

## 图像分割中基于过渡区技术的统计调查

章毓晋

(清华大学电子工程系 北京 100084)  
(zhang-yj@tsinghua.edu.cn)

**摘要:** 第一个基于过渡区的图像分割方法在四分之一世纪前提出后得到了许多图像技术同行的关注, 至今已有很多应用, 并得到进一步的研究且取得了一系列研究成果. 借助谷歌学术工具对与此相关的文献进行了网络搜索, 并以搜索到的文献为基础对近年来相关的研究进展进行全面的统计和回顾: 包括对引用文献进行了逐年统计, 对其中有进一步研究内容的文献进行了分类分析, 对研究过程中出现的几个问题进行了剖析讨论, 还指出了若干进一步研究的可能方向. 从中不仅可了解到基于过渡区图像分割方法的发展情况、基本特点、涉及领域以及存在的瓶颈, 还可看出一些未来深入研究的趋势和方向.

**关键词:** 图像分割; 过渡区; 灰度变化幅度; 灰度变化频率; 方法比较; 文献统计  
中图分类号: TP391

## A Survey on Transition Region-Based Techniques for Image Segmentation

Zhang Yujin

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract:** The first image segmentation method based on the determination of transition region proposed a quarter of a century ago has attracted many attentions from the community of image techniques. Till now, a lot of applications have been reported, and further researches have been conducted and some research results have been obtained. This paper uses Google Scholar as a tool for searching related literatures, and makes a complete review of progress for this method on the basis of the search results. This includes the yearly counts of citing articles, the classification and analysis of further research articles, the discussions on appearing problems, and the potential directions for further researches. From it, not only the information for the developments, basic principle, related areas and existing problems of the method are presented, but also the tendency for further research tasks is provided.

**Key words:** image segmentation; transition region; changes of gray-level magnitude; changes of gray-level frequency; method comparison; literature statistics

图像分割是由图像处理进到图像分析的关键步骤, 它是将图像分成各具特性的区域并提取出感兴趣目标区域的技术和过程. 由于图像分割至今为止尚无通用的自身理论, 所以对它的深入研究一直得到广泛关注. 根据对 EI Compendex 的统计, 从第 1 个分割算法提出的 1962 年到 2011 年的

半个世纪中, 有关图像分割研究的文献已达 7.7 万多篇<sup>[1]</sup>. 根据那里文献数量增加的趋势推断, 至今应有约 10 万篇研究图像分割的文献了, 这其中不乏介绍特殊的或者说有特色的分割技术的文献. 其中, 图像分割中基于过渡区(transition region)的技术有别于传统的基于边界或基于区域的技术,

它采用的策略是先检测图像中目标和背景之间的过渡区,再基于过渡区来将图像分割为目标区域和背景区域.第一个基于过渡区的技术常被简称为有效平均梯度(effective average gradient, EAG),其实这是该技术中一个核心计算参数的名称. EAG 提出来已有四分之一世纪了<sup>[2]</sup>. 在期刊上发表的(英文)文献[3]对该技术进行了全面详细的介绍,其后在期刊上发表的(中文)文献[4]又对该技术做了进一步完善.二十多年来,已有许多后续相关的研究、应用、参考等工作,并有一系列引用了文献[3-4]的相关文献发表.

本文下一节先借助谷歌学术(Google scholar)对基于过渡区进行图像分割的新文献,即引用了文献[3]或文献[4]的新工作进行了搜索统计,通过对这些新文献内容的分析可看出这类方法这些年来研究、推广、应用等的总体情况.本文还对其中主要围绕检测或确定过渡区的进一步研究工作和方法进行了分类,并根据各类的特点进行了分析讨论;同时对已有研究工作中出现的若干问题进行了剖析评论;最后对一些有前途的研究方向进行了展望.

## 1 相关文献统计调查情况

谷歌学术作为一个提供海量中英文文献(包括期刊、会议文章等)检索的学术资源搜索平台,为科研工作者获取相关学术文献信息提供了一种有力的工具.如果一个科研工作者在其上建立了主页,则谷歌学术会定期自动地返回引用该工作者所发表文章的记录信息.

### 1.1 引用文献历年分布统计

据谷歌学术可了解到至今引用文献[3]的记录有 85 条,引用文献[4]的记录有 55 条(但这还不应是全部,例如从中国知网上查到引用文献[4]的记录有 91 条),即共有 140 条. 引用文献[3]的 85 条记录在各年的分布情况如图 1 所示;引用文献[4]的 55 条记录在各年的分布情况如图 2 所示.

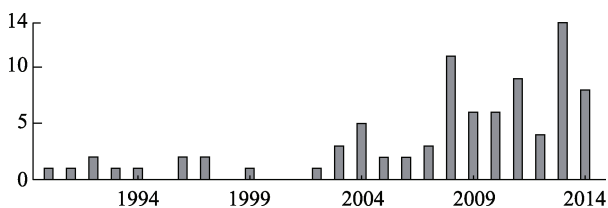


图 1 引用文献[3]的 85 条记录在各年的分布

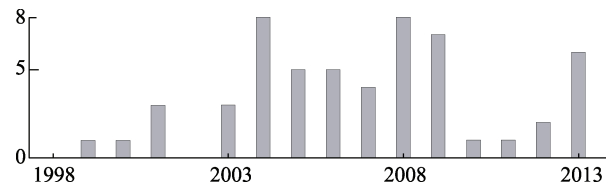


图 2 引用文献[4]的 55 条记录在各年的分布

经过对每一篇记录文献的仔细阅读,发现有些文献对文献[3-4]这 2 篇文章都进行了引用,而另有一些文献则是被谷歌学术错误地进行了统计.最后经过筛选,确认对第一个基于过渡区图像分割技术的引用文献共有 118 篇(其中 51 篇为英文文章,67 篇为中文文章).这 118 篇引用文献在各年的分布情况如图 3 所示.其中深色部分代表仅引用文献[3]的记录,浅色部分代表仅引用文献[4]的记录,花纹部分代表同时引用文献[3-4]的记录.

