

高空间分辨率遥感的单木树冠自动提取方法与应用

刘晓双, 黄建文, 鞠洪波

(中国林业科学研究院 资源信息研究所, 北京 100091)

摘要: 用高空间分辨率遥感影像对单木树冠进行自动提取和轮廓描绘, 是获取森林信息的一种快速有效的方法, 也是近年来林业遥感领域研究的热点。详细介绍了目前高分辨率遥感单木树冠信息自动提取的各种方法, 包括局部最大值法、模板匹配法、谷地跟踪法、多尺度法、种子区域生长法、分水岭分割法、局部射线法, 并对单木树冠提取在林业上的应用进行了探讨, 最后结合国内外研究现状, 对单木树冠自动提取的未来作了展望。参 51

关键词: 森林经理学; 高空间分辨率; 树冠提取; 谷地跟踪法; 局部最大值; 多尺度; 模板匹配; 综述

中图分类号: S757 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5692(2010)01-0126-08

Research progress in the methods and applications of individual tree crown's automatic extraction by high spatial resolution remote sensing

LIU Xiao-shuang, HUANG Jian-wen, JU Hong-bo

(Research Institute of Forest Resources Information Technique, The Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Automatic extraction and delineation of individual tree crown using high spatial resolution remote sensing is an efficient method to obtain forest information, and is also a hot issue in forest remote sensing research. In this article, different approaches of individual tree crown extraction were introduced in details, including local maxima, template matching, valley-following, multiple scale, seeded region growing, watershed segmentation, local transects. The application of individual tree crown extraction in the field of forestry was concluded. Finally, combined with current international research progress, the future of automatic extraction of individual tree crown was expected. [Ch, 51 ref.]

Key words: forest management; high spatial resolution; tree crown extraction; valley-following approach; local maxima; multiple scale; template matching; review

树冠是树木获取光能并进行能量转换的主要场所, 也是在遥感影像中最容易反映树木信息的部位。树冠的大小和形态及反映在遥感影像上的光谱信息, 是提取森林各种参数的重要依据。林分的林冠大小, 对那些模拟能量或质量通过林冠传递的众多模型来说, 也是一个重要的输入参数^[1-4]。因此, 单木树冠提取对于研究森林的生长情况和动态变化非常有意义。随着对地观测技术的飞速发展, 高空间分辨率遥感也很快进入了森林研究领域。如今, 卫星图像的空间分辨率已经提高到 0.6 m 级, 而航空遥感数字影像分辨率高达 0.1 m 以上。在这些高分辨率遥感影像上, 森林中每株树木的树冠清晰可辨, 但如何将单木树冠提取出来仍然是一个难题。尽管通过目前常用的目视解译方法提取树冠能达到一定效果, 但费时费力, 并且提取结果的好坏与专业人员的技术有很大关系。运用计算机自动或半自动提取单木树冠, 将有望成为一种高效的方法来替代人工解译, 并且在提取精度上也将接近甚至超

收稿日期: 2009-02-17; 修回日期: 2009-05-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40771141); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金资助项目(RIFRITZJZ 2007006);

作者简介: 刘晓双, 从事遥感和地理信息系统技术应用研究。E-mail: xinz_77@sina.com。通信作者: 鞠洪波, 研究员, 博士, 从事林业信息技术研究。E-mail: ju@caf.ac.cn

过人工解译。

1 单木树冠提取方法概述

传感器自上而下拍摄, 获取的通常是树木的顶部信息。因此, 树木在遥感影像上呈现为颗粒状的树冠。在森林资源调查中, 冠幅是一个重要的调查因子, 主要测量东西和南北 2 个方向的冠幅(树冠直径), 来反映树冠的大小。用高空间分辨率遥感影像提取树冠轮廓, 进而得到冠幅信息, 可以直观地反映出树冠的大小和形态, 省去了繁琐的地面调查。单木树冠自动或半自动提取研究始于 20 世纪 90 年代中期。目前, 对于单木树冠自动提取, 国外学者已经作出了很多研究, 对于某些特定的林分, 已有了成型的算法并获得了较高的精度。但由于森林自身的复杂性, 单木树冠信息自动提取技术具有相当的难度, 至今还处于研究阶段。国内有关这方面的研究才刚刚起步, 缺乏系统的基础性研究, 自动化程度很低。鉴于此, 笔者主要结合国外的相关文献, 对单木树冠自动提取的各种方法和研究进展作了详细的介绍, 然后对单木树冠提取的应用作了归纳, 最后对现状和发展前景作了展望。

