

文章编号:1001-1595(2010)01-0052-07

城市大比例尺真正射影像阴影与遮挡问题的研究

谢文寒¹, 周国清²

1. 中国测绘科学研究院, 北京 100039; 2. Old Dominion University, Norfolk 23508, USA

Occlusion and Shadow Detection of Large-scale True Orthophoto in Urban Area

XIE Wenhan¹, ZHOU Guoqing²

1. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100039, China; 2. Old Dominion University, Norfolk 23508, USA

Abstract: When the traditional orthorectification methods are applied for urban large-scale orthophoto generation, many problems exist. For example, their true positions of most objects in urban area are distorted from the orthophoto. This distortion shows that buildings lean over a street. Recent years, some researchers addressed the concept of true orthophoto. This paper mainly discusses the problem of buildings' shadow and occlusion in urban area, addresses DBM-based occlusion and shadow detection for true orthophoto generation, and presents one methodology for true orthophoto generation based on the CSG building model. The study area located in downtown of Denver, Colorado has been chosen to verify this method. The experimental results demonstrated that the proposed method in this paper is effective for large scale urban orthophoto generation.

Key words: true orthophoto; large-scale orthophoto; digital building model; shadow analysis; occlusion detection

摘 要:为解决城市大比例尺正射影像生成的问题,从真正射影像的关键技术入手,着重研究其中的阴影与遮挡问题并提出相应解决方法。将这些方法应用在美国丹佛城区的真正射影像生成的项目中,取得了令人满意的效果。

关键词:真正射影像;大比例尺正射影像;城市建筑模型;阴影分析;遮挡检测

中图分类号:P237

文献标识码:A

基金项目:美国国家科学基金(0131893);国家人事部留学人员科技活动择优资助项目(2008)

1 概 述

相对于地形图,应用航空摄影测量方法获取的城市大比例尺数字正射影像具有信息量更丰富、表现直观、现势性好、内容详细、易于更新、应用广泛等特点,因而逐渐成为数字城市空间数据框架中重要组成部分,并在城市规划、建设、管理和土地资源利用等应用中发挥重要作用。

美国于 1990 年提出国家数字正射影像计划。其主要目的是通过覆盖全美的数字正射影像为政府对土地的可利用性的决策提供基础信息。该计划对土地利用变化较快的地区,每 5 年或 10 年更新一次。然而,随着近年来遥感卫星成像技术的不断提高以及城市建设的高速发展,1990 年的数字正射影像计划及其标准已不再适合大比例尺城市正射影像生成的需求,传统正射影像中应用的数据与方法,如 2.5 维数字高程模型、航空三角构网等,已不适合大比例尺城市正射影像纠正。在传统数字正射影像的算法与程序中没有考虑空间目标如人工建筑物,从而导致城区的建筑目标偏

离其真正的位置,偏离方向以及偏离程度视摄影中心相对于地物目标的方位而定,有时建筑物会向街道方向倾斜,有时会遮挡其他地物目标,从而影响了应用正射影像对目标的判读。

上述问题的存在已经大大影响了数字正射影像在数据更新以及城市规划等领域的应用。因此,有必要对大比例尺正射影像进行更深层次的研究。

近年来,国内外一些学者提出真正射影像(true-orthophoto)概念^[1],并加以应用^[2-6]。Skarlatos 和 Joshua 分析了真正射影像的重要性,指出正射影像中建筑物引起的遮挡不仅严重影响影像质量,而且影响正射影像的精度;Bianon 等在此基础上进一步研究真正射影像自动生成算法,并应用该算法快速生成成都灵地区 1:2 000 比例尺的真正射影像^[6]。Zhou 等提出了城市区域的真正射影像的生成可以由基于数字地面模型(digital terrain model, DTM)的正射影像以及基于数字建筑模型(digital building model, DBM)的正射影像的合并组成,并对其进行可视化分