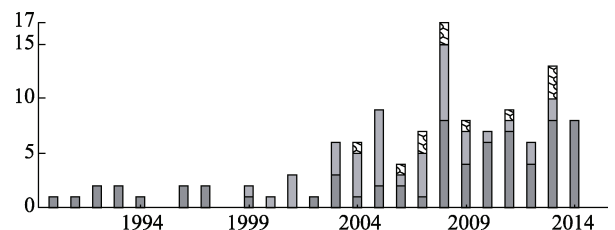


图 3 对 118 篇引用文献的分年统计

由图 3 可见,大部分文献都是近 10 年发表的,其中 2005~2009 年有 45 篇,2010~2014 年(10 月)已有 43 篇,即这 10 年占了文献总数的 3/4,而剩下 10 多年只占了 1/4.由此可见,对基于过渡区图像分割方法的关注应能用方兴未艾来形容.另外,在 2005~2009 年的 45 篇中,13 篇为英文文献,32 篇为中文文献;而在 2010~2014 年的 43 篇中,23 篇为英文文献,20 篇为中文文献.相比较来说,近年国际文献的数量有上升的趋势.

### 1.2 不同引用目的类别的统计

从科研工作者的角度,对学术和技术文献的引用,多出于以下 3 个目的:1) 介绍.如在综述类文献中或其他文献的综述部分将被引用文献作为相关技术或工作的典型;2) 应用.将被引用文献提出的概念和技术应用于实际工作(也常常需要调整参数等以适应具体应用需求);3) 研究.分析被引用文献的原理,指出其不足或总结实际使用文献中技术碰到的问题,提出新的概念、方式,以改进技术性能、扩展适用情况、将其推广到更广泛的领域.

通过对上述 118 篇文献的阅读分析,确定属于

第1类的引用文献有35篇,属于第2类的引用文献有41篇,属于第3类的引用文献有42篇.总体看来分布比较均衡,表明基于过渡区图像分割方法既得到了图像领域算法研究者的关注,也得到了其他领域科技工作者的使用.

## 2 主要研究工作归纳总结

从学术和技术研究的角度看,属于第3类的引用文献和相关工作更值得进一步分析.下面先概述原始文献[3-4]的内容要点,再根据对它们引用文献的内容特点进行分类介绍和讨论.

### 2.1 原始文献的要点

原始文献[3-4]的内容要点可以概括成5条:

#### 1) 阐明了过渡区存在的3个证据

首先可以证明,根据香农定理对连续图像中边缘采样得到的离散边缘总有至少一个像素宽的过渡区<sup>[5]</sup>;其次举例说明了过渡区在实际图像中是可以直接观察到的;最后指出,过渡区可借助图像采集中固有的平滑性质来产生.

#### 2) 分析了将过渡区应用于分割的合理性和可行性

过渡区从空间位置上介于目标和背景之间,所以目标和背景的分界应在过渡区中.过渡区包含的像素灰度也在目标像素灰度和背景像素灰度之间,所以如果采用阈值化方法分割目标和背景,则合适的阈值应属于过渡区像素的灰度值集合,而且从过渡区中选阈值比从全图选阈值要可靠.

#### 3) 提出了一种计算过渡区的具体方法

虽然过渡区客观存在,但还需要有效的检测方法.这里要从过渡区的概念推进到实际确定图像中的过渡区.为此,提出了一种借助对图像进行剪切变换(clip transformation),并计算EAG曲线,从中最优地确定出过渡区灰度动态范围(即 $[L_{low}, L_{high}]$ ),从而提取过渡区的方法.这种方法将对过渡区的检测转换为优化求极值的问题,且不需要任何预设的参数或在计算中需调整的参数,完全自动.这种方法具有迭代计算的本质,并利用了全局信息,所以比较稳定.最后,为提高计算效率,根据EAG曲线的特点设计了一种快速实现的方式.

#### 4) 证明了限定过渡区2个灰度值的3个性质

根据前述计算过渡区的具体方法,过渡区的灰度动态范围可由2个灰度值 $L_{low}$ 和 $L_{high}$ 所限定.借助数学分析的方法证明了这2个值的3个性质:

a.总存在且各只有一个;b.能使分别对应的 $EAG(L_{low})$ 和 $EAG(L_{high})$ 函数取到极大值;c.实际中这2个值总满足 $L_{low} < L_{high}$ .进一步还阐明了这些性质在图像中有多个过渡区时仍可成立<sup>[4]</sup>.

#### 5) 讨论了如何利用过渡区进一步分割图像

在从图像中提取出过渡区的基础上,从过渡区的灰度范围介于目标灰度和背景灰度之间的特点出发,提出可借助过渡区内的像素灰度来确定一个阈值进行图像分割,而这个阈值可取为过渡区中像素灰度的平均值或最频值.

### 2.2 后续研究方法分类

后续的研究工作(这里指属于第3类42篇引用文献)对过渡区的存在都持肯定态度,有些还给予了进一步的细化或给出了更多的示例.大部分工作也认可了将过渡区用于分割的合理性和可行性,并开展了各种确定过渡区的工作.

