

基于视觉注意的遥感图像分析方法

张鹏 王润生

(国防科学技术大学 ATR 国家重点实验室 长沙 410073)

摘要: 该文根据人类视觉系统的生理结构与认知特点, 提出了一个基于自底向上视觉注意的遥感图像分析模型, 并在此基础上开发出了一种新的遥感图像分析方法。该方法在一定程度上具备了类似于人类视觉系统的选择性加工能力。将其应用于多种类型的真实遥感图像, 获得了较为满意的实验结果。

关键词: 遥感, 图像分析, 视觉注意, 注意焦点, 感受野

中图分类号: TP751

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)12-1855-06

An Approach to the Remote Sensing Image Analysis Based on Visual Attention

Zhang Peng Wang Run-sheng

(ATR National Lab, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract In this paper, according to the physiologic structure and cognitive characteristic of the human vision system, a model of the remote sensing image analysis based on bottom-up visual attention is brought up. Then, based on the model, a novel approach to analyzing remote sensing image comes into being. It has the partial ability of visual selectivity in the human vision system. This approach is applied to the real remote sensing images, and the exciting outputs show it is effective.

Key words Remote sensing, Image analysis, Visual attention, Focus of attention, Receptive field

1 引言

在众多遥感图像分析任务中, 如何从海量数据中找到所需要的目标是一个核心问题。常见的解决途径包括统计方法、结构方法和谱方法等。我们留意到, 为了对目标的存在性做出判断, 这些方法往往需要对所有图像区域进行验证, 但实际上所关心的内容通常仅占图像中很小一部分面积。这种全面加工既造成了计算浪费, 又加重了分析难度。

然而, 人类视觉系统(Human Visual System, HVS)却很好地解决了这一问题。面对一个复杂场景, 它总会迅速选择少数几个区域进行优先处理。该过程被称为视觉注意(Visual attention), 被选中的区域被称为注意焦点(Focus of Attention, FOA)。视觉注意使 HVS 能够以不同的次序和力度对各个场景区域进行选择性地加工, 从而避免了计算浪费, 降低了分析难度。显然, 将这种机制引入遥感图像分析是非常必要的。

视觉注意包括与任务无关, 不受意识支配, 自底向上的视觉注意(Bottom-up attention)和与任务相关, 受意识控制, 自顶向下的视觉注意(Top-down attention)^[1], 本文将研究对象限定为前者。对此, 心理学和计算机视觉领域的研究者进行

了许多探索, 但大多是在合成图像上对视觉注意形成机理的理论研究, 而在真实图像上对我们所关心的将视觉注意用于图像分析的应用研究相对较少。所提出的一些方法通常从图像处理角度出发, 利用某种局部特征提取算子检测FOA, 进而在其引导下完成图像分析任务。寻找合适的局部特征及其提取算子是这些方法面临的重大难题, 通过目前所使用的边缘密度^[2]、对称性^[3]和复杂度^[4]等局部特征得到的FOA仍然与HVS的感知结果存在较大差异。

我们留意到, 近年来Itti等人从视觉分析角度出发, 模拟HVS的视觉注意体系构建适用于图像分析的视觉注意模型, 获得了与HVS的感知结果较为接近的FOA^[5-8]。受此启发, 本文根据HVS的生理结构与认知特点, 提出了一个基于自底向上视觉注意的遥感图像分析模型, 并在此基础上开发出了一种新的遥感图像分析方法。它首先在遥感图像中找到一组按照视觉显著性由强到弱顺序排列的FOA, 然后利用这些FOA引导图像分析过程。该方法在一定程度上具备了类似于HVS的选择性加工能力, 将其应用于多种类型的真实遥感图像, 获得了较为满意的实验结果。

本文章节安排如下：第2节介绍了视觉注意；第3节描述了基于视觉注意的遥感图像分析模型和方法；第4节分析了该方法在多种真实遥感图像中的实验结果；第5节对全文进行了简单的总结和讨论。