单木树冠提取的步骤主要分为 2 步。第 1 步首先对单木树冠的位置进行探测, 找到每个树冠的中心点。第 2 步将探测到的树冠中心点作为参照, 找到单木树冠的边界点, 从而对树冠轮廓进行描绘。笔者接下来将分步骤对单木树冠探测和描绘的各种方法进行详细的介绍。

2 单木树冠探测

单木树冠探测的目的就是找到每个树冠所在的位置, 这是单木树冠提取的基础。在森林中, 各种树冠的冠形普遍表现为中间高四周低的形态。对于阔叶树, 树冠近似呈现中心高四周低的圆拱形; 对于针叶树, 树冠近似呈现中心高四周低的尖塔形。因此, 无论针叶树冠还是阔叶树冠都能找到一个中心最高点来定义树冠的位置, 这一点在遥感影像上具有较高的光谱反射率。局部最大值法(local maxima)就是通过寻找遥感影像中光谱反射率最高的点来确定树冠的中心最高点。但局部最大值法在探测针叶树冠中心时通常表现较好, 这是由于针叶树冠的最高点较明显。而对于阔叶树冠, 同一个树冠经常会探测到多个局部最大值点。因此, 局部最大值法更适合对针叶树冠进行探测。另一些单木树冠探测法打破了局部最大值法的局限, 直接从树冠形状入手。这些以树冠形状为切入点的方法适用性较广, 对针叶树种和阔叶树种都适用, 但不适用于紧密度过高的林分。这些方法包括模板匹配法(template-matching)、谷地跟踪法(valley-following)和多尺度树冠提取法(multiple scale approach)。以下分别对上述方法进行介绍。

2.1 局部最大值法

综合国内外各种单木树冠探测方法的研究, 局部最大值法是最典型且应用最多的方法。局部最大值法用局部最大值滤波器(local maxima filter)通过 1 个移动窗口, 探测影像中的局部光谱最大值点作为树冠中心点。只要探测到局部最大值点, 就可以用这些点作为参照, 进一步找到树冠的边缘并描绘树冠轮廓。

2.1.1 固定窗口局部最大值 固定窗口局部最大值滤波采用的移动窗口大小一经确定以后就不再改变。移动窗口的大小根据遥感影像的分辨率大小和树冠的平均尺寸由用户自定义。当移动窗口的中心像元光谱值均大于邻近像元时, 就将中心像元确定为局部最大值。大多数树冠探测的研究都是采用 3×3 的固定窗口探测影像中的光谱最大值^[5-8]。Pouliot 等^[9]则参照了影像中树冠的平均大小, 将移动窗口选择为 15×15 至 30×30 来探测局部最大值。Walsworth 等^[10]则是先使用 3×3 的高通滤波器, 使树冠边缘的高频部分得到增强, 再利用 3×3 大小的移动窗口探测局部最大值。固定窗口局部最大值法较简便快速, 但移动窗口的大小是一个经验值, 需要用户根据经验或通过反复的试验来确定。如果移动窗口过大, 一些较小的树冠将探测不到; 如果移动窗口过小, 一些较大的树冠就会被割裂。因此, 这种方法适用于树冠大小较均匀的同龄林而不适用于树冠大小悬殊的异龄林。

2.1.2 动态窗口局部最大值 动态窗口局部最大值滤波就是为了解决固定窗口在异龄林中的局限性而设计的。移动窗口没有固定的大小, 会根据不同的情况随时调整。Culvenor^[11]提出的树木识别和描绘

算法 TIDA (tree identification and delineation algorithm)就是采用了动态窗口局部最大值滤波。这种方法用不同的线性距离分别判断中心像元在上下左右 4 个线性方向是否为最大值,并记录最大频数(maxima frequency count)。是则记为 1,不是记为 0。若 4 个线性方向都为最大值,则最大频数记为 4。最大频数最终记为 0 到 4 之间的数字。像元的最大频数越大说明此像元为局部最大值的可能性越大。最后选取一个合适的最大频数(一般为 3 或 4)来筛选出局部最大值像元。另一种方法是通过计算来确定移动窗口的大小。Wilder 等^[12]利用半方差函数来计算移动窗口大小。公式如下:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2。$$

其中: $\gamma(h)$ 为半方差, $N(h)$ 为像元对个数, $Z(X_i) - Z(X_i + h)$ 为任意像元对的光谱值之差, h 为像元对之间的距离。半方差函数随着像元之间距离的增加而增加。当像元距离增加到一定程度以后,半方差将不再增长并趋于平稳。计算的具体过程是从每个中心像元开始分别计算 8 个方向上的半方差函数,找到使函数值趋于平稳的像元距离,用 8 个方向上的平均像元距离来确定移动窗口大小。

