

基于形态学 top-hat 算子的多传感器图像融合

钟伟才,刘 静,刘 芳,焦李成

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室,陕西西安 710071)

摘 要: 本文根据形态学 top-hat 算子能够提取图像中极大值与极小值区域的特点,将其应用于多传感器图像融合的两个重要领域——多聚焦图像融合和高分辨、多光谱图像融合。实验中将本文方法与 Laplacian 塔型变换、子波变换、主分量分析等方法进行了比较,结果表明本文所提的基于 top-hat 算子的融合方法具有优越的性能,拓展了 top-hat 算子的应用范围。

关键词: 图像融合;数学形态学;top-hat 算子

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 09-1415-03

Morphological Top-Hat Operator for Multisensor Images Fusion

ZHONG Wei-cai, LIU Jing, LIU Fang, JIAO Li-cheng

(National Key Lab for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: Because the morphological top-hat operator can extract the local optima of an image, this paper applies it to two main fields of multisensor image fusion: multifocus image fusion and panchromatic and multispectral image fusion. In experiments, our methods are compared with the algorithms based on Laplacian pyramid, wavelet transform, and principal component analysis. The results show that our approaches outperform the others, and exploit the application scope of the top-hat operator.

Key words: images fusion; mathematical morphology; top-hat operator

1 引言

图像融合的结果可以提高信息的可靠性和分类的准确性,减少歧义性。它可以广泛的应用到计算机视觉、自动目标检测、图像处理、机器人、遥感图像分析等领域。图像增强是图像融合技术的重要应用领域,两个典型的方面就是多聚焦图像融合和高分辨全色图像与低分辨多光谱图像融合。目前具有代表性的方法有基于塔形变换的方法^[1]、基于子波变换的方法^[2-4]等,都取得了良好的效果。Top-hat 算子是灰度形态学中常用的一种算子,有开 top-hat 算子(WTH)与闭 top-hat 算子(BTH)两种。WTH 能够提取图像中的极大值区域,而 BTH 能够提取极小值区域^[5]。根据此,本文将其应用于多传感器图像融合,提出了基于 top-hat 算子的多聚焦图像融合算法和高分辨、多光谱图像融合算法,并在实验中与 Laplacian 塔型变换、子波变换、主分量分析等方法进行了比较,结果表明本文方法的性能优于其他方法。

2 基于 top-hat 算子的多聚焦图像融合

由光学系统对目标成像的原理可知,对同一目标而言,成像模糊的图像相当于对成像清晰的图像作了模糊处理^[6]。模糊图像的极大值与极小值间的差异必然会减小,而 top-hat 算子正好能提取图像中的极大值与极小值区域,因此可用 top-hat 算子来区分清晰图像与模糊图像。一般而言,模糊图像的极大值会比清晰图像的小,而模糊图像的极小值会比清晰图像的大,因此开 top-hat 算子和闭 top-hat 算子的结果都可作为评价标准。

下面用 Peppers 图来说明本文设计的多聚焦图像融合方法的思想。图 1(a)和(d)是两幅焦点不同的图像,(a)的左半部分清晰,右半部分模糊,而(d)的左半部分模糊,右半部分清晰。(b)和(e)分别是将开 top-hat 算子作用于(a)和(d)的结果,所采用的是 3×3 的方形平凡结构元素。由于开 top-hat 算子提取出的是结构元素所覆盖区域中的极大值区域,因此应该用 top-hat 算子结果中一个区域像素值的和作为判别标准。显然,区域的大小对判别结果有着直接的影响——区域过小,

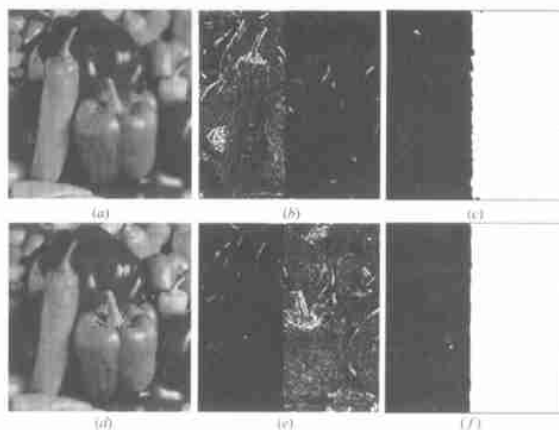


图 1 Peppers 图,(a)、(d)是两幅焦点不同的图像,(b)、(e)是(a)、(d)的开 top-hat 算子作用结果(灰度值放大了 10 倍),(c)、(f)是所得的决策面

收稿日期:2002-04-12;修回日期:2003-05-23

基金项目:国家自然科学基金(No. 60073053,60133010);国家“863”计划(No. 2002AA135080)