2 视觉注意

图1给出了两个视觉注意的例子。分别观察这两幅图像，我们会迅速选择图(a)中的A和图(b)中的B进行优先感知。该过程就是视觉注意，A和B所在的图像区域就是FOA。

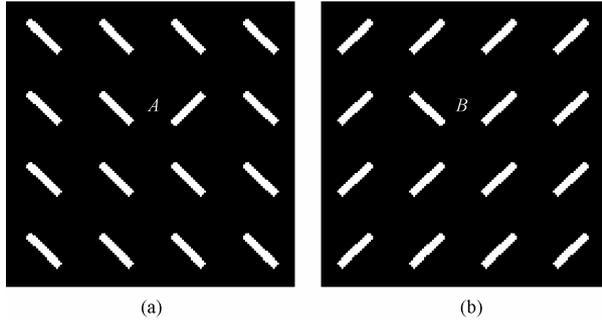


图1 视觉注意示例

对于HVS的视觉分析过程，Treisman的特征整合理论(Feature integration theory)^[9]将其划分为注意前期和注意期两个阶段：在注意前期，互不相关的早期视觉特征被提取出来，但尚未被知觉；在注意期，FOA内部的各种特征被整合为一个目标，并被知觉。这样，随着FOA的选择与转移，对场景的感知就逐渐形成了。在该体系中，注意前期的特征加工是高速并行的，注意期的目标加工是低速串行的，FOA是联系两者的纽带，它从特征加工获得选择依据，为目标加工提供引导信息。

对于自底向上的视觉注意，Braun的二元注意理论(Binary theory of attention)^[10]认为，这种FOA的选择不是依据场景区域的自身特征，而是基于它与周围区域比较产生的相对特征，可以将其称为视觉显著性(Visual saliency)。例如：在图1中，同样的A在图(a)中与其他区域差异较大，显著性较强，被选为FOA；而在图(b)中由于无法维持这种显著性，因此未被选为FOA。

3 基于视觉注意的遥感图像分析

根据上述理论，视觉注意的核心是FOA检测，自底向上FOA选择与转移的依据是视觉显著性，场景中某块区域的视觉显著性是互不相关的早期视觉特征中该区域与周围区域的属性差异。据此，本文提出了一个基于视觉注意的遥感图像分析模型(图2)。

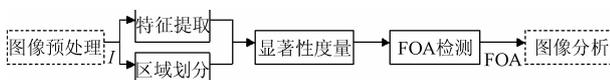


图2 基于视觉注意的遥感图像分析模型

该模型首先通过特征提取得到经过预处理的图像I中的早期视觉特征，通过区域划分得到FOA候选区域；然后利用显著性度量对各个FOA候选区域的视觉显著性进行评估；接着由FOA检测模块从这些候选区域中选择一组按照视觉显著性由强到弱顺序排列的FOA；最后利用这些FOA引导图像分析过程。该模型中各个模块的具体工作情况如下。

(1)图像预处理 输入原始的静态灰度遥感图像，根据数据特点和任务需求，对其进行几何校正、辐射校正、图像增强和分辨率调整等预处理，获得作为分析对象的图像I。

(2)早期视觉特征的选择和提取 限于视觉心理学的研究现状，我们还无法获知HVS中所有的早期视觉特征。这里选择亮度、方向和纹理这3种适用于遥感图像的经过验证的早期视觉特征，并通过计算量较小的基于像元运算的描述符提取它们，得到一组特征图(Feature maps)。

首先，直接将图像I作为亮度图L：

$$L(x, y) = I(x, y) \quad (1)$$

然后，分别用 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 这4个方向的Gabor滤波器对L滤波，得到4幅方向图 $R^0, R^{45}, R^{90}, R^{135}$ ：

$$R^\theta(x, y) = L(x, y) \cdot g(\theta, x, y), \quad \theta \in [0, 45, 90, 135] \quad (2)$$

