

基于正交多小波的红外和可见光图像融合

张 彬¹, 许廷发², 倪国强²

(1. 中国传媒大学理学院, 北京 100024; 2. 北京理工大学光电工程系 北京 100081)

摘要: 在应用中, 预滤波器或平衡滤波器的设计影响着多小波的处理结果。针对 OPTFR 一多小波, 设计了一种平衡滤波器, 将其应用于红外和可见光图像融合。首先, 对红外图像和可见光图像分别进行三层 OPTFR 一多小波变换, 提取出两幅图像的低频分量和不同尺度的高频分量。由于图像的大部分能量集中在低频分量上, 而不同尺度上的高频分量反映了图像在不同尺度上的细节信息, 在对源图像融合时, 对低频分量和高频分量分别采用能量和方差的加权平均进行融合, 得到融合后的低频分量和不同尺度的高频分量, 最后对这些融合后的分量进行重构, 得到融合图像。仿真结果表明: 和以往的融合算法相比较, 该算法强化了源图像的细节信息, 提高了融合的效果。

关键词: 多小波; 平衡多小波; 图像融合

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

The Fusion of Infrared and Visible Images with Orthogonal Multiwavelet

ZHANG Bin¹, XU Ting-fa², NIGuo-qiang²

(1. School of Science The Communication University of China Beijing 100024, China;

2. Department of Optoelectronic Engineering Beijing Institute of Technology Beijing 100081, China)

ABSTRACT: The design of pre-filter or balanced filter of multi-wavelets has an influence on processing results. The balanced multi-filter banks are designed for OPTFR-multi-wavelet and a new fusion method is presented. This method firstly extracts low frequency information and high frequency information at different scales from original infrared image and visible image using three levels OPTFR-multi-wavelet transform. Because most energy of images is concentrated on low frequency components and high frequency components at different scales reflect detail information of images at different scales, so the fused low frequency and high frequency components can be obtained by weighted mean using energy and variance as weight respectively. Then the fusion image is reconstructed by opposite reconstruction process. The simulation shows that the approach retains the detail information of input images better than conventional fusion methods.

KEYWORDS: Multi-wavelet; Balanced multi-wavelet; Image fusion

1 引言

由于不同图像传感器的成像机理和成像波段不同, 不同传感器获得的同一场景的多幅图像之间具有信息的冗余性和互补性, 经图像融合技术得到的合成图像包含各幅源图像的所有有用信息, 可以更全面更精确地描述所研究的对象。

目前常用的图像融合可分为灰度融合和彩色融合, 而灰度融合大部分是基于多分辨率分析框架的。由于多小波较之于单小波具有更完美的数学特性, 多小波的应用研究成为人们关注的热点之一, 本文就是基于这一想法将其应用于图像融合。在图像处理等实际应用中, 正交性能保持能量, 而对称性既适合于人眼的视觉系统, 又使信号在边界易于处理。

紧支撑的小波对应的滤波器是有限冲击响应滤波器, 其相应的快速小波变换的和是有限和。所以分析工具同时拥有这些性质是十分重要的。但在实数域中, 具有紧支集的, 对称的, 正交的非平凡单小波是不存在的, 这使得人们不得不在正交性和对称性之间进行折衷, 从而构造了双正交小波。为了使得小波基同时具有这些性质, Goodman 等提出多小波的概念, 设想用增加尺度函数的个数的方法来获得更大的自由度。对多小波的较早研究是由 Goodman, Lee 和 Tang 在 1993 年开始的。1993 年 Alpert 构造出了最早的多小波, 它是用来作为某些多项式表达式的基底的多项式小波。稍后, Goodman 构造了满足一定插值条件的多小波。1994 年, Geronimo 等人应用分形插值方法构造出了具有紧支撑、正交性、对称性和二阶消失矩的多小波中两尺度函数。1996 年, Geronimo 等人再次应用分形插值方法构造出了多小波中两

基金项目: 中国传媒大学学科建设基金 (XK060306)

