

规则林地覆盖度照相测量法的精度分析

赵继强, 谢东辉^{*}, 孟 夏, 穆西晗, 阎广建

(北京师范大学地理学与遥感科学学院, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875)

摘 要: 为定量研究照相法测量规则林地覆盖度中采样策略、相机非垂直拍摄等因素对覆盖度计算结果的影响, 该文对河北怀来的一片梨树林进行了实地测量, 通过对测量数据的统计计算, 利用植被结构生成软件 Onyx tree professional 重建梨树林场景, 采用基于物理的光线追踪算法模拟相机拍摄的照片, 提出了规则林地覆盖度照相法测量的采样方案, 并通过计算机模拟检验了采样方案。通过精确控制模拟相机的拍摄条件, 进一步分析了非垂直拍摄对测量精度的影响。结果表明, 相机的非垂直拍摄对覆盖度计算结果的精度有较大的影响, 误差最大可达 27.9%。该文提出的测量方案为规则林地的覆盖度实地测量提供了参考。

关键词: 遥感, 采样方案, 计算机模拟, 覆盖度, 照相法

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.19.019

中图分类号: TP79

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-19-0152-07

赵继强, 谢东辉, 孟 夏, 等. 规则林地覆盖度照相测量法的精度分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 152—158.
Zhao Jiqiang, Xie Donghui, Meng Xia, et al. Accuracy analysis of vegetation cover measurement using digital photography for regular planted woodland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(19): 152—158. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

植被覆盖度 (fraction of vegetation cover, FVC) 通常定义为植被 (包括茎、枝干、叶片) 在地面的垂直投影面积占统计样区总面积的百分比, 是反映地表植被生长状况, 指示生态环境变化的重要指标, 在农业、林业、土地利用、环境保护、灾害风险监测等领域都有广泛的应用^[1-2]。

植被覆盖度测量方法可分为遥感监测和地面实测 2 类。地面覆盖度实测值作为遥感反演覆盖度的基础数据, 是评价遥感反演植被覆盖度精度的重要依据^[3]。目前, 地面植被覆盖度的主要测量方法有: 目测估计法、采样法、仪器测量法等^[4]。数码相机照相法测覆盖度是仪器测量法的一种, 利用数码相机竖直向下 (或向上) 拍摄植被冠层照片, 计算照片中植被像元数占总像元数的百分比作为植被覆盖度。该方法相对于其他地面测量方法操作简单, 测量精度高, 是目前应用最为广泛的地面植被覆盖度测量方法。目前该方法的研究主要集中在针

对数码照片的分类方法及其精度评价方面, 如 Zhou 等利用数码相机拍摄植被冠层的数码照片, 并通过光谱纹理分类器计算草地植被覆盖^[5]。Laliberte 等利用 IHS 颜色空间法将草地的数码照片分成了阴影区、土壤、绿色植被、衰老植被 4 类, 统计了各类的百分比, 并与 LPI (line point intercept) 测量法^[6]的结果进行了比较^[7]。刘耀开等提出利用 Lab 颜色空间和高斯模型拟合来自动确定植被和土壤的分类阈值, 并与监督分类和 RGB 颜色空间分类法获取的覆盖度值进行对比^[8]。以上各研究仅对比了照片在不同分类方法下的覆盖度计算结果, 并未考虑实地测量中相机拍摄采样策略和相机的非垂直拍摄等因素的影响。如何定量评价照相法的测量精度, 为试验测量提供参考方案和指导, 是需要认真考虑和分析的问题。

在利用计算机模拟法构建的植被场景中, 可精确地获取模拟植被场景的覆盖度真值, 这为照相法测覆盖度的精度评价提供了一种思路。目前, 计算机模拟三维场景常用的渲染算法有蒙特卡洛光线追踪法和辐射度算法 2 种, 蒙特卡洛光线追踪法是建立在对光子在植被冠层中路径采样的基础上。该法已经大量应用于遥感中植被冠层 BRDF (bidirectional reflectance distribution function) 和热点效应的模拟, 较好地模拟了真实冠层的二向性反射情况, 并且是明确需要路径长度时仅有真正适应的方法^[9-11]。辐射度算法被

收稿日期: 2013-01-17 修订日期: 2013-08-06

基金项目: 国家自然科学基金 (41071224); 国家科技支撑计划 (2012BAH29B04); 欧盟委员会 FP-7 (212921)

作者简介: 赵继强 (1988—), 男, 山东青岛人, 主要从事植被真实结构计算机模拟模型的研究。北京 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 100875。Email: zjq061800@163.com

^{*}通信作者: 谢东辉 (1976—), 女, 吉林省永吉县人, 讲师, 博士, 主要从事虚拟作物与计算机模拟模型的研究与应用。北京 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 100875。Email: xiedonghui@bnu.edu.cn

