

## 红外光强与偏振图像多类拟态变元组合融合

吕 胜,杨风暴,吉琳娜,焦玉茜

(中北大学 信息与通信工程学院,山西 太原 030051)

**摘 要:** 现有红外光强与偏振图像融合算法不能根据图像差异特征变化动态调整融合算法,造成图像部分差异特征融合效果不理想甚至失效。根据拟态仿生学思想,借鉴拟态章鱼的多拟态过程,提出一种红外光强与偏振图像多类拟态变元组合融合方法。首先,分析拟态章鱼的多拟态过程,剖析其多拟态原因;其次,寻找多拟态过程与图像融合过程之间的对应关系,并确定图像融合过程的多类变元类型;最后,建立面向图像融合的多类变元组合关系并利用该关系进行图像融合。实验结果表明:所得融合图像的信息熵、标准差、边缘强度、平均梯度、清晰度方面平均提升 1.16%、7.25%、3.00%、0.31%、10.18%。该方法的建立可以使融合算法内变元组内变元选择和组合根据原始图像差异特征变化而进行动态调整,从而得到具有针对性的融合算法。

**关键词:** 红外偏振图像; 拟态融合; 多类拟态变元; 组合

**中图分类号:** TP391.41 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0504005

## Combination fusion of multi-types mimic variables of infrared intensity and polarization image

Lv Sheng, Yang Fengbao, Ji Linna, Jiao Yuqian

(School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** The existed infrared intensity and polarization image fusion algorithm could not dynamically adjust fusion algorithm according to the change of image difference characteristics, which results in that the partial differences feature fusion effect was not ideal or even failure. According to thought of mimicry bionics and learning from Mimicry Octopus's multi-mimicry process, a fusion method of combination fusion of multi-types mimic variable of infrared intensity and polarization images was proposed. Firstly, Mimicry Octopus's multi-mimicry process, the reason of multi-mimicry were analyzed. Secondly, the correspondence between multi-mimicry process and image fusion process was found, and multiple types variables of the image fusion process were determined. Finally, a reversible variable composition relation for image fusion was established and image fusion was carried out that used the combined relation. The experimental results showed that the information entropy, standard deviation, edge intensity, average gradient and sharpness of the obtained fusion image were obviously improved 1.16%, 7.25%, 3.00%,

收稿日期:2017-12-05; 修订日期:2018-01-03

基金项目:国家自然科学基金(61672472, 61702465);中北大学科学研究基金(XJJ2016024);

中北大学电子测试技术重点实验室开放基金(ZDSYSJ2015005)

作者简介:吕胜(1992-),男,硕士生,主要从事红外图像融合方面的研究。Email:lvsheng0927@163.com

导师简介:杨风暴(1968-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事图像融合方面的研究。Email:fengbao\_yang@163.com

0.31%, 10.18% in average. The establishment of this method could make the fusion algorithm within the variable selection and combination according to the original image difference characteristics of the dynamic adjustment, so as to obtain a targeted fusion algorithm.

Key words: infrared polarization images; mimicry fusion; multi-types mimic variables; combination

## 0 引言

红外光强图像描述物体的强度信息, 红外偏振图像描述物体的偏振信息, 两类图像分别描述了物体的不同属性, 具有很强的互补性, 将两类图像融合, 能够更全面的描述场景信息, 提高图像视觉效果, 在高性能空天一体化网络检测、公共安全视频监控等方面都有很重要的应用<sup>[1]</sup>。随着红外探测技术的不断发展, 场景信息日益复杂, 现有图像融合算法很难根据图像差异特征不同进行动态调整, 造成融合图像效果不佳。因此, 如何解决这一问题成为了当今红外图像融合领域的重点<sup>[2]</sup>。

近年来, 为了满足复杂场景对红外光强与偏振图像融合的需求, 研究人员做了一系列研究。当前图像融合算法以多尺度 (Multiscale transform, MST) 融合算法最流行。基于多尺度融合算法<sup>[3]</sup>包括金字塔分解、小波变换方法如离散小波变换 (Discrete Wave Transformation, DWT)、多尺度几何分解如轮廓波变换 (Contour Wave Transformation, CVT)、非下采样剪切波变换 (Non-subsampled Shearlet Transform, NSST) 等。以上所列典型多尺度分解算法都可以针对某些特定特征得到很好的融合效果, 但是不能根据图像特征的变换, 对算法内部的结构进行动态调整。笔者课题组<sup>[4]</sup>尝试将差异特征驱动的图像融合模型应用到红外光强与偏振图像融合中, 利用图像特征差异从而使融合算法进行调整, 上述融合模型虽然针对不同图像差异特征可以得到较好融合效果, 但是其融合算法内部各部分依然是不可变结构, 不能动态响应图像差异特征变化的融合需求。参考文献[5]阐述了信息的柔性融合, 介绍了常用的柔性融合结构、柔性融合概念及与结构不可变融合区别, 阐述了柔性可变结构可以随信息的差异而动态调整从而形成最优结构, 得到最优融合结果, 突出柔性可变结构比传统不可变结构的优势。图像融合作为信息融合的重要组成部分, 给图像融合算法的动态调整提供了

指导依据。

针对上述问题, 研究过程中发现拟态章鱼<sup>[6]</sup>的多拟态结构与图像多尺度融合结构具有很强的对应关系, 为此建立拟态章鱼多拟态过程与图像融合过程之间的对应关系, 得出图像的拟态多类变元组合融合。探究拟态章鱼的多拟态原因, 确定图像拟态融合过程的多类变元组及其选择和组合方式, 实现红外光强与偏振图像融合无法根据图像差异特征而动态调整其融合模型内部组成及其结构的问题。文中将多尺度分解融合设计成由多尺度分解算法变元组、融合规则变元组、融合参数变元组、融合结构变元组四类变元组形式, 各变元组内变元可以根据图像差异特征的不同进行不同的选择与组合。从根本上确保模型的融合性能, 保证融合图像质量。

