

基于对比度的多分辨图像融合

蒲 恬, 方庆[✉], 倪国强
(北京理工大学光电工程系, 北京 100081)

摘 要: 本文给出一种基于对比度的多分辨图像融合算法. 首先, 利用小波变换得到待融合图像的多分辨分析, 同时得到图像的多分辨对比度序列; 然后以对比度为判据, 在图像的多分辨分析的相应各级上进行融合, 得到融合图像的多分辨分析; 最后, 利用小波逆变换重构融合图像. 算法使用同一场景可见光图像和红外图像进行了验证, 结果表明, 融合图像完好地显示了源图像各自的信息.

关键词: 图像融合; 小波变换; 多分辨分析; 图像处理

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2000)12-0116-03

Contrast-Based Multiresolution Image Fusion

PU Tian, FANG Qing-zhe, NI Guo-qiang

(Department of Optoelectronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: This paper introduces a contrast-based multiresolution image fusion technique. Three steps can implement the method: First, the input multispectral images are decomposed by wavelet transform, meanwhile, the multiresolution contrast sequences of each input images can be obtained. Second, according to the contrast-based criterion, the multiresolution analysis of the fused image can be obtained on the corresponding levels of the multiresolution analysis of the input images. Finally, the output image can be obtained through inverse wavelet transform. This algorithm is tested by fusing the visual and infrared images from same scene. The experiment shows that the fused image can preserve the details of the each input images successfully.

Key words: image fusion; wavelet transform; multiresolution analysis; image processing

1 引言

新型图像传感器的发展为使用者提供了更多的信息量. 但是, 信息量的增加也导致了使用者工作负担的增加. 为了解决这一矛盾, 需要相应的图像处理技术将不同图像的信息有效融合在一起, 由此, 产生了图像融合技术. 例如, 红外传感器可以探测目标的工作状态, 其与可见光图像传感器的融合较单一传感器而言, 可以大大提高目标的可探测性和识别可靠性. 因此, 图像融合技术在军事、医学成像、遥感、计算机视觉等领域有着广泛的应用前景^[1, 2].

图像融合技术, 根据处理图像的表征层不同, 一般被分为三种类型: 像素级、特征级和决策级融合. 像素级融合是在图像严格配准的条件下, 直接进行像素关联融合处理. 特征级融合是在像素级融合的基础上, 使用模式相关、统计分析的方法进行目标识别、特征提取, 并得到融合结果. 决策级融合则是在上述两种处理的基础上, 采用大型数据库和专家决策系统, 模拟人的分析、推理过程, 以增加判决的智能化和可靠性.

从上面可以看出, 像素级的图像融合, 无论作为直接观察, 还是作为进一步处理的输入, 都是最基本的处理手段. 从符合人眼视觉特性和观察特点出发, 目前国际上在多重灰度

图像融合领域一般采用多分辨结构 (Multiresolution Architecture) 进行相应的像素级处理. 以往使用的多分辨结构一般都是高斯金字塔 (Gaussian Pyramid) 及其派生结构, 诸如拉普拉斯金字塔 (Laplacian Pyramid)、梯度金字塔等^[2~4]. 近年来, 随着对小波变换的深入研究, 小波多分辨分析这种具备完美数学性质的工具在图像处理领域有了越来越多的运用. 本文给出的算法是利用小波变换得到图像的多分辨结构, 然后根据人眼视觉系统对局部对比度敏感的特性, 在不同的空间分辨率上进行融合, 再进行小波逆变换, 从而得到融合图像.

2 方法

2.1 图像的小波多分辨分析 (Wavelet Multiresolution Analysis)

离散小波变换 (Discrete Wavelet Transform (DWT)) 为图像处理提供了强有力的工具. 图像通过小波变换, 可得到不同空间分辨率上的图像序列. 在把图像看成二维可分离信号的前提下, 设矩阵 A_l 是在空间分辨率 2^l 上 (l 是分辨率索引, $M+1 \leq l \leq N$, M, N 是分辨率索引的范围) 对原始图像 G 的多分辨分析, 根据 Mallat 算法, 图像的小波多分辨分析为^[5]:

$$\begin{aligned}
 A_{l-1}(i, j) &= \underset{m, n}{\tilde{h}(m) \tilde{h}(n)} A_l(2i - m, 2j - n) \\
 D_{l-1}^1(i, j) &= \underset{m, n}{\tilde{h}(m) \tilde{g}(n)} A_l(2i - m, 2j - n) \\
 D_{l-1}^2(i, j) &= \underset{m, n}{\tilde{g}(m) \tilde{h}(n)} A_l(2i - m, 2j - n) \\
 D_{l-1}^3(i, j) &= \underset{m, n}{\tilde{g}(m) \tilde{g}(n)} A_l(2i - m, 2j - n)
 \end{aligned} \tag{1}$$