广泛地应用于真实结构场景的计算机模拟中,该方法的优点是,一旦场景的辐射传输模拟完成,在任意视角的冠层反射情况都能够获取^[12-16]。尽管使用了各种加速计算方法,但对于复杂场景来说,该法需要求解大量的辐射传输方程,速度很慢^[17-21]。

本文基于实地测量的数据,利用植被结构生成软件 Onyx tree professional 重建了一片规则的梨树林场景,采用基于物理模型的光线追踪方法(physically based ray-tracing, PBRT)^[22]模拟相机拍摄的照片。利用计算机模拟验证了覆盖度照相法测量规则林地的采样方案,验证了一种针对规则林地的覆盖度照相法测量的采样方案。通过精确地控制模拟相机的拍摄条件,进一步分析了非垂直拍摄对覆盖度测量精度的影响。与其他精度评价方法相比,利用计算机模拟的场景可精确计算覆盖度真值作为精度评价的标准。同时,在计算机模拟模型中可精确地控制模拟相机的拍摄条件,排除实地测量误差的干扰。研究结论对规则林地的覆盖度的实地测量具有一定的指导意义。

1 试验方法及数据处理

2010 年 6 月至 8 月期间,研究人员在河北省张家口市怀来县的一片梨树果园(N40.373°, E115.723°, 海拔 505 m)内进行了试验测量。该梨园总面积约为 60 000 m²,梨园经过精细栽培和管理,每一株间距相等,株距和行距皆为 3.5 m,且梨树长势较均匀。试验期间,在梨园中部选取 20 m×20 m 作为重点采样区。

为了能在计算机中较准确的模拟并再现该梨园场景,本次试验同时测量了梨树的结构参数和组分光谱数据。

1) 梨树的结构参数:在梨园内选取 5 株具有代表性的样株,使用徕卡 TS02 全站仪(测距精度±1.5 mm)和皮尺,详细测量了梨树主要枝干起止位置的三维坐标和直径,同时记录不同分枝的分级及不同分枝上着生叶片数情况。通过该测量数据可以计算梨树每级枝干的位置、长度和倾角等。测量时,将梨树从上到下分成 3 层,每层选取 2~3 个典型分枝,将分枝上所有叶片编号。然后,将所有编号叶片取样,平铺在白纸上,利用数码相机垂直向下拍照,后期通过对拍摄照片进行分类,确定每个取样叶片的叶面积。根据统计的叶片数目可估计单株梨树的叶面积总和。根据上述测量数据,统计获得植被冠层的株高、冠幅、单片叶片大小、枝干间夹角等的均值或取值范围。具体结果如表 1 所示。

表 1 测量梨树的结构参数

Table 1 Measured structural parameters of pyrus	
结构参数 Structural parameters	值 Value
株高均值 Average height/m	3.8
冠幅均值 Average crown range/m	2.5
一级分枝高度 Branch growing height/m	0.4~0.6
一级分枝与主干夹角 Branch angle/°	50~60
叶片面积均值 Average leaf area/cm ²	55
单株梨树叶面积指数 Tree LAI	4.57~6.09

其中,单株梨树叶面积指数是整株梨树所有叶片的总面积和与该梨树投影所占面积的比值。梨树投影面积用以冠幅为直径的圆的面积来近似。

2) 组分光谱数据:利用积分球和 ASD 光谱仪测量了叶片的反射率、透射率数据,利用 ASD 光谱仪测量了枝干和土壤的反射率数据。

2 规则梨树林场景模拟

2.1 模拟场景结构数据的获取

为了构建梨树林三维场景,本文选择 Onyx tree professional^[23]进行单株梨树结构的重建。然后将产生的梨树通过旋转平移组合构造一片梨树林场景。

Onyx tree professional 软件是 Onyx computing 推出的植被建模软件,内置大量的常见植被素材库,目前已经广泛应用于植被结构产生、森林管理、植被遥感等领域^[24-26]。本研究中,将各样株实测数据的统计值(植株高度、冠幅、叶片大小、叶面积指数、枝干间夹角等)输入到 Onyx tree professional 软件当中,产生 20 株不同的梨树,主要输入的测量参数同表 1。利用这 20 株梨树构建一片 5 行 4 列的规则梨树林,所模拟梨树林的梨树株距、行距为 3.5 m,模拟场景大小为 17.5 m×14 m,利用随机起伏的曲面模拟场景的土壤。模拟的梨树林场景如图 1 所示。

