

基于感受野模型的图像融合算法研究

赵巍¹, 黄晶晶¹, 田斌²

(1. 北京航空航天大学 203 教研室, 北京 100083; 2. 第二炮兵装备研究院, 北京 100085)

摘要: 现实世界中最优的图像融合系统莫过于生物视觉系统. 如果能够了解生物视觉的基本原理, 建立其数学模型, 并能应用于多传感器图像融合实践中, 将会对多传感器图像融合技术的发展有很大促进作用. 本文以人类视觉的生物机理和感受野的数学模型为基础, 提出了一种新颖的基于人眼视觉感受野模型的图像融合算法. 这种算法非常适合融合两幅灰度差异较大的异质传感器图像, 融合图像在保留两幅原图像中有效信息的同时, 还对图像间的差异进行了增强, 有助于提高观察者识别目标的速度和准确性. 另外, 该算法还有一定的去噪功能, 计算量很小, 可满足实时性要求.

关键词: 图像融合; 感受野; 生物视觉

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2008) 09-1665-05

An Image Fusion Algorithm Based on Receptive Field Model

ZHAO Wei¹, HUANG Jing-jing¹, TIAN Bin²

(1. 203 Group, School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China;

2. Qinghe Building, Beijing 100085, China)

Abstract: The best image fusion system in real world is human vision. If we can know the biological machine and build its mathematic model, it will be very useful in application. In this paper, we describe the biological knowledge of human eyes, such as receptive field. And a new image fusion algorithm based on human vision model is presented. This method is suitable to fuse two images with different gray levels from different sensors. While all useful information in original images can be observed in fused images, the differences of two images are enhanced. The enhancement helps the observer to recognize the objects correctly and quickly. Additionally, this algorithm reduces the noise in original images and has low calculation cost. It can satisfy the real time requirement.

Key words: image fusion; receptive field; human vision

1 引言

图像融合可以充分利用多个传感器或同一传感器在不同时刻获得的多幅图像资源, 依据某种准则将多幅图像在空间或时间上的互补信息进行融合, 使融合后的图像比参加融合的任意一幅图像具有更优越的性质, 能更精确地反映客观实际, 从而达到更合理支配和使用观测信息的目的. 由于图像融合的上述优点, 其在军事和国民经济各领域都有着广泛的应用需求, 学术界对图像融合技术的研究也日趋关注. 图像融合技术的研究开始于 20 世纪 90 年代, 发展至今较为常用的算法有: 加权平均法、逻辑滤波法、彩色空间法、多分辨金字塔法^[1]、小波变换法^[2]等, 以及最近兴起的 Contourlet 变换法^[3]. 这些算法各有特点, 针对不同的应用对象都可得到较好

的融合效果.

但在实际的应用系统中, 我们对图像融合算法的要求应侧重以下几个方面: 一是融合图像应尽可能多地包含原图像的所有有用信息; 二是融合算法应尽量简单, 以满足实时性的需求; 三是融合图像不应引入虚假信息; 最后, 融合图像还应有助于提高观察者识别目标的速度和准确性, 也就是用最有效的形式表达融合信息. 因此, 优良的融合效果和简单的计算应是图像融合算法所追求的目标.

本文以人类视觉的生物机理和数学模型为基础, 提出了一种新颖的基于生物视觉的图像融合算法. 这种算法非常适合融合两幅灰度差异较大的异质传感器图像, 融合图像在保留两幅原图像中有效信息的同时, 还对图像间的差异进行了增强, 有助于提高观察者识别目标的

收稿日期: 2007-04-25; 修回日期: 2007-12-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60502019)

速度和准确性. 另外, 该算法还有一定的去噪功能, 计算量很小, 可满足实时性要求. 文章的第二节对本算法的生物视觉基础进行介绍, 第三节给出该算法的具体过程和仿真结果, 最后对全文进行总结.

2 图像融合的生物视觉基础

现实世界上最优的图像融合系统莫过于生物视觉系统. 生物学的研究表明在人眼视觉和响尾蛇的视觉顶盖中确实存在多幅图像的融合现象. 如果能够了解生物视觉的基本原理, 建立其数学模型, 并能应用于多传感器图像融合实践中, 将会对多传感器图像融合技术的发展有很大促进作用.