则有可能不能正确区分清晰目标与模糊目标,而区域过大,则对清晰与模糊交界处的判断有影响。因为所提取的极值区域的大小与结构元素的大小有关,所以一般取以该像素为中心、结构元素大小 2 倍的区域即可。根据此,比较 (b) 和 (e) 中对应像素 7×7 的区域和就可获得决策面——若 (b) 大于 (e), 则说明清晰目标在 (a) 中, 决策面上对应的像素值为 0, 否则说明清晰目标在 (d) 中, 决策面上应为 1。所得决策面如 (c) 所示, 0 表示为黑色, 1 表示为白色。

从图 1(c) 可以看出, 绝大部分区域的判定结果都是正确的, 但还存在两个问题: 一是一些小的区域判别错误, 二是在交界处有凹凸不平的毛刺。由光学成像原理可知, 在一个模糊(或清晰)的区域内不可能再出现面积很小的清晰(或模糊)的区域, 而清晰与模糊的交界处应是平滑的, 不可能是凹凸不平的。根据此我们就可以采用连通区域检测的方法把小面积区域滤掉, 并用形态学中的击中击不中变换将毛刺去掉。这样就得到如图 1(f) 所示的决策面, 可以看出, 以上两个问题都得到了较好的解决。

以上是两幅图像融合的例子, 它可以推广到多幅图像融合的情况:

设有 n 幅图像 F_0, F_1, \dots, F_{n-1} 需要融合, 图像大小均为 $M \times N$, 结构元素大小为 $m \times m$, 则其开 top-hat 算子作用的结果分别为 $F_0^{WTH}, F_1^{WTH}, \dots, F_{n-1}^{WTH}$ 。决策面 D 中第 i 行、第 j 列的值为 $D_{ij}, i=1, 2, \dots, M, j=1, 2, \dots, N$, 则

$$\forall l \in \{0, 1, \dots, n-1\}, \quad \begin{matrix} i+m & j+m \\ p=i-m & q=j-m \end{matrix} F_l^{WTH}(x_{pq}) \\ \leq \begin{matrix} i+m & j+m \\ p=i-m & q=j-m \end{matrix} F_k^{WTH}(x_{pq}) \Rightarrow D_{ij} = k \quad (1)$$

其中 $k \in \{0, 1, \dots, n-1\}$ 。对 D 的每种取值滤掉其连通区域中的小面积区域, 并对 D 的每两种取值组合作击中击不中变换以去掉交界处的毛刺。最后根据 D 将每幅图像的清晰区域拼在一起便可得到一幅景物目标聚焦都清晰的图像。以上是用开 top-hat 算子融合的方法, 闭 top-hat 算子的融合方法是类似的, 只需将式(1)中的“ \leq ”改成“ \geq ”即可。

3 基于 top-hat 算子的高分辨、多光谱图像融合

景物凹凸不平的变化反映到图像上就形成了极大值与极小值区域, 显然, 高分辨图像的极大值与极小值区域比多光谱图像要清晰。对于景物变化平缓区域, 不同分辨率所成的像差别不会太大, 因此若能能将高分辨图像中极大值与极小值区域合理的融入多光谱图像, 则能提高多光谱图像的分辨率。

通常人对颜色认识是基于色调 H 、饱和度 S 和强度 I 三个特征的。在 IHS 空间中, 光谱信息主要体现在色调和饱和度上, 强度的改变对光谱信息影响较小。因此常用的融合算法基本上都是先将 RGB 空间转换成 IHS 空间, 然后对 I 分量进行调整, 最后再反变换到 RGB 空间。但我们发现, 虽然 RGB 空间中光谱信息与三个分量的耦合度较强, 但若按比例调整 R 、 G 、 B 三分量则与在 IHS 空间中保持 H 、 S 分量不变, 按比例调整 I 分量是等价的。所以我们利用高分辨图像开 top-hat 算子的作用结果按比例增强多光谱图像的 R 、 G 、 B 三分量, 而用其闭 top-hat 算子的作用结果按比例减弱 R 、 G 、 B 三分量。这

样, 既保证了色调和饱和度不变, 达到了保留光谱信息的目的, 又省去了 RGB 空间与 IHS 空间的转换, 提高了运算效率。下面来分析图像中不同区域 top-hat 算子作用结果的特征:

(1) 平滑区域: 开 top-hat 算子作用结果与闭 top-hat 算子作用结果的取值都比较小, 因此其比值接近于 1;

(2) 极大值区域: 开 top-hat 算子作用结果的取值大, 而闭 top-hat 算子的小, 因此其比值大于 1;

