

# 彩色图像分割方法综述

林开颜<sup>1)</sup> 吴军辉<sup>1)</sup> 徐立鸿<sup>1),2)</sup>

<sup>1)</sup>(同济大学现代农业科学与工程研究院,上海 200092) <sup>2)</sup>(同济大学控制科学与工程系,上海 200092)

**摘要** 由于彩色图像提供了比灰度图像更为丰富的信息,因此彩色图像处理正受到人们越来越多的关注。彩色图像分割是彩色图像处理的重要问题,彩色图像分割可以看成是灰度图像分割技术在各种颜色空间上的应用,为了使该领域的研究人员对当前各种彩色图像分割方法有较全面的了解,因此对各种彩色图像分割方法进行了系统论述,即先对各种颜色空间进行简单介绍,然后对直方图阈值法、特征空间聚类、基于区域的方法、边缘检测、模糊方法、神经网络、基于物理模型方法等主要的彩色图像分割技术进行综述,并比较了它们的优缺点,通过比较发现模糊技术由于能很好地表达和处理不确定性问题,因此在彩色图像分割领域会有更广阔的应用前景。

**关键词** 彩色图像分割 颜色空间 直方图阈值化 边缘检测 模糊方法 神经网络

**中图法分类号**: TP391.41 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2005)01-0001-10

## A Survey on Color Image Segmentation Techniques

LIN Kai-yan<sup>1)</sup>, WU Jun-hui<sup>1)</sup>, XU Li-hong<sup>1),2)</sup>

<sup>1)</sup>(Modern Agricultural Science & Engineering Institute of Tongji University, Shanghai 200092)

<sup>2)</sup>(Control Science & Engineering Department of Tongji University, Shanghai 200092)

**Abstract** Due to color image providing more information than monochrome image, color image processing is being paid more and more attention. Image segmentation is critical to image processing and pattern recognition, so all the typical approaches are presented and discussed in this paper. Basically, color image segmentation techniques are based on monochrome ones operating in different color spaces. This paper first reviewed some major color representation methods, then summarized the major color image segmentation approaches including histogram thresholding, characteristic feature clustering, region-based approaches, edge detection, fuzzy techniques, neural networks, physics-based method. The merits and drawbacks of the methods were discussed too. Fuzzy set theory provides a mechanism to present and manipulate uncertainty and ambiguity, which is desirable for image processing. So, the fuzzy approaches will have a promising application in the color image segmentation area.

**Keywords** color image segmentation, color space, histogram thresholding, edge detection, fuzzy techniques, neural networks

## 1 引言

图像分割是图像分析和模式识别的首要问题,也是图像处理的经典难题之一,它是图像分析和模式识别系统的重要组成部分,并决定图像的最终分

析质量和模式识别的判别结果。所谓图像分割是指将图像中具有特殊意义的不同区域分离开,并使这些区域相互不相交,且每个区域应满足特定区域的一致性条件。

**定义**<sup>[1,2]</sup> 对一幅图像  $g(x, y)$  ( $0 \leq x \leq x_{\max}$ ,  $0 \leq y \leq y_{\max}$ ) 进行分割就是将图像划分为满足如下

收稿日期:2003-08-28; 改回日期:2004-06-29

**第一作者简介**: 林开颜(1975 ~ ), 男, 先后于1998年、2001年获长春光学精密机械学院机械设计与制造专业工学学士学位、机械电子工程专业工学硕士学位, 2004年获同济大学控制理论与控制工程专业博士学位, 现在同济大学现代农业科学与工程研究院工作。研究方向为智能控制理论与技术、农业计算机视觉技术等。E-mail: ky.lin@163.com; linkaiyan@yahoo.com.cn

条件的  $N$  个子区域  $g_i(x, y), i=1, 2, \dots, N$ ,

(1)  $\bigcup_{i=1}^N g_i(x, y) = g(x, y)$ , 即由所有子区域组成整幅图像;

(2)  $g_i(x, y)$  是连通的区域, 连通性是指在该区域内存在连接任意两点的路径;

(3)  $g_i(x, y) \cap g_j(x, y) = \emptyset (i, j=1, 2, \dots, N, i \neq j)$ , 即任意两个子区域不存在公共元素;

(4) 区域  $g_i(x, y)$  满足一定的均匀性条件, 所谓均匀性 (或相似性) 是指区域内所有像素点满足灰度、纹理、颜色等特征的某种相似性准则。

因为人眼对亮度具有适应性, 即在一幅复杂图像的任一点上只能识别几十种灰度级, 但可以识别成千上万种颜色, 所以许多情况下, 单纯利用灰度信息无法从背景中提取出目标, 还必须借助于色彩信息。由于彩色图像提供了比灰度图像更加丰富的信息, 因此随着计算机处理能力的快速提高, 彩色图像处理正受到人们越来越多的关注。

## 2 颜色特征空间

众所周知, 人眼所感知的色彩是由通常称为三基色的红 (R)、绿 (G)、蓝 (B) 3 种颜色混合而成。RGB 适合于显示系统, 但不适合于图像分割和分析, 因为 R、G、B 3 个分量是高度相关的, 即只要亮度改变, 3 个分量都会相应改变, 而且, 由于 RGB 是一种很不均匀的颜色空间, 所以两种颜色之间的知觉差异 (色差) 不能表示为该颜色空间中两点间的距离, 而利用线性或非线性变换, 则可以由 RGB 颜色空间推导出其他的颜色特征空间。目前虽有多种颜色空间用于彩色图像处理, 但由于无论哪一种都无法替代其他的颜色空间而适用于所有彩色图像处理, 故选择最佳的颜色空间是彩色图像分割的一个难题<sup>[3]</sup>。

线性变换空间有 YIQ、YUV、 $I_1 I_2 I_3$ <sup>[4]</sup> 等, 它们部分消除了 RGB 的相关性, 由于其是线性变换, 因此计算量小, 其中, Y 分量常用于边缘检测, 而  $I_1 I_2 I_3$  则能够有效地用于彩色图像处理。

非线性变换空间有 HSI (HSB、HSL、HSV 为 HSI 的变形)、归一化 RGB<sup>[5]</sup> (normalized RGB, Nrgb)、 $Y T_1 T_2$ <sup>[6]</sup> (另一种归一化颜色空间)、均匀颜色空间 CIE( $L^* a^* b^*$ ) 及 CIE( $L^* u^* v^*$ ) 等, 其中 HSI 与人眼的色彩感知相吻合, 其在一些照明不均的场合特