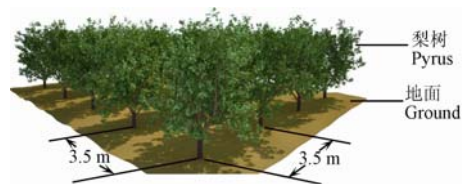


图 1 模拟的梨园场景

Fig.1 Simulated pyrus orchard

2.2 基于物理模型的照片模拟

基于物理模型的光线追踪法(physically based ray-tracing, PBRT)是一种具有照片级真实感的光线追踪渲染算法,目前被广泛应用于电影制作、游戏场景渲染、虚拟现实等方面。PBRT 已经得到科

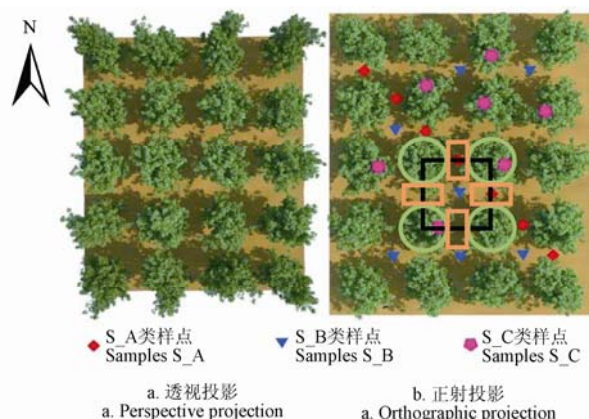
研领域的广泛认可,在辐射传输模拟当中具有广泛的应用。例如, Dimitrios 等利用 PBRT 模拟了光在真实植被内的直射和散射分布情况,并与利用比尔朗伯定律计算的多层简化冠层内的直射和散射分量进行对比,分析多层简化冠层对冠层辐射吸收计算结果的影响^[27]。Stuckens 等利用 PBRT 模拟了真实结构植被的叶片组分、土壤背景的反射和散射,并利用 RAMI 的在线验证系统(RAMI online model checker, ROMC)^[28]进行验证,结果表明 PBRT 可精确地模拟冠层内部的光照情况^[29]。本研究利用基于物理模型的光线追踪法模拟数码相机在不同拍摄条件下的照片。模拟参数设置如表 2 所示。

表 2 模拟参数

Table 2 Simulated parameters

项目 Item	值 Value
经纬度 Longitude, latitude	40.373°N, 115.723°E
日期、时间 Date, Time	2010.06.23 11:00 a.m.
波段范围 Band range/nm	400~700
拍摄高度 Shooting height/m	1
相机焦距 focal length/mm	18
像素 Pixel size	3872×2592

场景组分光谱数据参考 ASD 光谱仪的测量值。模拟过程中,通过设置模拟相机与地面之间的距离,控制模拟相机的拍摄高度;通过改变模拟相机坐标和观测方向实现模拟相机观测位置和观测角度的变化。模拟相机的参数设置参考实际测量时相机的参数设置,焦距固定为 18 mm,模拟的照片像素为 3 872×2 592,模拟相机的视场角为 65.6°×47.4°。图 2 为模拟梨树林的场景在竖直方向俯视观测的模拟照片。



注:图 2b 中,黑色方框是边长为 3.5m 的正方形样方,样方内同时包含了 S_A, S_B, S_C 这 3 类样点,代表整个梨树林的基本组成单元。
Note: As shown in Fig.2, The black box is a sampling square with side length 3.5m. It contains three different samples S_A, S_B, S_C and it is the basic unit of the pyrus orchard.

图 2 模拟梨树林的俯视图

Fig.2 Top view of simulated pyrus orchard.

3 规则林地照相法测覆盖度的测量方案及验证

3.1 测量方案

对于低矮的植被,常规的照相法测覆盖度是用数码相机竖直向下拍摄场景的照片,通过对数码照片进行分类,计算数码相片中植被像元数占总像元数的百分比作为植被覆盖度。对于较高的树木,受限于相机架设的高度和视场,通过竖直向下拍摄的方式获取研究区的照片一般是不现实的。这种情况下,可采用竖直向上拍摄的方式获取数码相片,将拍摄的照片分成植被和天空 2 类,其中植被组分的比例可作为相机拍摄场景的覆盖度值。

实地测量中,对于面积较大的植被场景,往往需要选择合适数量的拍摄样点。对于该类规则种植的林地,存在较为明显 3 类采样点,具体如图 2b 中所示:3 类采样点包括相邻垄行方向 2 棵树的中间点,记为 S_A;相邻 4 棵梨树的中间,记为 S_B;树底一侧的样点,记为 S_C。其中树下的样点覆盖度值最大,2 棵树之间的样点覆盖度值较小,4 棵树之间的样点覆盖度值最小,在实地测量中需要对每类样点分别进行采样拍摄。对不同样点拍摄获取的照片进行分类计算,求取 3 类采样点各自覆盖度的均值。然后根据林地的具体分布情况,确定 3 类样点各自在林地中的比例,通过加权计算得到整个场景的覆盖度值。