原始文献中所提的过渡区计算方法比较简单、直观,后续的研究和设计从不同角度着手,提出了各具特色的计算过渡区的改进方法;其中,大多数方法可从考虑它们对过渡区的认识来阐述.

将过渡区从图像中提取出来,需要将过渡区与目标区和背景区分离开,这可看作一个分类问题,需要考虑分类所要借助的特征.即为检测过渡区,需要考虑描述过渡区的特性.目前看来,考虑到过渡区处于目标和背景之间,其中像素的灰度从统计上也处于目标像素和背景像素之间,且相对于目标像素或背景像素的灰度分布来说范围还要大一些.另一方面,过渡区的面积相对于目标区域和背景区域常要小一些;所以,过渡区的特点是在较小的空间范围中有较明显的灰度变化.这个特点可以源自2个因素,一个是过渡区像素之间有较大的灰度差别,另一个是过渡区像素的灰度有较频繁的变化.当然,这2个因素也可能综合作用.换句话说,过渡区中灰度级变化剧烈,这既可以是变化幅度大也可以是变化频率高,还可以是两者结合.

从前面属于第3类的42篇文献来看,大多数在计算过渡区时其出发点都考虑了这2个因素之一,也有些将两者进行了结合,另外还有个别其他特殊方法.所以可以将它们分成4组:

#### 1) 考虑灰度变化幅度

属于这组方法的文献有19篇,基本原理是计算灰度差或灰度梯度.其中,从方法设计的着眼点看,主要有3类值得指出.a.考虑减少噪声影响,有

的文献对梯度算子进行高斯加权以减少噪声对梯度计算的影响<sup>[6-7]</sup>,有的文献用一元线性回归拟合灰度差曲线以消除噪声的干扰强度<sup>[8]</sup>; b.考虑有效计算和利用灰度差,有的文献借助了场论中的势<sup>[9]</sup>,有的文献借助了模糊集合或局部模糊熵<sup>[10-13]</sup>,有的文献选择了特定的计算方向<sup>[14-15]</sup>,有的文献计算了灰度绝对差的和与灰度值的比<sup>[16]</sup>; c.考虑提高计算速度,有的文献设计了快速算法<sup>[17]</sup>,有的文献假设灰度关于边界分布对称而进行简化<sup>[18]</sup>,有的文献直接计算全图的 EAG 作为梯度阈值<sup>[19]</sup>,有的文献利用度信息衡量灰度相似度<sup>[20-21]</sup>.

#### 2) 考虑灰度变化频率

属于这组方法的文献有 13 篇.为描述区域中灰度值的变化频率,使用多种不同的测度.其中,有的文献计算的是交叉熵<sup>[22]</sup>,有的文献计算的是局部熵<sup>[23-26]</sup>,有的文献计算的是局部方差或局部复杂度<sup>[27-31]</sup>,有的文献计算的是局部模糊复杂度<sup>[32]</sup>,有的文献利用小波变换获得不同尺度或频率(特别是高频部分)的能量信息以对纹理图像进行分割<sup>[33-34]</sup>,还有的文献建立云模型分析区域的同质性<sup>[35]</sup>.

#### 3) 结合考虑灰度变化幅度和频率

属于这组方法的文献有 5 篇.其中,有的文献既考虑灰度复杂度又考虑灰度差异度<sup>[36]</sup>,有的文献既考虑局部熵又考虑局部灰度差<sup>[37-38]</sup>,有的文献既考虑局部复杂度又考虑局部清晰度<sup>[39]</sup>等.

#### 4) 其他着眼点不同的方法

属于这组方法的文献有 5 篇.其中有的文献采用数学形态学的操作(如膨胀、腐蚀、开启、闭合以及形态学梯度等)来直接或间接计算过渡区<sup>[40-42]</sup>.

### 2.3 一些技术的实验比较及讨论

前述各组方法各有特点,其效果与要分割图像的特性有密切关系.为表明这点,也为比较前 3 组方法的性能,从每组方法中选一种(分别是第 1 组中基于灰度梯度的方法<sup>[19]</sup>、第 2 组中基于局部熵的方法<sup>[23]</sup>、第 3 组中结合局部熵和灰度差的方法<sup>[37]</sup>)对一些图像进行了确定过渡区的实验.下面给出 2 次实验的结果.

#### 1) 图像信噪比较大

当图像的信噪比较大时,目标-背景边界处灰度的变化明显大于背景中灰度的变化.图 4 给出该情况下的实验结果,对图 4a 所示原始待分割图像,分别采用基于灰度梯度的方法、基于局部熵的方法以及结合局部熵和灰度差的方法得到的过渡区如图 4b~4d 所示,其中基于灰度梯度的方法性能较好.

#### 2) 图像信噪比较小

通过给原始图像叠加随机噪声,图像的信噪比减小了.图 5 给出该情况下的实验结果,对图 5a 所示叠加了噪声的待分割图像,分别采用基于灰度梯度、局部熵以及结合局部熵和灰度差的方法得到的过渡区如图 5b~5d 所示.其中基于灰度梯度的方法性能下降较多,而考虑灰度变化频率的方法受到的影响较小.