别有用, 因色调与高亮、阴影无关, 色调对区分不同颜色的物体非常有效; Nrgb 虽降低了图像亮度对色彩的影响, 但不足之处是在低亮度情况下对噪声敏感; CIE 是一种均匀颜色空间, 能够直接用颜色空间的几何距离进行不同颜色的比较, 因此可有效地用于测量小的色差。虽然非线性变换空间消除了 3 个颜色分量间的相关性, 适合于图像处理, 但由于其是非线性变换, 因此计算量较大, 且颜色空间存在奇异点问题。

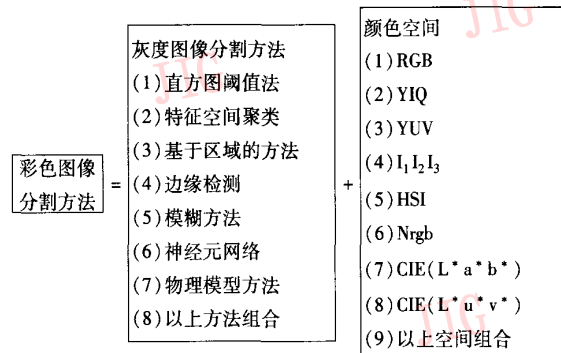


图 1 常用彩色图像分割方法

Fig. 1 The typical color image segmentation techniques

## 3 彩色图像分割方法

目前, 彩色图像分割有多种分类方法, 如把图像分割问题看作是基于颜色和空间特征的分类问题, 可以分为有监督和无监督分类问题。Power 等将有监督学习算法用于不同的颜色空间 (RGB、HSI、Nrgb、混合颜色空间) 进行果实图像分割<sup>[7]</sup>。有监督算法包括最大似然、决策树、K-最近邻、神经网络等。Hance 等比较了自适应阈值法、模糊 C-均值、球坐标变换/中心分裂、主分量变换 (principal components transform, PCT)、分裂合并、多分辨率等 6 种无监督彩色图像分割方法在边界识别算法中的效率, 结果显示, 自适应阈值法、主分量变换具有较低的错误分割率, 若将不同的方法相结合则可以进一步提高肿瘤边界的正确识别率, 并且在合并过程中加入启发算法还可以潜在地提高成功率<sup>[8]</sup>。Pal 等对彩色图像分割进行了简要介绍<sup>[9]</sup>, 并称彩色图像可以作为多光谱图像的一个特例, 且任何适用于多光谱图像的分割方法都可以用于彩色图像分割。

另外, 大部分的灰度图像分割技术 (如直方图

阈值法、聚类、区域增长、边缘检测、模糊方法、神经元网络等)也可以扩展到彩色图像。目前,许多彩色图像分割方法不仅把灰度图像分割方法应用于不同的颜色空间,而且可以直接应用于每个颜色分量上,其结果再通过一定的方式进行组合,即可获取最后的分割结果<sup>[10]</sup>。本文将按图1所示的分类方法对彩色图像分割展开论述。

### 3.1 直方图阈值化

直方图阈值法是灰度图像广泛使用的一种分割方法,它基于对灰度图像的这样一种假设:目标或背景内部的相邻像素间的灰度值是相似的,但不同目标或背景上的像素灰度差异较大,其反映在直方图上,就是不同目标或背景对应不同的峰。分割时,选取的阈值应位于直方图两个不同峰之间的谷上,以便将各个峰分开。Ohlander等提出了一种多维直方图阈值化方案<sup>[11]</sup>,其阈值是从不同的颜色空间(RGB、YIQ、HSI)中选取,并用于区域分裂。对于每个要分裂的区域,先计算 $R$ 、 $G$ 、 $B$ 、 $Y$ 、 $I$ 、 $Q$ 、 $H$ 、 $S$ 、 $I$ 等9个特征量的直方图后,再确定每个直方图的峰值,然后选出具有最佳峰值的直方图,并从中确定出一个阈值来将要分裂的区域一分为二,对于新分裂出的子区域重复同样的过程,直至每个区域都是相似的,不能再进行分裂为止。Guo等对图像数据在多维特征空间的多峰概率密度函数,则采用基于直方图熵的方法来确定峰和谷<sup>[12]</sup>。

与灰度图像不同的是,彩色图像有3个颜色分量,其直方图是一个3维数组,在这样的直方图中确定阈值是比较困难的。一种解决方法是将3维空间往低维空间投影,Underwood等把3维颜色空间( $X$ ,  $Y$ ,  $I$ )投影到2维平面( $X$ - $Y$ 、 $X$ - $I$ 、 $Y$ - $I$ )<sup>[13]</sup>,以便从航空彩色图像中交互地检测出果园中植物的病害情况。Kurugollu等提出了一种多频谱图像分割方法<sup>[14]</sup>,即对于彩色图像,首先选取 $F_{RG}$ 、 $F_{RB}$ 、 $F_{GB}$ 为频谱子集,并在计算3个频谱子集的2维直方图后,再进行多阈值化处理,然后利用融合算法对根据3个子集的2维直方图分割的图像进行合成。对于频谱数较多的图像,可以利用主分量变换(K-L变换)将频谱数减少到3。

如果阈值化操作只是在单个颜色分量上进行,则由于忽略了3个颜色分量间的相关性,因此提取区域不能同时考虑3个颜色分量的信息。若能够找到一条直线,使得投影在其上的3维空间的点能够很好地分开,这样既能对颜色空间进行降维处理,又

可以同时利用3个颜色分量的信息。Celenk利用Fisher线性判别来确定这样一条直线,用于1维直方图阈值化<sup>[15]</sup>,它是在CIE( $L^*a^*b^*$ )3维颜色空间中进行操作的,即先利用定义在CIE( $L^*a^*b^*$ )空间上的H、S、I3个分量的1维直方图来估计像素点在3维颜色空间分布的圆形柱面体单元的形状,并将每个柱面单元内的像素点投影到Fisher线性判别方法所确定的直线上,再利用1维直方图阈值化方法就可以对柱面单元所确定的区域进行分割。由于这种方法可以同时利用所有的颜色信息,因此有效地减少了聚类的错误率,类似的应用还可参见文献<sup>[16,17]</sup>。

直方图阈值法不需要先验信息,且计算量较小,但缺点是:(1)单独基于颜色分割得到的区域可能是不完整的;(2)在复杂图像的各个分量直方图中并不一定存在明显的谷,用来进行阈值化分割;(3)当像素颜色映射到3个直方图的不同位置时,颜色信息会发散;(4)没有利用局部空间信息。