根据本文中模拟的梨树林植株分布情况,在场景中随机选择了 3 类测量采样点,具体如图 2b 中所示。在各样点分别进行垂直向上的模拟拍摄。模拟相机拍摄高度为 1.0 m,模拟的 3 类样点照片如图 3 所示。按 3 类样点在场景中所占的面积比例,对 3 类样点的覆盖度均值进行加权计算整个场景的覆盖度值。

3.2 基于模拟照片的测量方案验证

采用监督分类方法对模拟的照片进行分类,主要分为天空背景和植被组分。在此过程中,没有具体区分叶片和茎干,而作为植被组分统一分类。根据分类后的二值化图像计算各样点照片的覆盖度。模拟照片如图 3 所示,分类结果如图 4 所示。

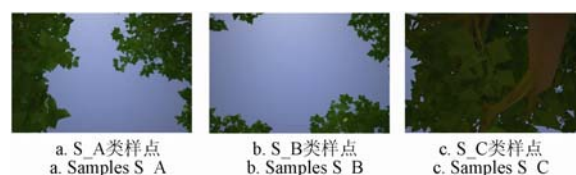


图 3 3 类不同样点的模拟照片

Fig.3 Simulated images of three different samples

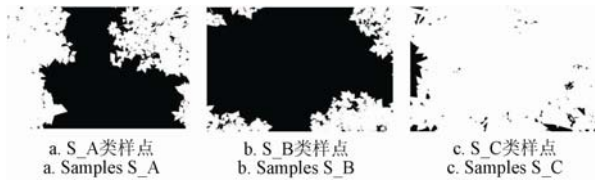


图 4 模拟照片的分类结果

Fig.4 Classification results of simulated images

为了获得场景的覆盖度真值，模拟了整个场景垂直向下的正射照片，然后对正射照片进行监督分类，进而统计获得场景的覆盖度值，并将该值作为真值。表 3 列出了模拟样点的覆盖度计算值以及 3 类样点各自的覆盖度均值。

表 3 不同样点的覆盖度值

Table 3 Calculated vegetation cover of different samples

样点 Samples	样点和相应的 覆盖度计算值 Samples and FVC values/%	均值 Average values/%	覆盖度 真值 True FVC values/%
S_A	A1	47.88	42.32
	A2	23.81	
	A3	54.45	
	A4	29.53	
	A5	47.50	
	A6	39.42	
	A7	53.67	
S_B	B1	15.40	14.67
	B2	13.71	
	B3	14.59	
	B4	14.73	
	B5	13.58	
	B6	14.51	
	B7	16.16	
S_C	C1	95.65	93.50
	C2	97.51	
	C3	92.63	
	C4	91.27	
	C5	89.73	
	C6	92.98	
	C7	94.76	

本研究中共模拟了 21 个样点，其中 S_A、S_B、S_C 类各 7 个样点。取各类样点的平均值代表该类样点覆盖度的均值。如表 3 中所示，S_B 类和 S_C 类样点采样的平均结果比真值显著偏低或偏高，S_A 类样点均值结果比较接近于真值，但单独从 S_A 类 7 个样点分别来看，S_A 类的取值范围特别宽（23.81~54.45），最大值与最小值甚至相差一倍以上，而 S_B 和 S_C 类各样点与均值的差别相对较小。因此，为了保证各个样点采样的代表性，在实际测量过程中有必要对 S_A 类样点尽量多的进行采样。

为了获得整个冠层场景的覆盖度值，对不同样点的覆盖度值采用按面积权重加权的方法计算。其

中 S_A 类样点代表 2 树间覆盖度，S_B 类样点代表 4 棵树间覆盖度，S_C 类样点代表树冠的覆盖度。对于本文中选用的规则分布的梨树场景，选择场景中具有代表性的样方，分别计算 3 类样点的面积权重。如图 2b 所示，黑色方框是以株距为边长的正方形样方，样方内同时包含了 S_A、S_B、S_C 这 3 类样点，代表整个场景典型的基本组成单元。计算 S_C 类样点面积时，将冠层视作以冠幅为直径的圆（如图 2b 中的绿色圆），S_A 类样点（如图 2b 中的黄色矩形）的面积可通过计算黄色矩形在样方中的面积和得到，S_B 类样点的面积可通过计算整个样方面积与 S_A 类与 S_C 类样点的面积差得到，本文模型梨树林的权重面积具体计算如下