其中g为Gabor函数， θ 为g的方向参数；接着，对L进行局部中心矩变换^[11]，得到3幅纹理图 $M^{0,1}, M^{1,0}, M^{1,1}$ ：

$$M^{p,q}(x, y) = \sum_{r=-w}^{r=w} \sum_{s=-w}^{s=w} L(x-r, y-s) r^p s^q \quad (3)$$

这里，局部窗口大小为 $(2w+1) \times (2w+1)$ 。为叙述方便，后文用 $O_i (i=0,1,2,3)$ 代表方向图 $R^0, R^{45}, R^{90}, R^{135}$ ，用 $T_i (i=0,1,2)$ 代表纹理图 $M^{0,1}, M^{1,0}, M^{1,1}$ 。这是一个开放性的特征选择和提取过程，在具体的图像分析任务中，可以根据任务需求调整这些特征的数量、类型及其描述形式。

(3)FOA候选区域的划分 小到一个像素，大至整幅图像，FOA总是针对某个具体的图像区域而言的。对于FOA候选区域的划分，最直接的想法是图像分割，但是从图像分析角度来看，分割算法的计算量太大，偏离了引入视觉注意的初衷；从视觉感知角度来看，注意前期的视觉感知还停留在像元级，基素级的区域分布信息尚未形成。这里根据人类视觉通路的感受野(Receptive Field, RF)等级结构划分图像区域，形成了一个多层次的FOA候选区域体系。该划分既不需要额外的计算，也不要求高层感知信息的参与，图3以一幅 8×8 图像为例，展示了具体的区域划分情况。其中，图3(a)和图3(b)是相邻的两层划分，图3(a)是浅层，图3(b)是深层，各层中的区域形状均为圆形；同一层中的区域尺寸相同，相邻区域间存在一定的重叠；不同层中的区域尺寸不同，层次越深，尺寸越大，相邻层间的区域直径比为1:2。在具体的

图像分析任务中, 通常对所关心的目标尺寸有一个大致了解, 可以据此确定 FOA 候选区域的最小直径 d_{\min} 与划分层数 Lay, 此时, 其最大直径 $d_{\max} = 2^{\text{Lay}-1} d_{\min}$ 。在图 3 的示例中, $d_{\min} = 2$, Lay = 2, $d_{\max} = 4$ 。在某些图像分析任务中, 可能难以确定所关心的目标尺寸, 此时, 需要研究更为复杂的整合野(Integration field)结构, 我们将在以后的工作中进行该方面的探索。

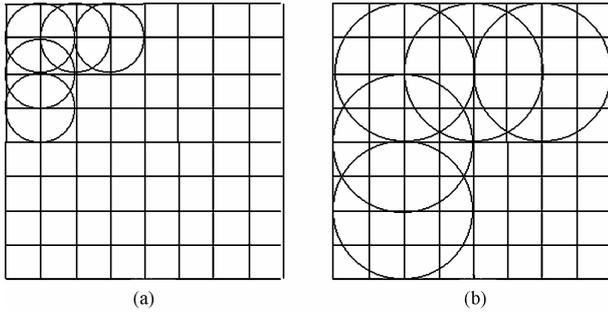


图 3 FOA 候选区域的划分

(4) 视觉显著性的度量 视觉显著性度量是视觉注意的核心环节。这里根据中心区和周边区相互拮抗的感受野模型计算各个 FOA 候选区域在各幅特征图中的视觉显著度, 得到一组多特征和多层次的显著图(Saliency maps)。图 4 展示了该方法的设计思想, 其中, 图 4(a)是简化的感受野模型, 图 4(b)—图 4(d)是同一层中尺寸相同, 位置不同的 3 个 FOA 候选区域的显著性度量情况, 图 4(e)—图 4(f)是不同层中位置相同, 尺寸不同的 3 个 FOA 候选区域的显著性度量情况, 图中阴影区的特征值为 0, 白色区的特征值为 1。可以看到, 与实际 FOA 的位置和尺寸都吻合的候选区域显著度最大(图 4(d), 图 4(f)), 当候选区域与实际 FOA 发生偏离时, 其显著度随之下降(图 4(b), 图 4(c), 图 4(e), 图 4(g))。