2.1 响尾蛇和人眼视觉上的图像融合

Newman、Hartline^[4,5]二人于 1981 年和 1982 年指出在响尾蛇的视觉顶盖中存在着 6 种神经元可对可见光信号和红外信号进行融合. 第一类神经元是 OR 单元, 这类神经元对可见光刺激和热红外刺激都可做出反应, 在响尾蛇的定向移动控制中起着非常重要的作用. 第二类神经元是 AND 单元, 它只对同时发出可见光和热红外刺激的物体反应, 例如恒温的、移动的动物. 后四类神经元的功能属于可见光模式和红外模式间的非线性交互式作用, 可以对可见光特性和红外特性不同的自然目标产生不同的反应.

在人眼的视网膜中, 存在着三种锥体细胞, 分别敏感于可见光范围内的长波、中波和短波. 由于水平双极细胞间的相互作用, 这三种感受器得到的图像分别由 ON 和 OFF 中心—环绕响应通道进行对比度增强. 接着, 在双极细胞、无长突细胞和节细胞间的相互作用下, 这些不同波段的信号被解相关, 得到了色彩对比度的增强. 双颞颥彩色细胞对信号进行进一步的彩色处理, 从而得到最终的彩色图像.

从上面的介绍中可以看出: 在生物视觉中确实存在着多频谱图像融合的现象, 接下来的问题就是要分析这一现象的生物机理, 建立其数学模型, 并进行工程上的实现. 在理解这一生物现象的过程中, 感受野理论是非常重要的, 下面就加以介绍.

2.2 感受野分层等级假设

研究证明: 在视觉系统中, 神经细胞由简单到复杂, 以高度有组织的形式发挥作用, 从而检测出象线条、边界及角这样的具体特征, 位于外侧膝状体中的细胞与视网膜上的节细胞具有围绕着的同心视野. 这就是著名的感受野 (RF) 与感受野等级假设, 是支持视觉信息分层串行处理的最重要的生理学基础.

感受野有两种类型: ON 中心 OFF 环绕感受野和 OFF 中心 ON 环绕感受野. 在一个 ON 中心感受野中, 如果光照充满中心, 则光照引起最强的激活反应; 如果光

照充满了周围的全部环形, 则对细胞的发放活动产生最大的抑制. 此外, 如果这种感受野中的 ON 区和 OFF 区被同时照亮 (也称弥散照明), 则它们之间存在趋于彼此抵消的作用. 同理, OFF 中心感受野具有与 ON 中心感受野相反的特征, 它是在光照充满中心时引起最大的抑制. 节细胞感受野的特性描述如图 1 所示^[6].

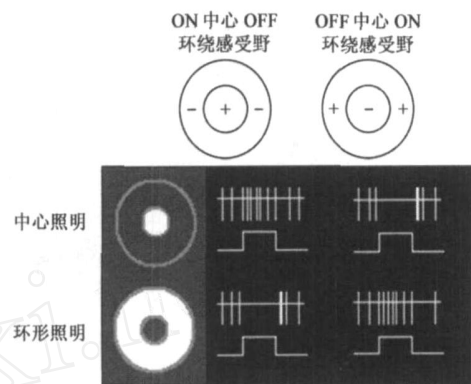


图 1 节细胞的感受野

2.3 感受野的数学模型

为了将前面介绍的生物机理运用到多频谱图像融合中去, 首先要为感受野建立数学模型. 在位置 (i, j) 处, 设一个 ON 中心的细胞活性为 x_{ij} , 它服从下面的方程^[7~9]:

$$\frac{dx_{ij}}{dt} = -Ax_{ij} + (B - x_{ij})C_{ij} - (x_{ij} + D)E_{ij} \quad (1)$$

其中, C_{ij} 和 E_{ij} 分别是输入到 x_{ij} 的总的兴奋输入和抑制性输入, A 为衰减率, B 和 D 分别为最大和最小激活等级, C_{ij} 和 E_{ij} 都是输入 I_{ij} 与高斯核的离散卷积, 即

$$C_{ij} = \sum_{p,q} I_{pq} C_{pqij} \quad (2)$$

$$E_{ij} = \sum_{p,q} I_{pq} E_{pqij} \quad (3)$$

其中

$$C_{pqij} = \frac{C}{2^{\frac{1}{2}}} \exp \left\{ -\frac{(p-i)^2 + (q-j)^2}{2^{\frac{1}{2}}} \right\} \quad (4)$$

$$E_{pqij} = \frac{E}{2^{\frac{2}{2}}} \exp \left\{ -\frac{(p-i)^2 + (q-j)^2}{2^{\frac{2}{2}}} \right\} \quad (5)$$

上式中, p 和 q 是 (i, j) 邻域内的点, C 是兴奋核的系数, E 是抑制核的系数; 1 是兴奋传播半径, 2 是抑制传播半径. 为了实现中心为 ON、周围为 OFF 的结构, 应选择 $C > E$, $1 < 2$. 稳定状态时, 令方程式 (1) 中的 $dx_{ij}/dt = 0$, 可以解得

$$x_{ij} = \frac{(BC_{pqij} - DE_{pqij}) I_{pq}}{A + (C_{pqij} + E_{pqij}) I_{pq}} \quad (6)$$

在公式 (6) 的分母中, 最大和最小激活等级 B 、 D 被包含在 C_{ij} 和 E_{ij} 中.

