

文章编号: 1007-4619(2005)04-0357-06

基于 DSM 阴影仿真和高度场光线跟踪的 影像阴影检测

李 艳¹, 官 鹏²

(1. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093;

2. 中国科学院遥感应用研究所、北京师范大学 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101)

摘 要: 介绍了一个建筑物阴影检测的模型。首先利用摄影测量学原理来计算阴影坐标。即用数字表面模型(digital surface model 缩写为 DSM)和太阳高度和方位来计算建筑物阴影的空间坐标,并由相机模型计算出每个阴影单元对应的扫描行和相机空间坐标。由高度场光线跟踪判断阴影的可见性,对可见阴影计算出它在投影图像上的坐标。然后在这个结果的基础上再对图像进行阴影的细分割。

关键词: 阴影检测;数字表面模型;光线跟踪;摄影测量学

中图分类号: TP751.1/TP79 **文献标识码:** A

1 引 言

随着遥感技术的发展越来越多的高空间分辨率影像被用于城市规划与管理领域。在这类图像上,建筑物阴影妨碍许多应用。例如图像匹配、变化检测等,阴影的存在会影响处理过程而导致错误。因此,探测阴影区,恢复这些阴影区域的亮度,使得它们接近光照下的效果是一个必要的措施。传统的基于图像分析的方法会难以处理低反射率的建筑物屋顶,以及水体。因而许多研究是通过双视图的计算来去除阴影的^[1,2]。文献[2]提出了一个数学模型,通过可见性分析结合摄影测量学来自动检测遮挡。当建筑物模型已知时,将建筑物投影到图像上,计算建筑物的角点在图像上的坐标。然后将遮挡处用同时成像的副图像来填充^[2]。我们的研究是利用数字表面模型(DSM),用摄影测量技术来计算建筑物产生阴影的空间坐标,再投影到图像平面上,然后由图像处理技术来消除这些阴影。本文将介绍一个集成了图像分析和摄影测量技术的阴影检测的方法。它首先利用摄影测量学^[3,4]由数字表面模型计算因太阳的作用形成的建筑物阴影的空间坐标,利用加速的光线跟踪

算法通过 DSM 以及相机模型来计算建筑物的可见阴影,并将之投射到图像平面上,然后通过图像分析进行精确分割并标记出阴影区域。

2 DSM 阴影仿真

用图像分析的方法来检测和分割阴影,结果在多数情况下是正确的。然而,因为城区环境的复杂性,会有一些因素影响对阴影的检测。例如,高反射率的地面,建筑物的玻璃墙壁,都会使某些阴影的亮度较高。这些阴影仅用图像分析的技术可能不会检测到。此外,分割阈值也很难确定。因此阴影的分割不稳健。摄影测量技术可以用 DSM 计算阴影的空间坐标,再投射到图像上。但一般情况下 DSM 分辨率比图像低,而且缺乏建筑的细节,所以,依据 DSM 投射到图像上的阴影形态和实际得到的图像阴影有一定程度的差异。尽管如此,这种方法不受地物反射率变化的影响。因此,我们提出一个集成的方法。首先用摄影测量的方法计算阴影的估计区域,在图像上计算估计区域的亮度统计并得到参考分割阈值。然后进行图像分割得到图像阴影。这个方法可以保证正确的阴影定位,同时减少阴影的漏检和虚假阴

收稿日期: 2003-12-12; 修订日期: 2004-03-19

基金项目: 中国博士后基金、中国科学院遥感应用研究所百人计划基金 Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

作者简介: 李艳(1968—),女,副教授,2002年毕业于华中科技大学,获工学博士学位,专业为模式识别和智能系统。从事图像处理、模式识别和摄影测量专业的研究工作。已发表论文 10 余篇。E-mail: liyan@nju.edu.cn

影的情况。阴影区域的细节也得以保持。

本文使用美国 LEICA 公司生产的 ADS40 相机三线扫描仪所获图像经过 0 级和 1 级校正后生成伪正射图像,即以一定的角度投影到平均地面高度上的投影图像,具体成像过程参见文献 [5]。我们用伪正射彩色图像、ADS40 相机模型、DSM 来计算图像上建筑物阴影的估计区域。首先由摄影测量学用 DSM 计算出建筑物投射的阴影点的地理坐标,对每个阴影计算出对应的相机坐标,建立阴影的视线。然后由光线跟踪来决定阴影点是否可见,如果可见,计算出它在地面平均高度上的投影,即伪正射图像上的坐标。如无特殊说明,本文中的“图像”均指伪正射图像。

