

面向大规模真正射影像生产的快速遮蔽检测方法

钟 成¹, 李 卉², 黄先锋³

(1. 中国地质大学 教育部长江三峡库区地质灾害研究中心, 湖北 武汉 430074;

2. 中国地质大学 行星科学研究所, 湖北 武汉 430074;

3. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079)

摘要: 根据径向投影高度角的变化进行遮蔽区域分析, 利用计算数学理论推导各个步骤的计算复杂度, 并利用极值理论确定具有最小复杂度的方法。实验表明, 基于径向投影高度角变化的方法可以有效解决因地形起伏、分辨率差异和高窄墙体引起的各类伪可见和伪遮挡问题。最优分割的径向扫描方法具有最高的计算效率和最平缓的效率曲线, 有利于大规模高质量真正射影像的生产。

关键词: 真正射影像; 算法复杂度; 径向扫描; 最优分割数
中图分类号: P237 **文献标志码:** A

A Fast Approach to Detect Occlusions for Large-scale True Orthophoto Generation

ZHONG Cheng¹, LI Hui², HUANG Xianfeng³

(1. Three gorges Research Center for Geo-hazard of the Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Planetary Science Institute, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. State Key Laboratory of Information

Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: The proposed method detects the occlusions by checking the off-nadir angle of the line of sight connecting the perspective centre with the object point of interest. Then, the algorithm complexity of all the steps is estimated according to the mathematical computation theory. Finally, a method of the least complexity is obtained on the basis of the extreme point theory of differential calculus. Experiments show that the proposed method is efficient to avoid “M-portion”, false occlusions and false visibilities caused by the rolling area, the incompatibility between the DSM and ground image resolution. It is a robust, accurate, fast and effective approach to generate high quality true orthophoto on a large scale.

Key words: orthophoto; algorithm complexity; radial sweep;

optimum segmentation number

传统正射纠正未考虑建筑物、树木等地面目标的投影变形, 在城市大比例尺正射影像上, 建筑物倾斜遮挡的情况非常严重, 影响了影像信息的有效解译和利用。20 世纪 90 年代以来, 随着世界范围内城市三维仿真项目的兴起和城市大比例尺地图的应用需求日益强烈, 利用城市三维模型制作“真正射影像”的研究和生产逐渐展开。

真正射影像制作的核心问题是高效稳健的遮蔽检测过程。根据摄影测量的基本原理, 非正射投影造成的高层建筑倾斜会导致对低矮目标的遮蔽, 若直接利用数字微分纠正方法为 DSM(数字表面模型) 格网寻找对应影像信息, 低矮目标将获得高层建筑的影像信息, 其结果是造成高层建筑在正射影像上多次出现, 学术界称之为“鬼影”现象。这样的正射影像无法谈及几何精度或光谱精度等问题。解决该问题的思路是, 首先检测出高层建筑对低矮目标的遮蔽情况, 在正射纠正过程中这些遮蔽地区不分配影像信息, 最后利用影像序列的重叠信息或利用仿真方法修复遮蔽地区。

已有遮蔽检测方法大多基于计算机图形学的 Z-Buffer 消隐技术, 比较目标距光源点的距离判断其遮蔽情况^[1-4]。这类方法在处理大量复杂的矢量建筑物模型时效率很低^[5]; 而在处理栅格数据时, 因难以捕获相机畸变和投影成像造成的栅格变形, 将导致错误的判断竞争关系, 造成大量伪遮蔽和伪可见噪声^[6-7]。此外, 该方法无法处理被高窄墙体遮蔽目标的伪可见问题, 即所谓“M-Portion”问题^[3,8-9], 改进的方法需要将墙面纳入遮蔽检测计算过程, 大大增加了计算工作量和复杂度。产生这些问题的根本原

因在于复杂多样的现实世界难以用简单的三维体块模型表示,基于图形学的 Z-Buffer 技术也未顾及摄影测量的特殊情况^[10].