对于中心为 OFF 的感受野同样可得到其满足的方

程为:

$$x_{ij} = \frac{(BE_{pqij} - DC_{pqij}) I_{pq}}{A + (C_{pqij} + E_{pqij}) I_{pq}} \quad (7)$$

3 基于生物视觉的图像融合算法

3.1 感受野的数学模型在图像融合中的应用

在图像处理的过程中,用得比较多的是 ON 中心 OFF 环绕的感受野模型,下面就详细分析这种感受野的数学模型.从公式(6)可以看出, C_{ij} 和 E_{ij} 都是同一幅输入图像 I_{ij} 与高斯核的离散卷积,所以其操作是针对一幅图像的.另外,由于输入图像和高斯函数进行了卷积,所以输出图像比输入图像模糊.如果想使输出图像和输入图像保持相同的分辨率,则其数学模型可以变为:

$$x_{ij} = \frac{BCI_{ij} - DE_{pqij}I_{pq}}{A + CI_{ij} + E_{pqij}I_{pq}} \quad (8)$$

如果选择 $C > E$,则输出图像不仅和输入图像的分辨率相同,还具有高频增强的作用.在开展研究的过程中,作者从公式(8)得到启发,如果将中心兴奋区图像和周围抑制区图像看作是两幅图像,则将此公式可以用于两幅图像的融合,修正后的公式如下:

$$I_{ij}^{fusion} = \frac{[C \cdot I_1 - E \cdot G_s * I_2]_{ij}}{A + [C \cdot I_1 + E \cdot G_s * I_2]_{ij}} \quad (9)$$

其中 I_1 为第一幅待融合的图像,也就是中心兴奋区输入的图像; I_2 为第二幅待输入的图像,也就是周围抑制区输入的图像, G_s 为高斯核函数, I^{fusion} 是融合后的图像.

与公式(6)相比较,公式(9)有以下几点变化:

(1) 将中心兴奋区的输入图像和周围抑制区的输入图像区分开,这样公式(9)就可用于两幅图像的处理,输出图像实际上是两幅输入图像的融合.

(2) 令 B 和 D 都为 1,并将兴奋核的系数 C 和抑制核的系数 E 都反映到公式里.

(3) 在公式(9)中,中心兴奋区输入的图像没有与高斯函数做离散卷积,这样就保留了中心输入图像的分辨率,使输出图像更为清晰.

(4) 高斯核函数 G_s 实际上是周围抑制区输入图像中各点的权值,对权值进行归一化处理使其满足:

$$G_s(p, q) = 1 \quad (10)$$

下面详细分析一下直接将公式(9)用于图像融合时的效果.为了说明两幅图像亮度的变化,令 $C = 1, E = 1, A$ 的取值在图像的均值附近.

对于位置 (i, j) ,当两幅输入图像的亮度相当时,其输出为趋近于零的值,在输出图像中表现为中等亮度的点.其中有一个特例就是当两个点都很暗时,而在图像 I_2 中 (i, j) 周围的点很亮,此时 ON 中心感受野的输出

趋于 - 1,在输出图像中就表现为很暗的点.这种情况下,第二幅输入图像的某些信息就被淹没掉了.当 $I_1(i, j)$ 很亮, $I_2(i, j)$ 很暗时,感受野的输出为较大的正值,在融合图像中表现为较亮的点.当 $I_1(i, j)$ 很暗, $I_2(i, j)$ 很亮时,感受野的输出为较小的负值,在图像中表现为较暗的点,这时图像 I_2 中的这些亮度信息就丢失了.现将上述关系总结在表 1 中.