2.1.3 结合树高的局部最大值法 由于移动窗口大小比较难掌握,局部最大值法探测到的树冠中心点经常会出现过多或过少的情况。对初步探测的局部最大值点进行必要的筛选和调整可以提高探测精度。在局部最大值探测中结合树高数据将是一种新的方法。Rawert^[13]通过数字表面模型(DSM, digital surface model)的最高点来探测针叶树的树冠中心。由于针叶树的最高点通常标记着树冠中心,因此,他认为对于大多数针叶树来说最高点将成为树冠探测的一个更好选择。Hirschmugl 等^[14]对探测到的局部最大值点进行筛选,结合植被高度模型(VHM, vegetation height model)来排除高度小于 10 m 的局部最大值点。其中,植被高度模型是用数字表面模型与数字地形模型(DTM, digital terrain model)相减得到。

2.2 其他树冠探测法

另一些树冠探测法采用了与局部最大值法不同的思路,它们从树冠边界入手,直接探测出树冠轮廓信息,而不必进行第 2 步的树冠描绘过程。以下将分别介绍这些方法。

2.2.1 模板匹配法 目前,图像的纹理、形状等空间特征在遥感信息提取中越来越得到重视^[15]。模板匹配法就是一种基于形状特征的单木树冠探测法,用树冠形状与图像亮度进行匹配以提取树冠。Pollock^[16]尝试将基于形状的模板匹配法应用在树冠提取的研究中。他考虑了树的外观所表现出的不同大小和形状,对不同树种采用了不同的模型进行提取。Larsen 等^[17]利用光学树冠模型和影像获取角度对不同大小、形状和观察条件的树木外形进行了数学渲染并与图像亮度进行了匹配以便定位树木和确定树冠尺寸。Warner 等^[18]使用了方向性纹理并运用一个专门为林分密度较高阔叶林设计的算法将像素和邻近像素组聚合成树冠。Johansen 等^[19]归纳了现有的模板匹配算法,提出了一种能够产生人工模版影像的新的影像分析算法。这种影像分析算法用来制作三维立木图,在丹麦橡树 *Quercus robur* 林中的树冠探测精度达到 85%到 98%。

2.2.2 谷地跟踪法 谷地跟踪法由 Gougeon^[5]于 1995 年提出,它通过跟踪树冠边界呈现的光谱最小值来探测和描绘树冠轮廓。此算法的具体过程是先用一个简单的阈值区分出森林区和非森林区;然后用一个 3×3 的移动窗口在森林区内搜索局部最小值,当移动窗口的中心像元光谱值小于所有周围像元时才认定为局部最小值;最后对全影像进行扫描,每当扫描到局部最小值就自动对局部最小值周围的像元进行检查,找到光谱值均小于两侧的点作为谷地像元(valley pixels),全影像扫描按照不同的顺序反复进行,直到找不出谷地像元为止。但谷地跟踪法并不是在所有情况下都表现良好,对于较密的冠层经常达不到理想的效果。例如,Leckie 等^[20]曾运用谷地跟踪法对澳大利亚西海岸的幼年针叶林进行单木树冠提取,提取出的树冠个数只占林分中树木总数的 1/2 到 1/4,多株树识别为一株树的情况普遍存在。这主要是由于树冠间的距离过于紧密,树冠相互重叠在一起,使光谱最小值的区分度降低。因此,谷地跟踪法更适合于提取树丛或大龄的优势树。

2.2.3 多尺度树冠提取法 由于森林中树冠大小参差不齐,不同大小的树冠都对应不同的尺度。多尺度树冠探测目的是用不同的尺度探测不同大小的树冠。Brandtberg 等^[21]在 1998 年曾尝试用多尺度方

法从高空间分辨率红外航空影像中提取单木树冠。他们对不同大小的树冠采用不同的尺度, 对每一个影像尺度都计算了灰度曲率, 将带有灰度曲率的过 0 点识别为树冠轮廓。最终 70% 的树冠提取结果与人工解译结果相同。2002 年, Brandtberg 等^[22]又用高采样密度的雷达数据探测分析了南美洲东部落叶林的单木树冠。树冠探测过程中他们对数据进行了多尺度光栅化高斯平滑, 以识别那些表现单个树木的斑块。6 个试验地的提取结果都是成功的, 但与大树相邻的小树冠很难作为一个单独的对象被探测到。这说明即使采用多尺度树冠对象提取也很难一次同时探测到非常小和非常大的树冠。此后 Hay 等^[23]又提出了多尺度特定对象分割(MOSS, multiscale object-specific segmentation), 专门用于在高空间分辨率森林遥感影像中多尺度自动描绘树冠对象。这种方法的目的是为了简化当前一些基于对象的方法, 将基于对象的方法综合起来, 使这些方法变得简单、容易使用并减少用户干预, 同时又要尽量与人工解译结果接近。MOSS 包括 3 个部分: 特定对象分析(OSA, object-specific analysis), 特定对象尺度扩大(OSU, object-specific upscaling)和一种叫做尺寸限制区域融合(SCRM, size constrained region merging)的新的分割算法。

