

文章编号:1004-4213(2011)01-0107-5

基于 PHLST 的红外与可见光图像融合算法

刘少鹏,郝群,宋勇

(北京理工大学 光电学院,北京 100081)

摘 要:针对图像融合过程中边缘处理和区域一致性的问题,提出一种基于多重调和局部正弦变换的红外与可见光图像融合新算法.多重调和局部正弦变换的多重调和分量 u 代表了图像缓慢变化的“趋势”,在空域进行加权融合;残差分量 v 体现了源图像的“波动”,在傅里叶正弦变换域进行融合,以充分提取可见光图像的细节信息.由于不存在边缘效应,同时残差分量的傅里叶正弦系数具有高的消失矩,多重调和局部正弦变换应用于图像融合可取得较好的效果.多次红外与可见光图像融合实验证明所提算法有效提取了源图像有用信息,克服了多分辨率分析算法存在的边缘效应和区域一致性问题.

关键词:图像融合;多重调和局部正弦变换;傅里叶正弦变换

中图分类号:TP391

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114001.0107

0 引言

图像融合作为新的研究领域,近年来得到了广泛和深入的研究.基于多分辨率分析的图像融合算法是目前图像融合领域研究热点之一^[1-4].在多分辨率分析算法中,小波变换由于具有在时间-频率域内局部化联合分析的能力,在图像融合过程中得到了广泛的应用.但是标准小波分析在图像处理过程中存在边缘效应,而在此基础上发展的多小波理论对纹理区域的处理效果也不理想^[5],因此基于小波的图像融合很难获得最优的融合效果.同时目前对基于小波变换图像融合算法的改进多集中在融合规则的研究上,这也使得各种改进方法的普适性不好.

本文基于多重调和局部正弦变换(Polyharmonic Local Sine Transform, PHLST)提出了一种新的红外与可见光图像融合算法.由于消除了信号人为周期化处理带来的边缘效应,同时其残差分量 v 的傅里叶正弦变换系数具有高的消失矩^[5],因此 PHLST 具有小波变换不具有的良好特性,用于图像融合可以克服小波算法的缺点,消除融合过程中的边缘效应.另外,区域一致性问题是多分辨率分析融合算法中造成融合效果恶化的另一个重要原因,区域不一致常导致区域对比度下降,同时融合后图像的局部区域不能完全反映源图像相应区域内部像素的分布特征^[6].因为残差分量的处理在傅

里叶正弦变换域进行,不存在多分辨率分析图像融合算法中局部相邻系数来源不同的问题,因此,基于 PHLST 的图像融合算法避免了多分辨率分析算法中的区域一致性问题.与具有平移不变特性的非采样 Contourlet 变换(Nonsubsampled Contourlet Transform, NSCT)相比较,基于 PHLST 的红外与可见光图像融合具有更小的计算复杂度和空间复杂度^[5-8],并且在融合过程中有效消除了边缘效应,不存在区域一致性问题,融合规则简单,因此其在图像融合中的应用研究具有实际意义.

1 PHLST 理论

PHLST 由 Naoki Saito 等人在 2006 年提出^[5].本文对其在图像融合中的应用进行了研究,设计了基于 PHLST 的融合方法.

假定 $f(x, y)$ 为空间域图像. PHLST 将 $f(x, y)$ 分解为两部分:多重调和分量 u 代表图像缓慢变化的整体特征,代表源图像的“趋势”或称之为“可预测”部分;残差分量 v 代表图像的波动成分. PHLST 可简单表示为 $f = u + v$,其中 f 表示矩形图像.令 Δ 表示拉普拉斯算子,解式(1)所示边界方程即可得到 u 分量.

$$\begin{cases} \Delta^m u = 0 & \text{in } \Omega_{in}, \quad m = 1, 2, \dots \\ \frac{\partial^l u}{\partial v^l} = \frac{\partial^l f}{\partial v^l} & \text{on } \partial\Omega, \quad l = 0, 1, \dots, m-1 \end{cases} \quad (1)$$

基金项目:国家自然科学基金(No. 60578053)资助

第一作者:刘少鹏(1983—),男,博士研究生,主要研究方向为多源图像融合. Email: digilshp@gmail.com

导师(通讯作者):郝群(1968—),女,教授,博导,主要研究方向为光电信息获取与处理,光学精密测量.