黑色方框样方面积

$$S_0 = l_1 \times l_2 = 3.5\text{m} \times 3.5\text{m} = 12.25\text{m}^2$$

其中， S_0 为规则林地组成单元的面积， m^2 ，即图 2 黑色方框。 l_1 、 l_2 为规则林地的植株间距， m ，此处皆为 3.5 m。

S_C 类样点的面积权重

$$W_{S_C} = \frac{\pi R^2}{S_0} = \frac{\pi \times 1.25\text{m} \times 1.25\text{m}}{12.25\text{m}^2} = 0.401$$

其中， W_{S_C} 为林下样点占黑色方框的面积权重，为 4 个以冠幅为半径的 1/4 圆的面积权重，即图 2b 中 1 个圆占黑色方框样方的面积权重。 R 为植株的冠幅均值， m ，取值为 1.25m，经计算 W_{S_C} 为 0.401。

S_A 类样点的面积权重

$$W_{S_A} = \frac{R \times (l_1 - R \times 2) \times 2}{S_0} + \frac{R \times (l_2 - R \times 2) \times 2}{S_0} = \frac{1.25\text{m} \times (3.5\text{m} - 1.25\text{m} \times 2) \times 2}{12.25\text{m}^2} + \frac{1.25\text{m} \times (3.5\text{m} - 1.25\text{m} \times 2) \times 2}{12.25\text{m}^2} = 0.408$$

其中， W_{S_A} 为 2 树之间的面积占黑色方框的面积权重，经计算 W_{S_A} 为 0.408。

S_B 类样点的面积权重

$$W_{S_B} = 1 - W_{S_C} - W_{S_A} = 1 - 0.401 - 0.408 = 0.191$$

其中， W_{S_B} 为 4 颗树之间的面积占黑色方框的面积权重，经计算 W_{S_B} 为 0.191。

FVC 加权计算值

$$FVC_{\text{calculate}} = FVC_{S_A} \times W_{S_A} + FVC_{S_B} \times W_{S_B} + FVC_{S_C} \times W_{S_C} = 42.32 \times 0.408 + 14.64 \times 0.191 + 93.50 \times 0.401 = 58.22$$

其中， $FVC_{\text{calculate}}$ 为 FVC 加权计算值； FVC_{S_A} 为 S_A 类样点覆盖度均值； FVC_{S_B} 为 S_B 类样点覆盖度均值； FVC_{S_C} 为 S_C 类样点覆盖度均值，经计算

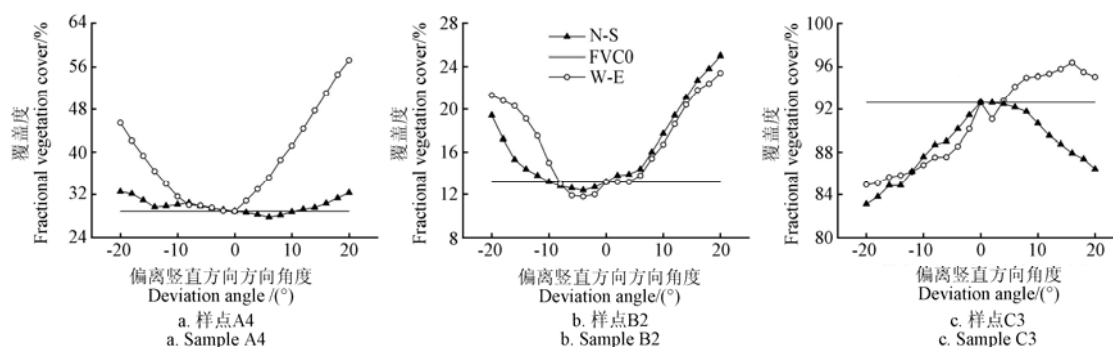
$FVC_{calculate}$ 为 58.22。

FVC 加权计算值与 FVC 真值的相对误差为

$$\left| \frac{FVC_{true} - FVC_{calculate}}{FVC_{true}} \right| \times 100\% =$$

$$\left| \frac{58.22 - 54.28}{54.28} \right| \times 100\% = 7.3\%$$

其中, FVC_{true} 模拟场景的 FVC 真值。计算结果表明, 该计算方法的相对误差较小, FVC 加权计算值与 FVC 真值的相对误差为 7.3%, 可较为精确的计算得到规则林地的 FVC 值。



注: FVC_0 表示竖直向上拍摄时的覆盖度计算值。N-S、W-E 分别表示沿南北方向和东西方向偏离竖直方向一定角度计算得到的覆盖度值。

Note: FVC_0 represents the calculated vegetation cover values when shooting upwards. N-S and W-E represent the calculated vegetation values when shooting deviated from the vertical to the North-South direction and West-East direction.