以第 l 层的一个中心位于 (P_x, P_y) 的 FOA 候选区域为例, 其在亮度图 L 中的视觉显著性度量过程如下: 首先, 建立感受野响应曲面:

$$RF_l(x, y) = \alpha[G(x, y, \sigma_c) - G(x, y, \sigma_s)] \quad (4)$$

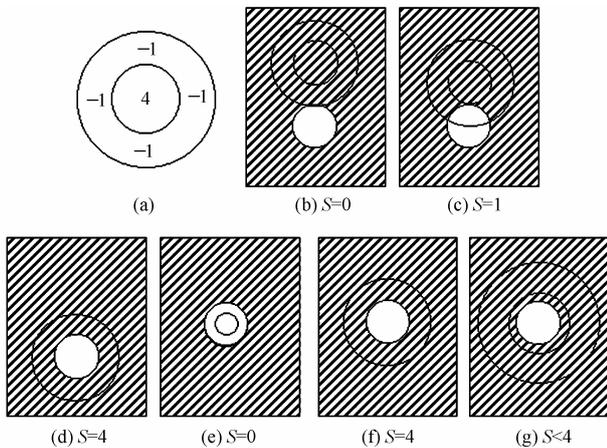


图 4 视觉显著性的度量

其中 G 为高斯函数:

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

σ_c 和 σ_s 之间满足比例关系: $\sigma_s = \lambda\sigma_c, (\lambda > 1)$, σ_c 由 FOA 候选区域的直径 $d = 2^{l-1} d_{\min}$ 确定:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{(\lambda^2 - 1)d^2}{8\lambda^2 \ln \lambda^2}} \quad (6)$$

这使得该候选区域对应 RF_l 中心正值区, 其周围区域对应 RF_l 周边负值区; 然后, 计算 RF_l 与 L 乘积的积分, 将其绝对值作为 FOA 候选区域与其周围区域的局部亮度差异:

$$LC_{l, P_x, P_y} = \left| \sum_{y=-m\sigma_s}^{m\sigma_s} \sum_{x=-m\sigma_s}^{m\sigma_s} RF_l(x, y)L(P_x + x, P_y + y) \right| \quad (7)$$

其中 m 用来控制积分的空间范围。接着, 计算 FOA 候选区域与整幅图像的全局亮度差异:

$$LD_{l, P_x, P_y} = \frac{\sum_{x^2+y^2 < d^2/4} L(P_x + x, P_y + y)}{\pi d^2/4} - L_m \quad (8)$$

其中 L_m 是整幅图像的亮度均值。最后, 以这两个差异值为基础, 综合 FOA 候选区域的尺寸与位置、特征类型等因素, 得到其视觉显著度:

$$LS_{l, P_x, P_y} = w_L \cdot w_l \cdot w_{P_x, P_y} \cdot (LC_{l, P_x, P_y} + \alpha_L LD_{l, P_x, P_y}) \quad (9)$$

这里, α_L 用来控制 LC_{l, P_x, P_y} 和 LD_{l, P_x, P_y} 之间的比例关系, w_L , w_l 和 w_{P_x, P_y} 分别是亮度特征、区域尺寸和区域位置的加权值, 这些参数可以在具体任务中进行调整。扩展以上操作, 可以得到一组显著图 LS_l^k , $O_l S_l^k$ ($i=0, 1, 2, 3$) 和 $T_l S_l^k$ ($i=0, 1, 2$), 其中 $1 \leq l \leq \text{Lay}$ 。