收稿日期:2009-11-16; **修回日期:**2010-01-08

式中 q_l 是法向导数的阶数, $\partial\Omega$ 表示边界, Ω_{in} 表示图像内部区域. q_0 为 0, 即在边界 $\partial\Omega$ 上有 $u=f$. 在此方程中只需要考虑 $q_l=2l$ 的偶数阶的法向导数, 奇数阶自动成立.

取 $m=1$, 并且整个图像矩形区域定义为 $0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1$, 式(1)变为

$$\begin{cases} \Delta u=0 & \text{in } \Omega_{in} \\ u=f & \text{on } \partial\Omega \end{cases} \quad (2)$$

即解狄利克雷边界条件的拉普拉斯方程. 将式(2)的解写为^[5]

$$u(x, y) = p(x, y) + \sum_{k \geq 1} [b_k^{(1)}(h_k(x, 1-y) + b_k^{(2)}h_k(y, 1-x) + b_k^{(3)}h_k(x, y) + b_k^{(4)}h_k(y, x))] \quad (3)$$

式中

$$p(x, y) = a_3xy + a_2x + a_1y + a_0 \quad (4)$$

并且在四个边界交点有 $p(0, 0) = f(0, 0), p(0, 1) = f(0, 1), p(1, 0) = f(1, 0), p(1, 1) = f(1, 1)$, 亦即

$$\begin{cases} f(0, 0) = a_0 \\ f(0, 1) = a_1 + a_0 \\ f(1, 0) = a_2 + a_0 \\ f(1, 1) = a_3 + a_2 + a_1 + a_0 \end{cases} \quad (5)$$

通过求解式(5), 可以得到 $p(x, y)$. 函数 h_k 定义为

$$h_k \triangleq \sin(\pi kx) \frac{\sinh(\pi ky)}{\sinh(\pi k)} \quad (6)$$

$b_k^{(j)}, j=1, 2, 3, 4$ 分别是 $f(x, 0) - p(x, 0), f(0, y) - p(0, y), f(x, 1) - p(x, 1)$ 和 $f(1, y) - p(1, y)$ 等四个边界方程的 k 阶 1 维傅里叶正弦变换系数. 同时 v 分量可写为

$$v(x, y) = \sum_{m \geq 1} \sum_{n \geq 1} \beta_{mn} \sin(m\pi x) \sin(n\pi y) \quad (7)$$

β_{mn} 是 $v(x, y) = f(x, y) - u(x, y)$ 的二维傅里叶正弦变换的系数.

为了得到源图像更精确的表示, 可以将源图像分解为一系列不同大小互不重叠的小矩形区域(可

共享边界), 在小矩形区域中重复以上操作, 即可实现图像更为精确的分解.

2 基于 PHLST 的图像融合算法

2.1 算法概述

将红外与可见光源图像分解为 5×5 像素的小块, 对每个图像子块进行 PHLST 分解, 得到 u 分量和 v 分量, 然后对每个 v 分量子块进行二维傅里叶正弦变换, 即可得到源图像的 PHLST 变换. 变换完成后对 u 分量在空域进行加权融合, 对 v 分量在傅里叶正弦变换域进行融合操作, 即可得到融合系数, 逆变换即得到融合图像.

2.2 融合算法

因为图像的 u 分量代表了图像缓慢变化的整体特征, 采用最简单的加权平均融合规则对 u 分量进行融合操作以保留源图像最基本的区域信息.

v 分量表示图像像素灰度的波动, 类似多分辨率分析中的高频分量, v 分量以二维傅里叶正弦变换系数 β_{mn} 的形式表示. v 分量融合的主要目的为保留图像的细节信息, 本文结合源图像特点针对 v 分量设计了融合规则, 如式(8). 因为傅里叶正弦变换的高频分量代表了图像的细节信息, 因此, 在式(8)中, 首先对图像子块 v 分量大于截止频率 s 的傅里叶正弦变换高频分量能量进行比较, 如果可见光图像子块 v 分量傅里叶正弦变换高频分量的能量大于红外图像对应值, 则认为可见光图像子块包含了更为丰富的细节信息, 因此直接取可见光图像子块的高频傅里叶变换系数作为融合图像的相应系数, 以充分保留可见光图像的细节信息; 对低于截止频率的傅里叶变换系数, 采用加权平均法则进行融合, 以保留红外源图像的基本区域信息. 对红外图像子块 v 分量高频分量能量大于可见光图像对应值的情况, 则采用相反的法则进行融合, 具体操作见式(8).