1 快速遮蔽检测方法

从计算效率的角度出发,优先考虑采用栅格 DSM 参与计算;从计算稳健性的角度出发,需克服各类伪可见和伪遮蔽噪声.为此可采用径向投影高度角的变化情况进行遮蔽区域分析,其原理是,同一方位射线上逐渐远离天底点时目标的投影高度角逐渐增大;在进入被遮蔽地区时投影高度角突然变小,直到离开被遮蔽地区时又回到之前的数值.据此,可以容易发现被遮蔽地区.该方法对遮蔽地区和遮蔽源的扫描都是连续的,对遮蔽地区的判断仅需高层建筑的边缘栅格,可避免因栅格变形造成的错误竞争,也可避免因缺乏墙面信息造成的“M-Portion”问题^[11].

为全面检测遮蔽情况,从天底点到 DSM 边缘所有栅格的射线都需要分析太阳高度角的变化情况.此时,邻近天底点的栅格将被多次访问,导致效率低下.可行的方法包括径向扫描和螺旋扫描两种方法(图 1),前者首先以不同半径将 DSM 划分为多个圆环,在每个圆环内根据完整扫描的要求制定合适的扫描和方向间隔;后者从天底点出发以螺旋方式扫描 DSM 栅格,最终完成对 DSM 的完整扫描.本文力图通过分析两种方法的计算步骤和算法复杂度,推导最优的配置方案,最终提出具有最高效率的遮蔽检测方法.

两种方法基本原理一致,区别在于对 DSM 扫描的方式,以及由此导致的不同的扫描面积、方位射线数和进行可见性判断的面积.因此,通过分析计算过程的复杂度,找到最优的分配方法,可找到复杂度最低的遮蔽检测方法.首先,基于算法原理利用严密的几何关系可以推出两种方法不同的扫描面积、射线数据和可见性判断面积;然后,利用计算数学理论推导出各个步骤包含的计算复杂度;最后利用微积分的极值理论求出具有最小复杂度的方法.

1.1 算法过程

首先,对于给定 DSM 栅格 (x, y, z) ,投影中心坐标为 (X_c, Y_c, Z_c) ,计算并记录每个 DSM 栅格的投影高度角 a .

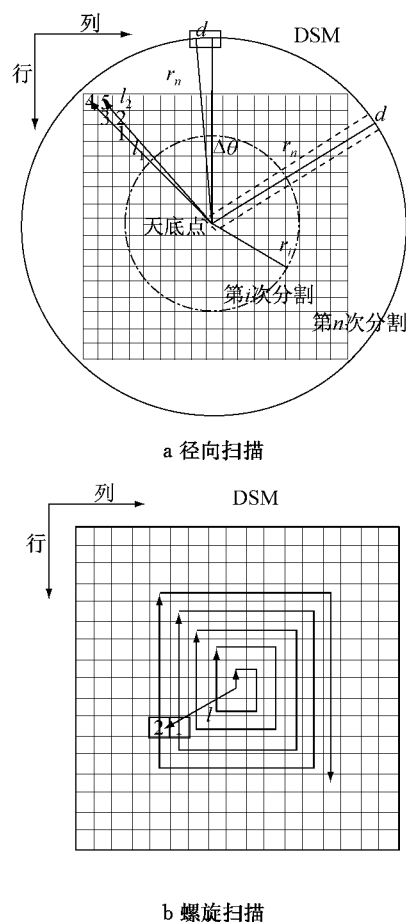


图 1 径向扫描和螺旋扫描方法

Fig. 1 Illustration of radial sweep and spiral sweep method

$$a = \arcsin \frac{\sqrt{(x - X_c)^2 + (y - Y_c)^2}}{\sqrt{(x - X_c)^2 + (y - Y_c)^2 + (z - Z_c)^2}} \quad (1)$$

然后扫描 DSM,分析沿扫描射线的投影高度角变化情况.对于径向扫描,计算当前范围内由边缘栅格决定的方位射线,沿着射线方向逐个比较 a 变化,同时记录栅格的可见性,若发现 a 突然变小,则记录当前的 a_{\max} 值,投影高度角未超出 a_{\max} 的栅格都被认为是被遮蔽的地区,其可见性值设为零.

对于螺旋扫描方式,需要计算每个栅格与天底点确定的方位射线,然后比较其与射线上相邻且靠近天底点的栅格的 a 变化,同样记录当前的 a_{\max} 值,投影高度角未超出 a_{\max} 的栅格被认为是被遮蔽的地区,其可见性值设为零.