(5) FOA 的选择和转移 对于 FOA 的选择, 特征整合理论^[9]认为, 在注意前期, HVS 能够从各幅互不相关的早期视觉特征图中选择一幅特征主图(Master map), 并通过注意聚光灯(Spotlight)照亮其中一块场景区域作为 FOA。这里根据上文得到的显著图确定特征主图和基本注意范围, 进而得到 FOA。首先, 在显著图 LS_l^k , $O_l S_l^k$ 和 $T_l S_l^k$ 中找到视觉显著度最大的单元, 将其显著值用 Sal^k 表示, 对应的特征用 Fea^k 表示, 对应的 FOA 候选区域的直径和位置用 Dia^k 和 (Loc^k, Loc^k) 表示, 其中, k 为 FOA 编号, 初始状态下 $k=1$, $LS_l^k = LS_l$, $O_l S_l^k = O_l S_l$, $T_l S_l^k = T_l S_l$; 然后, 按照胜者全取(Winner-take-all, WTA)原则, 将 Fea^k 对应的特征图作为特征主图, 将由 Dia^k 和 (Loc^k, Loc^k) 确定的圆形区域作为基本注意范围; 最后, 直接将该基本注意范围作为第 k 个 FOA, 或者以此为基础, 在特征主图中通过视区追踪^[12]、区域生长等相关算法对 FOA 进行更为准确的描述。

对于 FOA 的转移,这里根据 HVS 的认知特点,通过返回抑制(Inhibition of return)机制实现。在通过上述选择过程得到第 k 个 FOA 之后,首先更新显著图 LS_l^k , $O_lS_l^k$ 和 $T_lS_l^k$, 将被该 FOA 覆盖的候选区域的视觉显著度设置为 0, 得到 LS_l^{k+1} , $O_lS_l^{k+1}$ 和 $T_lS_l^{k+1}$, 然后据此选择新的特征主图和基本注意范围, 得到第 $k+1$ 个 FOA。这样, 它就不会返回已经被选择过的前 k 个 FOA 了。

(6) 利用 FOA 引导图像分析 在遥感图像分析中, 通过以上操作得到的 FOA 通常在准确度和精确度上都无法直接满足任务需求, 但是它用极低的代价获得了图像内容的相关线索, 这些线索可以为分析提供重要的引导信息, 从而使原本异常复杂的任务趋于简单。本文分别在 3 个层次上利用 FOA 引导图像分析过程: 第一, 根据 FOA 选择图像。在分析一组遥感图像时, 通过 FOA 判断各幅图像的属性, 若图像中存在显著值较大的 FOA, 则认为这是含有突出目标的有意义图像, 反之, 则认为这是不含突出目标的无意义图像, 据此选择有意义图像进行优先处理, 舍弃或推迟处理无意义图像。第二, 根据 FOA 选择区域。在分析一幅遥感图像时, 通过 FOA 判断各个区域的属性, 将显著值较大的 FOA 所在或聚集的区域看作重要区域, 将其他区域看作非重要区域, 据此选择重要区域进行优先处理, 舍弃或推迟处理非重要区域。第三, 根据 FOA 选择分析路径。在分析选中的多幅有意义图像或多个重要区域时, 按照图像或区域中 FOA 显著值由大到小的顺序选择分析路径, 依次处理各幅图像或各个区域。

根据上述模型, 我们得到了一种新的基于视觉注意的遥感图像分析方法, 它在分析一幅图像时的具体工作流程如下:

步骤 0 输入原始的静态灰度遥感图像;

步骤 1 通过预处理得到图像 I ;

步骤 2 通过式(1)–式(3)提取早期视觉特征, 得到亮度图 L , 方向图 $O_i (i=0,1,2,3)$ 和纹理图 $T_i (i=0,1,2)$;

步骤 3 参照目标尺寸的先验信息设置 FOA 候选区域的最小直径 d_{\min} 与划分层数 Lay , 如图 3 所示划分图像区域;

步骤 4 通过式(4)–式(9)度量各个 FOA 候选区域的视觉显著度, 得到多层次的亮度显著图 LS_l , 方向显著图 $O_lS_l (i=0,1,2,3)$ 和纹理显著图 $T_lS_l (i=0,1,2)$;

