

城市航空影像中基于模糊 Retinex 的阴影消除

唐 亮¹, 谢维信², 黄建军², 肖志级²

(1. 清华大学自动化系, 北京 100084; 2. 深圳大学信息工程学院, 广东深圳 518060)

摘要: 城市航空影像中, 高大建筑物形成的阴影影响了影像视觉效果, 也给物体识别造成了困难, 有必要对其进行补偿和消除. 本文针对 Retinex 图像增强算法的不足, 提出了一种模糊 Retinex 算法. 模糊 Retinex 使中心环绕空间对比运算仅在光照强度相近的区域中进行, 增强了 Retinex 在光照强度变化较大的场景中的鲁棒性. 基于影像阴影区域、非阴影区域的模糊划分, 该算法在保持原影像自然色彩的前提下补偿和消除了阴影的不良影响. 实验表明该方法取得了较好的效果, 丰富了 Retinex 的研究和应用范围.

关键词: 航空影像; 模糊 Retinex; 阴影消除

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 03-0500-04

Removing Shadows from Urban Aerial Images Based on Fuzzy Retinex

TANG Liang¹, XIE Weixin², HUANG Jiannun², XIAO Zhiji²

(1. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract: In urban aerial images, the poor visibility of features in shadowed regions created by buildings prevents recognition of objects. It is necessary to compensate and remove the shadowed region. In this paper, a fuzzy retinex is proposed to overcome the limitation of the well known image enhancement technique—retinex. The fuzzy retinex restricts the center/surround spatially contrast operation in region with homogeneous illumination so that the robustness of retinex is reinforced in scene with strongly variational illumination. Based on the fuzzy segmentation of an image into shadowed and unshadowed regions, shadows are compensated and removed using the fuzzy retinex while the natural tint of original image is retained. The proposed method enriches the research and application domain of the retinex. Experimental results are given to show its effectiveness.

Key words: aerial images; fuzzy retinex; shadow removal

1 引言

在城市区域航空影像中, 高大建筑物等形成的阴影影响了航空像片的视觉效果, 使得阴影区域内物体的色彩饱和度和亮度对比度降低, 增加了一些传统计算机视觉方法如图像分割、目标定位与跟踪的难度. 高大建筑物阴影区域内往往包含一些重要的信息, 比如道路、建筑物背阳墙面及一些小的建筑物等, 阴影的存在给这些物体的特征抽取和识别带来了极大的困难, 有必要研究可靠的方法对其进行补偿或消除. 另一方面, 由某一场景的一幅像片再现该场景在不同光照条件和视觉角度下的构像在一些实际应用中日益重要, 阴影的消除是解决这一类问题的重要步骤.

然而, 以往航空影像较低的分辨率和计算硬件的限制使得像片中的阴影问题并不突出, 因此在已有的文献中, 有关阴影补偿和消除的研究相对于航空影像处理的其它主题(如分割、识别等)较为少见. 近年来, 随着影像分辨率的提高以及有

关数字城市等方面的应用研究飞速发展, 这一方面的研究逐渐得到重视. Suzuki 等^[1]提出了一种基于色彩和空间概率分析的航空影像动态阴影补偿方法, 但该方法仅对阴影区域进行了增强, 并且其概率模型需要预先给定. Finlayson 等人^[2]基于 Retinex 彩色图像增强技术, 设计了一种阴影消除的方法, 但由于采用了 Retinex 早期的任意路径算法, 其计算量较大. 本文首先介绍了近年来得到广泛应用的中心/环绕 Retinex 方法, 并分析了单尺度和多尺度 Retinex 难以消除阴影的内在原因. 据此, 作者提出了一种模糊 Retinex 算法, 并在航空影像阴影区域、非阴影区域模糊划分的基础上, 补偿和消除阴影的不良影响. 实际航空影像实验证明, 所提方法在保持原图像自然色彩的前提下取得了良好的阴影消除效果.