由上述分析可知,两种方法效率的影响因子包括不同的扫描面积、方位射线数和可见性判断面积,需要研究这些因子的优化方法,以提高算法效率.

1.2 计算复杂度分析

假定 DSM 为圆形且未进行分割, 设定栅格尺寸为 1, 径向扫描的每条扫描射线的面积为

$$\Delta s = r \times \Delta d \quad (2)$$

式中: r 为 DSM 半径; d 为 DSM 栅格的直径. 而扫描射线的数量可以由下式获得:

$$L = \frac{2\pi r}{\Delta d} \quad (3)$$

可计算得到径向扫描的扫描面积为

$$S = \int_0^{2\pi} \Delta s = \frac{2\pi r}{\Delta d} \times r \times \Delta d = 2\pi r^2 \quad (4)$$

从式(4)可以看到, 径向扫描面积两倍于 DSM 实际面积, 存在较大程度的重复扫描. 考虑到若一个栅格的可见性已经判定, 那么在重复扫描的过程中, 不需要再重复判断, 因此需要进行可见性判定的面积为 πr^2 .

若 DSM 进行了 n 次分割, 根据图 1, 其扫描面积、射线数量和可见性判断面积计算公式演变为

$$\begin{cases} S_r = 2\pi \sum_{i=1}^n r_i (r_i - r_{i-1}) \\ L_r = 2\pi \sum_{i=1}^n r_i \\ V_r = \pi r^2 \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中: S_r 为径向扫描面积; L_r 为径向扫描射线数; V_r 为径向扫描需要进行可见性判断的面积.

对于螺旋扫描, 容易判断其扫描面积和可见性面积等于 DSM 的面积. 考虑到每个栅格都需要计算方位射线, 可以得到

$$S_s = L_s = V_s = \pi r^2 \quad (6)$$

式中: S_s 为螺旋扫描面积; L_s 为螺旋扫描射线数; V_s 为螺旋扫描需要进行可见性判断的面积.

通过计算数学分析, 可知计算每一条射线参数需要 5 个基本操作(加减乘除), 确定栅格的可见性需要 4 步操作. 在径向扫描中需要 3 步操作来扫描一个栅格, 而螺旋扫描中仅需要 1 步可实现栅格定位. 考虑到这些基本操作的复杂度是常量, 两种方法的计算复杂度可以估计为

$$\begin{aligned} C_r &= 6\pi \sum_{i=1}^n r_i (r_i - r_{i-1}) + 10\pi \sum_{i=1}^n r_i + 4\pi r^2 \\ C_s &= 10\pi r^2 \end{aligned} \quad (7)$$

式中: C_r 代表径向扫描方法的复杂度; C_s 代表螺旋扫描方法的复杂度.

式(7)表明径向扫描方法的复杂度主要依赖于 DSM 划分方式, 而螺旋扫描的复杂度依赖于 DSM

的大小. 在给定 DSM 的情况下, 螺旋扫描的复杂度是一个常量, 而径向扫描的复杂度是可以通过修改 DSM 划分方法而改善的.

1.3 求解最小复杂度

两种方法计算复杂度的差异可以通过下式计算:

$$\begin{aligned} \Delta C &= C_r - C_s = \\ &6\pi \sum_{i=1}^n r_{i-1} (r_{i-1} - r_i) + 10\pi \sum_{i=1}^n r_i \end{aligned} \quad (8)$$

若采用等差数列方法划分 DSM, 即 $r_i - r_{i-1} = m (m > 0)$ 可得

$$\begin{aligned} \Delta C &= \pi m \sum_{i=1}^n [6m(1-i) + 10i] = \\ &\pi r(5n + 3r/n + (5-3r)) \end{aligned} \quad (9)$$

在给定 DSM 的情况下, r 为常量, 此时求最小复杂度演变为求解单变量函数的最小值问题. 考虑到 n 和 ΔC 在 $[1, r]$ 是连续的, 且 ΔC 是可微的, 对 ΔC 求极值可得到

$$\Delta C' = \pi r(5 + 3r/n^2) = 0 \quad (10)$$

则可获得最小 ΔC 的分割数为

$$n = \sqrt{\frac{3r}{5}} \quad (11)$$

带入式(9), 计算得到最小的 ΔC 为

$$\Delta C = \pi r(2\sqrt{15r} + 5 - 3r) \quad (12)$$

当 r 大于 10 时, ΔC 的值小于 0, 也就是说通过选择最佳分割数, 径向扫描的复杂度此时小于螺旋扫描. 这证明螺旋扫描效率高于径向扫描的一般性结论不成立.