## 1 拟态章鱼多拟态分析

拟态<sup>[7]</sup>是指生物在形态、行为等特征上模拟另一种生物, 从而使一方或双方受益的生态适应现象, 是生物的一种生存本领。拟态章鱼是可以根据外界刺激主动拟态多种生物从而躲避危险具有多拟态特性的生物。多拟态是指生物可以拟态多种不同生物从而使自身受益的特性。该生物的出现将单拟态仿生研究向多拟态仿生学研究进行拓展, 具有重大的意义和价值。文中对拟态章鱼多拟态特性进行分析, 有利于建立多拟态特性与动态可变融合模型之间的联系, 为实现图像拟态融合奠定理论基础。

### 1.1 拟态章鱼的多拟态原因分析

根据对拟态章鱼的结构、颜色、外观暂态等方面进行充分研究与分析, 将其多拟态原因进行归纳。其每部分均由变元的不同选择与组合进而达到多拟态目的。变元, 生物拟态最基本的变换单元。变元又分为变元与不变元。其中, 不变元的变换过程是单向的, 该变元不能达到多次甚至多种变换; 变元的变换过程是双向的, 变换之后可以恢复成初始状态, 该类变元的优势可以进行多次甚至多种变换, 实现变元

的多次组合。变元不同组合是拟态章鱼多拟态特性的主要原因。

颜色变元分为色包和色袋状态。拟态章鱼身体内存在数以万计的色袋也叫做“色包”。它靠身体内复杂的肌肉网络控制其色素的不同组合方式和色袋的不同状态，在极快的时间内完成其表面颜色的改变，达到拟态效果。形状变元分为触角形状及其组合方式。复杂肌肉组织可以改变拟态章鱼的触角形状以及组合方式。拟态章鱼拥有八条触角，可以通过肌肉组织指令动态调整触角的形状及其组合方式，进

而达到触角拟态。拟态章鱼的身体结构同样可变，其身体形状的不同构成结构变元。拟态章鱼的身体柔软，可以将身体改变成多种形状，如圆形、三角形、椭圆形等。通过对身体结构的改变，使得拟态效果更加逼真。外界环境威胁不同，其运动状态也会进行相应变化。其运动状态包括：静止、藏匿、钻沙、高速游动等形成拟态章鱼的运动状态变元。运动状态的改变可以更好的达到拟态效果。综合以上拟态章鱼各部分变元的不同选择和组合，得出拟态章鱼多拟态原因，如图 1 所示。

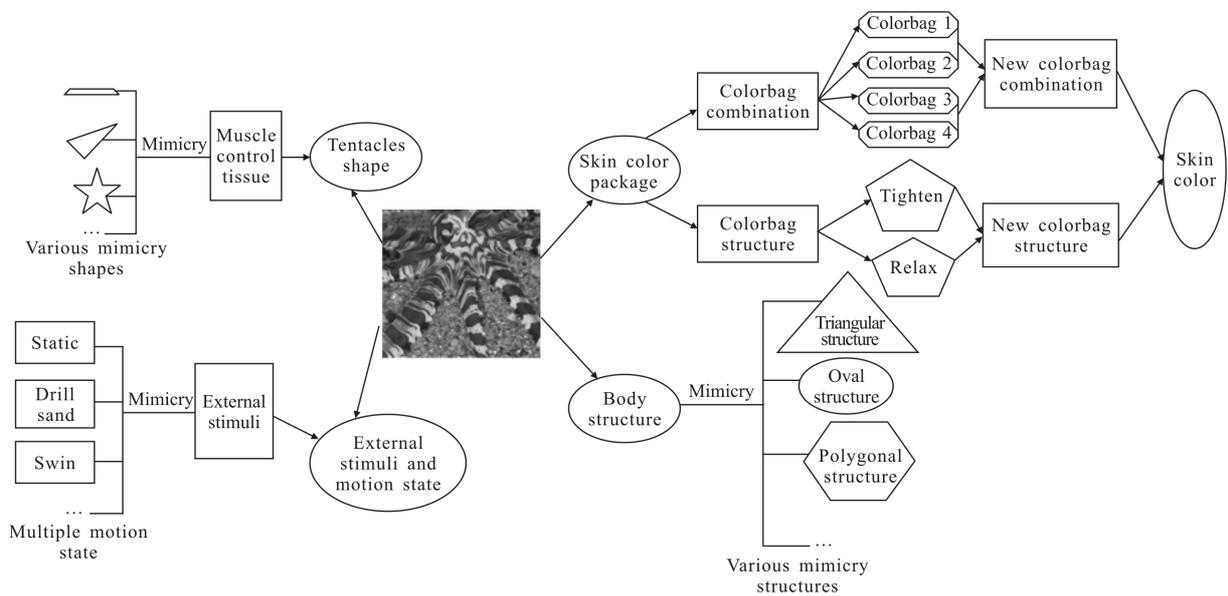


图 1 拟态章鱼的多拟态原因分析

Fig.1 Analysis of causes of the multi-mimicry of Mimicry Octopus

1.2 拟态章鱼变元组合分析

根据第 1.1 节的分析可知，拟态章鱼具有多拟态原因主要包括上述四点。各变元及变元组的组合形式千差万别，从而造成了拟态章鱼的多拟态特性。拟态章鱼各部分变元自由组合及其过程示意图如图 2 所示。