收稿日期: 2007-09-19 修回日期: 2007-11-19

多小波函数。我们一般把这个多小波称为 GHM 多小波。Chui 和 Lian 利用多小波的正交性、紧支撑性、对称性和插值性构造出了 CL 多小波函数。Mariantonia Cotronei 等人利用 Hurwitz 块矩阵和 Gram 矩阵构造出了半正交多小波。Jiang 利用视频分析中的窗函数的性质,构造出了具有最优时频分辨率的 OPTFR 多小波。为了解决多小波处理中的预滤波问题,Lebun 和 Vetterli 提出了平衡多小波这一新的概念,并与非平衡多小波进行了比较,给出了较好的结果。稍后,他们又提出了高阶平衡多小波理论、因式分解和设计方案。对于平衡多小波的研究,Selesnich 也作了大量研究工作。随着多小波研究的不断深入,人们构造了大量的性能良好的多小波,将其应用于图像处理各领域是一个值得研究的课题。

2 多小波的分解与重构算法、预滤波及平衡处理

设尺度向量函数 $\varphi = [\varphi_1(x), \varphi_2(x)]^T$ 和多小波函数 $\psi = [\psi_1, \psi_2]^T$ 满足双尺度方程

$$\varphi(x) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} P_k \varphi(2x - k) \quad (1)$$

$$\psi(x) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} Q_k \varphi(2x - k) \quad (2)$$

其中 $\{P_k\}_{k \in \mathbb{Z}}$ 和 $\{Q_k\}_{k \in \mathbb{Z}}$ 是 2 阶矩阵序列。

令 $\varphi_{j,k} = [\varphi_{1,j,k}, \varphi_{2,j,k}]^T$, $\psi_{j,k} = [\psi_{1,j,k}, \psi_{2,j,k}]^T$

其中 $\varphi_{1,j,k} = 2^{\frac{j}{2}} \varphi_1(2^j x - k)$, $\varphi_{2,j,k} = 2^{\frac{j}{2}} \varphi_2(2^j x - k)$,

$$\psi_{1,j,k} = 2^{\frac{j}{2}} \psi_1(2^j x - k), \psi_{2,j,k} = 2^{\frac{j}{2}} \psi_2(2^j x - k),$$

$$a_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \varphi_{1,j,k}(x) dx, c_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \varphi_{2,j,k}(x) dx$$

$$d_{1,j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi_{1,j,k}(x) dx, d_{2,j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi_{2,j,k}(x) dx$$

$$a_k^j = [a_{j,k}, c_{j,k}]^T, d_k^j = [d_{1,j,k}, d_{2,j,k}]^T$$

那么对正交多小波如下的分解算法

$$a_k^j = \begin{bmatrix} a_{j,k} \\ c_{j,k} \end{bmatrix} = \sum_n P_n a_{k+n}^{j+1} = \sum_n P_n \begin{bmatrix} a_{j+1, 2k+n} \\ c_{j+1, 2k+n} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$d_k^j = \begin{bmatrix} d_{1,j,k} \\ d_{2,j,k} \end{bmatrix} = \sum_n Q_n a_{k+n}^{j+1} = \sum_n Q_n \begin{bmatrix} a_{j+1, 2k+n} \\ c_{j+1, 2k+n} \end{bmatrix} \quad (4)$$

和重构算法

$$a_{k+n}^{j+1} = \begin{bmatrix} a_{j+1, k+n} \\ c_{j+1, k+n} \end{bmatrix} = \sum_n (P_{k+2n}^T \begin{bmatrix} a_{j,n} \\ c_{j,n} \end{bmatrix} + Q_{k-2n}^T \begin{bmatrix} d_{1,j,n} \\ d_{2,j,n} \end{bmatrix}) \quad (5)$$

目前,人们虽然构造了大量的多小波,但在应用上却不尽如人意。一是多小波给出的滤波器是矩阵滤波器,这与实际应用中的信号数据不相匹配。因此必须将信号数据进行转换,即先将一维信号转换为矩阵滤波器需要的向量信号,对向量信号进行多小波变换后,再将向量信号恢复为一维信号;二是阵滤波器的低通和高通特性都非常差,这就限制了多小波的应用。为了解决这一问题,就必须对多小波进行预处理,它包括了预滤波和后滤波两个环节。通过预处理,一方面将数据流转换为向量流,另一方面可以改善矩阵滤波器的滤波性能。

最简单的预滤波就是所谓的奇/偶预滤波,它将奇数位

的采样点和相邻的偶数位的采样点作为一组输入向量,例如有长度为 $2m$ 离散信号 $(y_1, \dots, y_{2m})$, 取 $c_{1,k} = y_{2k-1}$, $c_{2,k} = y_{2k}$, $k = 1, \dots, m$, 即 $c_k^1 = [y_{2k-1}, y_{2k}]^T$, 这样就将采样值转化为需要的输入向量,对输入向量进行适当层次的多小波变换,将变换后的输出向量再按奇偶两部分恢复信号。这种预处理由于简单而被经常应用。对于大多数矩阵滤波器而言,预滤波往往破坏的多小波原有的正交性和对称性,使得矩阵滤波器的滤波性能大打折扣。