析^[9]。这其中包括很多关键技术的研究,诸如遮挡区域的检测与填充、阴影区域的检测与补偿等等。

我国在真正射影像方面的研究起步较晚,2006年的《中国测绘学科发展蓝皮书》中提到“真正射影像”的概念,真正射影像这种全新的测绘产品开始引起普遍的关注。利用真正射影像生成数字线划图,具有如下特点:①不需要进行房檐改正;②不存在人工地物移位;③影像上无遮挡区域。因此,真正射影像在城市空间信息领域中应用前景非常广阔。随着航空数码、LiDAR等多源空间数据获取技术的进一步发展及集成,城市区域真正射影像将逐步取代传统的正射影像。

数字3维城市建模是一项复杂的工程,因为它在不同的应用中(如城市规划、通讯设计、旅游等)需要不同的数据类型、结构与功能^[7-9]。以真正射影像生成为例,所应用建筑模型的数据结构不仅应满足于高质量、高精度的正射影像生成,而且易于构建、存储、分析和查询建筑目标,以便于城市规划与建设等应用中。因此,本文第2部分介绍基于CSG的数字建筑模型。在此基础上,第3部分、第4部分分别讨论基于数字建筑模型的阴影与遮挡的检测与消除算法。第5部分以丹佛downtown地区的航片数据为实例,用本文提出的算法进行真正射影像的生成。

2 建筑模型的数据结构

构造实体几何CSG(constructive solid geometry)是广泛应用于计算机辅助设计中的一种数据结构,它通过基本体素及应用在其上的几何变换、布尔运算方法组合构建空间实体。因而可利用CSG方法先抽取建筑基本形状(体素),然后对这些体素进行几何变换和布尔运算,最后构建成建筑物的3维模型。它具有灵活性、可移植性和通用性等特点,满足真正射影像生成的要求。

CSG建模是将多个体素通过变换及运算形成一个建筑物实体,构建过程是一个森林数据结构。由于森林与二叉树有一一对应关系,因而构成几何体的原始特征和定义参数可以通过二叉树表示,也就是CSG树。CSG树的叶结点是体素或变换参数,中间节结点是集合运算符,树根是生成的空间实体^[10]。

CSG模型由很多CSG体素组成。任何3维体素都是由带有不同高度参数的2维基本图形获

得。本文提出3层数据结构用于构建3D建筑模型(如图1所示)。第1层是带有不同参数2D基本图形,如矩形、圆形、多边形等。每个图形有其各自的参数,如长度、宽度、半径、点位等。第2层是3D体素,2维基本图形附上高度参数即变成了3维图形。例如,矩形附加高度信息即为长方体;圆附加高度信息即为圆柱体或圆锥体。这些立方体、圆柱体、圆锥体、金字塔等都属于结构单一的原型。更进一步,可以从不同的单一原型生成复杂原型。第三层为建筑模型。3D体素通过正则布尔运算(并(\cup),交(\cap)以及差($-$)等操作)进行各种组合,即可生成CSG建筑模型。在这个过程中,为了便于数据检索及后续应用,各原型间的空间拓扑关系(如邻接、包含等)应被纳入到模型结构当中。基于此数据结构,可以从数字表面模型中自动或半自动构建数字建筑模型,并应用于后续的阴影及遮挡的检测方法中。

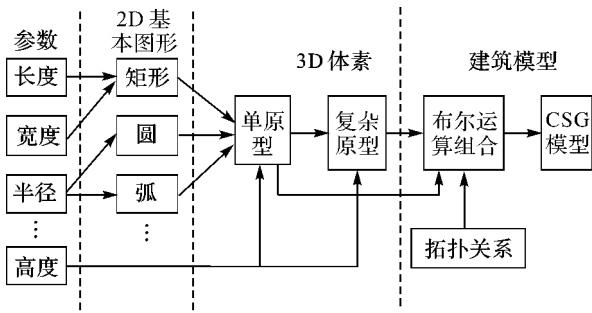


图 1 3层数据结构

Fig. 1 Three-level data structure

3 遮挡检测分析

遮挡现象在计算机图形图像中普遍存在,遮挡检测算法也是计算机视觉和摄影测量领域一项具有挑战性的任务。很多方法可以用来检测遮挡区域^[11-12]。在计算机视觉领域,检测遮挡的主要目的是试图发现并重建3维目标的结构,通过序列影像跟踪或预测目标的行为动作。然而,在摄影测量领域,目标的3维模型可作为先验信息来确定并解决遮挡区域。其中,普遍使用的检测遮挡方法是z-buffer算法。在计算机图形学中,z-buffer深度排序是一种隐藏面消除的方法,它用于处理含有多个3维模型的复杂场景。