由图 4~5 可见,基于灰度级变化幅度的方法(如计算梯度的方法)对噪声比较敏感.不过基于灰度级变化频率的方法(如计算局部熵或复杂度)虽然对椒盐噪声不太敏感,但对高斯噪声仍有一定的敏感性.对这 2 类方法都可以考虑在计算过渡区

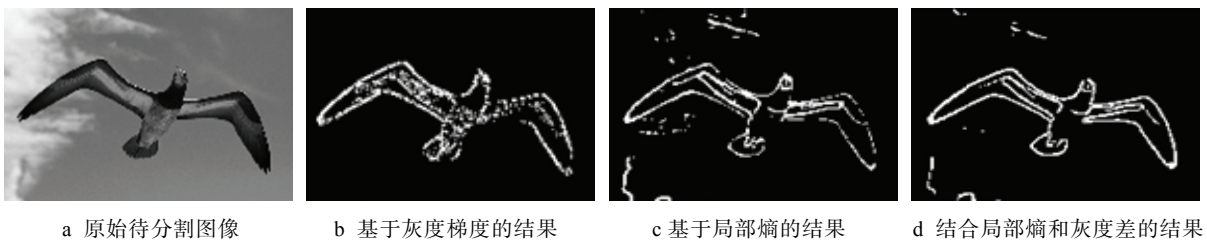


图 4 原始图像和一些技术的过渡区检测结果

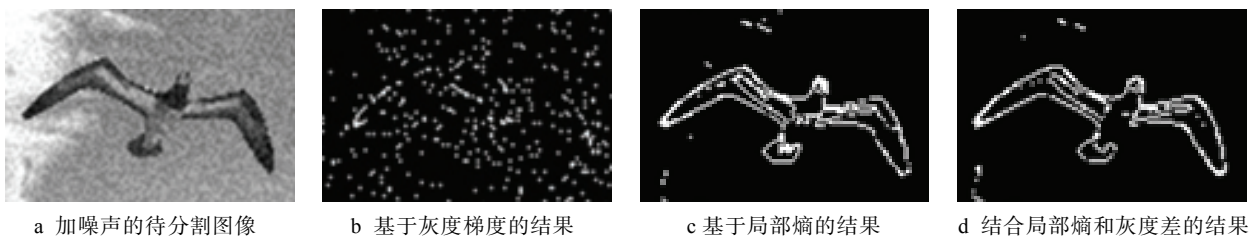


图 5 加噪声图像和一些技术的过渡区检测结果

前先对图像进行平滑预处理以减轻噪声影响(类似于从拉普拉斯算子向拉普拉斯-高斯算子的推广). 另外, 虽然基于灰度级变化频率的方法常有较好的稳定性和适应性, 但有可能出现过渡区刻画不全的问题, 而且如何选取参数、设置阈值也带来一些不确定问题.

### 3 对一些问题的辨析讨论

在对基于过渡区图像分割方法后续的研究工作中, 也出现过一些值得商榷的说法和问题(有些问题在文献[3]和[4]中已介绍或讨论过, 但可能没有被注意到或没有被正确地理解). 下面选择4篇引用文献里的一些问题进行辨析和讨论.

#### 1) 有关文献[43]

文献[43]从梯度计算的角度出发, 将 EAG 方法<sup>[3]</sup>与平均梯度(average gradient, AG)方法<sup>[44]</sup>以及更一般的直方图变换/修正(histogram transformation/histogram modification, HT/HM)方法<sup>[45]</sup>进行了比较, 还通过简化近似, 推论认为 EAG 方法是 AG 方法或 HT/HM 方法的一个平滑版本. 另外, 文献[43]还设计了一个例子, 以表明有可能出现  $L_{low} > L_{high}$  的情况, 对限定过渡区的2个灰度值的第3个性质提出了挑战. 但事实上这些说法都值得商榷.

这里首先要指出, EAG 并不是对 AG 的平滑. 根据 EAG 的定义, 其中梯度的计算只考虑了梯度值不为零(或很小)的像素, 所以统计计算是有选择性的, 与对 AG 的计算不一样. 另外, 为计算  $EAG(L_{low})$  和  $EAG(L_{high})$  函数, 分别引入了特殊的低端剪切和高端剪切(将被剪切部分设为剪切值), 剪切后保留下来的像素才选中参与梯度计算. 这2个选择都对应非线性的变换, 且梯度计算结果还是随剪切值变化的, 所以2种方法之间完全不是简单的平滑关系. 另外, 2种方法虽然都利用了2-D局部对比度信息, 但 EAG 方法还利用了2-D全局信息; 而且与 HT/HM 方法每次仅使用一个灰度级像素的信息不同; EAG 方法每次都使用梯度不为零的所有像素的信息, 所以对噪声更为鲁棒. 这从文献[3]中图4与图5的对比也能直接看出.

其次要指出, 文献[43]在对梯度计算的简化近似中, 忽略了梯度为零的像素. 这仅相当于取低端剪切值和高端剪切值分别为图像灰度的最小值和最大值的一种情况, 并不能反映剪切值变化带来的动态影响. 可见, 一方面文献[43]的简化仅是对

HT/HM 方法的近似, 另一方面文献[3]方法使用的不是传统的梯度计算. 如果考虑常见的目标处在背景上的分割模型, 此时图像中的大部分像素一般为目标内部和背景内部的像素, 而边缘上的像素只是小部分. 如果在文献[43]的近似中放松对梯度为零的限制, 则可能出现将大部分像素忽略的情况, 这样进行的近似是不合理的.