图 5 计算的覆盖度值随相机偏离竖直方向角度的变化

Fig.5 Calculated fractional vegetation cover when camera deviated from vertical direction

样点 A4 属于 S_A 类样点, 位于 2 棵树中间, 在 W-E 方向偏转时 (即向冠层方向偏转), 随偏转角度的增大, 相机视场内冠层组分 (包括叶片和茎干等) 所占的比例迅速增大; 而在 N-S 方向偏转时 (即沿着树间间隙方向偏转), 随偏转角度增加, 相机视场内冠层组分所占比例的变化不明显。样点 B2 属于 S_B 类样点, 位于 4 棵树中间, 空隙最大, 沿着 N-S 方向和 W-E 方向偏转角度时, 随偏转角度的增大, 相机视场内冠层组分所占的比例迅速增大, 因此覆盖度计算值迅速增大。样点 C3 属于 S_C 类样点, 位于冠层一侧的下方, 在 W-E 方向偏转时 (即偏向冠层和偏离冠层方向, 其中负角度代表偏离冠层, 正角度代表偏向冠层), 偏向冠层时, 随偏转角度的增大, 相机视场内冠层组分所占的比例迅速增大, 特别是茎干的比例会显著增加, 偏离冠层时, 随偏转角度的增大, 相机视场内冠层组分所占的比例迅速减少; 沿着 N-S 方向偏转 (即偏离冠层方向), 随偏离冠层角度的增大, 相机视场内冠层组分所占的比例减少。

由图 5 可知, 非垂直拍摄对覆盖度计算结果的影响非常大, 除了 A4 样点在 N-S 方向以外, 在偏离竖直方向角度大于 10° 后, 计算误差迅速增加,

4 非垂直拍摄对覆盖度测量精度的影响分析

实际拍摄中因摄像头难以保持完全竖直向上, 非垂直拍摄是较为常见的情况。因此有必要分析非垂直拍摄对覆盖度测量精度的影响。

本研究从上述 S_A、S_B 和 S_C 这 3 类样点中选取了 3 个样点 A4、B2、C3, 分别模拟了沿南北方向 (N-S) 和东西方向 (W-E) 偏离竖直方向一定角度的照片, 偏离角度范围为 $-20^\circ \sim 20^\circ$, 间隔 2° 。对模拟的照片进行监督分类, 计算各照片的覆盖度值。3 个样点的覆盖度计算值随偏离竖直方向角度的变化如图 5。

其中 B2 类样点的相对误差最大可达 98.4%。当 3 个样点偏离角度都为 20° 时, 最终计算的覆盖度结果误差可达 27.9%。由此可见, 非垂直拍摄对覆盖度计算结果的影响非常大, 在拍摄中应采用更为严格和精确的方法来保持相机竖直向上拍摄, 提高测量的精度。

本研究中所模拟的梨树场景, 因梨树的高度较小且梨树的间距较大, 受限相机的视场, 不同采样点拍摄照片的冠层差异明显, 故非垂直拍摄对计算结果的影响较大。当植株高度较大, 或者植株间距较小时, 不同采样点拍摄照片的冠层差异较小, 非垂直拍摄的影响会减小, 但仍然会对计算结果产生较大影响。

5 结 论

本研究利用计算机模拟的方法, 重建了植被真实结构, 模拟了数码相机拍摄的照片, 验证了一种按照面积加权法计算规则林地覆盖度照相测量法的采样方案。对于本研究重建的场景, 覆盖度计算相对误差为 7.3%, 精度较高, 符合实地调查测量精度的要求。

本研究进一步分析了非垂直拍摄对测量精度的影响。通过分析非垂直拍摄的覆盖度计算结果发

现, 对于本研究重建的场景, 由非垂直拍摄引起的覆盖度单点计算误差高达 98.4%, 覆盖度面积加权计算误差高达 27.9%。因此, 对类似于本研究中高度较小且间距较大的林地, 非垂直拍摄对覆盖度的估算精度有较大的影响。

计算机模拟的方法提供了标准可控的环境, 是检验各种测量方法精度的有效途径。除了用于本研究中照相法测覆盖度的精度分析外, 还可以用于叶面积指数地面间接测量仪器测量精度的评价。因此, 在接下来的工作中, 可将本研究中用到的方法扩展到 LAI 地面间接测量仪器的精度评价中。

[参 考 文 献]