由图 2 可以得出变元在自由组合过程中存在以下三种特性：(1) 动态可重构性，拟态章鱼自身各变元组、变体和结构等局部或全部随外界环境的不同从而实时进行调整，完成拟态后重构回初始状态。(2) 动态优化性，针对外界环境威胁不同，其拟态系统自适应地更新威胁与自身拟态之间的关系，从而找到更优的拟态方式。(3) 拟态多样性，拟态章鱼根据不同变元、变元组之间的不同组合，派生出多种拟

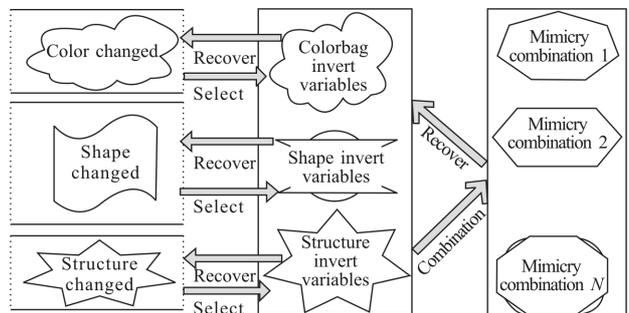


图 2 拟态章鱼各部分变元自由组合及过程示意图

Fig.2 Random combination and reversible process diagram of reversible variables in parts of Mimicry Octopus

态特性。由上述三种特性可知变元的自由组合都具备动态、可变、可重构的功能，且各变元组都是动态可

重构的,变元间既相互独立又相互关联;变元组的自由组合可以根据外界威胁的不同,动态调整变元组的组合关系,从而达到躲避威胁使自身受益的效果。

## 2 图像拟态融合变元类型确定及组合过程

### 2.1 图像拟态融合变元对应关系确定

现今常用双模态红外图像融合主要采用多尺度分解方法。多尺度分解算法又可以分成金字塔分解、小波分解、几何分解等<sup>[9]</sup>。多尺度分解算法是由多尺度分解方法、融合规则、融合参数、多尺度算法结构则共同组成,每部分的相应改变都会直接影响图像融合结果。这与拟态章鱼的多拟态特性非常相似,其颜色、触角形状、结构、运动状态每一部分的改变都会影响其最后的拟态结果。由于两者之间存在相似联系,文中以多尺度分解算法为例,将多尺度分解算法中必要而且可变的要素作为其融合过程中的变元组,组内不同元素作为变元,建立拟态章鱼多拟态过程与多尺度融合算法之间的对应关系,下文做具体分析。

拟态章鱼的皮肤表面色包表示其颜色特征,颜色改变是由于其色袋状态和组合的不同;而多尺度分解主要表征算法对图像特征的提取,由于图像特征不同更多的是表现在各像元的像素值不同,两者都表征视觉效果以及颜色的不同之间具有很相似的关系。拟态章鱼触角形状的改变,同样是章鱼多拟态的重要组成部分,颜色拟态和触角形状拟态可以构成其拟态的主体结构框架;融合规则描述算法对图像特征的具体融合过程,融合规则的选择直接影响融合图像是否能将两类图像的主要差异特征很好的融合,多尺度分解算法与融合规则构成了图像融合的总体框架,两者之间具有相似作用。拟态章鱼的结构拟态决定了其多拟态过程中各部分之间的结构关系;而融合结构的选择表征所采用的多尺度融合之间各类变元的组合关系,这与融合结构的作用是相近的。运动状态表明了根据拟态的相似程度,选择何种运动状态来躲避外界威胁,是继续快速游动还是静止不动,这和融合参数的作用非常相近;而融合参数决定不同特征(不同子带)的融合比例情况,参数不同,所得到的融合效果也就不同,两者之间作用关系类似。环境威胁是使拟态章鱼产生多拟态的外界原因,由于受到威胁,身体内各变元进行不同的组合从而达到最优拟态效果从而躲避威胁;而图像差异

特征是决定选择各类变元组及其组内元素以及变元之间的组合方式,差异特征的不同直接影响图像融合过程中各变元的组合方式,因此两者具有类似作用。上述各方面协同作用,共同完成变元的组合进而完成图像融合过程,这与拟态章鱼的变元组合从而完成多拟态过程具有极大的相似性,两者之间的具体对应关系如表 1 所示。

表 1 变元的选择与对应关系

Tab.1 Relationship between the choice of reversible variables and correspondence

Selection of the variable tuple of the Mimicry Octopus	Image mimicry fusion process variable element selection
Colorbag of skin surface	Multi-scale decomposition algorithm
Tentacles shape	Fusion rules
Body structure	Fusion structure
External stimulus and the state of movement	Fusion parameters
Environment threats	Image difference features

### 2.2 图像拟态多类变元组内变元确定

图像拟态融合过程中,其变元组合是由最小变换单元构成,变元组之间的不同组合作用于图像的拟态融合。融合结构主要考虑多种多尺度分解算法间的串行、并行、嵌接三种组合方式,针对具体的图像差异特征,选取一种合适的融合结构,构成拟态融合的框架。表 2 为文中所考虑多尺度分解算法变元集合;表 3 为所选融合规则变元集合;融合参数根据拟态类型及特点需要动态调整,通常在(0, 1)区间。通过对部分变元组合进行分析,找到各变元组之间的组合关系。

表 2 多尺度分解算法变元集合

Tab.2 Multi scale decomposition algorithm for reversible variables set

Symbolic representation	Algorithm
T1	DWT
T2	WPT
T3	DTCWT
T4	Top-hat
T5	SVT
T6	NSCT
T7	NSST