最后, 文献[43]给出了一个示例以说明会出现  $L_{low} > L_{high}$  的情况, 但实际上所给示例为一个图像中有2个灰度不重叠过渡区的情况(2个过渡区对应的剖面接续). 将文献[43]中示例所给出的1-D边缘曲线(其梯度曲线有2个尖峰)扩展到2-D平面的一种情况应如图6所示, 其中那里第1个尖峰对应这里处在背景0和目标1之间的过渡区01, 而那里第2个尖峰对应这里处在目标1和目标2之间的过渡区12. 目标1相对于目标2可看作是目标2的背景. 既然存在2个过渡区, 则对每个过渡区都需要计算  $L_{low}$  和  $L_{high}$ , 所以应算得对应过渡区01的  $L_{low01}$  和  $L_{high01}$ , 以及对应过渡区02的  $L_{low02}$  和  $L_{high02}$ . 文献[4]中专门指出,  $L_{low}$  和  $L_{high}$  的3个性质对多个过渡区的情况仍成立, 此时对过渡区01有  $L_{low01} < L_{high01}$ , 而对过渡区02有  $L_{low02} < L_{high02}$ (见文献[4]中的图9). 文献[43]将  $L_{high01}$  与  $L_{low02}$  相比较, 所以出现了反常情况; 而实际上它们分别对应2个过渡区, 互相比较并没有根据.

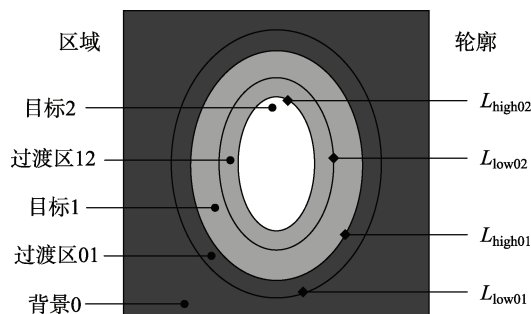


图6 2个过渡区的图像示例

#### 2) 有关文献[46]

文献[46]对2007年前基于过渡区的图像分割方法进行了综述, 认为是文献[45]“首次将过渡区理论引入图像分割中”. 这种说法应是对2种方法没有理解和区分清楚.

从字面上说, 文献[45]中从头至尾没有出现“过渡区”的字样, 更谈不上“过渡区理论”. 事实上, 文献[45]讨论的是 HM/HT 方法, 其基本思路是对图像的(原来峰谷区分度小的)原始直方图

利用其他信息进行调整,以增大峰和谷之间的区分度,从而有利于从直方图中选取阈值;而文献[3-4]中的 EAG 方法直接进行优化来确定过渡区,其间完全没有涉及图像灰度直方图的计算.可见,2 种方法从基本思路和技术路线都是完全不同的,并不能混为一谈.

考虑对 EAG 和 HM/HT 方法的比较.事实上,文献[3]已有对它们区别分析和效果比较的讨论. HM/HT 方法用每个像素的边缘值对其在阈值选取中所起的作用进行了加权,但并没有区分相邻像素灰度变化导致的边缘值与噪声产生的边缘值. EAG 方法中各个像素对阈值选取所起的作用既与其梯度值、也与其灰度值相对于全图的灰度分布有关,这相当于不仅考虑了边缘值,还将全局 2-D 信息(包括剪切变换反映的像素分布信息)也结合进了过渡区的检测中.由于 EAG 方法结合了更多的先验知识,有望获得比 HM/HT 方法更好的效果.另外,除了所结合知识的多少,如何利用这些知识也对算法性能有影响.最后,虽然 2 种方法都利用了局部对比度信息(边缘值信息和梯度值信息),但利用的方式并不同. HM/HT 方法对每个灰度级分别利用局部对比度信息,而 EAG 方法则对具有非零梯度值的所有灰度值的像素同时利用它们的局部对比度信息.由于统计样本比较多,所以 EAG 方法比 HM/HT 方法更加抗噪声<sup>[3]</sup>.

顺便指出,文献[46]将文献[7]归于利用数学形态学的一类方法,但实际上文献[7]中并未提到数学形态学.虽然文献[7]借助邻域中灰度和梯度的计算对边缘进行了细化(并在此基础上计算了灰度加权 EAG 曲线),但并没有使用数学形态学的操作.

### 3) 有关文献[47]

文献[47]利用有监督的方法来指定 2 个限定过渡区动态范围的灰度值(为方便与原始文献比较,也将它们记为  $L_{low}$  和  $L_{high}$ ),然后对图像进行剪切变换(以保留在  $[L_{low}, L_{high}]$  范围中像素的贡献并除去在该范围外像素的贡献)

$$f_{TR}(x, y) = \begin{cases} L_{low}, & \text{如果 } f(x, y) < L_{low} \\ f(x, y), & \text{如果 } L_{low} \leq f(x, y) \leq L_{high} \\ L_{high}, & \text{如果 } f(x, y) > L_{high} \end{cases}$$

这种变换在本质上与原始文献中的剪切变换<sup>[3]</sup>思路相同,可将其看作将 2 个剪切变换合成了一个式子.如果固定第 1 个灰度值而变化第 2 个,再固

定第 2 个灰度值而变化第 1 个则效果一致.不过文献[47]将 2 个灰度值都固定,所以就失去了文献[3]中分别迭代计算最优值的潜在优点.

### 4) 有关文献[48]

文献[48]对为计算 EAG 曲线而需要的梯度计算设计了一种方法进行加速,得到的结果是当采用索贝尔梯度算子时,乘法和加法的计算次数均减为直接计算的  $18/256 \approx 7\%$ .

事实上,文献[3]已介绍了一种利用 Fibonacci 序列的快速算法来进行相应的计算,计算量已可减为不到直接计算的 5% (且与所用梯度算子无关).