DSM 给出了地表面的高度,包括建筑物和树木,是一个二维的高度场。当太阳的高度和方位给出时,建筑物和树木的阴影的空间坐标就可以得到了。这里,太阳方位用方位角 α 和高度角 a 来表示。显然太阳方位的两个角度是相互独立的。为了方便计算,我们首先将 DSM 旋转一个角度,即太阳方位角 α 使得旋转后的 DSM 具有水平的太阳方位角 α 如图 1。这样实际上就可以在一维条件下(即每一行内)计算 DSM 上的阴影。

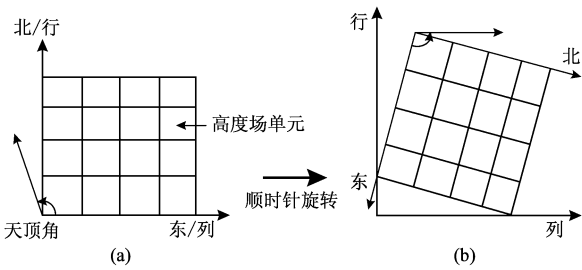


图 1 旋转的 DSM
Fig 1 Rotation of the DSM

因为所研究的区域是城区,产生阴影主要是建筑物,因此我们采用了建筑轮廓驱动的策略。图 2 为阴影检测示意图。建筑物的轮廓处是高度发生突变的地方,一定会产生阴影点,称为前端阴影。令 C 表示旋转后的 DSM 的列数。对旋转后的 DSM 的一行,计算阴影的平面坐标位置的算法是,首先用边缘检测算子 LOG 算子检测建筑物轮廓,然后计算前端阴影和相应的同段阴影。我们用 $e_k = 1$ 表示单元 k 为边缘, $s_k = 1$ 表示单元 k 为阴影, $k = 1, 2, \dots, C_c$ 表示当前单元, l_c 表示单元 c 对应的光线, d 表示搜索距离, $h[c]$ 表示单元 c 的高度。

对当前单元 c 通过高度比较法判断它是否为一个前端阴影,见图 2(b)。这是一个迭代过程。初

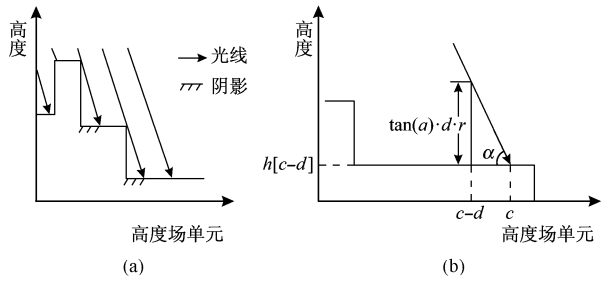


图 2 一维高度场阴影形成和计算
Fig 2 The formation of shadow in the 1D height field and its computation

始化令搜索距离 $d=1$ 。

$$s_c = \begin{cases} 1, & \text{if } c-d \neq 1 \text{ and } h[c-d] - h[c] \geq \tan(a) \cdot d \cdot r \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

其中 r 为 DSM 的分辨率, $\tan(a) \cdot d \cdot r$ 是光线 l_c 在单元 $c-d$ 的高度。如果 $s_c = 1$, 即单元 c 为前端阴影, 迭代中止; 否则, 令 $d = d - 1$, 如果 $c-d = 1$, 则单元 c 不是前端阴影, 迭代中止, 否则重新计算公式 (1)。

如果 $s_c = 0$, 则更新当前单元 $c = c - 1$ 并判断它是否为下一个前端阴影; 否则, 对阴影 s 满足下式的单元 k 为其同段阴影,

$$c > k \geq k_c \quad (2)$$

其中

$$k_c = \max \{ k \mid e_k = 1, k < c \} \quad (3)$$

k_c 是沿逆光线方向离 c 最近的轮廓点。更新当前单元 c 为 $k_c - 1$ 并判断它是否为下一个前端阴影。

3 图像阴影跟踪

3.1 阴影的视线建立

一个空间阴影点,在图像上不一定可见,因为相机的扫描行与地面可能会有一定的角度,而阴影可能被某个物体挡住而没有被任何扫描行扫描到。要判断阴影的可见性,首先要建立它的视线,即假设没有任何遮挡时,被哪个扫描行扫到,从而得到对应的相机位置。由 ADS40 相机模型 [5] 可以得到建立阴影视线的算法。