通常,遮挡检测是一个费时的过程。z-buffer算法中,要遍历计算地表面2维矩阵的每一个元素。在城市地区,大型的人工建筑物是产生遮挡的主要来源。针对城区,本文提出基于DBM的

快速遮挡检测方法。这种方法是一种改进的z-buffer算法。z-buffer算法有两个主要矩阵组成。一个存储投影中心到目标点的距离,可通过影像方位元素由共线方程计算得到。另一个用于存储与数字地面模型具有同样分辨率、尺寸和投影属性的二进制索引图。遮挡意味着多个目标点在影像中对应同一个位置。这种方法需要遍历搜索整个地表区域,因此算法效率比较低。

从遮挡成因可知,由建筑物引起的遮挡区域是沿着从摄影中心到地表面的射线形成的,建筑物形成的遮挡区域呈现出扇形特点,这在超高建筑物形成的遮挡区域中尤为明显。因此,本文在极坐标系下提出最小边界扇区(minimum boundary section, MBS)的概念,并将构建的数字建筑模型作为先验信息,在极坐标系下投影至地面,确定可能存在遮挡的候选区域,从而避免遮挡算法在整个区域中搜索。

假设点 O 是摄影中心 S 在地面上的投影,则由建筑墙面所导致的遮挡区域的边缘就是由点 O 引出的射线。以点 O 为中心建立极坐标系 $O-\rho, \theta$, ρ 是到点 O 的距离; θ 是射线相对于东向的方向角。在极坐标系中,一个建筑物的所有角点的投影将在地面上形成该建筑物的最小边界扇区。某建筑物的正射影像如图3所示。根据此建筑模型,建筑物其中6个角点投影值在 $X-Y$ 坐标系下可以表达为 $\{(x_i, y_i) | i \in [1, 6]\}$ 。沿 X 轴 Y 轴搜索最小值与最大值,可以形成一个最小边界矩形(minimum boundary rectangle, MBR)。其中,

$$x_{\min} = \min(x_1, x_2, \dots, x_6)$$

$$x_{\max} = \max(x_1, x_2, \dots, x_6)$$

$$y_{\min} = \min(y_1, y_2, \dots, y_6)$$

$$y_{\max} = \max(y_1, y_2, \dots, y_6)$$

如果转换 $X-Y$ 坐标系到 $\rho-\theta$ 极坐标系,沿 ρ 轴和 θ 轴搜索最大最小值,即形成最小边界扇区(见图2)。其中,

$$\rho_{\min} = \min(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_6)$$

$$\rho_{\max} = \max(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_6)$$

$$\theta_{\min} = \min(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6)$$

$$\theta_{\max} = \max(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6)$$

图2同时显示了最小边界矩形与最小边界扇区以作比较(点虚线为最小边界矩形;长虚线为最小边界扇区)。图中可以看出最小边界扇区所覆盖的搜索区域要小于最小边界矩形。这说明在进行遮挡检测时,最小边界扇区比最小边界矩形更有效地缩小