表 1 ON 中心感受野对两幅图像的作用

两幅输入图像关系	中心输入像素点	周边输入像素点	感受野输出	对应输出图像
两个像素点的亮度相似	暗	暗,周围非常亮	趋于 - 1	黑点
	暗	暗,周围相似	趋于 0	中等亮度的点
	暗	暗,周围更暗	趋于 0 ⁺	中等亮度的点
	亮	亮,周围更亮	趋于 0 ⁺	中等亮度的点
	亮	亮,周围相似	趋于 0	中等亮度的点
两个像素点的亮度不相似	亮	亮,周围暗	趋于 0 ⁺	中等亮度的点
	暗	亮,周围暗	趋于 - 1	黑点
	暗	亮,周围亮	趋于 - 1	黑点
	亮	暗,周围亮	趋于 + 1	亮点
亮	暗,周围亮	趋于 + 1	亮点	

表 2 改进算法对两幅图像的作用

两幅输入图像关系	中心输入像素点	周边输入像素点	输出	对应输出图像
两个像素点的亮度相似	暗	暗,周围非常亮	趋于 - 1	黑点
	暗	暗,周围相似	趋于 0	中等亮度的点
	暗	暗,周围更暗	趋于 0 ⁺	中等亮度的点
	亮	亮,周围更亮	趋于 + 1	亮点
	亮	亮,周围相似	趋于 + 1	亮点
两个像素点的亮度不相似	亮	亮,周围暗	趋于 + 1	亮点
	暗	亮,周围暗	趋于 - 1	黑点
	暗	亮,周围亮	趋于 0	中等亮度的点
	亮	暗,周围亮	趋于 + 1	亮点
亮	暗,周围亮	趋于 + 1	亮点	

从表 1 中可以看出:ON 中心感受野的输出所对应的图像既保留了中心输入图像的面貌,又对两幅图像有一种解相关的作用.当两幅图像的灰度值相近时,感受野的输出接近零,在对应图像中表现为中等亮度的点或黑色的点.当两幅图像的灰度差异较大时,输出图像保留了中心输入图像的亮度,同时对这种差异进行了增强.其作用就类似于“高频增强滤波器”,只不过此时是针对两幅图像.但是从表 1 中还可发现,第二幅图像的很多信息(亮点)在输出图像中被淹没了,没有反映出来.

上面就是 ON 中心感受野对两幅图像的作用,它在某种意义上是一种图像融合处理.但是从信息的保留程度上讲,其效果并不好.它的输出值在更大程度上反映的是两幅图像的相关程度.在某一像素点位置,如果输出图像为亮点(感受野的输出为 1),说明两幅图像在此位置不相似,从第一幅图像到第二幅图像有一个从亮到

暗的变化. 如果输出图像在这一位置的亮度中等(感受野的输出为 0), 说明两幅图像的相关程度较大. 如果输出图像在这一位置较暗(感受野的输出为 -1), 说明两幅图像不相似, 但变化是由暗到亮.

3.2 基于生物视觉的图像融合算法

从上一节的分析可知, 如果直接将感受野的数学模型(9)用于融合两幅图像会造成第二幅图像的某些亮度信息丢失. 但是, 将公式(9)直接用于融合两幅图像却具有别的融合算法无可比拟的优点:

(1) 计算量小, 可满足实时性要求. 由于公式(9)是直接于空间域对两幅图像进行处理的, 所以其计算量远远小于变换域的图像融合算法, 例如, 基于小波变换的图像融合算法和基于多分辨金字塔的图像融合算法.

(2) 融合图像基本上保持了第一幅图像的基本面貌, 还添加了第二幅图像的一些重要信息. 这一点在图像融合中非常重要. 比如, 一幅源图像是可见光图像, 其中的物体具有较清晰的轮廓和边缘; 另一幅源图像是红外图像, 它反应了物体的表面温度, 对可见光图像有很好的补充作用. 但是, 红外图像的对比度较低, 还有较强的噪声. 如果用现在比较流行的融合算法(如, 基于小波变换的算法)对这两幅图像进行融合, 融合图像虽然会较好地综合了两幅原图的信息, 但其对比度一定会低于可见光图像, 还会将红外图像的噪声包含进去. 而理想的融合算法应是保持可见光图像的对比度, 同时还能将红外的信息补充进去. 对于可见光图像与雷达图像的融合也有相同的要求.

(3) 公式(9)可以对第二幅图像有降噪的作用. 所以, 在应用公式(9)时通常将可见光图像作为 I_1 , 红外图像或雷达图像作为 I_2 .



图2 短波红外图像



图3 长波红外图像



图4 用公式(9)对图2和图3的融合



图5 改进算法对图2和图3的融合

4 结论

从前面的理论分析和仿真结果可以看出, 本文所提出算法的最大优点是非常适合融合两幅异质传感器得到的图像, 对输入原图像间的差异有一种放大作用. 该算法直接在空间域进行, 其计算量小, 可满足实时性要求. 用本文算法得到的融合图像基本上保持了第一幅图像的基本面貌, 同时还添加了第二幅图像中的重要信息. 另外, 算法对第二幅图像有降噪的作用.