2 中心/环绕 Retinex

作为人眼视觉感知颜色和亮度的模拟, Land 于 1977 年首次提出了 Retinex 算法模型^[3]. Retinex 是 Retina 和 Cortex 两词

的复合, 意为人视网膜感受和大脑皮层知觉的综合, 它力图模拟人眼视觉系统在光照条件空间变化的情况下仍然能对场景中每一点的颜色稳定感知的能力, 其核心思想是认为人眼对某一点的感受不仅来源于该点的绝对亮度和颜色, 还取决于该点与四周各点亮度、颜色的对比。多年以来, Land 将 Retinex 由最初的任意路径计算^[4]发展到最近的中心/环绕空间对比运算的形式^[5]。中心/环绕空间对比运算由于其计算较为简单且关键参数较易设置, 已经在图像恢复和图像增强工作(如动态范围压缩、彩色校正和色度级映射等)中得到了广泛应用^[2]。这种运算与灵长目动物视网膜和大脑皮层神经元的神经生理学函数相关, 其形式类似于自然视觉科学中常用来模拟单个神经元感受野的高斯差分函数(DOG)。Jobson 等人据此提出了一种单尺度 Retinex(SSR)^[6], 其计算方法为:

$$R_i(x, y) = \log I_i(x, y) - \log [k \cdot [F(x, y) * I_i(x, y)]] \quad (1)$$

式中 $I_i(x, y)$ 表示原图像的第 i 个颜色通道, “*” 表示卷积运算, $R_i(x, y)$ 为 Retinex 计算结果, $F(x, y)$ 为环绕高斯函数:

$$F(x, y) = e^{-r^2/c^2}, r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2)$$

k 为归一化常数: $k = 1 / \iint F(x, y) dx dy$ (3)

c 为高斯函数的尺度参数, 需要人为选择, 它对 SSR 的性能有关键性的影响。 c 越小, SSR 的动态范围压缩能力越强, 亮度较暗区域(如阴影)的细节能得到较好地增强, 但由于平均对比范围较小, 输出 Retinex 会产生颜色失真; 反之, c 越大, SSR 的颜色保真度越高, 但动态范围压缩能力减弱。解决这一矛盾的简单手段是选择一个适中的尺度, 可以兼顾两方面的性能; 但一种更合理的方法是综合不同尺度 SSR 的输出结果, 称为多尺度 Retinex (MSR)^[7], 它较好地平衡了动态范围压缩能力和颜色保真性能。

3 模糊 Retinex

在现实世界中, 人眼观察不容易受光照强度变化的干扰, 即使由阳光剧烈的地方走进阴影区域, 人们也能很快地准确感知当地物体的颜色和亮度。中心/环绕 Retinex 给出了人眼视觉的良好模拟, 因此可以期望用以消除阴影对航空影像的不良影响。将 SSR 和 MSR 应用于航空影像, 图 1 给出了一个例子。图 1(a) 是原始航空影像, 其地面像素分辨率为 0.2 米。由于摄影条件的影响(如空气中的水气), 像片有一些模糊。图 1(b) 是尺度 $c = 80$ 时 SSR 的输出结果, 它改善了影像的视觉效果并在一定程度上增强了阴影区域的细节信息; 图 1(c) 是按文献[7]所述将 $c = 15, 80, 200$ 时的 SSR 直接平均的 MSR 计算结果, 相对于

图 1(b), 它给出了更好的细节增强和颜色保真权衡(注意图像顶端水池和右上方草坪的色彩)。然而, 图中几个高大建筑物产生的阴影影响了阴影区域内物体的视觉效果和细节特征提取, 但 SSR 和 MSR 的结果中阴影区域仍然十分明显, 不能达到理想的阴影消除效果。亦即在这种情况下, Retinex 还不能完全摆脱光照条件变化的影响, 存在一定的局限性。

3.1 中心/环绕 Retinex 的局限性

考虑到图像单通道亮度可表示为:

$$I_i(x, y) = S_i(x, y) r_i(x, y) \quad (4)$$

式中 $S_i(x, y)$ 表示光照强度的空间分布, $r_i(x, y)$ 表示场景反射系数分布, 则式(1)等价于:

$$R_i(x, y) = \log \frac{S_i(x, y) r_i(x, y)}{S_i(x, y) \bar{r}_i(x, y)} \approx \log \frac{r_i(x, y)}{\bar{r}_i(x, y)} \quad (5)$$