表 3 融合规则变元集合

Tab.3 Fusion rules for reversible variables set		
Band	Fusion rules	Representation
Low-band	Weighted average	L1
	Adjacent to the normalized gradient	L2
	Local energy matching	L3
	Area standard deviation	L4
High-band	Absolute value	H1
	Local feature matching	H2
	Directional gradient operator	H3
	Edge keeping	H4

2.3 变元组合方式分析

实现图像拟态融合,不仅需要确定变元类型,而且变元以及变元组的组合方式同样重要。利用图像差异特征不同,针对性的改变变元的组合方式从而达到动态调整融合算法的目的。具体变元的确定以及组合过程如下所示:首先确定原始图像的主要差异特征,进而选择拟态变换过程各部分所需要的变元。其次,在融合结构集中寻找合适的结构构建拟态融合过程的主体框架。最后,将选择出来的拟态变元组成一个完整的融合模型对原始图像进行融合。具体的算法流程图如图 3 所示。

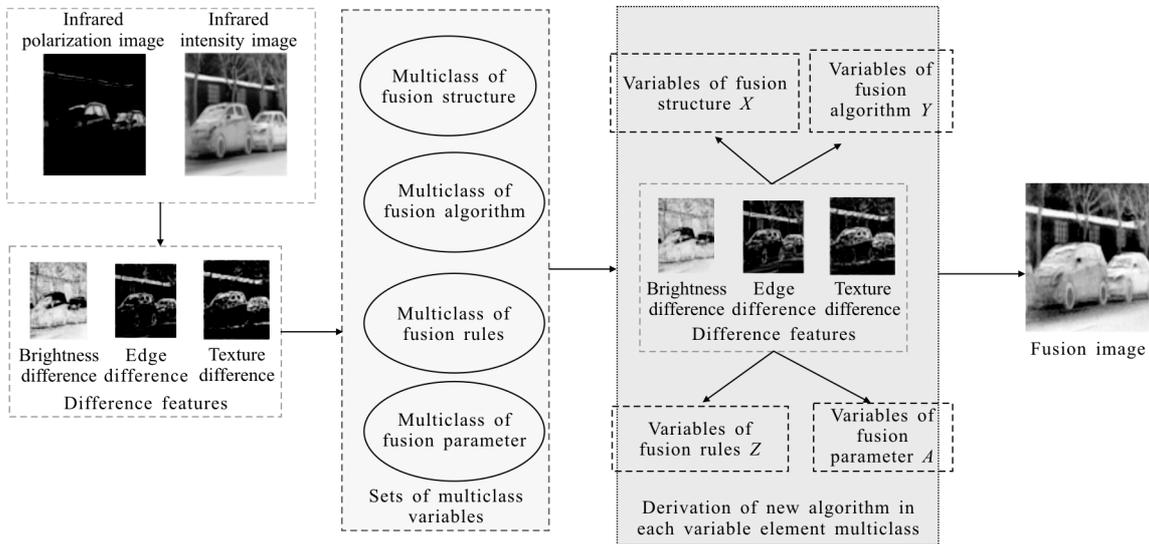


图 3 文中算法流程图

Fig.3 Flow chart of the algorithm in this paper

根据上述算法流程图,总结出图像拟态融合过程具有四点主要特征:(1) 结构重构性:应用多维重构、结构化融合算法构建技术,融合模型具备可变结构;模型中各变元、变体和结构等局部或全部随差异特征的变化实时调整,完成融合后重构回初始状态。(2) 主动感知性:依据拟态感知机理,融合模型自觉探知差异特征及其变换;(3) 动态优化性:针对感知到的差异特征变化,融合模型自适应地更新差异特征类集与融合算法类集间的映射,使差异特征与融合算法间达到更优匹配;(4) 拟态多样性:有机整合选择的融合算法,通过与拟态机理深度结合运用,融合模型通过各变元间、变体间组合派生出多种融合模型结构。这四类特征又和 1.2 节所论述关系具有

高度相似性和对应关系,证明拟态章鱼拟态过程和图像融合过程具有对应关系。

利用差异特征驱动机制<sup>[9]</sup>,通过建立多图像间差异特征类集与各变元组间的关系,根据不同的差异特征,选择不同的变元组(融合结构、融合规则、融合参数等)中的变元,将选择的各变元组合成新的融合模型,从而根据差异特征的不同而选择出派生后的新融合算法,从而达到图像差异特征改变,融合模型内各部分结构也相应改变。

笔者在前期研究中<sup>[10]</sup>,发现几种典型差异特征与多尺度分解算法、融合规则以及融合参数之间的关系如图 4 所示。

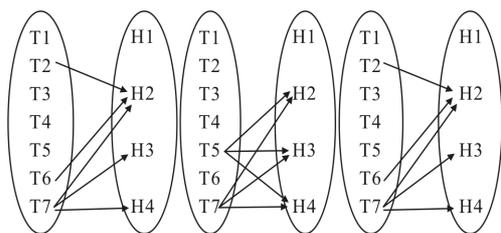


图 4 针对多特征的有效组合关系

Fig.4 An effective combination relationship of multiple features

文中主要阐述融合结构变元与差异特征之间的关系,该关系的建立可以与前期研究中的多尺度分解算法变元组、融合规则变元组、融合参数变元组相结合达到组内变元的不同组合,形成针对不同差异特征的融合算法,达到良好的融合效果,具体情况如下。