3 单木树冠描绘

单木树冠描绘是局部最大值树冠探测过程的下一步, 是在已知单木树冠中心点的基础上完成的。除了使用局部最大值法探测树冠中心点, 也可以用目视解译方法找出中心点再描绘树冠轮廓, 但工作量大, 自动化程度也降低了。单木树冠描绘的目的是以探测到的树冠中心点为参照, 自动找到树冠边界, 将树冠描绘成闭合的多边形。单木树冠描绘也有很多种不同的方法。

3.1 种子区域生长法(seeded region growing)

种子区域生长法是将单木树冠探测过程中产生的树冠中心点作为种子点, 将种子点周围邻域中各点的光谱值与种子点的光谱值作比较, 若它们之间的光谱值之差小于预先设定的阈值, 就将这些点合并到种子点所在的区域中; 若它们之间的光谱值之差超过预先设定的阈值, 则停止合并。这种方法利用的是同一树冠内光谱的相似性确定树冠的边界。

种子区域生长法计算简单, 速度快, 适用性很广。在单木树冠描绘领域中很多研究都是使用种子区域生长法来进行单木树冠描绘^[10,21]。Hirschmugl 等^[14]在近红外波段设定阈值来终止种子生长过程。这个阈值不仅能区分树冠和树冠间隙, 还能将针叶树和阔叶树区分开。他们同时还制定了一个程序, 在相邻种子区域使用阈值仍无法分开时, 就自动使用种子像素间的垂直平分线来进行分割。

3.2 分水岭分割法(watershed segmentation)

分水岭分割法在计算机图像分割领域中使用广泛, 目前, 分水岭算法已经逐渐成为许多强大分割程序中的一个基本步骤^[24-25]。分水岭分割法基于数学形态学, 将影像的光谱值考虑为起伏的地形。在单木树冠描绘中, 分水岭算法也见到了一些应用。主要的过程是先将原始影像生成梯度图像, 然后将梯度图像进行边缘细化的处理, 最后搜索梯度图像的局部最大值, 这些局部最大值即为树冠边界。

由于分水岭算法对微弱边缘敏感, 可以得到单像素宽的、连通的、封闭的及位置准确的轮廓, 因而比较适合高空间分辨率遥感影像^[26]。但分水岭算法具有过度分割的特点, 需要对图像进行预处理或后处理。由于树冠中心点已经确定, 在分水岭分割过程中就可以用树冠中心点作为参照, 解决过度分割问题。Wang 等^[8]就以树冠中心点作为参照, 利用分水岭算法在树冠中心点周围描绘树冠轮廓, 达到了较好效果。

3.3 局部射线法(local transects)

2002 年, Pouliot 等^[9]提出了局部射线法来描绘幼龄针叶林树冠。这种算法以顶点为中心向四周引出若干条局部射线(local transects), 探测每条射线中亮度变化率最大的点作为树冠边界点。射线法同样可以用在树冠探测中, 检验探测到的局部最大值点周围能否找到树冠边界, 从而对最初的局部最大值滤波结果进行筛选。射线法的树冠探测精度达到了 91%, 优于常规的固定窗口局部最大滤波。射线法的树冠直径提取精度也很好, 与实地测量的直径相比误差不超过 3%。同时研究还证明了树冠直径的提取精度随着空间分辨率的增大而有所提高。熊轶群等^[27]用 Pouliot 的射线法, 并针对树冠重叠现

象对算法进行了改进。他们对树冠中心点引出的若干条光谱射线进行高次曲线拟合, 求其拐点作为树冠边界点。但提取结果会受到树冠密度的影响。重叠较少的树冠面积提取精度为 87.82%, 重叠较多的树冠面积提取精度为 84.91%。

4 单木树冠提取应用

从自动提取的单木树冠多边形中可以轻易测量出单木树冠的直径和面积, 而树冠直径和面积信息又与其他测树因子相关。如胸径和生物量都已证明与树冠大小有密切的关系。因此, 可以通过树冠大小结合各种估测模型进一步估测树木胸径和森林生物量。提取得到的树冠轮廓信息也为单木树种的识别和分类奠定了基础。利用提取的树冠信息预测木材性质也已经走入了初步探索阶段。