式中短横杠表示空间环绕加权平均值。即 Retinex 实际上是当前点亮度与四周环绕加权平均亮度的比值(权值 $F(x, y)$ 由确定), 符合人眼视觉感知的神经生理学基本机制。若当前点光照强度与环绕光照强度基本相等, 或者场景中光照强度变化较为缓慢, 即 $S_i(x, y) \approx \bar{S}_i(x, y)$, 式(5)中约等号成立, 则 Retinex 反映了与光照条件无关的物体表面反射系数比, 这便是 Retinex 的核心思想。然而, 阴影区域和非阴影区域之间特别是两者交界处显然并不满足上述光照条件, 即一些点的光照强度与周围平均光照强度相差甚远, 式(5)中的约等号不能成立, 它使得 Retinex 不能消除光照条件变化的影响。因而, 大幅度光照条件变化使 Retinex 关键条件的不满足是 SSR 和 MSR 不能消除阴影的本质原因。

3.2 模糊 Retinex

根据以上分析, 为改善 Retinex 性能, 需要在计算中尽量确保条件 $S_i(x, y) \approx \bar{S}_i(x, y)$ 的成立, 即需要在与当前点光照强度基本相近或变化缓慢的区域内对比计算 SSR, 或者在计算环绕平均亮度值时, 强化与当前点光照强度相近的环绕点的影响, 减弱相差较大的环绕点的影响。对于存在大幅度光照条件变化的情形, 一种直接的想法是在当前点的环绕邻域中, 选择与其光照强度基本相近的点进行环绕对比运算。然而, 在图像中要明确地给出“光照强度相近”的定义较为困难, 因此, 本文尝试以模糊集理论来解决这一问题。将“光照强度相近”以模糊隶属度的形式表达, 形成一种模糊 Retinex 的概念。其基本思想是依据环绕点与当前点在亮度、颜色等已知信息的相似程度, 估计其光照强度与当前点相似的模糊隶属度函数, 在此基础上计算模糊环绕平均亮度值, 进而得出一种新的 Retinex——模糊单尺度 Retinex (FSSR)。设环绕光照模糊隶属度函数由表示, 则模糊单尺度 Retinex 由下式给出:

$$R_{FSSR_i}(x, y) = \log I_i(x, y) - \log [K(x, y) \cdot [F(x, y) * (I_i(x, y) u(x, y))]] \quad (6)$$

$R_{FSSR_i}(x, y)$ 是第 i 通道 FSSR 的计算结果。这里:

$$F(x, y) = e^{-r^2/c^2}, K(x, y) = 1 / \iint F(x, y) * u(x, y) dx dy \quad (7)$$

$K(x, y)$ 为模糊归一化系数。式(6)与式(1)的不同在于环绕平均亮度的计算不仅根据距离相关程度由 $F(x, y)$ 加权, 并且

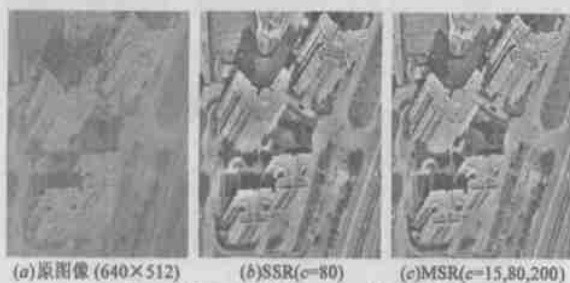


图 1 实际航空影像 Retinex 结果示例

考虑到光照条件相近模糊隶属度由 $u(x, y)$ 加权, 从而控制其对当前点 Retinex 输出的影响. 环绕点与当前点光照强度接近的影响权值大, 反之影响权值小, 使得当前点在模糊的意义上仅与光照强度相近的环绕点进行空间对比运算, 使条件 $S_i(x, y) \approx \bar{S}_i(x, y)$ 得到更好的满足, 避免了光照强度急剧变化产生的不良影响, 从而使得 Retinex 具有更为鲁棒的人眼视觉感知模拟能力.