### 2.4 融合结构变元选择

融合结构变元组内变元包含串行式、并行式、嵌接式等<sup>[11]</sup>,文中以这三类融合结构为例进行分析。每种融合结构都有其试用范围和优势,文中利用控制变量法对这三种融合结构进行实验实验,得出不同融合结构的优缺点。文中选择非下采样剪切波变换(Non-Subsampled Shearlet Transform, NSST)、双树复小波变换(Dual Tree Complex Wavelet Transform, DTCWT)以及小波包分解(Wavelet Packet Decomposition, WPD),分别利用串行式、并行式、嵌接式结构进行实验;其中串行式融合是利用 NSST 进行分解得到高、低频子带并分解进行子带融合,然后将融和后的高低频子带再次进行 DTCWT 分解,同样得到高、低频子带再次进行子带融合,最后利用 WPT 进行最后一次的高低频子带分解并融合,利用逆变换得到融合图像,其中高频融合过程均采用加权平均法,低频融合均采用取大法;并行式将融合后的图像进行并行式采用三种方式分别融合,然后利用加权法将三幅融合图像进行融合;嵌接法利用 NSST 对原始图像进行分解成高频子带和低频子带,利用 DTCWT 将高频子带进行再次分解,利用 WPT 对低频子带进行分解,融合过程高频均采用加权平均、低频部分均采用取大法对二次分解后所得到的高频、低频子带进行融合,最后分解进行 WPT、DWCWT 及 NSST 反变换得到最终的融合图像。具体实验结果如图 5、6 所示。文中采用客观评价指标对融合结果进行评价。其中,利用信息熵、标准差、边缘强度、平均梯度、清晰度分

别验证融合图像的边缘特征、纹理特征、亮度特征。



(a) 红外光强 (b) 红外偏振 (c) 串行

(a) Infrared intensity (b) Infrared polarization (c) Serialization



(d) 并行 (e) 嵌接  
(d) Parallel (e) Scarph

图 5 融合结构有效性结果验证实验(一)

Fig.5 Simulation results of fusion structure validation experiment (I)

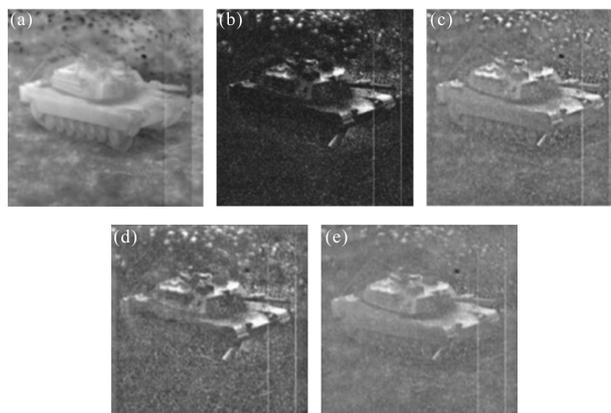


图 6 融合结构有效性结果验证实验(二)

Fig.6 Simulation results of fusion structure validation experiment (II)

根据表 4、5 结果可以看出,采用协同式融合结构对于边缘特征、纹理特征、亮度特征融合效果较其他几种融合结构融合效果较好,为此可以认为协同式结构对于这三类图像特征的融合比较敏感,可以得到较好的融合效果。串行式结构可以对源图像没有提取到的图像特征进行二次提取,不足在于如果所选用的方法对于同一特征较为敏感导致其他特征的提取效果大减;并行式结构的优势在于可以根据不同融合算法的优势自主设定不同算法所得融合图像在最终融合图像中所占的权值大小,缺点是目

还没有一种较为完备的权值确定方法只能依靠人为经验；嵌接式融合结构其优势可以将具有互补性的方法进行相应的组合嵌接成大的融合体系，对于高低频融合均有较好的提取效果，缺点是对于目前缺乏选择互补性算法的组合依据，同样只能靠人为经验。由于文中只利用了两种算法和三类图像特征对融合结构进行验证，所得结论对于这之类特征效果较好，不具有普适性。

表 4 图 5 客观评价数据

Tab.4 Figure 5 objective evaluation data

	Serialization	Parallel	Scarph
Information entropy	5.983 9	6.444 7	6.326 4
Standard deviation	22.324 9	29.524 2	28.486 4
Intensity of edge	32.947 3	44.301 7	39.414 6
Average gradient	3.138 6	4.368 7	3.867 1
Sharpness	3.371 6	4.503 1	4.163 1

表 5 图 6 客观评价数据

Tab.5 Figure 6 objective evaluation data

	Serialization	Parallel	Scarph
Information entropy	6.327 9	6.574 8	6.101 0
Standard deviation	24.981 0	28.281 1	23.006 7
Intensity of edge	74.257 6	85.554 2	58.107 4
Average gradient	7.328 3	8.407 6	5.873 2
Sharpness	8.515 8	9.914 3	6.573 6

### 3 实验及结果分析

#### 3.1 实验结果

通过实验验证文中所建立拟态变元组合关系针对不同图像的融合效果。利用四组不同图像分别对图像特征进行融合。实验所采用的四组图像均是由笔者课题组所采集，其中红外光强图像利用大立 DM60 长波红外热像仪采集；红外偏振图像的采集在长波红外热像仪的基础上加偏振片，分别采集 0°、45°、90°、135°偏振图像，利用斯托克斯解算所得其偏振度图像，其具体计算公式如公式(1)、(2)所示。所采用的图像采集设备如图 7 所示。

$$\begin{cases}
 I = I_0 + I_{90} = I_{+45} + I_{-45} = I_l + I_r \\
 Q = I_0 - I_{90} \\
 U = I_{+45} - I_{-45} \\
 V = I_l - I_r
 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases}
 P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \\
 \theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right)
 \end{cases} \quad (2)$$