步骤 5 根据具体任务, 通过对样本图像的分析与学习, 确定 FOA 的显著阈值 D_s 和数目阈值 N_s , 并设置 FOA 选择与转移过程的初始值: $k=1$, $LS_l^k = LS_l$, $O_lS_l^k = O_lS_l$, $T_lS_l^k = T_lS_l$;

步骤 6 选择第 k 个 FOA, 其显著度为 Sal^k , 对应特征

为 Fea^k , 中心位置为 (Loc^k, Loc^k) , 区域直径为 Dia^k ;

步骤 7 若 $Sal^k < D_s$ 或 $k > N_s$, 则进入步骤 10;

步骤 8 结合具体任务, 完成对当前第 k 个 FOA 所在的局部区域的分析;

步骤 9 更新显著图, 得到 LS_l^{k+1} , $O_lS_l^{k+1}$ 和 $T_lS_l^{k+1}$, 更新 FOA 编号, $k=k+1$, 返回步骤 6, 进行 FOA 转移;

步骤 10 结束整个图像分析过程。

该方法将视觉注意引入遥感图像分析, 在一定程度上具备了类似于 HVS 的选择性加工能力。它具有较为广泛的适用范围, 可以分析来自各种遥感平台的图像数据, 可以处理包括图像筛选、图像压缩和目标检测与识别在内的多种任务, 可以用于自动或辅助的图像分析过程。

4 实验结果与分析

为了验证本文方法的有效性, 我们在包括各种平台(卫星与飞机)、各种目标(飞机、港口与房屋等)和各种分辨率在内的 100 多幅不同类型的真实遥感图像上进行了大量实验, 获得了较为满意的结果。

图 5 是通过本文方法检测 FOA 的实验结果。其中, 图 5(a) 是取自 USC-SIPI 图像数据库^[13] 的 $1024 \times 1024 \times 8\text{bit}$ 静态灰度遥感图像, 图 5(b)–图 5(e) 分别是检测得到的第 1–第 4 个 FOA, 图中用圆环标示 FOA 的空间范围, 用直线标示 FOA 的转移路径。可以看到, 这些 FOA 按照视觉显著性由强到弱的顺序依次出现, 各个 FOA 的位置和尺寸与视觉感知结果基本相符。该实验说明本文方法能够从遥感图像中检测出有效的 FOA, 利用它引导图像分析是可行的。

图 6 是将本文方法用于图像筛选任务得到的实验结果。实验首先选择 20 幅含有突出目标的有意义图像和 10 幅不含突出目标的无意义图像组成训练样本集, 根据各幅图像中第

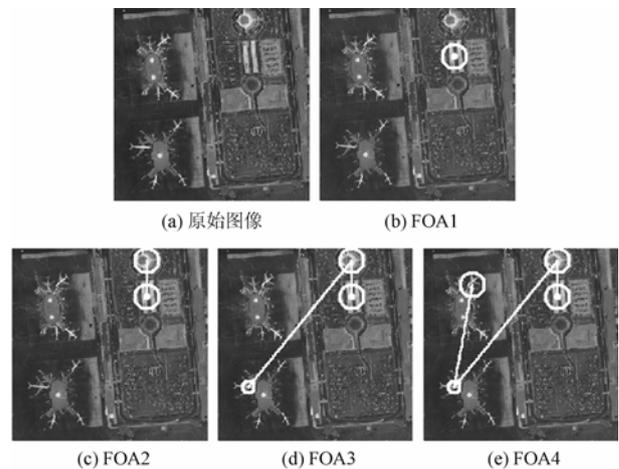


图 5 FOA 检测结果

1 个 FOA 的显著度 Sal^1 确定显著阈值 D_s , 使无意义图像的 Sal^1 小于该值; 然后选择 80 幅图像组成实验样本集, 通过本文方法对它们进行筛选, 如果待测图像中所有 FOA 的显著度均小于 D_s , 则认为其中不含足够突出的目标, 舍弃该图像, 如果待测图像中存在显著度大于 D_s 的 FOA, 则认为其中含有能够引起观察者注意的目标, 保留该图像; 最后在各幅保留图像中检测 FOA, 对其聚类后得到可能包含目标的重要区域, 用矩形框将它们的空间范围标示出来, 为其后的判读工作提供参考。图 6 中, 图 6(a)是舍弃图像, 图 6(b)是保留图像, 图 6(c)是图 6(b)的 FOA 标注图, 图 6(d)是图 6(b)的重要区域标注图。