$$\begin{cases} \text{if} \\ \sum_{\sqrt{x^2+y^2} > s} \beta_v^2(x, y) \geq \sum_{\sqrt{x^2+y^2} > s} \beta_i^2(x, y) \begin{cases} \beta_i = (x, y) = (\beta_i(x, y) + \beta_v(x, y))/2 & \sqrt{x^2+y^2} < s \\ \beta_i(x, y) = \beta_v(x, y) & \sqrt{x^2+y^2} \geq s \end{cases} \\ \text{else} \\ \begin{cases} \beta_i = (x, y) = (\beta_i(x, y) + \beta_v(x, y))/2 & \sqrt{x^2+y^2} < s \\ \beta_i(x, y) = \beta_i(x, y) & \sqrt{x^2+y^2} \geq s \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

式中 s 为截止频率到原点的距离, 取值一般为图像子块的行数(子块为正方形); β_v, β_i 和 β_f 分别表示可见光、红外及融合图像 v 分量傅里叶正弦变换系数.

对 u 分量和 v 分量分别融合, 进行逆变换即得到融合结果.

3 实验结果与分析

为了验证所提算法的有效性,进行了大量仿真实验,并将本文所提算法与基于 Mallat 算法、多孔

小波和 NSCT 的图像融合算法进行了比较,部分实验结果见图 1~图 3.