式中： $I_0$ 、 $I_{90}$ 、 $I_{+45}$ 、 $I_{-45}$ 、 $I_l$ 、 $I_r$  分别表示置放在光波传播路径上的理想偏振片在 0°、+45°、90°、-45°方向上的线偏振光及左旋和右旋 I 圆偏振光。利用公式(2)计算出斯托克斯参数及线偏振度 P 和偏振角  $\theta$ 。

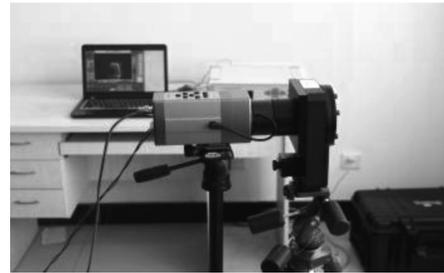


图 7 采集实验图像所用设备

Fig.7 Equipment used to collect the experimental image

文中利用拟态变元组合的方法(融合结构变元选择由文中 2.4 节所决定、其他变元选择由作者之前研究决定<sup>[10]</sup>，其中所采用的组合情况根据四组图像特征的不同动态变化，具体组合情况如图 8~11 所示)，对比实验采用与传统刚性不可变算法(非下采样轮廓波变换(NSCT)、支持度变换(SVT)、模糊聚类)、差异特征驱动融合算法、其他变元组合、嵌入式结构融合方法<sup>[12]</sup>进行对比，从而验证该优化组合方法有效性及优越性，具体实验结果如图 8~11 所示。

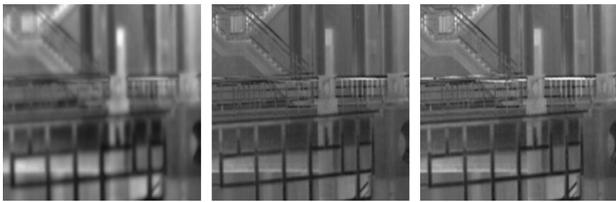


(a) 红外光强 (b) 红外偏振 (c) 模糊聚集

(a) Infrared Intensity (b) Infrared polarization (c) Fuzzy aggregation



(d) 非下采样轮廓波 (e) 协同+T6+H3+L1 (f) 差异特征驱动  
(d) NSCT (e) Coordination+T6+H3+L1 (f) Differential feature driven



(g) 支持度变换 (h) 嵌入式结构 (i) 协同+T7+H2+L2  
(g) Support vector (h) Embedded (i) Coordination  
transformation structure +T7+H2+L2

图 8 变元组合有效性结果验证实验(一)

Fig.8 Verification experiment of validity of reversible variable combination (I)

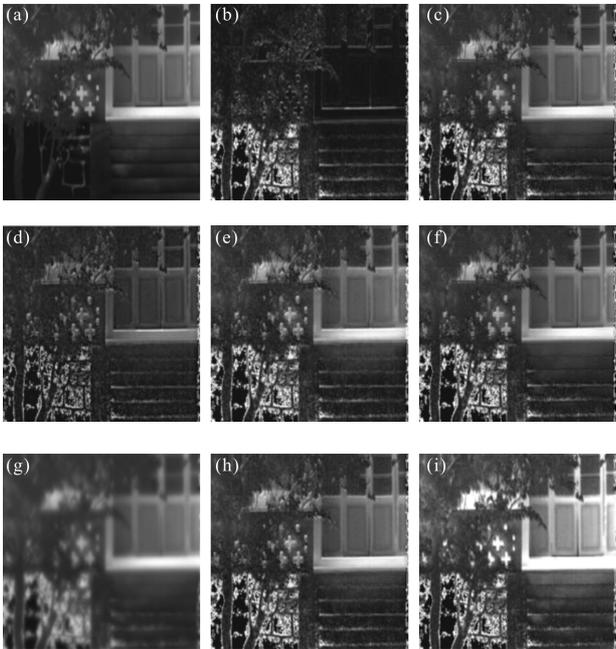


图 9 变元组合有效性结果验证实验(二)

Fig.9 Verification experiment of validity result of reversible variable combination (II)

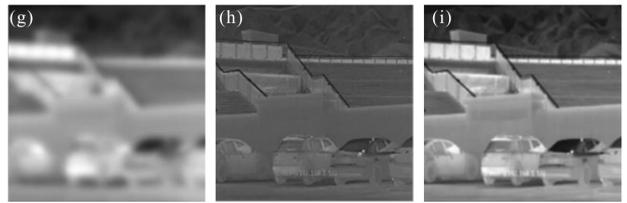
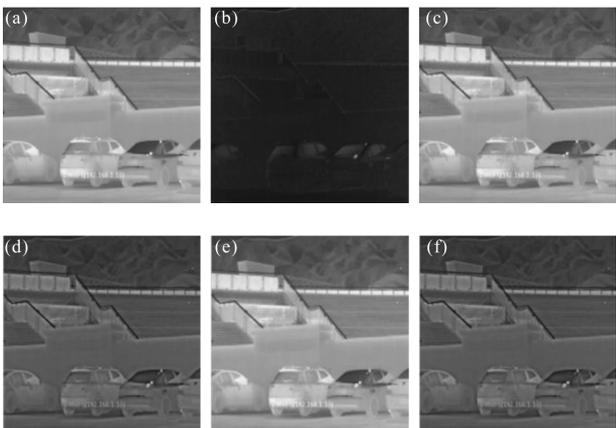


图 10 变元组合有效性结果验证实验(三)

Fig.10 Verification experiment of validity result of reversible variable combination (III)