## 4 结 语

本文对这些年来基于过渡区图像分割方法的研究和应用情况,结合谷歌学术上搜索到的引用文献进行了统计调查,包括对这些文献的分年分类统计,对它们研究内容的分组归纳,以及对若干问题的分析讨论.从中可看出,相关研究得到了很多关注,尤其近年的关注更多,可以预见进一步的参考、应用、研究和改进还会继续.

为什么有这么多的研究工作呢?一个重要的原因是对过渡区还没有唯一的和定量的定义.注意,文献[3]中 EAG 方法是借助计算结果定义了过渡区,而不是先定义过渡区再去计算的.这些年的研究工作也基本是沿这个思路进行的.例如,基于局部复杂度或局部熵的方法要确定过渡区就需要先确定一个阈值,那些具有局部复杂度或局部熵的值大于(或小于)阈值的像素才能归于过渡区.其他方法也基本是类似的情况.文献[49]试图定义广义的过渡区,但实际上只是放松了对表达过渡区特性的特征值的选择,仍需要先确定阈值才能确定过渡区,或者说使用不同的阈值将会得到不同的过渡区.由于对过渡区并没有唯一的和定量的定义,所以在方法评价比较中也没有可以参考的真值;再加上还没有合适的测试图像库,因而研究都还有一定的随机性.如何解决这些基本问题还有待于进一步的研究.

回到具体确定过渡区的问题.前面指出大多数方法都基于灰度变化幅度或灰度变化频率来进行.事实上,两者各有特色,各有更适合的应用领域.同时考虑两者是近年一些方法采取的策略,如文献[38]既对局部熵进行了加权,又对局部灰度差

进行了改进, 还将两者结合起来计算过渡区. 不过, 如何取长补短值得更多更深入的工作.

另外, 目前看到的研究工作基本都集中在沿第2.1节的第3条的方向上. 事实上在第5条的方向上也可能有些进一步的研究空间. 在获得过渡区后, 对图像的分割可利用过渡区的各种特性. 首先, 目前多利用其灰度特性, 即其灰度范围在目标灰度和背景灰度之间, 所以可利用过渡区灰度均值或过渡区灰度极值来确定一个分割阈值<sup>[3]</sup>; 其次过渡区的空间特性也可以利用. 由于过渡区是一个环绕目标边界的带状区域, 所以也可把这个区域加以细化(如使用中轴变换或求取骨架)来得到其中的目标轮廓<sup>[50]</sup>. 最新的一个相关工作就是在借助局部方差确定了过渡区后, 通过细化过渡区来得到目标边界<sup>[51]</sup>.

最后, 一些文献将在后续研究中的过渡区提取方法分为直接法(直接计算过渡区像素)和间接法(先计算过渡区灰度范围再确定过渡区)2类. 如果借助图像分割中常用的术语, 前者可看作基于区域的方法, 后者可看作基于边缘的方法. 一般认为, 直接法直接就获得了过渡区而间接法却转了个弯. 但是, 计算过渡区的最终目的还是为了进行图像分割, 如果要获得分割阈值, 直接法需在获得了过渡区后再利用其中的像素确定阈值, 而间接法则可在获得了过渡区灰度范围后直接确定阈值. 这里, “直接”和“间接”正好对调了. 特别如果过渡区是用 $L_{low}$ 和 $L_{high}$ 确定的, 则分割阈值也可直接根据这2个值来(近似)计算, 此时甚至不需要将过渡区显式地提取出来. 对此的深入工作也许对推动图像分割中基于过渡区技术的研究有一定意义.

## 参考文献(References):

- [1] Zhang Y J. Half century for image segmentation [M]//Mehdi Khosrow-Pour. Encyclopedia of Information Science and Technology. 3rd ed. Hershey: Information Resources Management Association, 2014: 5906-5915
- [2] Zhang Y J. Development of a 3-D computer image analysis system, application to megakaryocyte quantitation [D]. Liège: Liège University, 1989
- [3] Zhang Y J, Gerbrands J J. Transition region determination based thresholding [J]. Pattern Recognition Letters, 1991, 12(1): 13-23
- [4] Zhang Yujin. Transition region and image segmentation [J]. Acta Electronica Sinica, 1996, 24(1): 12-17 (in Chinese)  
(章毓晋. 过渡区和图象分割 [J]. 电子学报, 1996, 24(1): 12-17)
- [5] Gerbrands J J. Segmentation of noisy images [D]. Delft: Delft University, Netherlands, 1988
- [6] Wang H, Luo J P. A new algorithm for detecting the transition region on noise image [J]. Journal of Electronics, 2003, 20(4): 279-284
- [7] Wang Hui, Gao Jianbo, Huang Fen. Extraction of transition region of image based on ramp width reduction [J]. Journal of Shenzhen University: Science & Engineering, 2005, 22(1): 7-11 (in Chinese)  
(王 晖, 高建波, 黄 芬. 基于宽度细化的图像过渡区提取 [J]. 深圳大学学报: 理工版, 2005, 22(1): 7-11)
- [8] Le Ning, Liang Xuejun, Weng Shixiu. The algorithm of image transition region and its improvement [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2001, 20(3): 211-214 (in Chinese)  
(乐 宁, 梁学军, 翁世修. 图像过渡区算法及其改进 [J]. 红外与毫米波学报, 2001, 20(3): 211-214)
- [9] Wu T, Qin K. Data field-based transition region extraction and thresholding [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(2): 131-139
- [10] Li Xinwu, Ma Miao. Cell project algorithm based on fuzzy segmentation of medical 3D data field [J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(8): 1922-1935 (in Chinese)  
(黎新伍, 马 苗. 一种基于医学三维数据场模糊分割的体元投射算法 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17(8): 1922-1935)
- [11] Zhang Chao, Zhang Jiashu, Chen Hui, et al. Transition region extraction algorithm based on local fuzzy entropy [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2005, 40(5): 663-666 (in Chinese)  
(张 超, 张家树, 陈 辉, 等. 基于局部模糊熵的图像过渡区提取算法 [J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(5): 663-666)
- [12] Zhang C, Zhang J S, Chen H. Local fuzzy entropy-based transition region extraction and thresholding [J]. International Journal of Information Technology, 2006, 12(6): 19-25
- [13] Wang Zuocheng, Zhang Feizhou, Xue Lixia. Fuzzy edge detection algorithm of image based on cloud space and fuzzy entropy [J]. Computer Science, 2010, 37(8): 253-256 (in Chinese)  
(王佐成, 张飞舟, 薛丽霞. 基于云空间和模糊熵的边缘检测算法 [J]. 计算机科学, 2010, 37(8): 253-256)
- [14] Wang Yanchun, Liang Dequn, Wang Yan, et al. Image transition region extraction and segmentation based on neighborhood unhomogeneity [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2008, 19(3): 404-408 (in Chinese)  
(王彦春, 梁德群, 王 演, 等. 基于邻域非一致性图像过渡区提取与分割 [J]. 光电子·激光, 2008, 19(3): 404-408)
- [15] Wang J D, Wang Y C. Multi-scale image transition region extraction and segmentation based on directional data fitting information [C]// Proceedings of the MSEC International Conference on Multimedia, Software Engineering and Computing. Heidelberg: Springer, 2011, 1: 183-190
- [16] Zou Xiaolin, Feng Guocan. Weber's law-based transition region extraction and thresholding [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(15): 4217-4222 (in Chinese)  
(邹小林, 冯国灿. 基于韦伯定律的过渡区提取及阈值分割 [J]. 科学技术与工程, 2013, 13(15): 4217-4222)
- [17] Zhang A H. A novel fast algorithm of mono transition region determination with gray image [J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2004, 9(3): 309-312