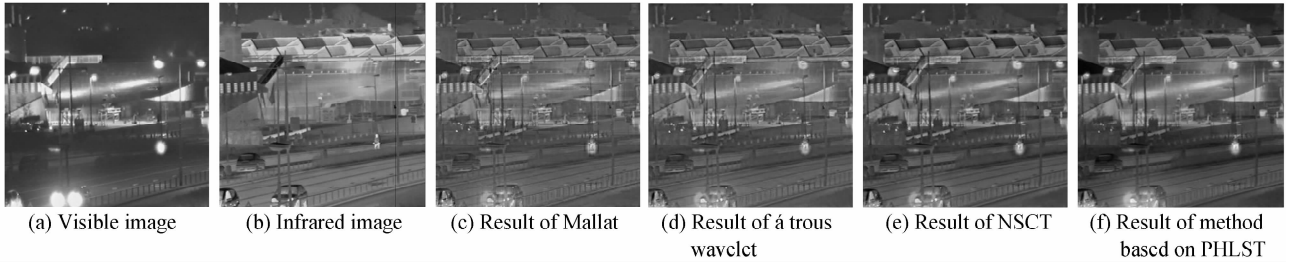


图 1 融合实验 1
Fig. 1 Results of experiment 1

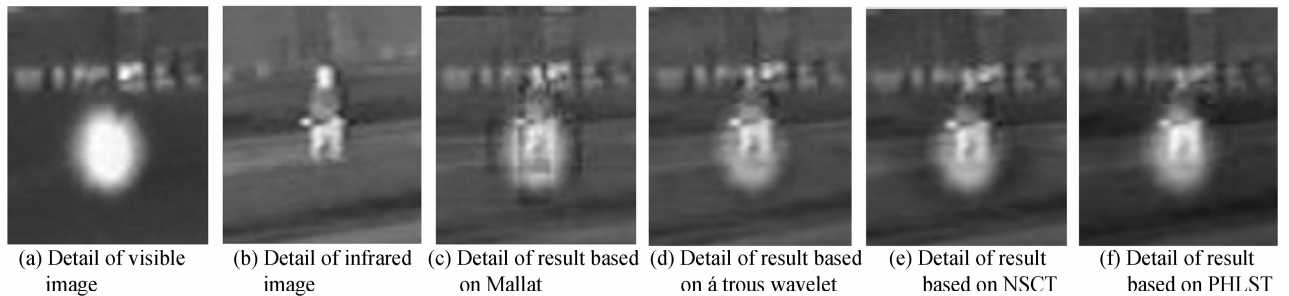


图 2 融合结果的放大效果对比
Fig. 2 Comparison of detail of the fusion results

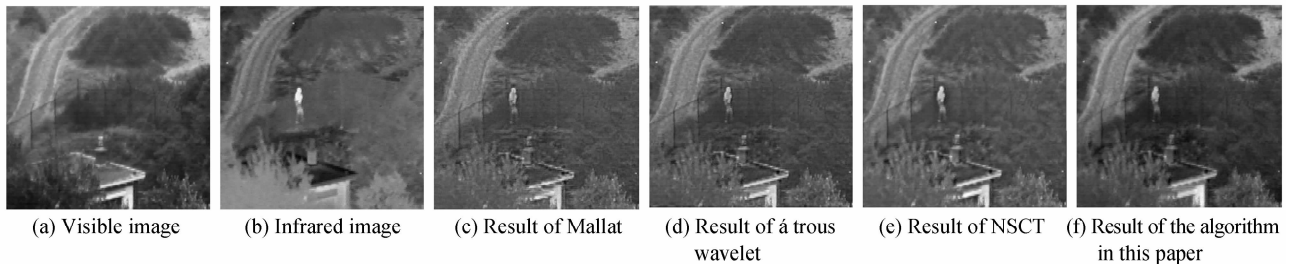


图 3 融合实验 2
Fig. 3 Results of experiment 2

图 1(a)和(b)为已配准的可见光与红外源图像,图 1(c)为基于 Mallat 算法的图像融合结果,低频系数采用加权平均,高频系数采用绝对值取大法;图 1(d)为基于多孔小波的融合结果,低频加权平均,高频采用文献[9]中提出的基于窗口的高频融合算子;图 1(e)为基于 NSCT 的融合结果,低频加权平均,高频采用文献[1]提出的相似性及显著性测度算子进行融合;图 1(f)为本文所提算法的融合结果.

从图 1(c)和图 2(c)视觉效果来看,基于 Mallat 算法得到的结果整体对比度较差.同时从图 2(c)可见 Mallat 算法本身边缘效应造成的影响明显,融合图像边缘模糊不清,红外目标区域边缘模糊,并且引入大量虚假边缘,效果较差.图 1(d)和图 1(e)所示融合图像边缘保持较好,没有明显变形和模糊,但是从图 1(d)和图 1(e)并结合图 2(d)和图 2(e)可见,融合图像的整体对比度明显降低,同时高频、低频系

数来源不一致造成物体(如人、灯光光晕、房子等)区域内部像素灰度分布和源图像相应区域不一致,区域过渡不自然,区域整体对比度降低.而本文所提算法得到的结果边缘保持较好,目标区域对比度好,视觉效果相对红外源图像没有明显下降,不存在区域一致性问题,边缘过渡自然,整体视觉效果最好.

除了视觉效果以外,采用常用评价指标^[6]信息熵(Entropy, E)、互信息(Mutual Information, MI)、标准差(Standard Deviation, S)及 Zhou Wang 等人提出的通用图像评价指标(Universal Image Quality, UIQ)^[10]对融合结果进行评价,结果如表 1. E、MI 是信息论的概念,E 表示图像包含信息量的多少,值越大说明包含信息量越多,亦即图像提供的信息越多;MI 体现了从源图像提取的信息量的多少,值越大说明提取了越多的信息量,相应的也说明融合算法越有效;而 S 反映了图像整体灰度的离散程度,S 越大说明灰度级分布越分散,图像的层次分

表 1 融合结果评价指标

Table 1 Performance evaluation of different methods

Fusion algorithm	Mallat	\acute{a} trous wavelet	NSCT	The proposed algorithm
E	6.645 5	6.763 7	6.768 4	7.058 8
MI	1.974 8	2.087 7	2.069 4	2.534 6
S	27.251 6	29.265 4	29.674 0	36.436 7
UIQ	0.653 8	0.684 4	0.675 0	0.726 1

明,视觉效果好;UIQ 综合体现了图像灰度扭曲、对比度扭曲和相关性降低的情况,值越大说明融合图像整体扭曲越小,效果越好。

从各项客观评价指标来看,本文所提算法得到的结果 E 和 MI 最大,这说明本文所提算法得到的结果包含了最多的信息量,同时从源图像提取了最多的有效信息;S 最大说明图像的整体对比度较好,层次分明;UIQ 最大说明本文所提算法在图像融合过程中带来的扭曲变形最小,算法的性能较好。结合目视效果和客观评价指标来看,本文所提算法在融合实验中取得了最好的效果。

为了进一步验证本文所提算法的有效性,进行了第二组仿真实验,结果如图 3。

图 3 所示融合结果采用的融合算法与图 1 完全相同,本文同样从视觉效果和客观评价指标两个方面对融合结果进行分析比较。

从视觉效果可以看出,Mallat 算法得到的结果图像整体对比度低,边缘模糊扭曲,整体融合效果最差;多孔小波和 NSCT 算法得到的融合结果边缘保持较好,但是图像整体对比度降低明显,同时目标边缘也存在黑色轮廓,过渡不够自然。整体来看,本文算法得到的结果区域过渡自然,同时背景信息保持的较好,视觉效果较好。