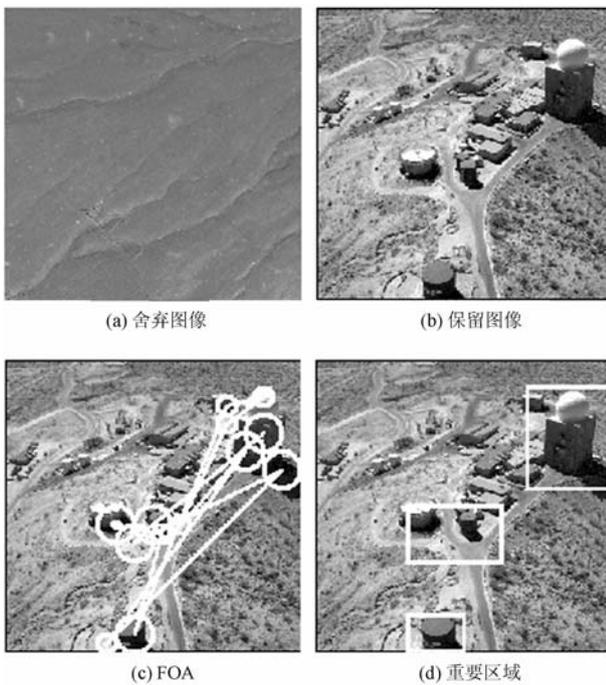


图 6 基于视觉注意的图像筛选实验结果

图 7 是将本文方法用于目标检测与识别任务得到的实验结果。图 7 中, 图 7(a)是飞机的检测与识别结果, 由左到右排列的 3 幅图像分别是原始图、FOA 标注图和目标标注图, 图 7(b)是港口和油库的检测与识别结果, 图 7(c)是房屋的检测与识别结果。实验中, 依次将各个 FOA 所在的局部图像区域作为分析对象, 结合目标模型库, 对该区域内目标的存在与否、所属类别和基本属性做出判断。从图中可以看到, 被选择和处理的局部区域仅占整幅图像中很小一部分面积, 因此, 相对于对整幅图像进行全面加工的传统方法而言, 这种仅对局部区域进行选择性的加工的方法具有更高的检测与识别效率。