为了说明 ADS40 相机模型,首先定义若干坐标系以及它们的转换关系。① 空间对象坐标系 $S(X, Y, Z)$ 。这是一个三维坐标系, X 轴正方向为东, Y 轴正方向为北, Z 轴正方向遵循右手螺旋法则。② 相机坐标系 $S(U, V, W)$ 。③ 相机像平面坐标系 $S(x, y)$ 。这是一个二维坐标系, x 轴正方向为飞行方向, y 轴与 x 轴成右手系统。④ 图像平面坐标系

$S(i, j)$ 。i 表示图像的行, j 表示图像的列。

设图像的左上角,即原点 (0 行, 0 列) 对应空间坐标系中平面坐标 (X_0, Y_0) , 则图像上任一点 (i, j) 对应空间坐标系中的平面坐标 (X, Y) 由下式决定:

$$\begin{cases} X = X_0 + j \cdot r_j \\ Y = Y_0 - i \cdot r_i \end{cases} \quad (4)$$

其中 r_i 和 r_j 分别表示图像行和列的空间分辨率。

对象空间的一个点 P, 坐标为 (X_p, Y_p, Z_p) , 在假设没有遮挡的情况下, 对应着扫描行 l_p , 用相应的相机位置 (X_c, Y_c, Z_c) 表达。它在像平面上的投影坐标 (x_p, y_p) 与 (X_p, Y_p, Z_p) 的关系由共线方程描述:

$$X_p = X_c + \lambda \cdot (a_{00} x_p + a_{10} y_p - a_{20} f) \quad (5)$$

$$Y_p = Y_c + \lambda \cdot (a_{01} x_p + a_{11} y_p - a_{21} f) \quad (6)$$

$$Z_p = Z_c + \lambda \cdot (a_{02} x_p + a_{12} y_p - a_{22} f) \quad (7)$$

f 是相机焦距, 矩阵

$$\begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad (8)$$

为相机坐标系对对象空间坐标系的旋转矩阵。它由相机的 3 个姿态角 ω, π, κ 决定, 对象空间坐标与相机坐标之间的关系为:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} \quad (9)$$

对一个空间点, 要得到它的扫描行, 即相机位置, 需要首先给出一个搜索窗, 只在这个窗内的扫描行才逐行计算以找出行 l_p 。搜索窗的尺寸是以迭代的方式逐步得到的。令 l 表示扫描行, 设有 L 各扫描行, 每个扫描行共取了 M 个像元。a、b 表示第一个扫描行的第一个和最后一个像元, c 表示第 L 行的中心像元。它们构成一个初始的搜索窗, 宽为 $w^{(0)} = M$, 高为 $h^{(0)} = L$ 。令 a_g, b_g, c_g 分别代表 a、b、c 对应的 3 个空间点, 高度阴影点 P 的高度相等, 即

$$Z_{a_g} = Z_{b_g} = Z_{c_g} \quad (10)$$

$X_{a_g}, Y_{a_g}, X_{b_g}, Y_{b_g}$ 和 X_{c_g}, Y_{c_g} 由共线方程 (5), (6), (7) 计算。将这 3 个点及它们相应的空间点之间建立仿射变换:

$$\begin{cases} 0 = c_0 + c_1 X_{a_g} + c_2 Y_{a_g} \\ 0 = c_3 + c_4 X_{a_g} + c_5 Y_{a_g} \\ M - 1 = c_0 + c_1 X_{b_g} + c_2 Y_{b_g} \\ 0 = c_3 + c_4 X_{b_g} + c_5 Y_{b_g} \\ M/2 = c_0 + c_1 X_{c_g} + c_2 Y_{c_g} \\ L - 1 = c_3 + c_4 X_{c_g} + c_5 Y_{c_g} \end{cases} \quad (11)$$

求出仿射变换系数 $c_k, k=0, 1, \dots, 5$ 。然后由下式得

到一个扫描行和像元列 (t_p, t_j) :

$$\begin{cases} t_j = c_0 + c_1 X_p + c_2 Y_p \\ t_i = c_3 + c_4 X_p + c_5 Y_p \end{cases} \quad (12)$$

下一步的搜索窗以 (t_p, t_j) 为中心, $w^{(1)} = w^{(0)} / 2, h^{(1)} = h^{(0)} / 2$, a、b 分别更新为新的搜索窗的第一行的边界像元, c 则更新为新搜索窗最后一行的中心像元。这个迭代进行到搜索窗小于定义的阈值为止, 在我们的研究中, 为 200×200 。