当然, 若逐个估计每个当前点的环绕光照模糊隶属度函数, 其计算过于繁琐, 影响其实用价值. 可以考虑根据具体情况将图像模糊划分为几个光照强度基本均匀的区域, 每个像素点均以一定隶属度属于每一个区域, 称为类属隶属度. 设共有 n 个像素, 分为 m 个区域, 则模糊划分可表示为:

$$M_{F_{FCM}}: \left\{ U \in R^{m \times n} \mid u_j(x, y) \in [0, 1], \forall j \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^m u_j(x, y) = 1, n > \sum_{x,y} u_j(x, y) > 0, \forall j \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

U 表示隶属度矩阵, $u_j(x, y)$ 表示像素 (x, y) 属于第 j 个区域的类属隶属度. 按式(6)分别计算各像素点对应各区域的模糊 Retinex 输出(此时环绕光照模糊隶属度由类属隶属度给出):

$$R_{FSSR_i}^j(x, y) = \log I_i(x, y) - \log \{ K(x, y) \cdot [F(x, y) * (I_i(x, y) u_j(x, y))] \}, \quad j = 1, \dots, m \quad (9)$$

得到的 m 个模糊 Retinex 和模糊划分构成了图像的一种模糊表达, 即图像以值为的隶属度具有 Retinex 值: $R_{FSSR_i}^j(x, y)$. 为得确值输出, 按形心去模糊法计算最终的 FSSR 输出:

$$R_{FSSR_i}(x, y) = \sum_{j=1}^m R_{FSSR_i}^j(x, y) u_j(x, y) \quad (10)$$

4 基于模糊 Retinex 的阴影消除

基于 FSSR 和航空影像的实际情况, 为达到阴影消除的目的, 本节将图像模糊划分为阴影和非阴影两个光照强度基本均匀的区域, 分别计算其 FSSR, 再综合构造最后的输出结果.

阴影产生于到达物体的光源直射光线被部分或全部遮挡. 通常可分为投射阴影和自阴影两类^[8], 投射阴影是位于光源方向的物体的投影, 自阴影是指物体不能被光源直接照射的部分. 在前面的工作中^[9], 作者分析了航空影像阴影形成的机理和阴影区域色调较高的特征, 提出了一种基于色调直方图阈值分割的阴影检测方法, 比较适合城市航空影像中的阴影检测. 因此, 本文采用像素色调值来检测阴影, 为得到模糊划分, 采用模糊 C -均值聚类方法(FCM)将影像分割为阴影和非阴影两类:

$$[C, U] = FCM(H, 2) \quad (11)$$

式中 H 表示彩色图像色调图; C 为聚类中心, 色调值较大的一类为阴影区域; U 给出图像中各像素分别属于阴影区域和非阴影区域的模糊隶属度. 以 $\mu_s(x, y)$ 表示阴影区域类属隶属度, $\mu_n(x, y)$ 表示非阴影区域类属隶属度, 可计算得图中各像素在阴影区域和非阴影区域的模糊 Retinex 分别为:

$$\begin{aligned} R_{FSSR_s}(x, y) &= \log I_i(x, y) - \log \{ K_s(x, y) \\ &\quad \cdot [F_s(x, y) * (I_i(x, y) \mu_s(x, y))] \} \\ R_{FSSR_n}(x, y) &= \log I_i(x, y) - \log \{ K_n(x, y) \\ &\quad \cdot [F_n(x, y) * (I_i(x, y) \mu_n(x, y))] \} \end{aligned} \quad (12)$$

式中:

$$\begin{aligned} F_s(x, y) &= e^{-r^2/c^2}, K_s = 1 / \iint F_s(x, y) * \mu_s(x, y) dx dy \\ F_n(x, y) &= e^{-r^2/c^2}, K_n = 1 / \iint F_n(x, y) * \mu_n(x, y) dx dy \end{aligned} \quad (13)$$

结合各像素在阴影区域和非阴影区域的模糊 Retinex, 得影像第 i 通道的 FSSR 输出为:

$$R_{FSSR_i}(x, y) = R_{FSSR_s}(x, y) \mu_s(x, y) + R_{FSSR_n}(x, y) \mu_n(x, y) \quad (14)$$

综合 RGB 三个通道的 FSSR, 即得影像的最终处理结果. 上述计算由于分别在阴影和非阴影区域实施模糊 Retinex 运算, 因而避免了阴影产生的大幅度光照强度变化对 Retinex 的不良影响, 较好地模拟了人眼在现实世界中的视觉感知能力.