- [1] Choudhury B J. Synergism of multispectral satellite observations for estimating regional land surface evaporation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 49(3): 264—274.
- [2] 李存军, 赵春江, 刘良云, 等. 红外光谱指数反演大田冬小麦覆盖度及敏感性分析[J]. *农业工程学报*, 2004, 5(20): 159—164.
Li Cunjun, Zhao chunjiang, Liu Liangyun, et al. Retrieval winter wheat ground cover by short-wave infrared spectral indices in field and sensitivity analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2004, 5(20): 159—164. (in Chinese with English abstract)
- [3] 任杰, 柏延臣, 王锦地. 从数码照片中快速提取植被覆盖度的方法研究[J]. *遥感技术与应用*, 2010, 25(5): 719—724.
Ren Jie, Bo Yanchen, Wang Jindi. An efficient method for extracting vegetation coverage from digital photographs[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(5): 719—724. (in Chinese with English abstract)
- [4] 张云霞, 李晓兵, 陈云浩. 草地植被盖度的多尺度遥感与实地测量方法综述[J]. *地球科学进展*, 2003, 18(1): 85—93.
Zhang Yunxia, Li Xiaobing, Chen Yunhao. Overview of field and multi-scale remote sensing measurement approaches to grassland and vegetation coverage[J]. *Advance In Earth Sciences*, 2003, 18(1): 85—93. (in Chinese with English abstract)
- [5] Zhou Q, Robson M. Automated rangeland vegetation cover and density estimation using ground digital images and a spectral-contextual classifier[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(17): 3457—3470.
- [6] Herrick J E, Zee J W V, Havstad K M, et al. Monitoring manual for grassland, shrubland and savanna ecosystems. Volume I: Quick Start. Volume II: Design, supplementary methods and interpretation[M]. Las Cruces, NM: USDA-ARS Jornada Experimental Range, 2005, 36—199.
- [7] Laliberte A S, Rango A, Herrick J E, et al. An object-based image analysis approach for determining fractional cover of senescent and green vegetation with digital plot photography[J]. *Journal of Arid Environments*, 2007, 69(1): 1—14.
- [8] Liu Y, Mu X, Wang H, et al. A novel method for extracting green fractional vegetation cover from digital images[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2012, 23(3): 406—418.
- [9] North P R. Three-dimensional forest light interaction model using a Monte Carlo method[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(4): 946—956.
- [10] Disney M, Lewis P, North P. Monte carlo ray tracing in optical canopy reflectance modeling[J]. *Remote Sensing Reviews*, 2000, 18(2/4): 163—196.
- [11] Goel N S, Thompson R L. A snapshot of canopy reflectance models and a universal model for the radiation regime[J]. *Remote Sensing Reviews*, 2000, 18(2/4): 197—225.
- [12] Borel C C, Gerstl S A W, Powers B J. The radiosity method in optical remote sensing of structured 3-D surfaces[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 36(1): 13—44.
- [13] Wenhan Q, Jupp D L B. An analytical and computationally efficient reflectance model for leaf canopies[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1993, 66(1/2): 31—64.
- [14] Wenhan Q. Modeling bidirectional reflectance of multicomponent vegetation canopies[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 46(3): 235—245.
- [15] Wenhan Q, Yueqin X. On the hotspot effect of leaf canopies: Modeling study and influence of leaf shape[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 50(2): 95—106.
- [16] Qin W, Gerstl S A W. 3-D scene modeling of semidesert vegetation cover and its radiation regime[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74(1): 145—162.
- [17] 谢东辉, 孙睿, 朱启疆, 等. 利用辐射度模型模拟玉米冠层辐射分布[J]. *作物学报*, 2006, 32(3): 317—323.
Xie Donghui, Sun Rui, Zhu Qijiang, et al. Reflectance distribution of corn canopies simulated with radiosity-graphics combined model[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(3): 317—323. (in Chinese with English abstract)
- [18] 赵峰, 顾行发, 刘强, 等. 基于 3D 真实植被场景的全波段辐射传输模型研究[J]. *遥感学报*, 2006, 10(5), 670—675.
Zhao Feng, Gu Xingfa, Liu Qiang, et al. Modeling of 3D canopy's radiation transfer in the VNIR and TIR domains[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(5): 670—675. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张阳, 柳钦火, 黄华国, 等. 大尺度辐射度模型敏感性分析及在祁连山林区的应用[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(7): 834—842.
Zhang Yang, Liu Qinhua, Huang Huaguo, et al. Sensitivity analysis of large scale radiosity-graphics model and the application on the forest of qilian mountain[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7): 834—842. (in Chinese with English abstract)
- [20] Zhao F, Gu X, Verhoef W, et al. A spectral directional reflectance model of row crops[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(2): 265—285.
- [21] Huang H, Qin W, Liu Q. RAPID: A radiosity applicable to porous individual objects for directional reflectance over complex vegetated scenes[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 132(2013): 221—237.
- [22] Matt P, Greg H. Physically Based Rendering from Theory to Implementation[M]. San Francisco, CA, USA, 2004: Morgan Kaufmann, 2004.
- [23] Bosanac B, Zanchi P. Onyx Tree User's manual[M]. Upper Marlboro, Maryland, 2002.
- [24] Lintermann B, Deussen O. A modelling method and user interface for creating plants[J]. *Computer Graphics Forum*, 1998, 17(1): 73—82.