式(1)中, $A_{l-1}, D_{l-1}^1, D_{l-1}^2, D_{l-1}^3$ 是空间分辨力 2^{l-1} 上的子带信号, Z 是整数集, i, j 是像素坐标, $\tilde{h}(n), \tilde{g}(n)$ 构成正交镜像滤波器对。

重构公式为:

$$\begin{aligned}
 A_l(i, j) &= 4 \underset{m, n}{h(m) h(n)} A_{l-1} \left\{ \frac{i-m}{2}, \frac{j-n}{2} \right\} \\
 &+ 4 \underset{m, n}{h(m) g(n)} D_{l-1}^1 \left\{ \frac{i-m}{2}, \frac{j-n}{2} \right\} \\
 &+ 4 \underset{m, n}{g(m) h(n)} D_{l-1}^2 \left\{ \frac{i-m}{2}, \frac{j-n}{2} \right\} \\
 &+ 4 \underset{m, n}{g(m) g(n)} D_{l-1}^3 \left\{ \frac{i-m}{2}, \frac{j-n}{2} \right\}
 \end{aligned} \tag{2}$$

式(2)中, $h(n), g(n)$ 同样构成正交镜像滤波器对, 且有

$$\begin{aligned}
 \tilde{h}(n) &= h(-n), \tilde{g}(n) = g(-n) \\
 g(n) &= (-1)^{1-n} h(1-n)
 \end{aligned} \tag{3}$$

考虑到任何物理可测量的信号都是在给定分辨力条件下进行处理的, 原始图像可用最大分辨力 $2^l = 2^N$ 时的 $A_N(i, j)$ 逼近, 即

$$A_N(i, j) \approx G(i, j) \tag{4}$$

因此, 根据公式(1)~(4), 可以对图像 G 进行多分辨分解和重构。

从滤波器理论出发, $h(n), \tilde{h}(n)$ 相当于一个低通滤波器, 相应的 $g(n), \tilde{g}(n)$ 相当于一个高通滤波器。

上述多分辨分析可以理解为图像在两个垂直取向的空间频率上进行分解的过程。因此, A_{l-1} 表示 A_l 在 2^{l-1} 分辨力上的水平和垂直方向的低频分量, D_{l-1}^1 表示 A_l 在 2^{l-1} 分辨力上的水平低频和垂直高频分量, D_{l-1}^2 表示 A_l 在 2^{l-1} 分辨力上的水平高频和垂直低频分量, D_{l-1}^3 表示 A_l 在 2^{l-1} 分辨力上的水平和垂直方向的高频分量(可以认为是 45° 对角线方向的高频分量)。

2.2 方向对比度(Directive Contrast)

一般的, 图像对比度 C 定义为:

$$C = (L - L_B) / L_B = L_H / L_B \tag{5}$$

式(5)中, L 表示图像局部亮度(即局部灰度), L_B 表示图像的局部背景亮度(相当于局部低频分量), 那么 $L_H = L - L_B$ 相当于局部高频分量。根据公式(5)和前面图像的多分辨分析, 定义方向对比度如下:

$$\left. \begin{aligned}
 \text{垂直对比度(Vertical Contrast): } C_{l-1}^V &= D_{l-1}^1 / A_{l-1} \\
 \text{水平对比度(Horizontal Contrast): } C_{l-1}^H &= D_{l-1}^2 / A_{l-1} \\
 \text{对角对比度(Diagonal Contrast): } C_{l-1}^D &= D_{l-1}^3 / A_{l-1}
 \end{aligned} \right\}, M+1 \leq l \leq N \tag{6}$$