5 实验结果与讨论

将第 4 节所述方法应用于图 1 所示航空影像, 图 2a 给出其阴影区域模糊隶属度值, 隶属度越大, 亮度越高. 由于一些杂散点和树木阴影的影响, FCM 直接得到的模糊隶属度图中有许多噪声点, 这会造成计算结果不平滑, 因此图中先对其进行了中值滤波. 图 2(b) 给出该影像的 FSSR 计算结果, 计算中采用了一个比较适中的尺度 $c = 80$. 为便于比较, 将图 1(c) MSR 的结果重绘于图 2(c). 可以看到相对于 MSR, FSSR 更好



图 2 图 1 所示影像的阴影区域模糊隶属度图像, 以及 FSSR 阴影消除和 MSR 对比实验一

地去除了阴影的影响, 特别是在水泥地等灰色区域的阴影得到了很好的消除; 同时由于条件 $S_i(x, y) \approx \bar{S}_i(x, y)$ 在计算中得到了更充分的保障, 因此 FSSR 结果的颜色看起来也更加自然(注意右上方草坪). 为检验算法性能, 作者在多幅实际航空影像中进行了实验, 均取得了令人满意的效果. 但由于阴影消除的质量和色彩保真度难以量化评价, 文中仅能给出其中的几个图例(图 3~4). 为便于对比, 图 3~4 中同时给出了原始

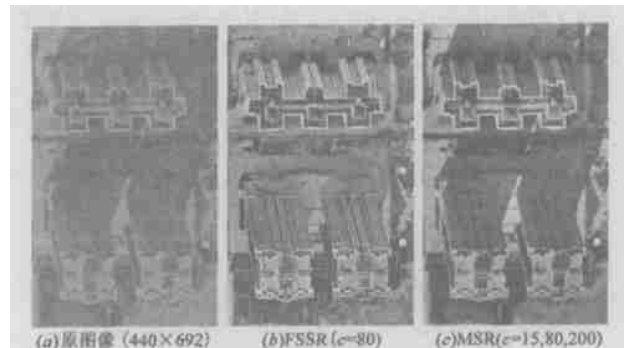


图 3 原始航空影像及其 FSSR 阴影消除和 MSR 对比实验二

航空影像、FSSR 阴影消除和 MSR 的结果。

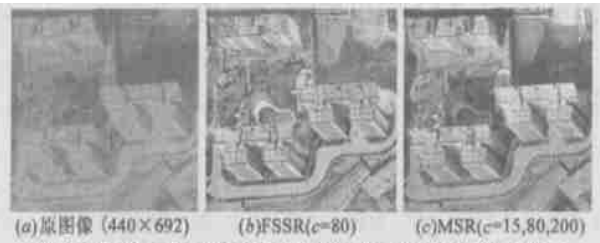


图 4 原始航空影像及其 FSSR 阴影消除和 MSR 对比实验三

从几个例子中可以发现, 凡灰色区域中的阴影(包括投射阴影(图 2)和自阴影(图 3))可以得到满意地消除, 但其它颜色区域如草地上的阴影消除则表现得差强人意(图 4), 这是由于 Retinex 数学基础的缺陷造成的. Hurlbert 等^[10]指出 Retinex 实际上隐含了一种“灰色世界”的假定. 因为式(5)的运算在 RGB 三个通道同时进行, 仅在三个通道环绕均值基本相等(“灰色”)的情况下, 原图像的颜色信息才不被破坏; 若三个通道环绕均值相差较大, 则式(5)不仅消除了光照强度变化的影响, 同时也将产生颜色失真. 它解释了非灰色区域 FSSR 性能较差的原因. 另外, 从结果中还可看到, 大片区域的阴影能得到较好地补偿消除, 而小范围的阴影则效果较差, 这是由于小范围阴影的环绕区域中与其光照强度相近的点太少, 环绕平均光照强度与当前点光照强度相差较大造成的. 尽管有上述不足, 但从实用角度看有利的一面是, 小范围阴影对整幅影像视觉效果的影响较小, 同时从物体识别的要求看, 感兴趣的信息大都位于灰色区域中(如道路、低矮的人造物体以及高大建筑物的背阳面等). 因此, 本文所述方法给出了一个令人满意的阴影消除方法.