待搜索的候选区域,这大大提高了算法的效率。

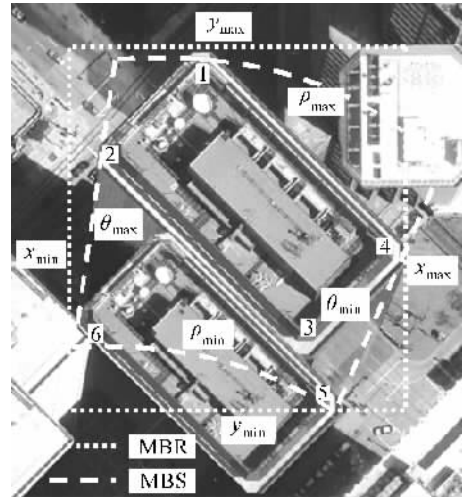


图2 最小边界矩形(MBR)与最小边界扇区(MBS)的比较

Fig. 2 The comparison of MBR and MBS

对于建筑目标本身出现的遮挡问题,可分两种情况解决。由于建筑物的竖直墙体将不会显示在真正射影像中,因此,该算法不对建筑物竖直墙体出现的遮挡进行检测。而当建筑物的水平屋顶出现遮挡时,则需按上述算法检测。对于遮挡区域(包括地面以及建筑屋顶)产生的信息缺失,若比例尺一致且影像重叠度高,可通过其航向和旁向相邻影像的对应信息进行补偿,本文的实验部分会做具体分析。

4 阴影分析与信息补偿

在真正射影像生成中,阴影检测是另一个关键问题。在传统正射纠正模型中没有考虑建筑物的阴影问题,而阴影中隐藏了很多影像信息,这样,由建筑物导致的阴影影响了正射影像的应用。为了生成高质量的正射影像,有必要对阴影区域的自动检测以及辐射度的平衡进行深入研究。

近年来,出现很多种方法用来检测遥感影像阴影,并取得一定效果。如基于影像灰度直方图的双峰法检测阴影;基于同态系统消除阴影的技术;对于高分辨率卫星遥感影像,有学者提出通过共生矩阵和相应的纹理指数来自动提取阴影^[13];在影像融合基础上,运用波谱角度映射表分类方法,对IKONOS影像中的阴影进行自动提取^[15];对于航空影像,通过分析影像光照函数和反射函数的频谱特性,利用分离亮度低频的方法分离阴影区域和非阴影区域^[14]。以阴影区域和非阴影

区域之间的反差普遍较大的特点为约束,导出了整体变分模型用于影像上阴影的检测^[16]。

这些方法多数是针对某种特定数据源以及影像特征来检测并分割阴影区域。然而,对于城市大比例尺的航空影像,因为城区环境的复杂性,诸多因素影响着阴影的检测。例如,高反射率的路面以及建筑物的玻璃幕墙使阴影在一些地方很亮,甚至某些阴影地区亮度接近非阴影地区。这样,仅通过图像分析技术,这些阴影地区可能不会被有效检测出来。此外,图像分割的阈值也很难确定。所以,阴影区域的分割具有不可靠性。

本文对于框幅式航空影像提出一种基于数字建筑模型的检测阴影的方法。在城市地区,影像中的阴影主要来源于人工建筑物产生的阴影。因此,借助城市数字建筑模型,可以快速有效地检测阴影区域。本文提出的阴影检测方法建立在以下原则:

1. 阴影的长度依赖于目标的高度以及太阳的高度角;阴影的方向依赖于太阳相对于目标的方向。

2. 在摄影时太阳相对于目标的高度以及方位维持在一个常数。这意味着影像中所有建筑物阴影的方向是相同的,如果太阳高度角已知,那么每个建筑物阴影的长度可通过 DBM 量测得出。因此,首先要计算出太阳的高度角和方位角。

4.1 高度角与方位角的计算

影像中,假定一个建筑物垂直边缘的两角点的阴影为点 a 和点 b 。相机模型、内外方位元素已知。根据摄影测量共线方程,这两点在数字地面模型的物空间坐标系中为 $A(x_1, y_1, z_1)$ 和 $B(x_2, y_2, z_2)$ (见图 3)。这样,可以计算得到高度角 α 和方位角 β

$$\sin(90-\alpha) = \frac{L}{\sqrt{h^2 + L^2 - 2hL\cos\lambda}} \sin\lambda \quad (1)$$