4.1 计算树冠面积和郁闭度

从高空间分辨率遥感影像中提取的单木树冠轮廓信息对计算单木树冠面积和林分郁闭度非常有用。众多对树冠面积和郁闭度的研究都是基于物理模型, 如 Li-Strahler 模型就是一种用 TM(thematic mapper)影像反演树冠大小和覆盖度的模型^[28], 在应用上也取得了一些成功^[29-30]。但有学者指出陆地卫星 TM 影像的像素大小与树冠大小相比悬殊太大, 不能有效获取树冠结构^[31]。从高空间分辨率遥感影像中直接提取的单木树冠更加直观准确, 不必再引入复杂的模型。单木树冠轮廓信息中包含了树冠直径和树冠面积, 从而为郁闭度的精确计算提供了便利。同时, 由于高空间分辨率遥感可以大大减轻混合像元问题, 树冠面积和郁闭度的提取精度也会有所提高。Morales 等^[32]曾用 IKONOS 卫星影像对夏威夷岛北部热带干旱森林的郁闭度作了定量提取, 结果与实地测量的林冠覆盖度有很大的相关性, 相关系数 R^2 高达 0.86。

4.2 估测胸径和生物量

一些研究已经发现, 树冠直径与树木胸径有密切的关系^[33-35], 而树木胸径又是一个与森林生物量密切相关的因子^[36-38]。因此, 利用树冠轮廓信息中的树冠直径进行树木胸径和森林生物量建模, 将可能成为一个新的选择。对于一些现有的胸径和生物量的估算模型来说, 树冠直径或树冠面积也一直是一个重要的输入参数。比如, 相容性的多自变量生物量模型中, 自变量就需要考虑冠幅、冠长和冠体积等^[39]。因此, 用单木树冠自动提取得到的树冠直径或面积结合各种模型推算树木胸径和森林生物量是一个便捷的选择。

4.3 单木树种识别和分类

在高空间分辨率遥感单木树冠提取技术实现之前, 树种分类只能以大面积的林分为单位。这种大尺度的分类对于纯林尚能识别出树种, 而混交林则只能大致按照林型或树种组成进行归类。高空间分辨率遥感影像单木树冠提取将每株树木都提取出来, 就可以实现以单木为尺度的树种识别和分类了。Leckie^[20]运用 60 cm 高空间分辨率小型机载成像光谱仪 CASI(compact airborne spectrographic imager)影像对澳大利亚西海岸的幼年针叶林进行单木树种识别和分类。在自动提取出单木树冠以后, 将 16 个试验地林分中的所有树木分为 6 个树种类, 平均分类误差仅为 7.25%。林分中大多数树种的分类误差都低于 20%, 极少数大于 30%。

4.4 预测木材结构和性质

森林木材的结构和性质对于评价森林的经济利用价值非常重要。对木材结构和性质的研究必须通过砍伐后对解析木各项指标的测定来完成。在 20 世纪初很多学者对木材结构性质与树冠的关系进行了研究, 旨在不经过砍伐, 而用树冠形态参数来估计木材性质。如今单木树冠自动提取技术不仅让获取树冠形状尺寸方面的参数变得更加容易, 更重要的是还能提供树冠的各种光谱信息参数。这对于研究树冠参数与木材性质之间的关系非常有利。对于如何利用树冠信息预测木材结构和性质, 建立遥感树冠因子与木材性质关系模型, 也正在初步探讨^[40-41]。

5 单木树冠提取技术展望

单木树冠自动提取对遥感空间分辨率的要求很高。高空间分辨率遥感可以使森林树冠内部组成要

素丰富的细节信息得到充分的表达。在高空间分辨率影像中树冠的形状、尺寸、纹理以及与相邻树冠的关系都能得到很好的表现。但缺点是数据量大, 空间信息复杂, 数据的处理分析比较困难。此外, 遥感空间分辨率与光谱分辨率之间的矛盾也为树冠提取造成了困难。为了解决这些问题, 一些方法也应运而生。面向对象的提取技术可以缓解数据量大的问题。这种方法以像元类为分析提取对象^[42-44], 代替了曾处于支配地位的逐像元处理方法, 大大提高了数据处理的效率^[45]。此外, 全色数据与多光谱数据的融合可以缓和空间分辨率与高光谱分辨率之间的矛盾^[46-47], 融合后的数据既能提高空间分辨率又能在一定程度上保留原有的光谱信息。

但仍有一些问题有待解决。首先, 任何一种单木树冠提取的自动化方法都仅仅在某些特定林分下表现良好, 并不适用于所有林分, 这是由森林结构本身的复杂性决定的。一般情况下, 疏林地或排列较规整的人工林, 树冠提取精度较高。而郁闭度高的密林, 由于树冠之间相接, 重叠, 提取精度相对较低。其次, 对于生长状况不佳的被压木和幼树, 由于冠层的遮挡, 也无法实现自动提取。这些受遮挡的树木即便使用遥感目视解译也同样难以提取。因此单木树冠自动提取的精度最大也只能与人工目视解译精度相当或略好, 而无法代替实地的每木检尺。