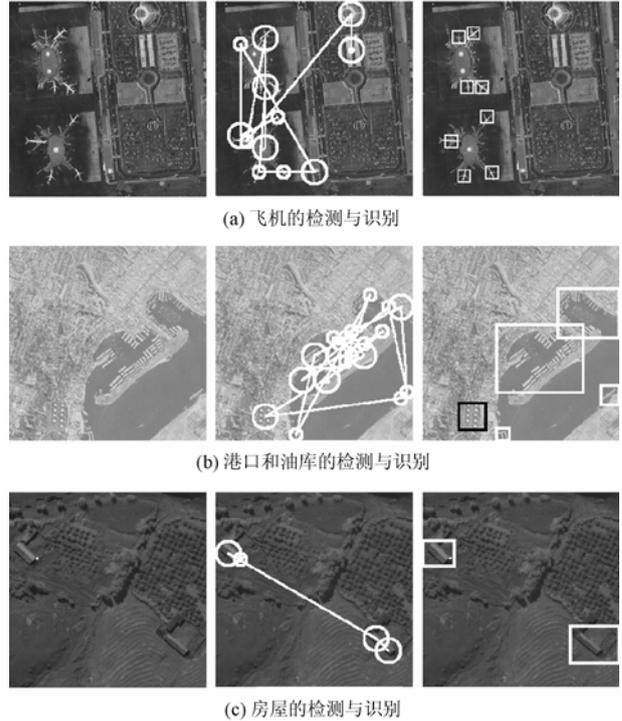


图 7 基于视觉注意的目标检测与识别实验结果

5 总结与讨论

将 HVS 中的视觉注意引入遥感图像分析是非常必要的。本文从视觉分析角度出发, 根据 HVS 的生理结构与认知特点, 提出了一个基于视觉注意的遥感图像分析模型, 并在此基础上开发出了一种新的遥感图像分析方法。该方法具有以下特点: (1) 开放性 能够处理各种遥感图像, 适用于多种分析任务; (2) 简单快捷 视觉注意过程是通过像元级特征实现的, 不需要图像高层信息的参与; (3) 仿生性 感受野模型和感受野等级结构是生理学关于 HVS 的研究成果; (4) 选择性 图像分析中按照视觉显著性由强到弱的顺序依次选择和处理的局部区域。我们将这种方法应用于多种类型的真实遥感图像, 获得了较为满意的实验结果。

该方法中也还存在一些尚未解决的问题。首先是早期视觉特征问题: 本文使用的亮度、方向和纹理只是 HVS 众多早期视觉特征中的一小部分, 其数量、类型和描述形式都与人类视觉感知存在一定差异。其次是感受野形态问题: 本文使用的圆形感受野只是各式感受野中最基本的一种, 视皮层神经细胞具有更加复杂的感受野形态。最后是先验知识的使用问题: 本文提出的方法完全是自底向上的, 没有使用目标的先验知识, 而在 HVS 中, 由数据驱动的自底向上的加工与由知识驱动的自顶向下的加工是一个有机的整体, 孤立任何一方都是不合适的。我们将在以后的研究中努力解决这些问题。

参 考 文 献

- [1] Koch C, Ullman S. Shifts in selective visual attention: towards the underlying neural circuitry. *Human Neurobiology*, 1985, 4(4): 219 – 227.
- [2] Bourque E, Dudek G, Ciaravola P. Robotic sightseeing: a method for automatically creating virtual environments. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, 1998: 318 – 3191.
- [3] Reisfeld D. Constrained phase congruency: simultaneous detection of interest points and of their scales. In: Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition, San Francisco, USA, 1996: 562 – 567.
- [4] Kadir T, Brady M. Saliency, scale and image description. *International Journal of Computer Vision*, 2001, 45(2): 83 – 105.
- [5] Itti L, Koch C, Niebur E. A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(11): 1254 – 1259.
- [6] Salah A A, Alpaydin E, Akarun L. A selective attention-based method for visual pattern recognition with application to handwritten digit recognition and face recognition. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(3): 420 – 425.
- [7] Boccignone G, Ferraro M, Caelli T. Generalized spatio-chromatic diffusion. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(12): 1298 – 1309.
- [8] Privitera C M, Stark L W. Algorithms for defining visual regions-of-interest: comparison with eye fixations. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(9): 970 – 982.
- [9] Treisman A. Preattentive processing in vision. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1985, 31(2): 156 – 177.
- [10] Braun J, Sagi D. Vision outside the focus of attention. *Perception & Psychophysics*, 1990, 48(1): 45 – 58.
- [11] Gesu V Di, Valenti C, Strinati L. Local operators to detect regions of interest. *Pattern Recognition Letters*, 1997, 18(11): 177 – 181.
- [12] 张鹏, 王润生. 基于视点转移和视区追踪的图像显著区域检测. *软件学报*, 2004, 15(6): 891 – 898.
- [13] 5.3.02.tiff, The USC-SIPI Image Database, <http://sipi.usc.edu/services/database/>
- 张 鹏: 男, 1974 年生, 博士生, 研究方向为图像分析理解与信息融合.
- 王润生: 男, 1941 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为图像分析理解与信息融合.