(3) 极小值区域: 开 top-hat 算子作用结果的取值小, 而闭 top-hat 算子的大, 因此其比值小于 1。

所以可以用开 top-hat 算子作用结果的取值与闭 top-hat 算子作用结果的取值的比值来调整多光谱图像:

设待融合的高分辨图像为 F_1 , 多光谱图像为 F_2 , 图像大小均为 $M \times N$ 。开 top-hat 算子与闭 top-hat 算子均采用 $m \times m$ 原点在中心的平凡结构元素, F_1 经开 top-hat 算子与闭 top-hat 算子作用的图像分别为 F_1^{WTH} 和 F_1^{BTH} , 并将其映射到区间 $[1, 2]$ 上。最后, 按式(2)调整 $F_2(x_{ij}), i=1, 2, \dots, M, j=1, 2, \dots, N$:

$$R_{ij} \leftarrow F_1^{WTH}(x_{ij}) / F_1^{BTH}(x_{ij}), F_2^R(x_{ij}) \leftarrow F_2^R(x_{ij}) \times R_{ij}, \quad (2) \\ F_2^G(x_{ij}) \leftarrow F_2^G(x_{ij}) \times R_{ij}, F_2^B(x_{ij}) \leftarrow F_2^B(x_{ij}) \times R_{ij}$$

其中 $F_2^R(x_{ij}), F_2^G(x_{ij}), F_2^B(x_{ij})$ 表示 F_2 中像素 x_{ij} 的 R 、 G 、 B 三分量的取值。

4 仿真实验

实验 1: 基于 top-hat 算子的多聚焦图像融合实验

图 1 中的 Peppers 图是人工数据, 下面对图 2 所给的实测数据进行融合。(a) 的前景清晰, 背景模糊; (b) 的前景模糊, 背景清晰; (c) 为所得决策面, 其参数设置与图 1 相同。可以看出, 算法基本上正确判定出了清晰目标所在的图像。由于图像上方是光滑的墙壁, 其清晰图像与模糊图像没有太大区别, 所以决策面上显示一部分清晰目标在 (a) 中, 一部分在 (b) 中, 但这对融合效果没有太大影响, (d) 为最终融合的结果。

下面对融合结果作定量分析。设参考图像为 F_r , 融合图像为 F , 大小为 $M \times N$, 则常用的评价度量 E_F 为:

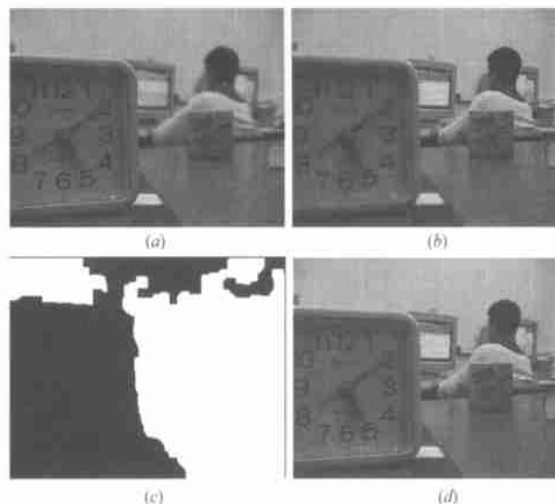


图 2 (a)、(b) 为待融合图像, (c) 为决策面, (d) 为本文方法融合结果

$$E_F = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (F_r(x_{ij}) - F(x_{ij}))^2 \quad (3)$$

E_F 值越小,说明融合效果越好,反之融合效果越差.表 1 给出了对图 1 与图 2 两组图像分别使用 Laplacian 塔型方法、小波变换方法和本文方法融合结果的评价度量值,其中图 2 的参考图像可通过人工剪切的方法得到.比较结果表明本文方法优于其他两种方法.

表 1 多聚焦图像融合评价度量 E_F

| | Laplacian 塔型方法 | 小波变换方法 | 本文方法 |
|-----|----------------|---------|--------|
| 图 1 | 5.4264 | 7.8444 | 0.2535 |
| 图 2 | 18.2933 | 22.8293 | 1.7918 |

实验 2:基于 top-hat 算子的高分辨、多光谱图像融合实验

图 3 (a)、(b) 分别是 Landsat 遥感卫星与 SPOT 遥感卫星对某地区拍摄的多光谱图像与全色高分辨图像^[7], (c) ~ (e) 分别是 IHS 方法^[8]、子波方法与主分量分析法^[9]的融合结果, (f) 是本文方法的融合结果.可以看出, IHS 方法与主分量分析法的融合结果光谱信息损失严重,而子波方法光谱信息损失也较明显,尤其在蓝色分量上.