未来高空间分辨率单木树冠自动提取将会由二维向三维发展。高采样密度激光雷达不仅可以获取树高, 还可以获取单木的三维树冠结构信息。要提取树木的三维信息, 一般采样密度要达到每平方米 10 个回波点左右^[48-50]。此外, 三维激光扫描系统也可以获取树木的三维空间点阵数据, 但会受到树冠间隙点的干扰, 区分出树冠外层点云是难点。三维树木信息的获取, 可以进行林分的生长模拟, 林分的三维重现, 并大大提高生物量蓄积量等的估测精度。

现阶段, 用于进行单木树冠提取的数据源大部分还是以航空影像为主, 卫星影像用得较少。主要是由于卫星影像的空间分辨率还达不到单木树冠提取研究的需要。但是最近几年, 具有更高空间分辨率的商用卫星已经陆续发射成功。2007 年 9 月 18 日美国数字地球公司 (DigitalGlobe) 发射的 WorldView-1 商用卫星可提供 0.5 m 分辨率的全色图像。2008 年 9 月 6 日美国地球之眼公司 (GeoEye) 发射的 GeoEye-1 商用卫星将提供 0.41 m 全色和 1.65 m 多光谱的高分辨率影像。高空间分辨率的卫星遥感影像能覆盖地球的任何区域, 适用性大大增强, 获取更加快捷^[51]。遥感空间分辨率的提高和计算机技术的快速发展使我们有理相信, 基于高空间分辨率遥感的单木树冠自动提取将会越来越普及, 单木树冠自动提取技术也会不断走向成熟。这必将带给现有的森林经营管理理念一个巨大的转变。单木树冠提取使森林参数能够细化到每株具体的树木, 森林监测也将有望以单木为对象开展。届时, 森林经营管理将不再是一个粗放的概念, 而是以个体树木为单位, 以实时高精度遥感信息提取为手段的精准集约化管理。

参考文献:

- [1] CHEN Dexing, COUGHENOUR M B. GEMTM-A general model for energy and mass transfer of land surfaces and its application at the FIFE sites [J]. *Agric For Meteorol*, 1994, **68** (3-4): 145 - 171.
- [2] LI Xiaowen, STRAHLER A H, WOODCOCK C E. A hybrid geometric optical-radiative transfer approach for modeling albedo and directional reflectance of discontinuous canopies [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1995, **33**: 466 - 480.
- [3] NI Wenge, LI Xiaowen, WOODCOCK C E, et al. Transmission of solar radiation in boreal conifer forests: measurements and models [J]. *J Geophys Res*, 1997, **102**: 29555 - 29566.
- [4] SONG Conghe, BAND L E. MVP: a model to simulate the spatial patterns of photosynthetically active radiation under discrete forest canopies [J]. *Can J For Res*, 2004, **34**: 1192 - 1203.
- [5] GOUGEON F A. A crown-following approach to the automatic delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images [J]. *Can J Remote Sens*, 1995, **21** (3): 274 - 282.
- [6] ERIKSON M. Segmentation of individual tree crowns in colour aerial photographs using region growing supported by fuzzy rules [J]. *Can J For Res*, 2003, **33** (8): 1557 - 1563.
- [7] DRALLE K, RUDEMO M. Automatic estimation of individual tree positions from aerial photos [J]. *Can J For Res*, 1997, **27**: 1728 - 1736.