设得到的搜索窗的宽为 w, 高为 h 对每一个扫描行 $l_k, k=0, 1, \dots, k=h-1$, 都根据共线方程 (5), (6), (7) 计算空间点 P 在它对应的像平面上投影的坐标 $(x_{p,k}, y_{p,k})$ 。定义平方距离

$$d_k^2 = (x_{p,k} - x_0)^2 + (y_{p,k} - y_0)^2 + (x_{p,k} - x_{w-1})^2 + (y_{p,k} - y_{w-1})^2 \quad (13)$$

其中 (x_0, y_0) 和 (x_{w-1}, y_{w-1}) 分别是扫描行第一个和最后一个像元的坐标, 由相机定标文件提供。最小的 d_k^2 对应的行即为 P 点对应的扫描行 l_p 。

3.2 光线跟踪

这里光线跟踪^[6-9]的目的是决定一个地理阴影 (x, y, z) 是否对相应的扫描行, 即相机的一个时刻的空间坐标可见。它是对从相机单元到阴影单元的一维高度信号进行的。对可见的阴影, 由共线方程 (5), (6), (7) 计算它投射到图像上的位置。

首先进行高度场预处理, 即一个单元对应一个内部为空的圆锥体。光线不在每个单元跟踪, 而是在与圆锥体的交点单元跟踪。我们改进了光线跟踪算法以提高跟踪速度。当光线与当前单元的圆锥体的交点处于该单元之前时迭代停止, 说明出现遮挡; 否则进入到下一个轮廓单元进行跟踪。如果直到阴影点单元都不出现遮挡, 则阴影点为可见。图 3 的例子中, 跟踪单元依次为 c_1, c_2, c_3 。阴影为不可见。

因为扫描行的顺序基本是沿着飞行方向的, 为了减少跟踪的时间, 我们给出了一个简化跟踪的模型。定义一个单元的相关单元为其沿着飞行方向的相邻单元。阴影单元 m 对应扫描行 k 则它的相关单元 m+1 对应扫描行 k+l (l>0)。令 $v(m)=1$ 表示阴影单元 m 对它的扫描行可见, $v(m)=0$ 表示它不可见。令 H(m) 表示单元 m 的高度。对可见阴影 m, 如果单元 m+1 也是阴影, 并且有

$$H(m+1) \geq H(m) \quad (14)$$

假如 m+1 不可见,

$$v(m+1) = 0 \quad (15)$$

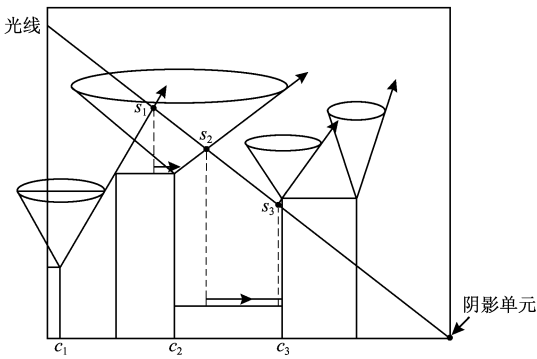


图 3 高度场光线跟踪步骤

Fig 3 Ray tracing procedure in the height field

即它的视线与某单元 $m-n$ ($n>0$) 的高度相交, 交点高度记为 h_{m+1} , 见图 4。由于各单元的视线是平行的, 容易知道 m 单元的视线也与 $m-n$ 单元高度相交, 即

$$v(m) = 0 \tag{16}$$

交点高度为 h_m , 并且有

$$h_{m+1} > h_m \tag{17}$$

这与单元 m 可见的前提矛盾, 因此有

$$v(m+1) = 1 \tag{18}$$

即 $m+1$ 单元可见。因此, 对一个可见的阴影单元, 如果相关单元也是阴影, 且相关单元的高度大于或等于该单元的高度, 则相关单元也为可见。

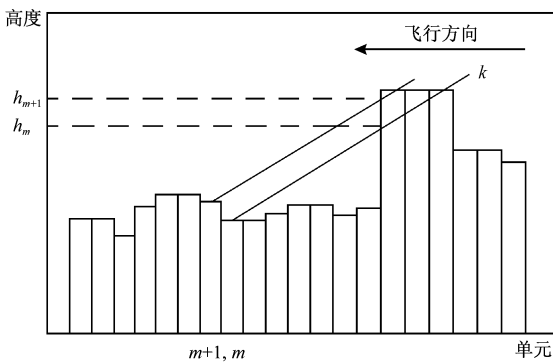


图 4 阴影单元与相关阴影单元高度与可见性的关系

Fig 4 Relationship between shadow unit and neighboring shadow unit and the visibility