### 3.2 特征空间聚类

特征空间聚类算法不需要训练样本,是一种无监督的统计方法,它是通过迭代地执行分类算法来提取各类的特征值,其中K-均值<sup>[18,19]</sup>、模糊C-均值(Fuzzy C-mean, FCM)<sup>[20]</sup>等是最常用的分类方法。对于彩色图像,颜色空间本身就是一种特征空间,颜色空间聚类方法用于彩色图像分割具有直观易于实现的特点,并且能同时利用3个分量的颜色信息,但它的最大问题是要事先确定聚类数目,即需先进行聚类的有效性分析。对于FCM,目前已有不少分类指标,如基于隶属度矩阵的分割系数(partition coefficient, PC)和分割熵(partition entropy, PE),还有考虑数据点紧密度-分离度(compactness-separation)的Xie-Beni指标和Fukayama-sugno指标,以及将紧密度-分离度和隶属度矩阵特性进行综合的SC指标<sup>[21,22]</sup>。

Carevic等提出了基于如下特征向量的K-均值聚类彩色图像分割方法<sup>[18]</sup>: $K_{x,y} = [\alpha I_1^n(x,y), \alpha I_2^n(x,y), \alpha I_3^n(x,y), \beta \sigma_R^n(x,y), \beta \sigma_G^n(x,y), \beta \sigma_B^n(x,y), \gamma x^n, \gamma y^n]$ ,其中, $(x,y)$ 像素坐标, $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 为 $R$ 、 $G$ 、 $B$ 的线性变换; $\sigma_R(x,y)$ ,  $\sigma_G(x,y)$ ,  $\sigma_B(x,y)$ 为像素 $(x,y)$ 及其8邻域像素的 $R$ 、 $G$ 、 $B$ 的偏差;上标 $n$ 表示该分量归一化为0均值、单位标准偏差的变量。该特征量既考虑了空间的相关信息,也提供了图像的二阶统计信息,其不仅使得聚类在



空间上是连续的,并且通过调整控制因子 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 还可以提高聚类性能。这种在特征向量中考虑与邻域像素关系的方法还可见参考文献[23]。

Lim 等把直方图阈值化和 FCM 相结合用于彩色图像分割<sup>[24]</sup>,并分为粗分和细分两个阶段。在粗分阶段,先利用尺度空间滤波器来确定各分量的阈值,然后用该阈值把颜色空间分为若干个六面体,当某个六面体包含的像素超过一个预先确定的阈值时,就被认为是一个有效的聚类,而直方图中的峰值则可以用于确定聚类中心;细分阶段,则根据在粗分阶段所确定的聚类中心,再利用 FCM 算法来对未被划分的像素再进行分类。这种方法试图先在粗分阶段确定聚类的数目和中心点,以及解决 FCM 计算量大的问题,但由于是基于直方图不是单峰的这一种假设,因此与大多数直方图方法具有同样的缺点。为了提高 FCM 的运算速度,刘健庄等在图像数据集上建立了一种塔型结构,并先将每一层四邻域的颜色均值作为上层像素点的颜色值,然后用塔顶端的数据来进行聚类<sup>[25]</sup>,这虽然提高了运算速度,但由于其是一种降低图像分辨率的做法,从而导致了图像有用信息的丢失。林开颜等利用分层减法聚类方法把图像数据分成一定数量的色彩相近的子集<sup>[26]</sup>,一方面,子集中心用于初始化聚类中心点;另一方面,利用子集中心点和分布密度来进行模糊聚类,由于聚类样本数量显著减少以及分层减法聚类计算量小,故可以大幅提高模糊 C-均值算法的计算速度,进而可以利用聚类有效性分析指标来快速确定聚类数目。与传统 FCM 算法每次迭代都要对所有聚类中心同时进行优化不同的是,Chen 等提出了一种新的模糊聚类算法<sup>[27]</sup>,即在算法中的隶属度函数考虑了与其他类的关系,由于聚类中心可逐一通过迭代优化产生,故减少了计算量。

Michael 等在分析向量量化和聚类关系的基础上,以最小平方和作为准则,利用竞争学习优化的权向量作为聚类中心,实现了彩色图像分割<sup>[28]</sup>,并讨论了不同颜色空间变换对于图像分割结果的影响。

虽然聚类分析不需要训练集,但需要事先确定分类个数,且初始参数对分类结果影响较大;另一方面,由于聚类也没有考虑空间信息,因而对噪声敏感。

### 3.3 基于区域的方法

#### 3.3.1 区域生长、区域分裂、合并及两者的组合

区域生长的基本思想是将具有相似性质的像素集合起来构成区域,而区域分裂技术则是将种子区域

不断分裂为 4 个矩形区域,直到每个区域内部都是相似的为止。区域合并通常和区域生长、区域分裂技术相结合,以便把相似的子区域合并成尽可能大的区域。当图像区域的同一性准则容易定义时,则这些方法分割质量较好,并且不易受噪声影响。典型的同一性准则是通过统计的方法确定的,文献[4,11,15]利用区域分裂的方法进行图像分割,其所用同一性准则是用颜色分量的 1 维直方图来确定的。

Tremeau 等提出了一种将区域生长和区域合并技术相结合的彩色图像分割方法<sup>[29]</sup>,即先利用 RGB 颜色空间的欧氏距离定义了 3 个色彩同一性准则,并将其分别用于两个相邻像素之间、某个像素与已定义的相邻区域内像素之间以及其均值的比较。分割时,先利用基于颜色相似度和空间相近度的准则进行区域生长,然后根据基于色彩相似性的全局同一性准则来对区域生长形成的区域进行合并,以生成空间分离、但色彩相近的分割区域。这种方法缺点是这些准则所对应阈值的选取具有主观性,并且不适合分割具有阴影区域的图像。为了识别彩色图像中的小目标和局部变化,Cheng 等提出了一种分层的分割方法<sup>[30]</sup>,即通过对同一性直方图进行阈值化操作来辨识同一个区域,并将同一性定义为亮度  $I$  的偏差(像素邻域内的亮度标准偏差)和突变(像素亮度 Sobel 算子的梯度模)两个变量的函数。这两种方法由于同时考虑了局部信息和全局信息,故分割质量较好。

区域生长的固有缺点是分割效果依赖于种子点的选择及生长顺序,区域分裂技术的缺点是可能会使边界被破坏。由于相似性通常是用统计的方法确定的,因而这些方法对噪声不敏感。

#### 3.3.2 分水岭分割方法

分水岭(watershed)是地形学的经典概念,也是图像形态学的一个主要算子。在图像处理领域,计算分水岭的算法有很多,其中,典型的一种方法是基于浸没模拟(immersion simulation)<sup>[31]</sup>思想,即把图像视为地形表面,像素的灰度对应于地形高度,其局部最小值对应地形的洞。设想将地形表面浸入一个湖中,从最小值开始,水会逐渐充满各个不同的聚水盆地,当来自相邻聚水盆地的水要合并时,若在该处建立一个堤坝,则浸没结束时,所建立的堤坝就对应于区域的轮廓,而聚水盆地则对应分割区域。