若采用等比数列方法分割 DSM, 即 $r_i/r_{i-1} = m (m > 0)$, 式(8)演变为

$$\Delta C = \pi r \sum_{i=1}^n [6(m^{4-2i} - m^{(i-1)(2-i)}) + 10m^{1-i}] \quad (13)$$

由于求解幂指数的极值比较复杂, 反而会影响计算复杂度, 本文不再讨论. 同样的, 也可以采取其他方法划分 DSM, 进而比较算法复杂度.

上述推导已经证明通过求解最优分割数, 径向扫描方法的复杂度可以得到大幅度改善并获得比螺旋扫描更高的计算效率. 因此, 基于最优分割数的径向扫描方法可认为是一种高效稳健的遮蔽检测方法.

2 实验与讨论

考虑到 LiDAR(激光扫描数据)可以快速有效

地获取地表三维模型,已经日益成为城市三维建模的重要数据源,实验采用 LiDAR 点云构建高分辨率 DSM;作为基础实验数据,引入 Z-Buffer 方法对比算法的稳健性和效率。

实验数据如图 2 所示,包含加拿大多伦多地区的 LiDAR 点云数据(图 2a)和航空影像数据(图 2b)。航空影像的分辨率为 0.5 m, LiDAR 点云的分

辨率为 1.0 m。航空影像记录了城市目标的灰度和纹理信息, LiDAR 数据记录城市目标的三维坐标。在图 2b 中左下部分有重大偏移和遮蔽的地区,从图 2c 展示的局部点云可知,这些地区点云中不存在变形和遮蔽。因此,利用 LiDAR 构建的 DSM 实施航空影像的真正射纠正是可行的。

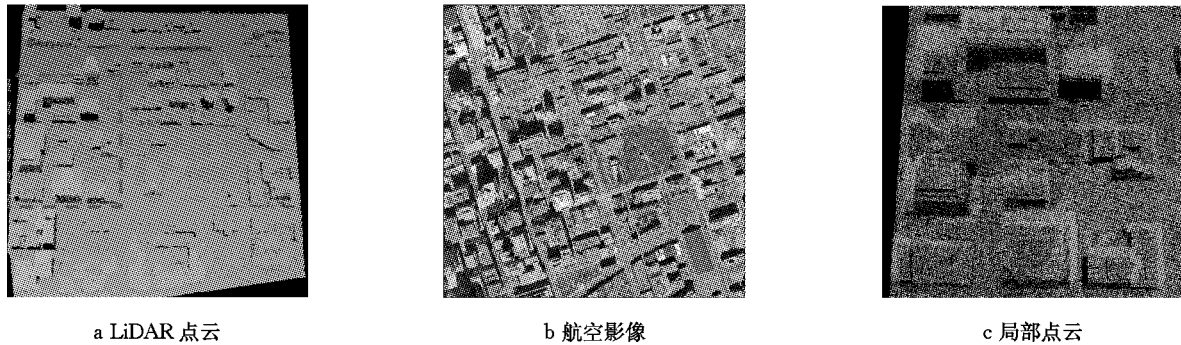


图 2 实验数据
Fig.2 Experimental data

图 3 展示了利用典型方法实施遮蔽检测的实验结果。图 3a 展示了 Z-buffer 方法产生的可见性矩阵,图 3b 展示其局部放大图,图 3c 展示了对其进行 Z-buffer 遮蔽检测的结果,图 3d 展示了径向扫描方法产生的可见性矩阵。从图 3a~3c 中,可以发现大量的离散噪声,以及由噪声组成的黑色曲线。这些是因为 Z-buffer 方法无法适应 DSM 起伏和分辨率差