- [25] Yan H P, Kang M Z, De R, et al. A dynamic, architectural plant model simulating resource-dependent growth[J]. *Annals of Botany*, 2004, 93(5): 591—602.
- [26] Fettig C J, Allen K K, Borys R R, et al. Effectiveness of bifenthrin (Onyx) and carbaryl (Sevin SL) for protecting individual, high-value conifers from bark beetle attack (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) in the western United States[J]. *Journal of Economic Entomology*, 2006, 99(5): 1691—1698.
- [27] Dimitrios B, Willem W V, Bart M, et al. Assessing the impact of canopy structure simplification in common multilayer models on irradiance absorption estimates of measured and virtually created fagus sylvatica (L.) stands[J]. *Remote Sensing*, 2009, 1(4): 1009—1027.
- [28] RAMI-IV. RAdiation transfer Model Intercomparison, 2009.
- [29] Stuckens J, Somers B, Delalieux S, et al. The impact of common assumptions on canopy radiative transfer simulations: A case study in Citrus orchards[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2009, 110(1/2): 1—21.
- [30] Chen J M, Rich P M, Gower S T, et al. Leaf area index of boreal forests: Theory, techniques, and measurements[J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(D24): 29429—29443.
- [31] Zou J, Yan G, Zhu L, et al. Woody-to-total area ratio determination with a multispectral canopy imager[J]. *Tree Physiology*, 2009, 29(8): 1069—1080.

Accuracy analysis of vegetation cover measurement using digital photography for regular planted woodland

Zhao Jiqiang, Xie Donghui^{*}, Meng Xia, Mu Xihan, Yan Guangjian

(State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Digital photography is now the most widely used method to obtain the vegetation cover in field measurements. It uses a digital camera to shoot the research area straight downward, classify the digital images into plants and soil, and calculate the percentages of the pixel numbers of plants. When measuring the vegetation cover of regular planted woodland with digital photography, the accuracy of the calculated vegetation cover is affected by following factors such as the sampling strategy and non-vertical shooting of digital camera. However, it is difficult to analyze these factors mentioned above quantitatively in situ measurement because there are lots of uncertain errors involved. In this study, we used the computer simulation method to evaluate these factors because in a computer simulated scene, we can strictly control all these uncertainties. We measured a regular planted pyrus orchard to get the structural data in Huailai (40.373°N, 115.723°E), Heibei province. Through statistics of the measured structural data, a regular planted pyrus orchard scene was reconstructed with the plants structural generating software, onyx tree professional which is widely used in forest management, plants reconstruction, and remote sensing of plants. Then the physically based ray-tracing (PBRT) algorithm was used to simulate the illumination conditions of the reconstructed scene and a virtual camera was simulated to get the images taken by a digital camera. The virtual camera settings are just like the digital camera when we measure the vegetation cover in situ. By controlling the shooting conditions strictly within the computer model, we can obtain simulated images under different shooting conditions. The supervised classification method was used to classify the simulated images to obtain the vegetation cover values. Due to the obvious three different samples in the regular planted woodland, this study proposed an area-weighted sampling strategy to calculate the vegetation cover of regular planted woodland. The strategy was then validated in the reconstructed scene using a computer simulation method. It showed that the area-weighted sampling strategy can obtain the vegetation cover of the regular planted woodland accurately, and the relative error is about 7.3% in this simulated pyrus scene. Furthermore, the study analyzed the influence of the non-vertical shooting. We simulated different images taken by the digital camera of these three samples and the viewing zenith angle of digital camera was from -20°~20°. The results showed that the non-vertical shooting had a great impact on the accuracy of the calculated vegetation cover. The relative error of vegetation cover can reach 98.4% for one sample and 27.9% for the calculated vegetation cove of the regular planted pyrus scene. The computer simulation method presented in this paper was demonstrated to be feasible and objective for analyzing the accuracy of digital photography. An area-weighted sampling strategy to calculate the vegetation cover of regular planted woodland and the non-vertical shooting were evaluated in this paper. The results can provide guidance for obtaining the FVC in field measurements using digital photography. Besides, the computer simulation methods came up with in this paper can be used to evaluate the accuracy of other instruments such as LAI2000, or TRAC in following studies.

Key words: remote sensing, photography, computer simulation, vegetation cover, sampling strategy

(责任编辑: 鲍洪杰)