在分水岭的分割方法中,需首先进行标记提取,然后对待分割图像的梯度信号使用分水岭算法来分

割出已被标记的感兴趣的物体。这种标记选取不仅是分水岭算法的一个主要难点<sup>[32]</sup>,而且选取不当会导致图像过分割。为避免过分割,需先选取标记,如今已有不少标记提取方法如 Shafarenko 等通过对原图像进行形态“闭”运算来对“伪”谷底进行填充,以获得更有意义的局部极值点作为标记<sup>[33]</sup>;Shiji 等利用“闭”运算填充后的直方图来产生标记图像,并在标记图像的梯度和原图像特征值变化均比较缓慢的地方选取标记<sup>[34]</sup>;Lezoray 等从贝叶斯分类器分类的结果中选取标记<sup>[32]</sup>;马丽红等则先对图像开闭滤波的结果做二值标记预处理,并将其作为初始分割步骤,然后将所得的分割结果作为分水岭算法的种子(标记)<sup>[35]</sup>等。

### 3.3.3 基于随机场的方法

马尔科夫随机场(Markov random field, MRF)是图像分割中最常用的一种统计学方法,其实质是把图像中各个点的颜色值看成是具有一定概率分布的随机变量。从统计学的角度看,正确分割观察到的图像,就是以最大概率得到图像的物体组合;从贝叶斯定理看,就是要求具有最大后验概率(maximum a posteriori, MAP)的分布。MRF 最重要的一个特点是,图像中每个点的取值是由其邻域像素决定的,其本质上是一种基于局部区域的分割方法。Hammersley-Clifford 定理<sup>[36]</sup>为 MRF 中局部特性的条件概率和 Gibbs 分布中的局部势能之间建立了等价关系,这样,MAP 的求解就转变为极小化一个势能函数的优化问题。常用的 MAP 求解方法有模拟退火(simulated annealing, SA)<sup>[36]</sup>、迭代条件模式(iterated conditional modes, ICM)<sup>[37]</sup>、最大期望(expectation maximization, EM)<sup>[38,39]</sup>等。

与文献[24]的方法相类似,文献[40,5]均把图像分割过程分为粗分和细分两阶段,即先利用尺度空间滤波器(scale space filter, SSF)进行粗分割,然后利用 MRF 进行精细分割。尺度空间滤波器的作用有:(1)获取细分阶段所需的聚类信息,包括聚类数目和范围;(2)获取粗分图像。在文献[40]中,就是利用 SSF 和 MRF 分别对每个颜色分量进行处理,其结果再进行合并,粗分结束后,未分类的像素再利用 MRF 进行细分,并对 SA 和 ICM 两种方法进行了比较,该方法的缺点是,3 个分量分开处理,并且 MRF 只在像素级上使用,而在文献[5]中,3 个颜色分量均同时用于整个分割过程,在细分阶段,则利用 MRF 和四叉树结构相结合的方法来实现多分辨率

分割,其中,粗分的结果用于初始化四叉树,模拟退火算法用于控制节点的分裂与合并。这类方法由于 MRF 所操作的数据量较小,因而速度快。

与阈值法和聚类分析相比,由于基于区域的方法同时考虑了图像的颜色信息和空间关联信息,因此分割效果较好。

### 3.4 边缘检测

边缘检测是灰度图像分割广泛使用的一种技术,它是基于在区域边缘上的像素灰度变化比较剧烈,试图通过检测不同区域的边缘来解决图像分割问题。在灰度图像中,边缘的定义是基于灰度级的突变,而且两个区域的边缘当亮度变化明显时才能被检测出来。在彩色图像中,用于边缘检测的信息更加丰富,如具有相同亮度、不同色调的边缘同样可以被检测出来,相应地,彩色图像边缘的定义也是基于 3 维颜色空间的不连续性。Nevatia 给出了 3 种定义边缘的方法<sup>[6]</sup>:(1)首先在选定的颜色空间上定义一个测量距离,然后利用颜色空间中距离的不连续性来确定边缘,由于这使得颜色空间的边缘检测仍然限制在 1 维空间中进行,因此,其边缘检测结果与相应灰度图像的边缘检测结果不会有太大差异;(2)把彩色图像看成是由 3 个不同颜色分量对应的单色图像组成,然后利用灰度边缘检测方法分别对 3 个图像进行边缘检测,其结果再经过特定的方法进行合成;(3)允许边缘在 3 个分量上具有较大的独立性,同时施加某种同一性约束(如边缘具有相同方向),以便能够同时利用边缘的颜色信息。Nevatia 扩展了 Hueckel 算子<sup>[41]</sup>,并将其用于色度边缘检测,通过实验表明,亮度分量虽可以检测出大部分边缘信息,但是在低对比度的图像中,亮度边缘会丢失,而色度边缘则不会,这是因为色度信息不易受光照变化影响的缘故。

现有的灰度边缘检测技术可以直接应用于彩色图像的 3 个分量上,其结果再根据一定的方法进行合并<sup>[6]</sup>,常用的合并方法有均方根、求和、取最大绝对值、“或”运算等<sup>[42~44]</sup>,这种分别处理 3 个颜色分量的方法,从本质上讲,还是一种灰度边缘检测的方法,有可能得不到满意的结果,如利用梯度边缘算子进行边缘检测,则图像中的某一个点在 3 个图像中虽具有相同的梯度模,却可能有不同的方向。对于该问题,一种解决办法是把彩色图像看成是一个向量场,如 Trahanias 等就基于有序向量样本线性组合的幅值定义了一类边缘检测算子<sup>[45]</sup>;另一种方法是

降维处理,文献[46,10]先把图像分成互不重叠的许多小区块(如 $5 \times 5$ ),然后对于每个小区块图像,再利用矩量保持法将其分成两个子块,同时计算子块的质心,并将其作为代表向量,当这两个代表向量的距离超过给定阈值时,则表明这个小区块图像中存在彩色边缘。此时,先把两个代表向量作差,然后将小区块内像元的彩色向量在这个差向量上进行投影,最后再进行边缘检测,如此不仅可把3维空间降为1维处理,同时还利用了3个分量的颜色信息。