- [18] Zou Y B, Liu H, Zhang Q. Image bilevel thresholding based on stable transition region set [J]. *Digital Signal Processing*, 2013, 23(1): 126-141
- [19] Yan C X, Sun Y. Gradient threshold based image transition region extraction and segmentation [C]//*Proceedings of International Workshop on Intelligent Systems and Applications*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2009: Article No. 5072891
- [20] Yan Chengxin, Sang Nong, Zhang Tianxu. Degree-based image transition region extraction and its segmentation [J]. *Journal of Huazhong University of Science & Technology: Nature Science Edition*, 2004, 32(10): 1-3 (in Chinese)  
(闫成新, 桑农, 张天序. 基于度信息的图像过渡区提取与分割 [J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2004, 32(10): 1-3)
- [21] Wu T, Chen Y X, Xiao J. Context dependent graph-based method for laser cladding image thresholding [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, 125(18): 5391-5399
- [22] Xu Wenwu, Duan Xianhua. Infrared moving target detection based on transition region extraction [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(7): 775-778 (in Chinese)  
(许文武, 段先华. 基于过渡区提取的红外运动目标检测 [J]. *激光与红外*, 2010, 40(7): 775-778)
- [23] Yan C X, Sun N, Zhang T X. Local entropy-based transition region extraction and thresholding [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2003, 24(16): 2935-2941
- [24] Yan Chengxin, Sang Nong, Zhang Tianxu. Multilevel image segmentation based on transition region extraction [J]. *Journal of Huazhong University of Science & Technology: Nature Science Edition*, 2005, 33(1): 65-67 (in Chinese)  
(闫成新, 桑农, 张天序. 基于过渡区提取的多阈值图像分割 [J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2005, 33(1): 65-67)
- [25] Li Z Y, Zhang D, Xu Y, *et al.* Modified local entropy-based transition region extraction and thresholding [J]. *Applied Soft Computing*, 2011, 11(8): 5630-5638
- [26] Kang Wenwei, Kang Wenyin, Kang Xiaotao. Image transition region extraction and segmentation based on information measure [J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2013, 43(sup.): 414-418 (in Chinese)  
(康文伟, 康文颖, 康晓涛. 基于信息测度的图像过渡区提取与分割 [J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2013, 43(增刊): 414-418)
- [27] Yan Chengxin, Sang Nong, Zhang Tianxu, *et al.* Image transition region extraction and segmentation based on local complexity [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2005, 24(4): 312-316 (in Chinese)  
(闫成新, 桑农, 张天序, 等. 基于局部复杂度的图像过渡区提取与分割 [J]. *红外与毫米波学报*, 2005, 24(4): 312-316)
- [28] Feng Tao, Zhou Zu'an, Liu Qizhen. Analysis of the image transition region processing based on local complexity [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(10): 1894-1897 (in Chinese)  
(冯涛, 周祖安, 刘其真. 基于局部复杂度的图像过渡区处理研究 [J]. *中国图象图形学报*, 2008, 13(10): 1894-1897)
- [29] Li Z Y, Liu C C. Gray level difference-based transition region extraction and thresholding [J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2009, 35(5): 696-704
- [30] Yan Chengxin. Local complexity based remote image segmentation [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2009, 31(18): 160-163 (in Chinese)  
(闫成新. 基于局部复杂度的遥感图像分割 [J]. *武汉理工大学学报*, 2009, 31(18): 160-163)
- [31] Wang F, Zhang T X, Deng J P. A novel method concerning about image transition region extraction and segmentation [C]//*Proceedings of International Conference on Multimedia Technology*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2011: 95-97
- [32] Cao Zhanhui, Zhang Ke, Li Yanjun. Transition region extraction algorithm based on local fuzzy complexity [J]. *Fire Control and Command Control*, 2008, 33(1): 25-27 (in Chinese)  
(曹占辉, 张科, 李言俊. 局部模糊复杂度的图像过渡区提取算法 [J]. *火力与指挥控制*, 2008, 33(1): 25-27)
- [33] Yan Chengxin, Sang Nong, Zhang Tianxu. Wavelet transform based image transition region extraction and segmentation [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2004, 40(18): 29-31 (in Chinese)  
(闫成新, 桑农, 张天序. 基于小波变换的图像过渡区提取与分割 [J]. *计算机工程与应用*, 2004, 40(18): 29-31)
- [34] Zhao Maocheng, Zheng Jiaqiang, Ling Xiaojing. Image transition region extraction and segmentation method based on wavelet transform [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(11): 103-107 (in Chinese)  
(赵茂程, 郑加强, 凌小静. 一种基于小波变换的图像过渡区提取及分割方法 [J]. *农业工程学报*, 2005, 21(11): 103-107)
- [35] Shi Zhaoyao, Liu Xiao, Lin Jiachun. Extraction method for digital edge of tooth contact zone of spiral bevel gear [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(4): 94-97 (in Chinese)  
(石照耀, 刘潇, 林家春. 弧齿锥齿轮接触斑点的数字边缘提取方法 [J]. *光电工程*, 2008, 35(4): 94-97)
- [36] Wu Tao, Yang Junjie. Image transition region extraction and thresholding based on local feature fusion [J]. *Journal of Computer Applications*, 2013, 33(1): 40-43 (in Chinese)  
(吴涛, 杨俊杰. 融合局部特征的图像过渡区提取与阈值化 [J]. *计算机应用*, 2013, 33(1): 40-43)
- [37] Wang Yanchun, Liang Dequn, Wang Yan. Transition region extraction and segmentation based on image fuzzy entropy neighborhood unhomogeneity [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(12): 2445-2449 (in Chinese)  
(王彦春, 梁德群, 王演. 基于图像模糊熵邻域非一致性的过渡区提取与分割 [J]. *电子学报*, 2008, 36(12): 2445-2449)
- [38] Deng H, Wei Y T, Zhao G, *et al.* Integration of local information-based transition region extraction and thresholding [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 66: 103-113
- [39] Chen Congping, Qin Wu, Fang Zifan. Image transition region extraction and segmentation based on LDC [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(9): 1023-1026 (in Chinese)  
(陈从平, 秦武, 方子帆. 基于 LDC 的图像过渡区提取与分割 [J]. *激光与红外*, 2011, 41(9): 1023-1026)
- [40] Xing Guobo, Zhang Shaolan. Image segmentation method