其中, $\lambda = 90 + \arcsin \frac{|z_1 - z_2|}{L}$

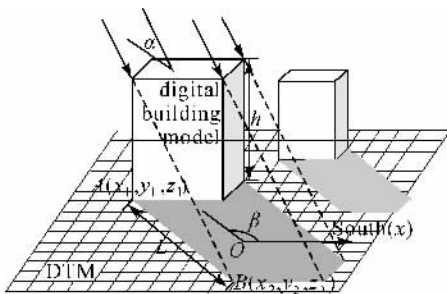


图 3 高度角与方位角的计算

Fig. 3 The calculation of zenith angle and altitude angle

对于地势平坦地区,高度角可近似为

$$\left. \begin{aligned} \tan \alpha &= h / \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \\ \tan \beta &= (y_1 - y_2) / (x_1 - x_2) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中,坐标 (x_1, y_1, z_1) 和 (x_2, y_2, z_2) 可通过计算得到; h 代表建筑物的高度,可通过建筑模型得到; L 为建筑物阴影的长度。

4.2 阴影区域检测

由于在真正射影像中建筑物的墙体不会显示,因此本文所提到的阴影检测不包括建筑物自身阴影。检测阴影流程如图 4 所示。

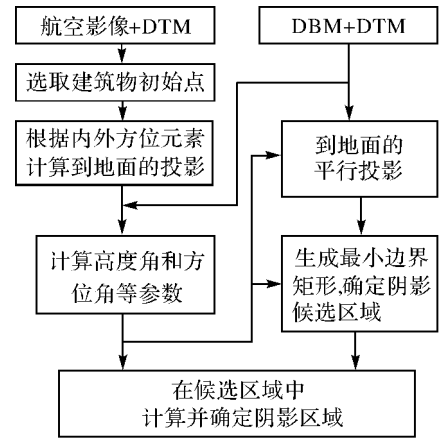


图 4 阴影检测流程图

Fig. 4 Flow chart of the shadow detection process

在影像上选取某建筑模型一垂直边缘的阴影,根据影像内外方位元素得到它在 DTM 上的位置,根据式(1)和式(2)计算太阳高度角和方位角,这样,即可跟踪从太阳到地面目标点的每一条光线。如果某一光线被建筑物遮挡,则意味着所对应地面点为阴影区域。根据太阳高度角和方位角,对 DBM 中每个建筑模型都进行平行投影。每个建筑模型中所有角点的投影点将会形成一个最小边界矩形。该区域可认为是阴影候选区域,并用对应模型的索引值进行标记。通过投影几何方程,对每个建筑模型的最小边界矩形区域进一步计算,即可确定每一建筑模型的阴影区域。

关于阴影的补偿,航空影像上每个像元的亮度都是太阳光照函数和地物反射函数的复合函数。由于这一复合函数非常复杂,从理论上讲,完全消除阴影的影响,恢复阴影区域中应有的亮度信息几乎是不可能的^[14]。本文在实际应用中,阴影区域像素的亮度采用通过邻近非阴影区域的映射关系映射到某一亮度值的方法进行补偿。本文

采用膨胀算法得到的阴影区域边缘的缓冲区作为邻近区域。阴影补偿公式如下

$$g_{NEW} = \frac{\sigma_n(g - \mu_s)}{\sigma_s} + \mu_n \quad (3)$$

其中, g_{NEW} 是调整后的灰度值; g 是原始灰度值; μ_n 是非阴影区域的灰度均值; μ_s 是阴影区域的灰度均值; σ_n 是非阴影区域的标准方差; σ_s 是阴影区域的标准方差。

5 试验分析

试验区域位于美国丹佛市中心城区。原始航空影像由 RC30 航空相机拍摄得到, 共 6 幅, 来自两个相邻航带。其中覆盖中心城区的两幅相邻影像(dv1119 和 dv1120)具有 65% 的航向重叠度以及 30% 的旁向重叠度。经数字化扫描的部分航空影像如图 5 所示。该地区的数字表面模型的 2 维表达如图 6 所示, 灰度值代表不同的高程值。