当区域对比明显时,分割效果较好,反之,较差。另外,边缘检测方法常和基于区域的方法相结

合<sup>[47]</sup>,以避免过分割和提高分割质量。

### 3.5 模糊技术

大家知道,在图像分析和模式识别的每一级别上都会出现不确定性,这种不确定性会在底层传感器输出端产生,并沿着计算机视觉的处理顺序逐级延伸<sup>[48]</sup>(如图2所示)。由于每一级的决策都是基于前一级的处理结果,因而其处理结果同样会影响更高一层的处理。计算机视觉系统应该有足够的能力处理每一层的不确定性,并使其处理结果能够保留尽可能多的信息,以确保视觉系统的最终输出不会产生太大偏差。

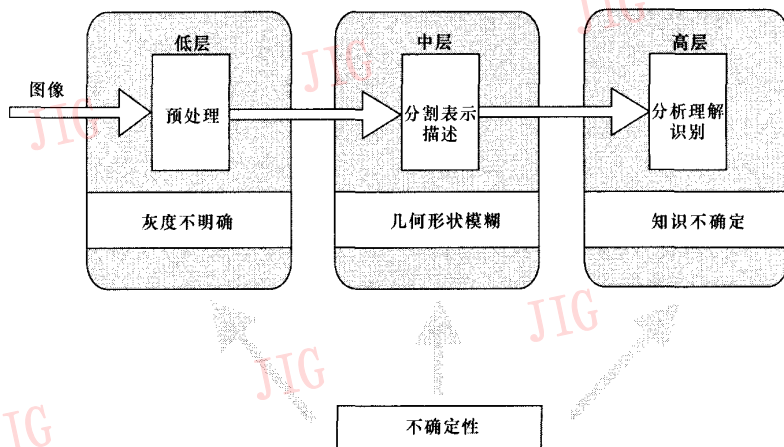


图2 图像处理中的不确定性

Fig. 2 Uncertainty in color image processing

随机性和模糊性是两种不同的不确定性,概率论用于处理前者,而模糊集合则用于处理后者。由于模糊集合理论能够很好地表述和处理不确定性问题,故模糊测度、模糊集合理论、模糊推理<sup>[49]</sup>等已在图像分割领域获得广泛应用。Prewitt 最早建议应该用模糊集合替代常规集合来表示图像分割结果<sup>[9]</sup>。由于在模糊集合中,图像的一个像素属于边界点或某个区域是用一个隶属度表示的,因此这样就可避免过早地做出明确判断,以便为更高级的处理保留尽可能多的信息。源于模糊集合的概念,Sugeno 提出了模糊测度和模糊积分<sup>[50]</sup>概念,与概率测度作为随机性度量指标相对应,模糊测度用于度量模糊程度,而基于模糊测度的特性,模糊积分则是模糊信息多种属性的一种聚合算子。模糊积分可以理解为模糊期望,或者是客观事实与期望的最大一致程度。Pham 等把模糊积分看成是某个目标属于一个特定类的最大置信度,并将模糊积分作为山峰聚类中“距离”的测度,用于度量彩色图像数据间的相似

程度<sup>[51]</sup>。

隶属度函数可方便地用于定义同一性准则,Moghaddamzadeh 等把边缘检测和区域增长相结合,用于确定大的、且有明确边界的区域,并把一个分割区域看作为“色彩几乎相同,且变化缓慢的像素集合”,同时在 RGB 颜色空间中用欧氏距离定义了两种颜色差异的隶属度函数,然后将其用于定义区域增长的同时性准则<sup>[52]</sup>,但由于 R、G、B 分量高度相关,在 RGB 空间用欧氏距离定义两种颜色差异并非是一种好的方法。Cheng 等针对每个颜色分量,首先利用拉普拉斯算子和局部邻域标准偏差来定义模糊同一性(fuzzy homogeneity),其值越大,表明局部区域越均匀;然后对于模糊同一性直方图,再利用尺度空间滤波器确定分割阈值,最后对分割后的图像再进行区域合并,以防止过分割<sup>[53]</sup>。

图像中的色彩可以用模糊集合表示,如耿伯英等提出了一种基于模糊主色调的彩色图像分割方法<sup>[54]</sup>,即利用各类模糊主色调在各属性中所占比例



的不同来构造一个动态颜色查找表,并先由像元的颜色值求得所对应的模糊主色调值,再由该值查颜色表确定其所属的类别。Chien 等提出了一种基于模糊颜色相似测度的彩色图像分割方法<sup>[55]</sup>,即首先在 HLS 颜色空间上定义了一个模糊颜色集合,这样图像中的任何一个像素都可以用一个模糊颜色集合表示,然后利用两个模糊集合的相似测度<sup>[56]</sup>来度量两个像素模糊颜色的相似程度,最后以该模糊相似测度为准则反复合并相邻像素,以形成有意义的区域。

模糊推理可方便地用于边缘检测,Carron 等基于 IF-THEN 规则,在 HSI 空间中提出了一种彩色边缘检测方法<sup>[49]</sup>,即先利用线性的模糊隶属函数来描述两个像元在各分量上的绝对差异,然后定义若干个  $3 \times 3$  的边缘结构,并使每个结构对应一条模糊规则,再根据这些规则通过推理来得出代表某个分量潜在边缘的模糊集合。推理时,一个像元可能在 1 个、2 个甚至 3 个分量上被检测出是边缘点,若对每一种情况的推理结果进行加权求和,则可求得表示彩色边缘点的模糊集合。Ito 等利用  $H$  和  $I$  两个分量进行边缘检测<sup>[57]</sup>,分量  $I$  可以检测出大部份边缘,但对于相同亮度不同色调的区域,则需用分量  $H$ 。隶属度函数可通过直方图确定,同样地,6 个  $3 \times 3$  的潜在边缘结构对应 6 条模糊规则,另外,还可将边缘检测的结果再和区域抽取方法相结合,以提高分割质量。

虽然模糊技术为处理图像种的不确定性问题提供了一种有效方法,但模糊运算需占用一定时间。

### 3.6 人工神经网络

人工神经网络 (artificial neural networks, ANN) 因其具有并行处理能力和非线性特点而特别适合于解决分类问题。Huang 提出了利用最小化一个合适能量函数的 Hopfield 神经网络来进行灰度图像分割<sup>[58]</sup>,Campadelli 等基于 Huang 的思想,提出了用于彩色图像分割的两种 Hopfield 神经网络分割算法<sup>[59]</sup>,其中一种是将 3 个颜色分量分别利用 Huang 的方法进行分割,其结果再进行合并;另一种是将 3 个分量作为一个整体进行处理。两者均采用同样的网络结构,设图像大小为  $M \times N$ ,  $S$  为分割区域数,则整个网络的神经元个数为  $M \times N \times S$ ,共分为  $S$  层,每个神经元的输出  $V_i(x, y)$  表示像素  $p(x, y)$  属于第  $i$  类的概率。这种方法由于在能量函数中考虑了空间信息,因而使得分割区域具有较好的连续性,但需