由于已有的阴影消除算法较少发现, 且难以获取其技术细节(如文献[2]), 所以难以给出同类算法间的比较. 但是, 从文献[2]的叙述来看, 由于它采用了 Retinex 早期的任意路径对比计算方法, 其参数选择较为复杂且计算量较大; 同时该算法需要较为精确的阴影边缘检测结果, 但这一条件目前的检测手段难以保证. 本文方法的计算量主要集中于环绕高斯函数与图像的二维卷积, 该类计算已被数学证明其可由两个一维卷积(横向、纵向)实现, 因此其计算复杂度较低, 适合大尺寸航空影像处理的需求; 同时由于 FSSR 采用了阴影、非阴影区域的模糊划分, 可以承受一定的阴影区域分割误差, 因而具有更好的鲁棒性.

6 小结

本文分析了中心/环绕 Retinex 在航空影像阴影消除应用中的优缺点, 并针对其缺点的本质原因, 提出了一种模糊 Retinex 概念和模糊单尺度 Retinex 算法(FSSR). 进而, 利用 FCM 算法将影像模糊划分为阴影和非阴影区域, 分别计算其模糊 Retinex, 再综合得出影像的 FSSR 输出结果. FSSR 在模糊的意义上使得中心环绕空间对比运算仅在光照强度相近的区域中进行, 增强了 Retinex 在光照强度变化较大的场景中的鲁棒性, 因而在保持原图像自然色彩的前提下取得了较好的阴影消除效果. FSSR 丰富了 Retinex 的研究和应用范围, 对提高影像的视觉效果和基于影像的特征提取具有重要意义.

参考文献:

- [1] A Suzuki, A Shio, H Arai, S Ohtsuka. Dynamic shadow compensation of aerial images based on color and spatial analysis[A]. Proceedings of 15th International Conference on Pattern Recognition[C]. 2000. 1: 317-320.
- [2] G D Finlayson, S D Hordley, M S Drew. Removing Shadows from Images Using Retinex[A]. Proceedings of IS&T/SID Tenth Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications[C]. Scottsdale, Arizona: IS&T/SID, 2002. 73-79.
- [3] Edwin H Land. The retinex theory of color vision[J]. Scientific American, 1977, 237(6): 108-129.
- [4] Edwin H Land. Recent Advances in Retinex Theory and Some implications for Cortical Computation[A]. Proceedings of the National Academy of Science USA[C]. Washington, DC: 1983, 80: 5163-5169.
- [5] Edwin H Land. Recent advances in retinex theory[J]. Vision Research, 1986, 26(1): 7-21.
- [6] D J Jobson, Z Rahman, G A Woodell. Properties and performance of a center/surround retinex[J]. IEEE Trans on image processing, 1997, 6(3): 451-462.
- [7] D J Jobson, Z Rahman, G A Woodell. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes[J]. IEEE Trans on image processing, 1997, 6(7): 965-976.
- [8] E Salvador, A Cavallaro, T Elrahimi. Shadow Identification and Classification Using Invariant Color Models[A]. Proc IEEE Signal Processing Society International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 2001)[C]. Salt Lake City (Utah USA): 2001, (3): 1545-1548.
- [9] 唐亮, 谢维信, 黄建军. 城市彩色航空影像中的阴影检测[J]. 中国体视学与图像分析, 2003, 8(3): 129-134. Liang Tang, Weixin Xie, Jianjun Huang. Shadow Detection in Urban Color Aerial Image. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis.
- [10] A C Hurlbert, T Poggio. Synthesizing a color algorithm from examples[J]. Science, 1988, 239(4839): 482-485.

作者简介:



唐 亮 男, 1975 年 4 月生于四川达州, 清华大学自动化系博士后, 2004 年于西安电子科技大学获工学博士学位, 当前主要研究兴趣为计算机视觉、图像处理和模式识别等, 已发表学术论文十余篇. E-mail: tt@tsinghua.edu.cn.



谢维信 男, 深圳大学信息工程学院教授、博士生导师, 深圳大学校长, 主要从事信号和图像处理、智能信息处理、模糊信息处理等方面的研究, 已发表学术论文百余篇, 出版学术专著数部, 并获多项科研奖励.