事实上, 公式(6)给出的对比度定义较公式(5)更加完备。

在公式(5)中, 根据使用的低通滤波器的不同, 得到的 L_B 和 L_H 也不同, 从而得到不同的对比度 C 。而根据小波多分辨分析的性质, 子带信号 A_{l-1} 和 $D_{l-1}^1, D_{l-1}^2, D_{l-1}^3$ 在空间分辨力 2^{l-1} 上构成正交补, 即 A_l 是 A_{l-1} 与 $D_{l-1}^d (d=1, 2, 3)$ 的直和:

$$A_l = A_{l-1} \oplus \sum_{d=1}^3 D_{l-1}^d \tag{7}$$

小波分解的正交性使经过多分辨分析得到图像信号的低频、高频分量消除了数据的相关性(即消除了频域上的混迭), 因此, 相应的方向对比度定义较以往的对比度定义更合理。

2.3 融合算法

像素级图像融合的实现要求提取各个源图像中的信息(细节)并在最终的融合图像中得到有效显示。

根据图像处理的一般理论, 图像的信息(细节)包含在图像的高频分量中, 因此, 图像融合研究的重点是寻求合适的处理方法融合源图像各自的细节信息, 即如何有效的在相应的频段里进行信息的融合处理。根据前面的图像多分辨分析理论, 源图像经过小波分解后, 子带信号 $D_{l-1}^1, D_{l-1}^2, D_{l-1}^3$ 分别包含图像在垂直、水平和 45° 方向相应频段的高频分量, 因此, 在这些特征域内进行处理, 就可以达到融合目的。

以往基于小波的多分辨融合算法一般有:(1)逻辑方法^[6], 采用“与(AND)”或“或(OR)”的处理选择对应的子带信号;(2)加权处理^[7], 按照一定的原则赋予对应子带信号不同的权值;(3)能量原则^[8], 计算对应子带信号的局部能量, 并以此为判据选择对应的子带信号。以上几种融合方法处理时都是单纯在高频分量特征域内确立某种融合原则, 再以此原则建立融合图像相应的子带信号, 这些处理都没有考虑包含低频分量的子带信号 A_l 的影响; 同时, 根据生理学研究结果, 对于黑白图像, 人类视觉系统实际上是对图像的局部对比度敏感^[2], 局部对比度的变化反映了图像内各个对象的差异。同时, 对比度定义包含了图像的高频信息及其相对于背景的程度。鉴于此, 采用基于对比度的判据可以获得更加符合生理视觉的结果。

根据前面的分析, 融合算法包含以下 4 个步骤:

- (1) 对每一个输入图像进行小波分解, 建立各自的多分辨图像序列;
- (2) 按式(6)在不同空间分辨力上建立方向对比度序列;
- (3) 建立融合图像的多分辨分析。

以两路图像 X, Y 融合为例, 设融合图像为 F , 有:

$$\begin{aligned}
 D_{l-1, F}^1(i, j) &= \begin{cases} D_{l-1, X}^1(i, j), & \text{if } |C_{l-1, X}^V| > |C_{l-1, Y}^V| \\ D_{l-1, Y}^1(i, j), & \text{otherwise} \end{cases} \\
 D_{l-1, F}^2(i, j) &= \begin{cases} D_{l-1, X}^2(i, j), & \text{if } |C_{l-1, X}^H| > |C_{l-1, Y}^H| \\ D_{l-1, Y}^2(i, j), & \text{otherwise} \end{cases} \\
 D_{l-1, F}^3(i, j) &= \begin{cases} D_{l-1, X}^3(i, j), & \text{if } |C_{l-1, X}^D| > |C_{l-1, Y}^D| \\ D_{l-1, Y}^3(i, j), & \text{otherwise} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{8}$$

式(8)中, $D_{l-1, T}^d (d=1, 2, 3; T=X, Y, F)$ 分别表示输入图像 X, Y 和融合图像 F 的子带信号, $C_{l-1, T}^E (E=V, H, D; T=X, Y)$ 分别表示输入图像 X, Y 的方向对比度。

在最低分辨率 2^M 时,融合图像 F 的图像最低分辨率图像 $A_{M,F}$ 可以通过对输入图像 X 、 Y 的最低分辨率图像 $A_{M,X}$ 、 $A_{M,Y}$ 进行简单平均建立:

$$A_{M,F}(i,j) = [A_{M,X}(i,j) + A_{M,Y}(i,j)]/2 \quad (9)$$

(4) 得到融合图像的多分辨分析后,利用公式(2)重构融

合图像。

当然,以上融合处理的前提条件是输入图像已得到配准。

3 试验

本部分将给出一个试验来说明前述融合算法的效果。试验中采用的是 4 阶 B 样条小波。



图 1 可见光图像

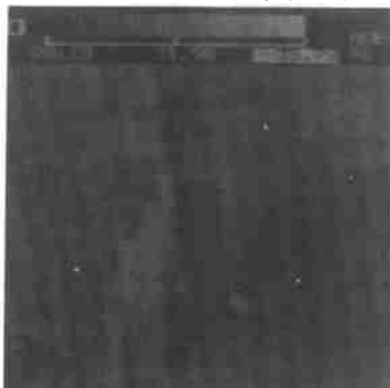


图 2 红外图像

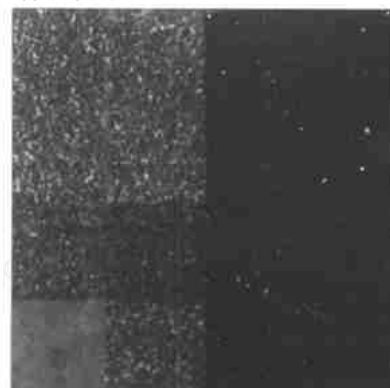


图 3 可见光图像的二级多分辨分析

图 1、图 2 分别是一幅隐藏在树丛中身着迷彩服的人体的可见光图像和关于同一场景的 $8 \sim 12\mu\text{m}$ 的红外图像,灰度级 256,图像大小 256×256 。图 3、图 4 分别是图 1、图 2 的二级多分辨分析。图 5 是融合结果图像。可以看到,在可见光图像(图 1)中很难将人体从背景中区分出来,而在红外图像(图 2)中,具有较高表面辐射的人体却清晰可见。相反,可见光图像中十分明显的背景信息在红外图像中却无法分辨。因此,两幅图像具有不同的信息,通过上述融合运算后,两幅图像的细节均较好的在一幅图像(图 5)中得到显示,从而达到图像融合的目的。我们还采用了其它图像,由多个随机抽取的测试人员进行融合效果的评价。从结果来看,较好的反映了源图像的信息。

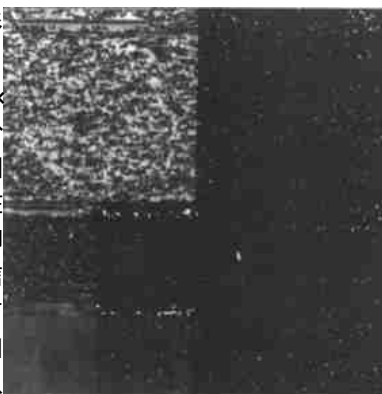


图 4 红外图像的二级多分辨分析



图 5 图 1、2 的融合图像

4 结论

本文介绍了基于对比度的多分辨图像融合算法。算法通过小波变换得到图像的多分辨分析,在提出方向对比度概念的基础上,根据人眼视觉系统的特性进行相应的多分辨融合处理。该算法是自适应的,不随输入图像的特性而改变。这种处理能够有效将输入源图像的细节融合在一起。作为结论,这种处理在探测、图像重建和计算机视觉领域均可以得到应用。

参考文献:

- [1] A. Toet and J. Walranven. New false color mapping for image fusion [J]. Opt. Eng., 1996, 35: 650 - 658.
- [2] A. Toet, L. J. van. Ruyven, and J. M. Valetton. Merging thermal and visual images by a contrast pyramid [J]. Opt. Eng., 1989, 28: 789 - 792.
- [3] P. J. Burt and E. H. Adelson. The Laplacian pyramid a compact image code [J]. IEEE Trans. Commun., 1998, COM-31: 532 - 540.
- [4] A. Akerman. Pyramidal technique for multisensor fusion [J]. SPIE Sensor Fusion, 1992: 1828.

- [5] S. Mallat. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation [J]. IEEE Trans. Patt. Analysis. Machine Intell., 1989, 11(7): 674 - 693.
- [6] T. Huntsberger, et al. Wavelet based sensor fusion [J]. SPIE Sensor Fusion 2059: 488 - 498.
- [7] T. A. Wilson, S. K. Rogers and L. R. Myers. Perceptual-based hyperspectral image fusion using multiresolution analysis [J]. Opt. Eng., 1995, 34: 3154 - 3164.
- [8] Jiang Xiaoyu, Zhou Liwei and Gao Zhiyun. Multispectral image fusion using wavelet transform [J]. SPIE, 1996, 2898: 35 - 42.

作者简介:

蒲恬 1995 年浙江大学本科毕业, 1998 年北京理工大学硕士研究生毕业。现为北京理工大学博士研究生, 当前研究兴趣为图像融合、图像处理和 DSP 在图像处理中的应用。

方庆 1995 年北京理工大学本科毕业。现为北京理工大学博士研究生, 当前研究兴趣为并行图像处理及其 DSP 实现。

倪国强 北京理工大学光电工程系教授、博士生导师。当前研究兴趣为实时图像处理与融合系统设计。