要用直方图分析来确定分类个数,以便于确定网络结构和进行初始化。Hopfield 网络在彩色图像分割领域的应用可参见文献[60, 61]。Ong 等提出了基于 Kohonen 自组织网络 (self-organizing map, SOM) 的两步分层神经网络彩色图像分割方法<sup>[62]</sup>,SOM 中,图像的 3 个颜色分量作为输入节点。分割步骤为:第 1 步,输出节点为 2 维  $20 \times 20$  的特征映射,图像的每个像素点作为训练样本,串行输入到网络中,网络收敛后即可完成图像的粗分割;第 2 步,输出节点为 1 维 20 个神经元,先以第 1 层的输出作为训练样本,网络收敛后其连接权即为聚类的中心,然后再把相似的聚类中心进行合并。合并后的网络连接权用于分割图像,分割时,把原始图像的每个点输入到网络中,其颜色用胜出的连接权替代,即可完成彩色图像的分割。为增加 SOM 网络的判别能力,Papamarkos 等在 SOM 前增加了一个单层 3 个节点的前馈网络,以实现主分量变换<sup>[63]</sup>,其颜色分量的协方差矩阵不需另外计算,可以通过网络训练得到的特征向量获得。反向传输 BP (back propagation) 网络也可以用于图像分割,其输入需要 3 个节点,彩色特征向量以一次一个像素的方式连续输入 BP 网,Lescure 等提出了用于彩色图像分割的 BP 网络结构以及训练方法<sup>[64]</sup>,并且将 BP 网的分割方法与 C-均值算法及学习向量量化 (learning vector quantization, LVQ) 进行了比较。

神经网络方法的出发点是将图像分割问题转化为诸如能量最小化、分类等问题,即先利用训练样本集对 ANN 进行训练,再用训练好的 ANN 去分割新的图像。另外,由于神经网络中存在大量的连接,因此容易引入空间信息。ANN 的不足是需要大量的训练样本集,而且用现在串行的计算机去模拟 ANN 的并行操作,计算速度往往难以达到要求。

### 3.7 基于物理模型的方法

在现有的彩色图像分割方法中,区域的定义是基于颜色的相似性的,这给分割具有耀斑、阴影区域的彩色图像带来很大困难,因为它们导致了目标表面的不均匀性,即区域边界与目标边界的不一致性。利用 HSI 虽可以在一定程度上解决这个问题,但在低饱和度色调会不稳定。有学者提出了一些基于物理模型的分割方法<sup>[65~69]</sup>以解决这个问题,并在模型中考虑了彩色信息,但由于需要太多约束条件,如光照条件要求高,成像物体表面的反射特性已知,并且易于建模等,因而应用范围有限。

## 4 结 论

对于彩色图像分割需面临如下两个主要问题:(1)选择合适的颜色空间;(2)择恰当的分割方法,其中,颜色特征空间的选择要根据具体的图像和分割方法而定,目前还没有一种颜色空间可以替代其他的空间而适用于所有彩色图像分割,可见选择合适的特征空间是彩色图像分割的一个难题,Li 等对此进行了有益的探索,他利用自组织特征映射(SOFM)网络从5种颜色空间共15个特征中选取有效的特征构成新的特征向量来进行FCM聚类<sup>[70]</sup>,并通过与FCM算法在不同颜色空间对不同图像的分割效果进行比较来表明这种方法的可行性。

本文对主要的彩色图像分割方法进行了综述,包括直方图阈值方法、特征空间聚类、基于区域的方法、边缘检测、模糊方法、神经元网络等,而纹理图像分割见文献[71~74],而且这些分割方法往往相互结合,例如,聚类和模糊方法结合出现了模糊聚类、模糊方法用于定义区域生长准则<sup>[52]</sup>、直方图分析用于确定神经网络结构<sup>[59]</sup>等。目前,对于彩色图像分割,还没有一个统一的方法,现有的方法都是针对特定图像特定应用场合的,换言之,还没有一个通用的分割算法和颜色空间可以胜任所有的彩色图像分割。虽然大部分基于灰度图像的分割方法可以通过扩展而应用于彩色图像分割,也可直接应用于单个颜色分量,其分割结果再利用某种特定方法进行合并,但是,当彩色向量在3个分量上投影时,由于彩色信息会发散而造成信息丢失,因此,如何将彩色信息作为一个整体进行考虑是一个重要问题。

近来,模糊方法在图像分割领域受到越来越多的关注,其应用成果也层出不穷。尽管模糊运算要占用一定的时间,但更重要的是,由于模糊方法是处理图像不确定性的一种有效方法,其不仅可以为更高层的处理(图像分析、图像理解、模式识别)保留更多的信息,而且模糊推理还可以部分模拟人的推理能力,因此,随着计算机处理能力的提高和人们对模糊方法研究的深入,模糊方法在彩色图像处理领域必将有更广阔的应用前景。另外,由于光照变化会影响成像目标的表面颜色,而有些应用场合,如机器人视觉系统,则要求分割算法能够消除光照的影响,故基于颜色恒常性<sup>[75~78]</sup>的分割算法正受到越来越多的关注。

## 参考文献(References)

- 1 Lou X P, Tian J, Zhu G Y, *et al.* A survey on image segmentation techniques [J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 1999, **12**(3):300~312. [罗希平,田捷,诸葛婴等. 图像分割方法综述[J]. 模式识别与人工智能,1999, **12**(3):300~312].
- 2 Lin Y, Tian J. A survey on medical image segmentation methods[J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2002, **15**(2):192~204. [林瑶,田捷. 医学图像分割方法综述[J]. 模式识别与人工智能,2002, **15**(2):192~204].
- 3 Cheng H D, Jiang X H, Sun Y, *et al.* Color image segmentation: advances and prospects [J]. *Pattern Recognition*, 2001, **34**(12):2259~2281.
- 4 Ohta Y, Kanade T, Sakai T. Color information for region segmentation[J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1980, **13**(3):222~241.
- 5 Liu J Q, Yang Y H. Multiresolution color image segmentation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1994, **16**(7):689~700.
- 6 Nevatia A. A color edge detector and its use in scene segmentation[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1977, **7**(11):820~826.
- 7 Power W, Clist R. Comparison of supervised learning techniques applied to color segmentation of fruit image[A]. In: *Proceeding of SPIE, Intelligent Robots and Computer Vision. XV: Algorithms, Techniques, Active Vision, and Material Handling* [C]. Boston, MA, USA, 1996:370~381.
- 8 Hance G A, Umbaugh S E, Moss R H, *et al.* Unsupervised color image segmentation with application to skin tumor borders[J]. *IEEE Engineering in Medicine and Biology*, 1996, **15**(1):104~111.
- 9 Pal N R, Pal S K. A review on image segmentation techniques [J]. *Pattern Recognition*, 1993, **26**(9):1277~1294.
- 10 Yang C K, Tsai W H. Reduction of color space dimensionality by moment-preserving thresholding and its application for edge detection in color images[J]. *Pattern Recognition Letters*, 1996, **17**(5):481~490.
- 11 Ohlander R, Price K, Reddy D R. Picture segmentation using a recursive region splitting method [J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1978, **8**(3):313~333.
- 12 Guo G D, Yu S, Ma S D. Unsupervised segmentation of color images [A]. In: *Proceeding of 1998 IEEE International Conference on Image Processing* [C]. Chicago, IL, USA, 1998:299~302.
- 13 Underwood S A, Aggarwal J K. Interactive computer analysis of aerial color infrared photographs [J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1977, **6**(1):1~24.
- 14 Kurugollu F, Sankur B, Harmanci A E. Color image segmentation using histogram multithresholding and fusion [J]. *Image and Vision Computing*, 2001, **19**(13):915~928.
- 15 Celenk M. A color clustering technique for image segmentation [J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1990, **52**(2):145~170.
- 16 Ahuja N, Haralick R M, Rosenfeld A. Neighbor gray levels as features in pixel classification [J]. *Pattern Recognition*, 1980,