编组之后, 生成上层建筑物轮廓, 大多数建筑物都有着规则的外部轮廓或由规则体组合而成, 因此可以在 CSG 体素数据库中匹配到相应的 CSG 体素, 建筑物的高度信息可以从 DSM 中获取, 复杂的建筑物可以分解成多个简单模型, 并通过正则布尔运算将各个模型组合成一个完整建筑模型。图 7 所示为提取的建筑物模型与影像数据的比较, 通过比较, 可以看出此立体模型能详细、准确的对建筑物外部轮廓进行描述。

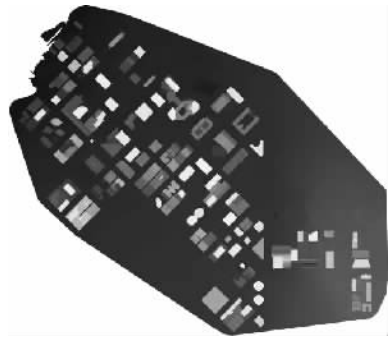


图 6 2 维形式表示的数字表面模型

Fig. 6 2D representation of DSM in downtown



(a) 原始影像 dv1119



(b) 原始影像 dv1120

图 5 部分航空影像

Fig. 5 Part of original aerial images

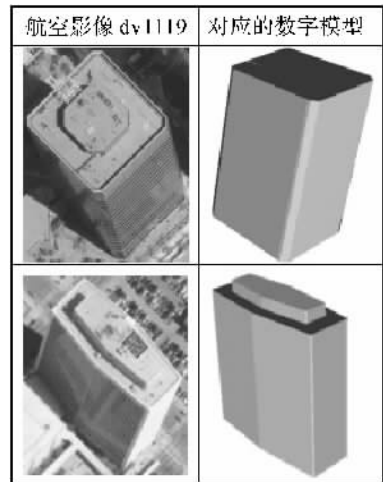


图 7 提取的建筑物模型与对应影像比较

Fig. 7 The extracting result compared with aerial image

图 8 为对某一建筑物进行遮挡区域的检测与处理。(a) 中白线区域为 dv1119 影像中检测的遮挡区域。(b) 中白线区域为相邻影像 dv1120 中检测的遮挡区域, 两幅影像分别覆盖了不同的遮蔽区域, 在航高近似的情况下可从相邻影像中获取信息进行补偿。(c) 为通过相邻航片数据补偿进行遮挡处理的结果, (c) 中可以看出白线区域仍有小部分遮挡区域未消除。

本文首先从数字表面模型中提取基于 CSG 的数字建筑模型^[2]。结合该区域的 GIS 矢量图获取建筑目标的 2 维信息, 2 维矢量信息经特征

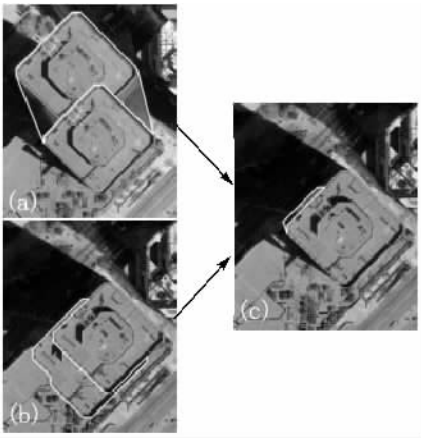


图 8 正射影像中遮挡区域的处理

Fig. 8 Occlusion refilling of one building in orthophoto

对于整幅影像的遮挡区域,可通过本文所提出的方法自动检测出来。图 9 所示为影像 dv1119 遮挡区域检测的结果,其中黑色区域为检测的建筑物遮挡区域。该区域覆盖了 124 263 m² 的面积。图 10 显示了影像 dv1120 遮挡检测结果。此区域覆盖了 138 396 m² 的面积。