Lebun 和 Vetterli 基于低通滤波应该保持平滑信号的思想,提出了平衡多小波的概念。实验表明:在大多数情况下,只要选择适当的正交矩阵,多小波的平衡处理能够达到比较满意的效果。

3 性能良好的矩阵滤波器的构造

Jiang 基于最优时频局部化的考虑,利用多小波的正交性条件和尺度向量的每一个分量的时频窗面积与对应的小波分量的时频窗面积之和为最小的条件,构造了性质良好的 OPTFR 多小波系,它的优点在于低通滤波器和高通多滤波器都由某些参数决定,在应用中,只要选择适当的参数就可得到需要的滤波器。例如,当 $N = 2$ 时,低通滤波系数矩阵 $\{P_k\}$ 和高通滤波系数矩阵 $\{Q_k\}$ 分别为:

$$P_0 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \sqrt{2} \sin \theta & \sqrt{2} \sin \theta \end{bmatrix}$$

$$P_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \sqrt{2} \sin \theta \end{bmatrix}$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -\sqrt{2} \sin \theta & \sqrt{2} \sin \theta \end{bmatrix}$$

$$Q_0 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \sqrt{2} \cos \theta & \sqrt{2} \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$Q_1 = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -\sqrt{2} \sin \theta \end{bmatrix}$$

$$Q_2 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -\sqrt{2} \cos \theta & \sqrt{2} \cos \theta \end{bmatrix}$$

当 $k < 0$ 或 $k > 2$ 时 $P_k = 0$, $Q_k = 0$. 取 $\theta = -1.20942920288819 (-\arccos(\sqrt{2}/4))$, 矩阵滤波器有最优的时频分辨特性。

选择正交矩阵 $R = (1/\sqrt{2}) \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$ 对矩阵滤波器作平

衡处理,平衡后的低通滤波系数矩阵为 $R^T P_i R$ 而选择高通滤波系数矩阵为 $R^T Q_i R$, 经此处理后,滤波器组的正交性得以保留。在实际应用中,选取适当的常数因子 $c = \sqrt{2}$, 以 $\sqrt{2}R$ 为平衡器,可以显著提高矩阵滤波器的滤波性能。

假设有采样数据 s 其长度为 m , 定义如下的分块矩阵 C_i 和 D_i :

$$C_j = \begin{bmatrix} R^T P_0 R & R^T P_1 R & R^T P_2 R & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & R^T P_0 R & R^T P_1 R & R^T P_2 R & 0 & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R^T P_0 R & R^T P_1 R & \dots \end{bmatrix}_{\frac{1}{2} \times 1}$$

D_j 的定义类似于 C_j 只需将 P_j 换成 Q_j , $j=0, 1, 2, \dots, 1=m/2^{j-1}$ 。

此时,分解公式为:

$$\begin{aligned} v_1 &= C_1 * s & w_1 &= D_1 * s \\ v_2 &= C_2 * v_1 & w_2 &= D_2 * v_1 = D_2 * C_1 * s \\ &\vdots & &\vdots \\ v_j &= C_j * C_{j-1} * \dots * C_1 * s & w_j &= D_j * C_{j-1} * \dots * C_1 * s \end{aligned} \quad (6)$$

重构公式为:

$$v_{j-1} = C_j^T * v_j + D_j^T * w_j \quad (7)$$

4 融合算法

设红外图像和可见光图像进行小波变换后的低频信息分别为 $C_R(m, n)$ 和 $C_N(m, n)$, 高频信息分别为 $D_R^h(m, n)$, $D_R^v(m, n)$, $D_R^d(m, n)$ 和 $D_N^h(m, n)$, $D_N^v(m, n)$, $D_N^d(m, n)$ 。低频信息主要包含了图像的近似内容, 定义红外/可见光图像近似部分的能量分别为:

$$E_R = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |C_R(m, n)|^2 / M \times N \quad (8)$$

$$E_N = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |C_N(m, n)|^2 / M \times N \quad (9)$$