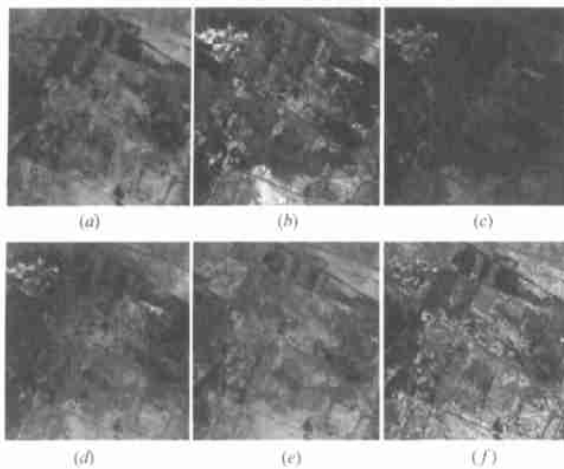


图 3 (a) Landsat 遥感卫星多光谱图像; (b) SPOT 遥感卫星全色高分辨图像; (c) IHS 方法融合结果; (d) 子波方法融合结果; (e) 主分量分析法融合结果; (f) 本文方法融合结果

对于高分辨、多光谱图像融合来说,由于实际中不存在参考图像,所以不能用实验 1 的评价度量来定量的衡量各方法的性能.但我们希望融合出的图像既具有高分辨图像的细节信息,又具有多光谱图像的光谱信息,即融合出的图像与高分辨图像和多光谱图像的相关度都较大,因此根据相关度定义了如下的评价度量:

$$\text{Corr}(F_1, F_2, F) = \frac{\text{Corr}(F_2^R, F^R) + \text{Corr}(F_2^G, F^G) + \text{Corr}(F_2^B, F^B) + \text{Corr}(F_1, F)}{4} \quad (4)$$

其中 F_1 是高分辨图像, F_2 是多光谱图像, F 是融合图像; $\text{Corr}(X, Y)$ 表示图像 X 与 Y 的相关度.可以看出,当融合图像的 R, G, B 分量和灰度图像与待融合图像相应分量的相关度都较高时,评价度量值则较高;否则,若有一个分量的相关度过

低,则会降低评价度量的值,这与要求融合图像和高分辨图像与多光谱图像的相关度都较高的目的保持一致.表 2 给出了图 3 融合结果的评价度量值.比较结果表明本文方法所得的融合图像与多光谱和高分辨图像的相关度都较高.

表 2 高分辨、多光谱图像融合评价度量

| | IHS 方法 | 子波方法 | 主分量分析法 | 本文方法 |
|-----|--------|--------|--------|--------|
| 图 3 | 0.6253 | 0.7285 | 0.8016 | 0.8491 |

5 结论

本文将 top-hat 算子应用到多聚焦图像融合与高分辨、多光谱图像融合,提出了新的融合算法,拓宽了 top-hat 算子的应用范围,并在实验中与其他融合算法进行了比较,显示出了优越的性能.目前,本文方法是在假设待融合图像大小一致且已经过像素级对齐的情况下工作的,因此研究有自动配准功能的融合算法将是我们下一步的研究方向.

参考文献:

- [1] 刘贵喜,杨万海.基于多尺度对比度塔的图像融合方法及性能评价[J].光学学报,2001,21(11):1336-1342.
- [2] Zhou J, Civco D L, Silander J A. A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(4): 743-757.
- [3] 蒲恬,方庆,倪国强.基于对比度的多分辨图像融合[J].电子学报,2000,28(12):116-118.
- [4] 杨,杨万海,裴继红.基于小波分解的不同聚焦点图像融合方法[J].电子学报,2001,29(6):846-848.
- [5] Soille P. Morphological Image Analysis: Principles and Applications [M]. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 1999.
- [6] 杨.多传感器图像融合算法研究[D].西安:西安电子科技大学电子工程学院,2001.
- [7] Li J, Zhou Y, Li D. PCA and wavelet transform for fusing panchromatic and multi-spectral images [A]. Proceedings of SPIE [C]. Heidelberg, Germany: Orlando, FL, USA: SPIE, 1999, v. 3719. 369-377.
- [8] Carper W J, Lillesand T M, Kiefer R W. The use of intensity-hue-saturation transformations for merging SPOT panchromatic and multispectral image data [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1990, 56(6): 459-467.
- [9] Chavez P S, Sides S C, Anaerson J A. Comparison of three different methods to merge multi-resolution and multi-spectral data: TM & SPOT Pan [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1991, 57(3): 295-303.

作者简介:



钟伟才 男,1977年9月生于江西寻乌,博士研究生,研究方向为数学形态学、进化计算、数据挖掘、多媒体应用、模式识别.