异引起的。如果采用滤波方法消除噪声,将降低影像的细节层次。而在图 3d~3f 中则没有这些离散噪声和曲线,表明基于径向投影高度角变化的检测方法可以有效地适应城市地区复杂的 DSM 起伏和分辨率差异。图 3 也表明,由于 LiDAR 数据分辨率低于遥感影像,由其构建的 DSM 生产的真正射影像中缺乏精确的断裂线,建筑物轮廓出现锯齿。

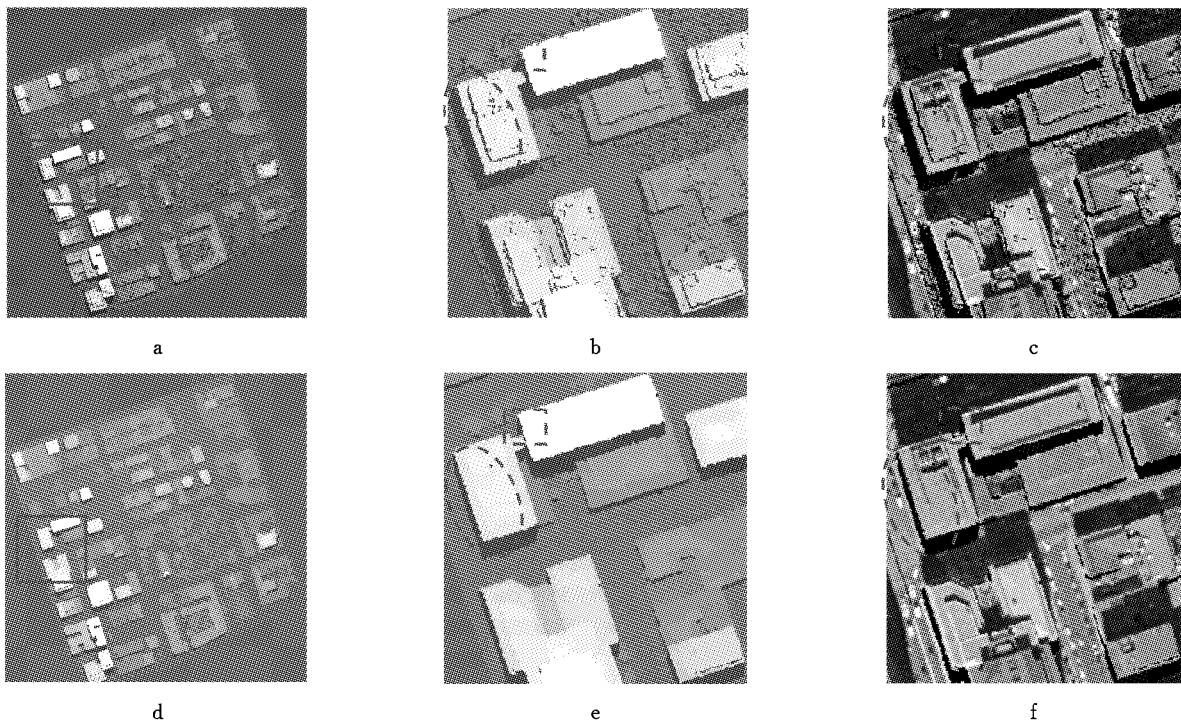


图 3 遮蔽检测实验
Fig.3 Detecting occlusions with typical methods

高窄的结构容易产生 M-portion 问题,在数据源中较难发现此类结构,为了验证算法对于 M-portion 问题的处理能力,图 4 展示了两种方法对于高窄结构的检测结果.图 4a 展示了实验中人为添加了模拟的高窄结构.图 4b 是利用 Z-buffer 方法检测的结果.可见建筑顶面的遮蔽范围被检测出来,而部分被墙面遮蔽地区未被检测到.这是因为考虑到效率问题,一般未将墙面纳入 DSM 参与计算和分析,若墙面遮蔽地区大于建筑本身面积,则会导致伪可

见的情况,即所谓“M-portion”问题.高且窄的建筑物最容易导致这类问题的出现.图 4c 是利用径向扫描方法检测的结果,可见建筑物顶面和墙面遮蔽的地区都被检测出来了.根据该方法的原理,仅需扫描建筑物边缘的栅格即可完成对顶面和墙面遮蔽的检测,无需额外改进和其他步骤.而绝大部分基于 Z-buffer 原理的方法及改进算法往往很难高效地发现并解决 M-portion 问题.从这一点来说,该方法极大地提高了遮蔽检测的稳健性.