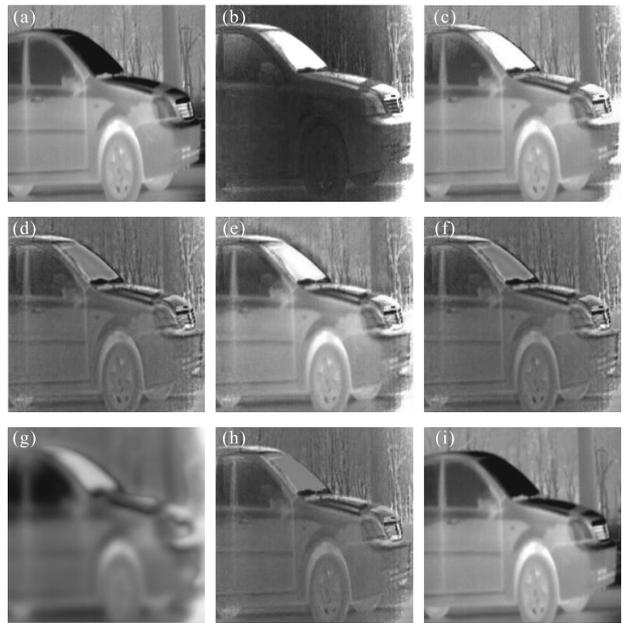


图 11 变元组合有效性结果验证实验(四)

Fig.11 Verification experiment of validity result of reversible variable combination(IV)

### 3.2 客观评价指标

文采取信息熵、标准差、边缘强度、平均梯度、清晰度分别验证融合图像中信息量、灰度范围、边缘特征、纹理特征、亮度特征,具体计算公式如公式(3)~(8)所示。实验数据如表 6~9 所示。

$$E = - \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N P_{ij} \log P_{ij} \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (P_{ij} - \mu)^2} \quad (4)$$

$$g = \sqrt{s_A^x(i, j)^2 + s_B^y(i, j)^2} \quad (5)$$

$$\alpha_A(i, j) = \arctan \left( \frac{s_A^m(i, j)^2}{s_B^n(i, j)^2} \right) \quad (6)$$

$$\text{grad} = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \cdot$$

$$\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N \sqrt{\frac{1}{2} \left( \left( \frac{\partial f(x_i, y_j)}{\partial x_i} \right)^2 + \left( \frac{\partial f(x_i, y_j)}{\partial y_j} \right)^2 \right)} \quad (7)$$

$$F = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P_{ij}^2}{M \times N} \quad (8)$$

表示整幅图像的灰度平均值;  $S_A^x(n, m)$  代表图像边缘强度;  $\alpha_A(m, n)$  表示该像素点的边缘强度值;  $\alpha_A(i, j)$  表示该像素点的像素角度;  $grad$  代表图像平均梯度;  $\frac{\partial f(x_i, y_j)}{\partial x_i}$  表示该像素点的梯度值;  $F$  表示图像清晰度。表 6~9 中的提高率由文中算法与对比算法中的最大值计算所得。

式中:  $E$  代表图像的信息熵;  $P_{ij}$  表示该点像素值;  $\sigma$  代表图像标准差;  $M, N$  表示图像的大小;  $\mu$

表 6 图 8 客观评价数据

Tab.6 Figure 8 objective evaluation data

	Fig.8(c)	Fig.8(d)	Fig.8(e)	Fig.8(f)	Fig.8(g)	Fig.8(h)	Fig.8(i)	Improved rate
Information entropy	6.546 3	6.388 4	6.802 3	6.921 1	6.321 0	6.803 3	7.029 7	1.57%
Standard deviation	33.557 9	23.161 4	33.556 7	29.874 5	41.047 1	27.534 4	42.488 9	3.51%
Intensity of edge	69.747 3	67.577 0	71.993 5	64.090 2	54.190 3	69.092 1	70.901 2	2.62%
Average gradient	7.194 6	6.520 6	6.853 3	9.102 3	6.893 1	9.587 0	9.689 1	1.06%
Sharpness	18.161 9	18.367 2	20.756 3	22.409 2	23.073 1	21.932 1	23.889 7	14.9%

表 7 图 9 客观评价数据

Tab.7 Figure 9 objective evaluation data

	Fig.9(c)	Fig.9(d)	Fig.9(e)	Fig.9(f)	Fig.9(g)	Fig.9(h)	Fig.9(i)	Improved rate
Information entropy	7.237 8	6.721 2	7.261 3	7.166 6	6.966 8	7.217 9	7.412 2	2.08%
Standard deviation	52.808 9	52.808 9	51.201 1	51.221 6	41.046 6	51.124 9	65.969 0	24.92%
Intensity of edge	117.317	112.35 3	117.100	109.89 3	95.309 2	123.49 0	124.92 0	1.58%
Average gradient	22.103 0	21.816 3	22.047 2	20.903 1	18.329 0	24.091 2	24.890 1	3.32%
Sharpness	46.236 8	45.039 2	45.571 4	41.902 1	44.321 9	47.029 1	49.894 3	6.09%

表 8 图 10 客观评价数据

Tab.8 Figure 10 objective evaluation data

	Fig.10(c)	Fig.10(d)	Fig.10(e)	Fig.10(f)	Fig.10(g)	Fig.10(h)	Fig.10(i)	Improved rate
Information entropy	7.237 8	6.721 2	7.261 3	7.166 6	6.966 8	7.217 9	7.412 2	2.08%
Standard deviation	52.808 9	52.808 9	51.201 1	51.221 6	41.046 6	51.124 9	65.969 0	24.92%
Intensity of edge	117.317	112.35 3	117.100	109.893	95.309 2	123.49 0	124.92 0	1.58%
Average gradient	22.103 0	21.816 3	22.047 2	20.903 1	18.329 0	24.091 2	24.890 1	3.32%
Sharpness	46.236 8	45.039 2	45.571 4	41.902 1	44.321 9	47.029 1	49.894 3	6.09%