3.3 集成的阴影检测和定位

由上一个阶段检测和计算得到的图像阴影区域估计跟图像显示出来的阴影并不完全吻合。这是因为 DSM 本身缺乏细节信息, 如房屋的一些精细结构等, 所以不能期望它能给出很精确的结果。然而, 第一阶段的计算给出了图像上阴影区域的大体正确的

位置。在图像上计算阴影估计区域的灰度均值 \bar{g}_s , 作为分割参考阈值。令 $h(D)$ 表示图像直方图, 16 位图像的灰度 $I=0, 1, \dots, 65535$ 。

令 $h'(D)$ 表示高斯平滑后的直方图, 即

$$h'(D) = \frac{\sum_{I=-L}^L \exp\left\{-\frac{I^2}{2\sigma^2}\right\} h(I-D)}{\sum_{I=-L}^L \exp\left\{-\frac{I^2}{2\sigma^2}\right\}} \tag{19}$$

令 $M_n(D)$ 为灰度 I 的一个邻域 $\{-\epsilon, \epsilon\}$ 内的局部极小值, 即

$$M_n(D) = \min\{h'(I_n), I-\epsilon < I_n < I+\epsilon\} \tag{20}$$

若有

$$M_n(D) = h'(D) \tag{21}$$

则说明 I 是直方图上的一个局部极小值灰度, 记为 $I_k^{(mn)}$, $k=1, 2, \dots, K$, K 为局部极小值的数目。那么图像的阴影分割阈值 T_s 就定义为最接近参考阈值的局部最小值灰度, 即

$$T_s = \min\{I_k^{mn} \mid |\bar{g}_s - I_k^{mn}|, k=1, 2, \dots, K\} \tag{22}$$

然后做图像分割, 即对图像 $f(i, j)$, 若

$$f(i, j) > T_s \tag{23}$$

则像素 (i, j) 为阴影。最后将阴影区域逐个标记出来。

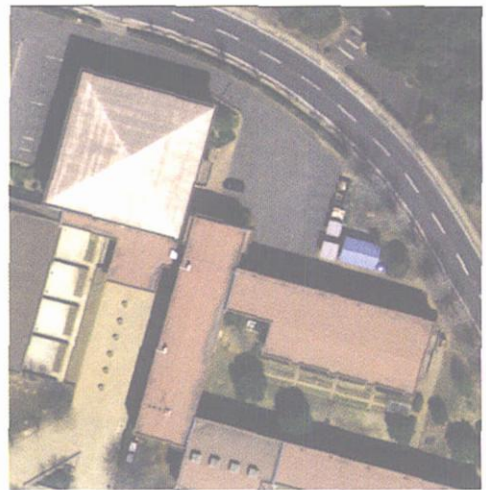
4 结果和讨论

我们用一幅 ADS40 扫描的彩色图像和相关的数据进行了一系列的实验来检验本文所提出的这个阴影检测模型。研究地区为日本横滨, 摄影时间为 2003 年 3 月 26 日 10:49:14。图像格式为每通道 16 位的 TIFF, 是经过了 几何校正的伪正射彩色照片; 相机模型包括与该图像对应的定位文件、定标文件。另外需要与图像覆盖地区对应的 DSM 模型。图像的分辨率为 0.2m, 图像尺寸为 3750×3750 , 共 84.3MB。所用操作系统为 WINDOWS 2000, 1.9GHz CPU, 内存 256M。

图 5 是阴影检测的效果。这里是 从整幅图像中剪切的两个部分。(a) 和 (d) 为两个不同的原始图像区域, 已经将图像各通道灰度转化为 256 个灰度级。(b) 为 (a) 的叠加了单独由摄影测量方法得到的阴影的图像; (c) 为 (a) 的叠加了由集成方法得到的阴影的图像; (e) 为 (d) 的叠加了单独由摄影测量方法得到的阴影的图像; (f) 为 (d) 的叠加了由集成方法得到的阴影的图像; 可以看到, 由于 DSM 本身的原因导致的跟踪出的阴影与图像上的阴影不完全吻合。而细分割后大部分的阴影区域都被正确地分



(a)



(d)



(b)



(e)