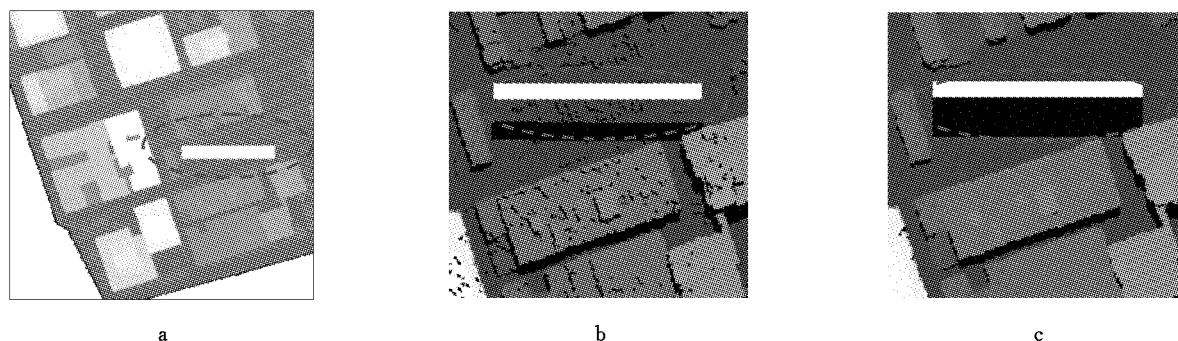


图 4 对高窄结构的检测

Fig.4 Detecting occlusions with simulated DSM

本文对典型方法的计算效率做了对比实验,包括 Z-Buffer 方法,径向扫描方法、螺旋扫描方法和最优分割数径向扫描方法.实验设备是具有双核 2.8G CPU 和 3.0G DDR 内存的微机.图 5 展示了效率实验的结果.

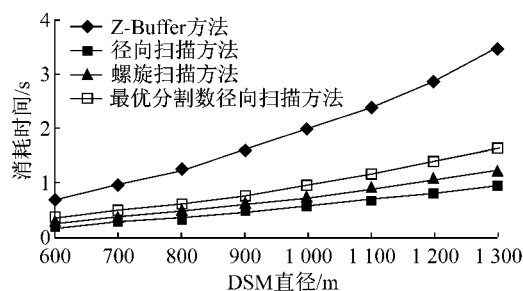


图 5 效率实验

Fig.5 Performance of typical methods

从图 5 可见,随着给定 DSM 尺寸增大,各类方法消耗的时间增加.其中,对于任何尺寸,Z-Buffer 总是消耗最长时间,径向扫描方法次之,螺旋扫描方法又次之,最优分割径向扫描方法消耗的时间最短.这说明最优分割径向扫描方法在这些方法中具有最高效率.考虑到其他基于 Z-Buffer 原理的方法或改进算法往往比基于栅格数据的 Z-Buffer 消耗更长的

时间^[11],可认为最优分割径向扫描方法是具有最高效率的遮蔽检测方法.此外,值得注意的是,最优分割径向扫描方法的效率曲线表现为线性函数,而 Z-Buffer 方法的效率曲线表现为高次函数.随着给定 DSM 尺寸逐渐增大,两种方法消耗的时间差距会越来越大.

3 结语

近十几年来,国内外学者努力尝试寻找一种高效、稳健、精确的遮蔽检测方法.已有的基于 Z-Buffer 技术的遮蔽检测方法并不适应摄影测量的特殊要求,已经被证明存在诸多难以克服的问题,而一些改进算法往往过于复杂,计算不稳定且效率低下.实验表明,基于径向投影高度角变化的方法可以有效解决因地形起伏、分辨率差异和高窄墙体引起的各类伪可见和伪遮挡问题,实现稳健、精确的遮蔽检测.对比实验表明,同样数据量下该方法消耗时间最少,且数据量增大时的时间增量也最少.本文的理论推导和实验表明,最优分割的径向扫描方法可以实现稳健、精确、快速、高效的遮蔽检测,有利于大规模高质量真正射影像制作.

(下转第 623 页)