(4) 当两幅图像存在灰度差异时, 输出图像对这种差异有放大作用. 所以, 公式(9)非常适合融合异质传感器得到的两幅图像.

那么怎样才能将公式(9)的优点保留, 同时又克服其缺点, 将第二幅图像中丢失的信息包含进来呢? 从表1中看出, 融合图像在两幅图像的灰度近似时会丢掉第二幅图像中较亮的信息. 所以将公式(9)作如下修改.

$$x_{ij} = \begin{cases} \frac{[C \cdot I_1 - E \cdot G_s * I_2]_{ij}}{A + [C \cdot I_1 + E \cdot G_s * I_2]_{ij}}, & I_2(i, j) < \\ \frac{[C \cdot I_1 - E \cdot G_s * (255 - I_2)]_{ij}}{A + [C \cdot I_1 + E \cdot G_s * (255 - I_2)]_{ij}}, & I_2(i, j) \end{cases} \quad (11)$$

公式(11)假设两幅图像的灰度是用 8 比特的整数表示, a 为阈值. 改进后输出图像与两幅原图像间的关系如表 2. 从表 2 可看出, 被丢掉的第二幅图像中亮的区域, 由于做了反转变换而被保留在融合图像中. 而且整个输出图像的亮度也提高了.

3.3 仿真结果

图 2 是某场景的短波红外图像, 图 3 是相同场景的长波红外图像^[10]; 图 4 是用公式(9)对图 2、3 的融合结果. 从结果中可以看出, 融合图像基本上保留了短波红外的基本特征, 如树冠的纹理和轮廓; 同时还将长波红外中的暗点信息和中等亮度的信息也反映到融合图像中, 如车窗玻璃和雨刷部分. 但长波红外中非常亮的信息却被弱化了, 例如车外站的人和车内的司机.

图 5 是用改进算法对图 2 和图 3 进行处理的结果. 可以看出长波红外图像中的两个人在融合图像中得以保留, 短波红外图像中的树林、天空也非常清楚. 而且和图 4 比起来, 图 5 的亮度稍微高一些.

参考文献:

- [1] 赵巍. 多传感器图像融合算法研究[R]. 北京: 北京航空航天大学电子信息工程学院, 2003.
Wei Zhao. Study on Multisensor Image Fusion Algorithm[R]. Beijing: School of Electronic and Information Engineering, Beijing University, 2003. (in Chinese)
- [2] Wei Li, Xuefeng Zhu, et al. A novel approach to fast medical image fusion based on lifting wavelet transform[A]. Proceed-

- ings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation[C]. Dalian:WCICA,2006. 9881 - 9884.
- [3] Yong-an Zheng, Changsheng Zhu, et al. Fusion of multi-band sar images based on contourlet transform[A]. IEEE Proceedings of the 2006 International Conference on Information Acquisition[C]. Weihai:IEEE,2006. 420 - 424.
- [4] Newman E A, Hartline P H. Integration of visual and infrared information in bimodal neurons of the rattlesnake optic tectum [J]. Science,1981,123(14):789 - 791.
- [5] Newman E A, Hartline P H. The infrared vision of snakes[J]. Scientific American,1982,246(3):116 - 127.
- [6] School of Optometry, Indiana University. V648 Neurophysiology-of-vision[OL]. <http://www.opt.indiana.edu/v648/>
- [7] Luiz A. Pessoa. Studies of Human Vision: A Neural Network Model of Brightness Perception and Experiments on Chromatic Textures[D]. Boston:Boston University,1996.
- [8] Stephen Grossberg, Ennio Mingolla, et al. A neural network architecture for preattentive vision [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering,1989,36(1):65 - 83.
- [9] Grossberg S. Neural Networks and Natural Intelligence [M]. Cambridge,MA:MIT Press,1988.
- [10] Fay D A, Waxman A M, et al. Fusion of multi-sensor imagery for night vision:color visualization, target learning and search [CD]. 3rd International Conference on Information Fusion 2000. TuD3 - 1.

作者简介:

赵 巍 女,1972 年生,副教授,硕士生导师.2000 年在西北工业大学获得控制理论和控制工程专业博士学位.现为北京航空航天大学电子信息工程学院“信息与通信工程”学科教师.主要研究领域为数字图像处理、自动目标识别、无线传感器网络中的信号处理、信息融合、运动目标跟踪等.

Email:zhao29wei@263.net

www.cnki.net