表 9 图 11 观评价数据

Tab.9 Figure 11 objective evaluation data

	Fig.11(c)	Fig.11(d)	Fig.11(e)	Fig.11(f)	Fig.11(g)	Fig.11(h)	Fig.11(i)	Improved rate
Information entropy	7.002 4	6.663 4	7.176 6	6.659 5	6.792 1	6.601 2	7.033 0	0.44%
Standard deviation	41.432 4	28.814 9	42.002 0	28.419 6	38.018 7	27.365 0	42.657 1	1.56%
Intensity of edge	61.409 4	61.861 9	62.945 3	61.233 8	22.539 0	52.891 8	60.492 3	-3.89%
Average gradient	5.279 2	5.334 0	5.344 4	5.964 0	2.178 4	5.229 4	5.697 3	-4.47%
Sharpness	6.164 0	6.707 1	6.178 3	4.043 5	2.312 0	6.885 3	7.570 2	9.95%

根据表 6-9 数据所示,可以清晰地看出利用多类变元组合融合方法比传统刚性不变融合算法在边缘、纹理、清晰度等方面都有明显的提高。但是表 9 中边缘强度和平均梯度并不是最高,但是与其他五组(除去结果最好的那一组)对比实验结果相比,文中方法所得到的实验图像还是有一定的提升,融合效果相对较好。利用文中方法与六组对比实验中最好的方法计算五种客观评价指标的提高率,并计算每组实验的每个客观评价指标提高率的平均值可以发现,提高率均是正值,证明文中所提方法对于大部分实验和客观评价是有效果提升的。产生文中方法指标不是最优现象的原因可能是由于所采用的变元组合对图像特征的感知不敏感、不准确导致其变元的变换组合能力不强,但是所得到的变元组合对整体融合效果的影响不大,同样可以得到较好的融合图像。针对这一现象,将在接下来的工作中做深入研究。

## 4 结 论

图像融合过程中变元的选择及组合是实现图像拟态融合的前提。文中通过对拟态章鱼多拟态特点分析,将其多拟态特征引入图像融合过程中从而得出以下结论:(1)文中找到了拟态章鱼多拟态过程与图像融合过程之间的对应关系,从而将多拟态特性引进到图像融合过程中,找到图像融合的新思路;(2)文中找到了不同变元组的类型及其组内变元和变元间的组合关系,确定了其变换过程,从而实现了图像特征不同,各变元组及其组内变元可以动态调整实现不同组合,从而得到了面向图像拟态融合的多类变元的组合方法;(3)文中利用控制变量法,找到了不同融合结构对于不同差异特征的优缺点以及使用条件;实验结果表明,所得融合图像的信息熵、标准差、边缘强度、平均梯度、清晰度方面平均提升 1.16%、7.25%、3.00%、0.31%、10.18%。文中所建立变元组合的图像融合利用拟态仿生学,将多拟态特性引入到图像融合中取得了很好的效果。文中研究为后续实现图像的拟态融合确定拟态变换定理奠定基础。

## 参考文献:

- [1] Yang Fengbao, Lin Suzhen, Wang Xiaoxia. *Infrared Physics and Technology* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014: 257. (in Chinese)
- [2] Zhao Wenda, Xu Zhijun, Zhao Jian. Gradient entropy metric and P-laplace diffusion constraint-based algorithm for noisy multispectral image fusion [J]. *Information Fusion*, 2016, 27(4): 138-149.
- [3] Filippo Nencini, Andrea Garzelli, Stefano Baronti, et al. Remote sensing image fusion using the curvelet transform[J]. *Information Fusion*, 2007, 8(2): 143-156.
- [4] Niu Tao, Yang Fengbao, Wang Xiaoxia, et al. Establishment of set-valued mapping between difference characteristics and fusion algorithms[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 1074-1079. (in Chinese)
- [5] Li Junling, Wang Yu, Zhao Zhongui. Concept and connotation of flexible fusion of multi-class diversity information [J]. *Command Information System and Technology*, 2013, 4(2): 15-20. (in Chinese)
- [6] Yang Fengbao. Research on theory and model of mimic fusion between infrared polarization and intensity images[J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2017, 38(1): 1-8. (in Chinese)
- [7] Kazuo Yamazaki, Simcha Lev-Yadun. Dense white trichome production by plants as possible mimicry of arthropod silk or fungal hyphae that deter herbivory[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2015, 364(25): 1-6.
- [8] Rajiv Singh, Ashish Khare. Fusion of multimodal medical images using Daubechies complex wavelet transform -a multiresolution approach [J]. *Information Fusion*, 2014, 19(9): 49-60.
- [9] An Fu, Yang Fengbao, Lin Suzhen, et al. Feature differences driven fusion of infrared polarization and intensity images[J]. *Chinese Journal of Scientific and Technical*, 2014, 9(1): 96-102. (in Chinese)
- [10] Lv Sheng, Yang Fengbao, Ji Linna. Dual-mode infrared image fusion based on the optimized combination of multi-scale decomposition and fusion rules [J]. *Chinese Journal of Scientific and Technical*, 2017, 12(2): 161-167. (in Chinese)
- [11] Gan Wei, Wu Xiaohong, Wu Wei, et al. Infrared and visible image fusion with the use of multi-scale edge-preserving decomposition and guided image filter [J]. *Physics & Technology*, 2015, 72(6): 37-51.
- [12] Lin Suzhen, Wang Dongjuan, Zhu Xiaohong, et al. Fusion of infrared intensity and polarization images using embedded multi-scale transform[J]. *Optik*, 2015, 126(24): 235-243.