- [8] WANG Le, GONG Peng, BIGING G S. Individual tree-crown delineation and treetop detection in high-spatial-resolution aerial imagery [J]. *Photogramm Eng Remote Sens*, 2004, **70** (3): 351 – 357.
- [9] POULIOT D A, KING D J, BELL F W, *et al.* Automated tree crown detection and delineation in high-resolution digital camera imagery of coniferous forest regeneration [J]. *Remote Sens Environ*, 2002, **82** (2–3): 322 – 334.
- [10] WALSWORTH N A, KING D J. Image modeling of forest changes associated with acid mine drainage [J]. *Comput Geosci*, 1999, **25** (5): 567 – 580.
- [11] CULVENOR D S. TIDA: An algorithm for the delineation of tree crowns in high spatial resolution remotely sensed imagery [J]. *Comput Geosci*, 2002, **28** (1): 33 – 44.
- [12] WULDER M, NIEMANN K O, GOODENOUGH D G. Local maximum filtering for the extraction of tree locations and basal area from high spatial resolution imagery [J]. *Remote Sens Environ*, 2000, **73** (1): 103 – 114.
- [13] RAWERT B. *Automatic Tree-crown Segmentation Using LM Filters and Balloons* [D]. North Dartmouth: University of Massachusetts, 2004.
- [14] HIRSCHMUGL M, OFNER M, RAGGAM J, *et al.* Single tree detection in very high resolution remote sensing data [J]. *Remote Sens Environ*, 2007, **110** (4): 533 – 544.
- [15] GONG Peng, MARCEAU D, HOWARTH P J. A comparison of spatial feature extraction algorithms for land-use mapping with SPOT HRV data [J]. *Remote Sens Environ*, 1992, **40** (2): 137 – 151.
- [16] POLLOCK R J. *The Automatic Recognition of Individual Trees in Aerial Images of Forests Based on A Synthetic Tree Crown Image Model* [D]. Vancouver: The University of British Columbia, 1996: 172.
- [17] LARSEN M, RUDEMO M. Optimizing templates for finding trees in aerial photographs [J]. *Pattern Recognition Let*, 1998, **19** (12): 1153 – 1162.
- [18] WARNER T A, LEE J Y, MCGRAW J B. Delineation and identification of individual trees in eastern deciduous forest [C]// HILL D A, LECKIE D G. *Proc. International Forum: Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry*. Victoria: Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre, February 10-12. BC, 1998: 81 – 91.
- [19] JOHANSEN T, JEPPE M. Automatic stem mapping in three dimensions by template matching from aerial photographs [J]. *Scandinavian J For Res*, 2002, **17** (4): 359 – 368.
- [20] LECKIE D G, GOUGEON F A, WALSWORTH N, *et al.* Stand delineation and composition estimation using semi-automated individual tree crown analysis [J]. *Remote Sens Environ*, 2003, **85** (3): 355 – 369.
- [21] BRANDTBERG T, WALTER F. Automated delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images by multiple-scale analysis [J]. *Mach Vision Appl*, 1998, **11** (1): 64 – 73.
- [22] BRANDTBERG T, WARNER T A, LANDENBERGER R E, *et al.* Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America [J]. *Remote Sens Environ*, 2003, **85** (3): 290 – 303.
- [23] HAY G J, CASTILLA G, WULDER M A, *et al.* An automated object-based approach for the multiscale image segmentation of forest scenes [J]. *Int J Appl Earth Obs Geoinform*, 2005, **7** (4): 339 – 359.
- [24] MEYER F, BEUCHER S. Morphological segmentation [J]. *J Visual Commun Image Represent*, 1990 (1): 21 – 46.
- [25] NAJMAN L, COUPRIE M, BERTRAND G. Watersheds, mosaics, and the emergence paradigm [J]. *Discrete Appl Math*, 2005, **147** (2–3): 301 – 324.
- [26] 肖鹏峰, 冯学智, 赵书河, 等. 基于相位一致的高分辨率遥感图像分割方法 [J]. *测绘学报*, 2007, **36** (2): 146 – 151.
XIAO Pengfeng, FENG Xuezhi, ZHAO Shuhe, *et al.* Segmentation of high-resolution remotely sensed imagery based on phase congruency [J]. *Acta Geod Cartogr Sin*, 2007, **36** (2): 146 – 151.
- [27] 熊轶群, 吴健平. 基于高分辨率遥感图像的树冠面积提取方法 [J]. *地理与地理信息科学*, 2007, **23** (6): 31 – 33.
XIONG Yiqun, WU Jianping. Tree-crown area detection algorithm for high spatial resolution remote-sensing image [J]. *Geogr Geo-Inform Sci*, 2007, **23** (6): 31 – 33.
- [28] LI Xiaowen, STRAHLER A H. Geometric-optical modeling of a conifer forest canopy [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1985, **23**: 705 – 721.
- [29] FRANKLIN J, STRAHLER A H. Invertible canopy reflectance modeling of vegetation structure in semi-arid woodland [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1988, **26**: 809 – 825.
- [30] WU Yecheng, STRAHLER A H. Remote estimation of crown size, stand density and foliage biomass on the Oregon tran-