- based on transition region extraction using recursive morphological operators [J]. *Journal of Wuhan University of Science and Engineering*, 2006, 19(11): 73-75 (in Chinese)  
(邢国波, 张绍兰. 基于递归式形态学算子过渡区提取的图像分割方法 [J]. *武汉科技学院学报*, 2006, 19(11): 73-75)
- [41] Xu Muping, Feng Tao, Zhou Zu'an. Analysis of the image transition region based on mathematical morphology [J]. *Journal of Shanghai Second Polytechnic University*, 2008, 25(4): 276-279 (in Chinese)  
(许慕平, 冯涛, 周祖安. 基于数学形态学的图像过渡区处理研究 [J]. *上海第二工业大学学报*, 2008, 25(4): 276-279)
- [42] Ren Z M. Variational level set method for two-stage image segmentation based on morphological gradients [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014(2014): Article No. 145343
- [43] Groenewald A M, Barnard E, Botha E C. Related approaches to gradient-based thresholding [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1993, 14(7): 567-572
- [44] Watanabe S, CYBEST group. An automated apparatus for cancer prescreening: CYBEST [J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1974, 3(4): 350-358
- [45] Weszka J S, Rosendeld A. Histogram modification for threshold selection [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1979, 9(1): 38-52
- [46] Liu Suolan, Yang Jingyu. Survey on extraction methods of transition region [J]. *Engineering Science*, 2007, 9(9): 89-96 (in Chinese)  
(刘锁兰, 杨静宇. 过渡区提取方法综述 [J]. *中国工程科学*, 2007, 9(9): 89-96)
- [47] Hua Q M, Luo S H, Qiao Y, *et al.* Supervised grayscale thresholding based on transition regions [J]. *Image and Vision Computing*, 2008, 26(12): 1677-1684
- [48] Zhang A H. A novel fast algorithm of mono transition region determination with gray image [J]. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2004, 9(3): 309-312
- [49] Yan Chengxin. Two basic notes on image transition region extraction and segmentation method [J]. *Computer Engineering and Design*, 2005, 26(10): 2589-2590  
(闫成新. 图像过渡区提取与分割算法的两个基本问题 [J]. *计算机工程与设计*, 2005, 26(10): 2589-2590)
- [50] Zhang Yujin. *Image segmentation* [M]. Beijing: Science Press, 2001 (in Chinese)  
(章毓晋. *图象分割* [M]. 北京: 科学出版社, 2001)
- [51] Li Z Y, Tang K Z, Cheng Y, *et al.* Transition region-based single-object image segmentation [J]. *AEÜ International Journal of Electronics and Communications*, 2014, 68(12): 1214-1223