoves for the Lin-Kernighan TSP heuristic [J]. Mathematical Programming Computation, 2009, 1(2-3): 119-163.

(上接第 71 页)

- [2] 刘洲洲. 基于 HSI 空间伪彩色异构多传感器图像融合仿真 [J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(10): 201-203.
- [3] Ma Jianping, Jiang Jin. Detection and identification of faults in NPP instruments using kernel principal component analysis [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2012, 134(3): 739-744.
- [4] Wang Rui, Wu Yi, Ding mingyue, et al. Medical image fusion based on spiking cortical model [J]. Proc of SPIE, 2013, 8676: 101-104.
- [5] 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.
- [6] 王海江, 王周龙, 吴孟泉, 等. 一种最佳基小波包变换的影像融合研究 [J]. 测绘科学, 2009, 34(5): 63-66.
- [7] 蒋年德, 毛建旭, 王耀南. 基于小波包变换的遥感图像融合 [J]. 微计算机信息, 2008, 24(13): 286-287.
- [8] 李林宜, 李德仁. 基于最佳小波包变换的遥感影像融合方法 [J]. 计算机应用研究, 2007, 24(3): 318-320.
- [9] 赵松年, 熊小芸. 子波变换与子波分析 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1996.
- [10] Coifman R R, Wickerhauser M V. Entropy-based algorithms for best basis selection [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1992, 38(2): 713-718.
- [11] Wickerhauser M V. Comparison of picture compression methods: wavelet, wavelet packet, and local cosine transform coding [C]//Proceedings of the international conference on wavelets: theory, algorithms, and applications. Taormina, Sicily: [s. n.], 1993: 585-621.
- [12] Garbas Jens-Uwe, Presquet-Popescu B, Trocan M, et al. Wavelet-based multi-view video coding with joint best basis wavelet packets [C]//Proceedings of ICIP. San Diego, CA: IEEE, 2008: 1232-1235.
- [13] 夏明革, 何友, 欧阳文. 像素级图像融合方法与融合效果评价 [J]. 遥感技术与应用, 2002, 17(4): 224-229.
- [14] 胡良梅, 高隽, 何柯峰. 图像融合质量评价方法的研究 [J]. 电子学报, 2004, 32(F12): 218-221.

# 基于联合最佳基小波包的图像融合方法

作者：

薛庆增，刘倩，郝小健，陈光辉，[XUE Qing-zeng](#)，[LIU Qian](#)，[HAO Xiao-jian](#)，[CHEN Guang-hui](#)

作者单位：

[中国北方车辆研究所, 北京, 100072](#)

刊名：

[计算机技术与发展](#)

英文刊名：

[Computer Technology and Development](#)

年，卷(期)：

2014(12)

引用本文格式：[薛庆增](#). [刘倩](#). [郝小健](#). [陈光辉](#). [XUE Qing-zeng](#). [LIU Qian](#). [HAO Xiao-jian](#). [CHEN Guang-hui](#) [基于联合最佳基小波包的图像融合方法](#)[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2014(12)