设融合后的低频信息为 $C_F(m, n)$, 定义近似部分的融合准则为:

$$C_F(m, n) = \frac{E_R}{E_R + E_N} C_R(m, n) + \frac{E_N}{E_R + E_N} C_N(m, n) \quad (10)$$

图像的高频信息体现了图像的细节和突变。设红外、可见光图像的标准差分别为: $V_R^k(m, n)$ 和 $V_N^k(m, n)$ ($k = h, v, d$ 分别表示高频信息中的水平、垂直和对角三个方向):

$$V_R^k(m, n) = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (C_R^k - \mu_R^k)^2} \quad k = h, v, d \quad (11)$$

$$\mu_R^k = \frac{1}{M \times N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N C_R^k(m, n) \quad k = h, v, d \quad (12)$$

$$V_N^k(m, n) = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (C_N^k - \mu_N^k)^2} \quad k = h, v, d \quad (13)$$

$$\mu_N^k = \frac{1}{M \times N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N C_N^k(m, n) \quad k = h, v, d \quad (14)$$

设融合后的高频信息为 $D_F(m, n)$, 定义高频部分的融合准则为:

$$D_F(m, n) = \frac{V_R^k}{V_R^k + V_N^k} D_R(m, n) + \frac{V_N^k}{V_R^k + V_N^k} D_N(m, n)$$

$$k = h, v, d \quad (15)$$

把融合后的 $C_F(m, n)$, $D_F^h(m, n)$, $D_F^v(m, n)$, $D_F^d(m, n)$ 应用重构公式 (7) 便得到融合后的图像。

5 仿真实验

为了验证本算法的有效性, 选择了和 OPTFR 一多小波有相同滤波器长度的正交小波及高斯一拉普拉斯金字塔进行了比较。图 1 给出了融合的结果。图 (a) 和图 (b) 分别为可见光和红外源图像, (c) 为用 OPTFR 一多小波和本文提出的融合算法的融合结果, (d) 为正交小波的融合结果, (e) 为高斯一拉普拉斯金字塔的融合结果。从融合效果来看, 基于多小波的融合效果和基于正交小波的融合效果基本上相差不多, 但在点目标和道路细节上, 多小波略胜一筹, 它更好地综合并保留了源图像的有用信息, 更利于视觉观察和后续研究。

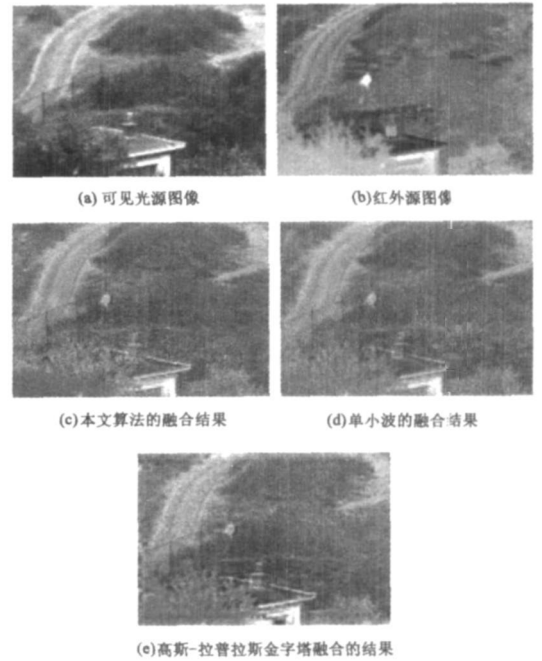


图 1 红外和可见光图像的融合结果

6 结论

本文对正交的 OPTFR 一多小波设计了性能良好的平衡滤波器, 并对红外图像和可见光图像进行三层 OPTFR 一多小波分解, 分别得到两幅图像的第三层低频信息和一到三层的高频信息。对两幅图像的低频信息以能量为权值进行加权平均, 对于两幅图像的高频信息以方差为权值进行加权平均。最后对融合后图像的低频信息和高频信息进行重建, 便得到融合图像。仿真实验也说明了该算法的有效性。

参考文献:

- [1] Q Jiang Orthogonal mutiwavelets with opotinum time-frequency

[J]. IEEE Trans on Signal Processing 1998, 46(4): 830—844.