(c)



(f)

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

图 5 实验图象及其对应的叠加了阴影的图像

Fig 5 Experiment example images and the corresponding shadow detection results

割出来了。然而,树的阴影检测效果不理想。这两方面的原因,首先 DSM 构建未考虑树,因此不准确。其次树阴影由于叶面积指数不同暗度不同。这些给树木阴影的检测带来难度。树木 DSM 的构建需专门的算法^[10],本文尚未涉及。另外,在一般的图像分割方法检测阴影时常会出现的将水体误分割成阴影的情况这里也不会出现,这是用 DSM 来做阴影检测的一个好处。

因为 DSM 在一定时间内保持静态,与照片摄影时间及角度等都无关,参数平面转换可以提前进行,而且参数可以被反复使用,所以我们这里不考虑参数转换的效率问题。只做阴影检测和分割,整幅图像所需时间为 15min23s,时间消耗取决于图像中包含的建筑物的面积比例。房屋比较稠密的地区,耗时将较多。

综上所述,我们的研究提出了一个阴影检测的数学模型。它综合了摄影测量学原理从 DSM 计算阴影和图像分析方法从图像分割阴影的优点。由于 DSM 分辨率较低,而且建筑物形状的细节模糊,所以仅由 DSM 来计算建筑物的阴影与图像上的阴影之间有误差。我们将这个计算结果作为图像阴影分割的参考,对图像作细分割,从而得到精确的阴影位置。由试验可以看出,阴影检测的效果令人满意。由于光线跟踪的计算时间很长,我们根据阴影点之间的空间相关性,以及飞机的飞行方向来判断阴影的可见性。这样,相当一部分阴影没有经历光线跟踪的过程而直接得到其可见性的判断,所以大大缩短了整个阴影检测的时间。今后需要进一步研究的仍然是光线跟踪的快速算法。

参 考 文 献 (References)

- [1] Chen L C, Rau J Y. A Unified Solution for Digital Terrain Model and Orthoimage Generation from SPOT Stereopairs [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31 (6): 1243-1252.
- [2] Zhou G, Qin Z, Kauffmann P, et al. Large-Scale City True Orthophoto Mapping for Urban GIS Application [A]. ASPRS 2003 Annual Conference Proceedings [C], 2003.
- [3] Zhang Z X, Zhang J Q. Digital Photogrammetry [M]. Wuhan: WTUSM Press, 1997. [张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学 [M]. 武汉:测绘科大出版社, 1997.]
- [4] Gong P, Shi P J, Pu R L, et al. Earth Observation Systems and Earth System Science [M]. Beijing: Science Press, 1996. [宫鹏, 史培军, 浦瑞良等. 对地观测技术与地球系统科学 [M]. 北京:科学出版社, 1996.]
- [5] ADS40 Information Kit for Third-Party Developers. www.gis.leica-geosystems.com, 2003.
- [6] Paglieroni D W. Directional Distance Transforms and Height Field Preprocessing for Efficient Ray Tracing [J]. Graphical Models and Image Processing, 1997, 59(4): 253-264.
- [7] Paglieroni D W. A Complexity Analysis for Directional Parametric Height Field Ray Tracing [J]. Graphical Models and Image Processing, 1999, 61(5): 299-321.
- [8] Bitner J. Hierarchical Techniques for Visibility Determination [R]. Postgraduate Study Report DC-PSR-99-05, 1999.
- [9] Paglieroni D W, Petersen S M. Height Distributional Distance Transform Methods for Height Field Ray Tracing [J]. ACM Transaction on Graphics, 1994, 13(4): 376-399.
- [10] Gong P, Sheng Y, Bing G S. 3D Model-based Tree Measurement from High Resolution Aerial Imagery [J]. PE&RS, 2002, 68(11): 1203-1212.

Integrating Photogrammetry and Image Analysis for Shadow Detection

LI Yan¹, GONG Peng²

(1. International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China)

Abstract: A mathematical model of shadow detection is introduced in this paper. It first computes the coordinates of the shadow through a photogrammetric approach. Digital surface model (DSM) and the altitude of the sun are used to detect the space coordinate of the shadow, and camera model is used to calculate the scanning line and the associated camera position for each shadow cell. Height field ray tracing is carried out to determine the visibility of each shadow. For a visible shadow, the coordinate in the projecting image is calculated. Based on this result, we extract successfully the fine segments of shadows in the image.

Key words: shadow detection; DSM; ray tracing; photogrammetric engineering