- 13(4):251~260.
- 17 Liu C Q, Cheng H. An efficient clustering method for color image segmentation [J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 1995, **8**(A01):133~138. [刘重庆,程华. 分割彩色图像的一种有效聚类方法[J]. 模式识别与人工智能, 1995, **8**(A01):133~138.]
- 18 Carevic D, Caelli T. Region-based coding of color image using Karhunen-Loeve Transform [J]. *Graphics Models and Image Processing*, 1997, **59**(1):27~38.
- 19 Wang X W, Shen L S, Wei B G, *et al.* The focus segmentation of color ophthalmologic image based on modified K-means clustering and mathematical morphology [J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2002, **21**(5):443~448. [王兴伟,沈兰荪,卫保国等. 基于改进的K-均值聚类和数学形态学的彩色眼科图像病灶分割[J]. 中国生物医学工程学报, 2002, **21**(5):443~448.]
- 20 Bezdek J C. *Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms* [M]. New York: Plenum Press, 1981.
- 21 Xie X L, Beni G. A validity measure for fuzzy clustering [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, **13**(8):841~847.
- 22 Zahid N, Limouri M, Esseid A. A new cluster-validity for fuzzy clustering [J]. *Pattern Recognition*, 1999, **32**(5):1089~1097.
- 23 Ferri F, Vidal E. Color image segmentation and labeling through multi-edit condensing [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1992, **13**(8):561~568.
- 24 Lim Y W, Lee S U. On the color image segmentation algorithm based on the thresholding and the fuzzy c-means techniques [J]. *Pattern Recognition*, 1990, **23**(9):935~952.
- 25 Liu J Z, Xie W X. An efficient pyramidal color image segmentation method with fuzzy clustering [J]. *Journal of Xidian University*, 1993, **20**(1):40~46. [刘健庄,谢维信. 高效的彩色图像塔形模糊聚类分割方法[J]. 西安电子科技大学学报, 1993, **20**(1):40~46.]
- 26 Lin K Y, Xu L H, Wu J H. A fast fuzzy C-means clustering for color image segmentation [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2004, **9**(2):159~163. [林开颜,徐立鸿,吴军辉. 快速模糊C均值聚类彩色图像分割方法[J]. 中国图象图形学报, 2004, **9**(2):159~163.]
- 27 Chen T Q, Lu Y. Color image segmentation——An innovative approach [J]. *Pattern Recognition*, 2002, **35**(2):395~405.
- 28 Michael T U, Arbib A. Color image segmentation using competitive learning [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1994, **16**(12):1197~1206.
- 29 Treméau A, Borel N. A region growing and merging algorithm to color segmentation [J]. *Pattern Recognition*, 1997, **30**(7):1191~1203.
- 30 Cheng H D, Sun Y. A hierarchical approach to color image segmentation using homogeneity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, **9**(12):2071~2082.
- 31 Vincent L, Soille P. Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, **13**(6):583~598.
- 32 Lezoray O, Cardot H. Cooperation of color pixel classification schemes and color watershed: a study for microscopic images [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, **11**(7):783~789.
- 33 Shafarenko L, Petrou M, Kittler J. Automatic watershed segmentation of randomly textured color images [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, **6**(11):1530~1544.
- 34 Shiji A, Hamada N. Color image segmentation method using watershed algorithm and contour information [A]. In: *Proceeding of 1999 IEEE International Conference on Image Processing* [C]. Kobe, Japan, 1999:305~309.
- 35 Ma L H, Zhang Y, Deng J P. A target segmentation algorithm based on opening-closing binary marker on watersheds and texture merging [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2003, **8**(1):77~83. [马丽红,张宇,邓健平. 基于形态开闭滤波二值标记和纹理特征合并的分水岭算法[J]. 中国图象图形学报, 2003, **8**(1):77~83.]
- 36 Geman S, Geman D. Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1984, **6**(11):721~741.
- 37 Besag J. On the statistical analysis of dirty pictures [J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1986, **48**(3):259~302.
- 38 Celeux G, Forbes F, Peyrard N. EM procedures using mean field-like approximations for Markov model-based image segmentation [J]. *Pattern Recognition* 2003, **36**(1):131~144.
- 39 Zhang Y, Brady M, Smith S. Segmentation of brain MR images through a hidden Markov random field model and the expectation-maximization algorithm [J]. *IEEE Transactions on Medical Image*, 2001, **20**(1):45~57.
- 40 Huang C L, Cheng T Y, Chen C C. Color images segmentation using scale space filter and Markov random field [J]. *Pattern Recognition*, 1992, **25**(10):1217~1229.
- 41 Hueckel M H. A local visual operator which recognizes edges and lines [J]. *Journal of Association for Computing Machinery*, 1973, **20**(4):634~647.
- 42 Zeno S D. A note on the gradient of a multi-image [J]. *Computer Vision, and Image Processing*, 1986, **33**(1):116~128.
- 43 Shiozaki A. Edge extraction using entropy operator [J]. *Computer Vision, and Image Processing*, 1986, **36**(1):1~9.
- 44 Fan J, Aref W G, Hacid M S, *et al.* An improved automatic isotropic color image detection technique [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2001, **22**(13):1419~1429.
- 45 Trahanias P E, Venetsanopoulos A N. Color edge detection using vector order statistics [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1993, **2**(2):259~265.
- 46 Tsai P, Chang C C, Hu Y C. An adaptive two-stage edge detection scheme for digital color images [J]. *Real-Time Imageing*, 2002, **8**(4):329~343.
- 47 Pavlidis T, Liow Y T. Integrating region growing and edge detection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, **12**(3):225~233.
- 48 Tizhoosh H R. *Fuzzy image processing* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1997.
- 49 Carron T, Lambert P. Fuzzy color edge extraction by inference rules quantitative study and evaluation of performances [A]. In: *Proceedings of the 1995 International Conference on Image Processing* [C]. Washington DC, USA, 1995, **2**:181~184.
- 50 Sugeno M. Fuzzy measures and fuzzy integrals—a survey [A]. In:

- Fuzzy Automata and Decision Processes [M]. New York: North-Holland, 1977; 89 ~ 102.
- 51 Pham T D, Yan H. Color image segmentation using fuzzy integral and mountain clustering[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1999, **107**(2): 121 ~ 130.
  - 52 Moghaddamzadeh A, Bourbakis N. A fuzzy region growing approach for segmentation of color images[J]. Pattern Recognition, 1997, **30**(6): 867 ~ 881.
  - 53 Cheng H D, Li J. Fuzzy homogeneity and scale-space approach to color image segmentation[J]. Pattern Recognition, 2003, **36**(7): 1545 ~ 1562.
  - 54 Geng B Y, Lu J F, Yang J Y. An approach to color image segmentation based on fuzzy domain color and road detection[J]. Journal of Njing University of Science and Technology, 2000, **24**(4): 353 ~ 358.  
[耿伯英, 陆建峰, 杨静宇. 基于模糊主色调的彩色图像分割及道路检测[J]. 南京理工大学学报, 2000, **24**(4): 353 ~ 358].
  - 55 Chien B C, Cheng M C. A color image segmentation approach based on fuzzy similarity measure [A]. In: Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Fuzzy Systems [C]. Honolulu, HI, USA, 2002, **1**: 449 ~ 454.
  - 56 Wang W J. New similarity measures on fuzzy sets and on elements [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1997, **85**(3): 305 ~ 309.
  - 57 Ito N, Kamekura R, Shimazu Y. The combination of edge detection and region extraction in nonparametric color image segmentation [J]. Information Science, 1996, **92**(2): 277 ~ 294.
  - 58 Huang C L. Parallel image segmentation using modified Hopfield model [J]. Pattern Recognition Letters, 1993, **13**(5): 345 ~ 353.
  - 59 Campadelli P, Medici D, Schettini R. Color image segmentation using Hopfield networks [J]. Image and Vision Computing, 1997, **15**(3): 161 ~ 166.
  - 60 Sammouda M, Sammouda R, Niki N, et al. Segmentation and analysis of liver cancer pathological color image based on artificial neural networks [A]. In: Proceeding of IEEE 1999 International Conference on Image Processing [C]. Kobe, Japan, 1999: 392 ~ 396.
  - 61 Sammouda R, Sammouda M. Improving the performance of Hopfield neural network to segment pathological liver color images [J]. International Congress Series, 2003, **1256**: 232 ~ 239.
  - 62 Ong S H, Yeo N C, Lee K H, et al. Segmentation of color images using a two-stage self-organizing network [J]. Image and Vision Computing, 2002, **20**(4): 279 ~ 289.
  - 63 Papamarkos N, Strouthopoulos C, Andreadis I. Multithresholding of color and gray-level images through a neural network technique [J]. Image and Vision Computing, 2000, **18**(3): 213 ~ 222.
  - 64 Lescure P, Yedid V M, Dupoisot H, et al. Color segmentation on biological microscope images [A]. In: Proceeding of SPIE, Application of Artificial Neural Networks in Image Processing IV [C]. San Jose, California, USA, 1999: 182 ~ 193.
  - 65 Shafer S A. Using color to separate reflection components [J]. Color Research Application, 1985, **10**(4): 210 ~ 218.
  - 66 Healey G. Using color for geometry-insensitive segmentation [J]. Journal of the Optical Society of America, 1989, **6**(6): 920 ~ 937.
  - 67 Klinker G J, Shafer S A, Kanade T. A physical approach to color image understanding [J]. International Journal of Computer Vision, 1990, **4**(1): 7 ~ 38.
  - 68 Huang Y M, Xu G Y, Ye P J. Color image segmentation based on physical model [J]. Acta Automatic Sinica, 1992, **18**(4): 421 ~ 429. [黄玉明, 徐光祐, 叶培健. 基于物理模型的彩色图像分割[J]. 自动化学报, 1992, **18**(4): 421 ~ 429.]
  - 69 Bajcsy R, Wooklee S, Leonardis A. Detection of diffuse and specular interface reflections and inter-reflections by color image segmentation [J]. International Journal of Computer Vision, 1996, **17**(3): 241 ~ 272.
  - 70 Li N, Li Y F. Feature encoding for unsupervised segmentation of color images [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 2003, **33**(3): 438 ~ 447.
  - 71 Riseman E M, Arbib M A. Computational techniques in the visual segmentation of static scenes [J]. Computer Vision Graphics Image Processing, 1977, **6**(3): 221 ~ 276.
  - 72 Caelli T, Reye D. On the classification of image regions by color, texture and shape [J]. Pattern Recognition, 1993, **26**(4): 461 ~ 470.
  - 73 Valkealahti K, Oja E. Reduced multidimensional histograms in color texture description [A]. In: Proceeding of 1998 International Conference on Pattern Recognition [C]. Brisbane, Australian, 1998: 1057 ~ 1061.
  - 74 Eom K B. Segmentation of monochrome and color texture using moving average modeling approach [J]. Image Vision Computing, 1999, **17**(3): 233 ~ 244.
  - 75 Tao L M, Xu G Y. Some color issues and application in machine vision [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, **46**(3): 178 ~ 190. [陶霖密, 徐光祐. 机器视觉中的颜色问题及应用[J]. 科学通报, 2001, **46**(3): 178 ~ 190.]
  - 76 Barnard K, Cardei V, Funt B. A comparison of computational color constancy algorithms-part I: methodology and experiments with synthesized data [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, **11**(9): 972 ~ 983.
  - 77 Barnard K, Cardei V, Funt B. A comparison of computational color constancy algorithms-part II: experiments with image data [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, **11**(9): 972 ~ 983.
  - 78 Tsin Y H, Collins R T, Ramesh V, et al. Bayesian color constancy for outdoor object recognition [A]. In: Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. Kauai, Hawaii, USA, 2001: 8 ~ 14.