- sect [J]. *Ecol Appl*, 1993 (4): 299 – 312.
- [31] COHEN W B, SPIES T A. Semivariograms of digital imagery for analysis of conifer canopy structure [J]. *Remote Sens Environ*, 1990, **34** (3): 167 – 178.
- [32] MORALES R M, MIURA T, IDOL T. An assessment of Hawaiian dry forest condition with fine resolution remote sensing [J]. *For Ecol Manage*, 2008, **255** (7): 2524 – 2532.
- [33] READ J M, CLARK D B, VENTICINQUE E M, *et al.* Application of merged 1-m and 4-m resolution satellite data to research and management in tropical forests [J]. *J Appl Ecol*, 2003, **40** (3): 592 – 600.
- [34] BECHTOLD W A. Largest-crown-width prediction models for 53 species in the western United States [J]. *Western J Appl For*, 2004, **19** (4): 245 – 251.
- [35] HEMERY G E, SAVILL P S, PRYOR S N. Applications of the crown diameter-stem diameter relationship for different species of broadleaved trees [J]. *For Ecol Manage*, 2005, **215** (1–3): 285 – 294.
- [36] BROWN S, GILLESPIE A J R, LUGO A E. Biomass of tropical forests of south and southeast Asia [J]. *Can J For Res*, 1991, **21**: 111 – 117.
- [37] CLARK D B, CLARK D A. Landscape-scale variation in forest structure and biomass in a tropical rain forest [J]. *For Ecol Manage*, 2000, **137** (1–3): 185 – 198.
- [38] ALVES L F, SANTOS F A M. Tree allometry and crown shape of four tree species in Atlantic rain forest, southeast, Brazil [J]. *J Trop Ecol*, 2002, **18**: 245 – 260.
- [39] 唐守正, 张会儒, 胥辉. 相容性生物量模型的建立及其估计方法研究[J]. 林业科学, 2000, **36** (1): 19 – 27.
TANG Shouzheng, ZHANG Huiru, XU Hui. Study on establish and estimate method of compatible biomass model [J]. *Sci Silv Sin*, 2000, **36** (1): 19 – 27.
- [40] 刘杏娥, 江泽慧, 费本华, 等. 利用遥感技术预测人工林木材性质及其产品价值的初探[J]. 林业科学研究, 2005, **18** (4): 425 – 429.
LIU Xing'e, JIANG Zehui, FEI Benhua, *et al.* Discussion on prediction of wood properties and product values of plantation by remote sensing technology [J]. *For Res*, 2005, **18** (4): 425 – 429.
- [41] 王小青, 刘杏娥, 任海青. 树冠特征对小黑杨木材性质和生长量的影响研究[J]. 林业科学研究, 2007, **20** (6): 801 – 806.
WANG Xiaoqing, LIU Xing'e, REN Haiqing. Effects of crown attributes on wood characteristics and increments of *Populus × xiaohei* [J]. *For Res*, 2007, **20** (6): 801 – 806.
- [42] LALIBERTE A S, RANGO A, HAVSTAD K M, *et al.* Object-oriented image analysis for mapping shrub encroachment from 1937 to 2003 in southern New Mexico [J]. *Remote Sens Environ*, 2004, **93** (1–2): 198 – 210.
- [43] GITAS I Z, MITRI G H, VENTURA G. Object-based image classification for burned area mapping of Creus Cape, Spain, using NOAA-AVHRR imagery [J]. *Remote Sens Environ*, 2004, **92** (3): 409 – 413.
- [44] QUARTEL S, ADDINK E A, RUESSINK B G. Object-oriented extraction of beach morphology from video images [J]. *Int J Appl Earth Obs Geoinform*, 2006, **8** (4): 256 – 269.
- [45] WIDLowski J L, LAVERGNE T, PINTY B, *et al.* Towards a high spatial resolution limit for pixel-based interpretations of optical remote sensing data [J]. *Adv Space Res*, 2008, **41** (11): 1724 – 1732.
- [46] DUPORT B G. WaveMerg: a multiresolution software for merging SPOT panchromatic and SPOT multispectral data [J]. *Environ Mod Software*, 1997, **12** (1): 85 – 92.
- [47] YANG Xuhong, JING Zhongliang, LIU Gang, *et al.* Fusion of multi-spectral and panchromatic images using fuzzy rule [J]. *Comm Nonlin Sci Numer Simul*, 2007, **12** (7): 1334 – 1350.
- [48] BRANDTBERG T, WARNER T A, LANDENBERGER R E, *et al.* Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America [J]. *Remote Sens Environ*, 2003, **85** (3): 290 – 303.
- [49] CLARK M L, CLARK D B, ROBERTS D A. Small-footprint lidar estimation of sub-canopy elevation and tree height in a tropical rain forest landscape [J]. *Remote Sens Environ*, 2004, **91** (1): 68 – 89.
- [50] MALTAMO M, EERIKAINEN K, PITKANEN J, *et al.* Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions [J]. *Remote Sens Environ*, 2004, **90** (3): 319 – 330.
- [51] SONG Conghe. Estimating tree crown size with spatial information of high resolution optical remotely sensed imagery [J]. *Int J Remote Sens*, 2006, **28** (15): 3305 – 3322.