- [2] Q Jiang On the design of multifilter banks and orthogonal multi-wavelet bases [J] IEEE Trans on Signal Processing 1998, 46(12): 3292—3304.
- [3] J Lebnun M Vetterli Balanced multiwavelets: theory and design [J]. IEEE Trans Signal Process 1998, 46(4): 1119—1125.
- [4] O Rioul A discrete-time multiresolution theory [J]. IEEE Trans on Signal Processing 1993, 41(8): 2591—2606.
- [5] V Petrovic C Xydeas Gradient-Based Multiresolution image fusion [J]. IEEE Trans Image Processing February, 2004, 13(2): 228—237.
- [6] P Burt R Kolczynski Enhanced image capture through fusion

[C]. Proc 4th Int Conf Computer Vision, Berlin, Germany, 1993. 173—182.

【作者简介】



张彬 (1965.5—), 男 (汉族), 陕西咸阳人, 博士, 硕士生导师, 副教授, 主要研究方向为小波分析、图像融合、视觉模型;

许廷发 (1968—), 男 (汉族), 吉林长春人, 博士, 硕士生导师, 副教授, 主要研究方向为目标识别、跟踪、视

频处理技术;

倪国强 (1945—), 男 (汉族), 江苏江阴人, 博士, 博士生导师, 教授, 主要研究方向为微光与红外热成像技术、图像工程与视频处理技术、图像实时融合处理。

(上接第 190 页)

从表 2 中可以得到时由改进算法得到的结果。从图 5 可以看出当增大时, 算法性能有所下降。主要原因在于选择的起始点增多, 扩大了寻优范围, 得到较差的解的几率增大, 导致算法性能的下降。

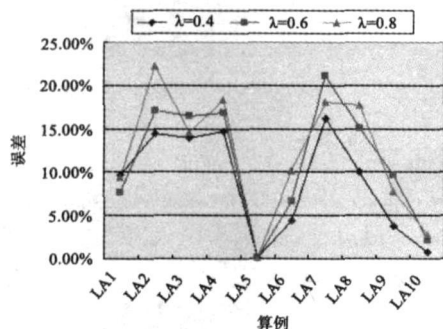


图 5 性能比较 $\lambda=0.4$ $\lambda=0.6$ $\lambda=0.8$

5 结论

实际生产调度中的 Job—Shop 问题是十分复杂的组合优化问题。本文从按机器分解的角度, 研究了蚁群算法求解 Job—Shop 问题的机器分解方法。并且根据分解后问题的新特点, 设计了如何安排蚂蚁起点的方法和新的状态转移规则。在 Benchmark 问题上的仿真结果表明, 这种分解方法缩短了蚁群算法求解 Job—Shop 问题的时间并且结果令人满意。仿真结果说明, 用蚁群算法通过分解的思路来求解 Job—Shop 问题可取得较高的效率。较原有的一类蚁群算法求解 Job—Shop 问题的集中式方法有效的多。

参考文献:

- [1] Marco Dorigo Vittorio Maniezzo and Alberto Colomi Ant system: optimization by a colony of cooperating agents [J]. IEEE transactions on systems man and cybernetics—part B: cybernetics 1996, 26(2): 29—41.
- [2] Bud Fox Wei Xiang Heow Pueh Lee Industrial applications of the ant colony optimization algorithm [J]. Int J Adv Manuf Technol 2007, 31: 805—814.
- [3] 陈知美, 顾顺生. 改进型蚁群算法在 Job Shop 问题中的应用 [J]. 华东理工大学学报 (自然科学版), 2006, 32(4): 466—470.
- [4] 王常青, 操云甫, 戴国中. 用双向收敛蚁群算法解作业车间调度问题 [J]. 计算机集成制造系统, 2004, 10(7): 820—824.
- [5] Michael Pinedo 调度: 原理、算法和系统 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [6] Marco Dorigo Eric Bonabeau Guy Theraulaz Ant algorithms and stigmergy [J]. Future Generation Computer Systems, 2000, 16: 851—871.
- [7] Mario Ventresca Beatrice M. Ombuki Ant Colony Optimization for Job Shop Scheduling Problem [J]. Artificial Intelligence and Soft Computing 2004. 451.
- [8] Thomas Stutzle and Holger Hoos MAX—MIN Ant System and Local Search for the Traveling Salesman Problem [C]. IEEE international conference 1997. 309—314.

【作者简介】



薛拾贝 (1982.09—), 男 (汉族), 辽宁省沈阳市人, 硕士研究生, 主要研究方向生产调度, 智能算法;

席裕庚 (1946.09—), 男 (汉族), 上海市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向预测控制, 动态大系统。