表 2 为各融合结果的客观评价指标数据。从中可以看出,使用本文提出的算法时,各项指标相比其余三种算法均有比较明显的提高,说明本文所提算法在综合性能上取得了最优的效果,信息量增加明显,图像整体对比度最高,目视效果与客观评价指标一致。

表 2 融合结果评价指标

Table 2 Performance evaluation of different fusion methods

Fusion algorithm	Mallat	\acute{a} trous wavelet	NSCT	The proposed algorithm
E	6.452 8	6.594 4	6.467 2	6.787 3
MI	1.383 7	1.450 0	1.408 7	1.604 6
S	25.282 7	28.324 8	25.755 3	33.283 6
UIQ	0.587 9	0.599 6	0.583 6	0.621 3

4 结论

本文提出了一种基于 PHLST 变换的红外与可见光图像融合新方法。在对 PHLST 变换性质进行研究的基础上,针对其特点设计了合理的融合规则,算法充分利用了 PHLST 良好的特性,根据 PHLST 的特点针对其 u 分量和 v 分量分别在空域和频域设计了不同的融合规则,解决了多分辨率分析图像融合算法常见的边缘效应和区域一致性不好的问题。通过多组红外与可见光图像融合实验证明了本文所提算法的有效性。

参考文献

- [1] PIELLA G. A general framework for multiresolution image fusion: from pixels to regions[J]. *Information Fusion*, 2003, **4**(4): 259-280.
- [2] YE Chuan-qi, WANG Bao-shu, MIAO Qi-guang. Fusion algorithm of infrared and visible images based on region feature [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6): 1498-1503.
叶传奇,王宝树,苗启广.一种基于区域特性的红外与可见光图像融合算法[J].光子学报,2009,**38**(6):1498-1503.
- [3] ZHANG Qiang, GUO Bao-long. Fusion of multifocus images based on the nonsubsampling contourlet transform [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 476-480.
- [4] ZHAO Yong-qiang, PAN Quan, ZHANG Hong-cai. Study of adaptive multi-band polarization image fusion [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7): 1356-1359.
赵永强,潘泉,张洪才.自适应多波段偏振图像融合研究[J].光子学报,2007,**36**(7):1356-1359.
- [5] SAITO N, REMY J F. The polyharmonic local sine transform: A new tool for local image analysis and synthesis without edge effect [J]. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2006, **20**(1): 41-73.
- [6] JING Zhong-liang, XIAO Gang, LI Zhen-hua. Image fusion: theory and applications[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007: 124-125.
敬忠良,肖刚,李振华.图像融合理论与应用[M].北京:高等教育出版社,2007:124-125.
- [7] DOMOHO M N, VETTERLI M. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation [J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2005, **14**(12): 2091-2106.
- [8] Da CUNDA A L, ZHOU J, DO M N. The nonsubsampling contourlet transform: theory, design, and applications [J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2006, **15**(10): 3089-3101.
- [9] LI Wei, ZHU Xue-feng. An image fusion algorithm based on second wavelet transform and its performance evaluation [J]. *Acta Automatic Sinica*, 2007, **33**(8): 817-822.
李伟,朱雪峰.基于第二代小波变换的图像融合方法及性能评价[J].自动化学报,2007,**33**(8):817-822.
- [10] WANG Z, BOVIK A C. A universal image quality index [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2002, **9**(3): 81-84.

Fusion Algorithm of Visible and Infrared Images Based on Polyharmonic Local Sine Transform

LIU Shao-peng, HAO Qun, SONG Yong

(*School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

Abstract: Aiming at the regional homogeneity and processing of the edges in course of image fusion, a novel image fusion algorithm for visible and infrared images based on polyharmonic local sine transform is proposed. The polynomial u of the source images are fused with average in order to extract the global feature, and the residual v are fused in the field of Fourier sine transform to keep region homogeneity and extract details of the visible image. The polyharmonic local sine transform avoids the disadvantages of edge effect. Combing this advantage with the quickly decaying coefficients of the residuals, polyharmonic local sine transform is effective for image fusion. Experimental results show that the proposed algorithm improves the visual effect, and enhances the contrast and information entropy.

Key words: Image fusion; Polyharmonic local sine transform; Fourier sine transform