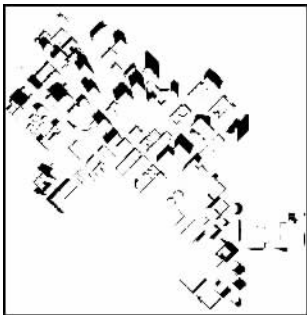


图 9 基于影像 dv1119 的遮挡区域检测

Fig. 9 Occlusion detection of dv1119

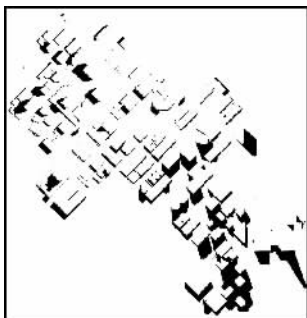


图 10 基于影像 dv1120 的遮挡区域检测

Fig. 10 Occlusion detection of dv1120

结合两幅带有不同遮挡检测区域的正射影像,可以生成一幅消除遮挡的正射影像。图 11 显示了

由 dv1119 以及 dv1120 相邻影像生成正射影像的公共遮挡区域。该区域仅仅覆盖了 29 444 m² 的范围。实验结果显示,通过这两幅航空影像,接近 80% 的遮挡区域可以被消除。如果进一步应用更多的相邻航空影像,则可以消除更多的遮挡区域。

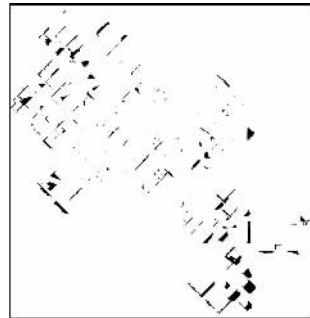


图 11 遮挡区域的消除

Fig. 11 Occlusion areas occurred by both dv1119 and dv1120

对于阴影问题,结合本文提出的基于 DBM 自动检测阴影的算法,可以检测出整幅影像的阴影区域,如图 12 所示,白色区域为建筑模型产生的阴影范围。放大建筑物 a 和 b, a₁ 和 a₂ 分别显示了建筑物 a 的阴影区域和阴影消除结果; b₁、b₂ 分别显示了建筑物 b 的阴影区域和阴影消除结果。

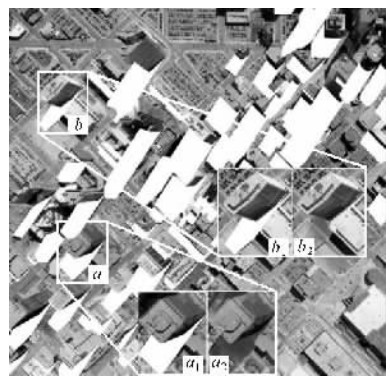


图 12 阴影的检测与去除

Fig. 12 Shadow detection

对整个实验区域所有航片数据进行阴影与遮挡检测与处理,可以生成真正射影像(如图 13 所示)。将它与未进行遮挡与阴影分析的正射影像(图 1 所示)进行比较,可以看出真正射影像中的建筑物遮挡部分已基本消除,每栋建筑物的正射投影都位于正确的地理位置,如图中白色轮廓线所示;此外阴影区域也被正确检测,并进行了信息补偿。

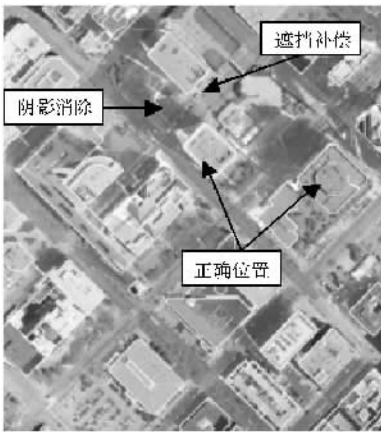


图 13 进行了遮挡与阴影分析的真正射影像局部
Fig. 13 True orthophoto after occlusion and shadow analysis

6 结 论

传统方法应用于城市大比例尺正射影像的生成将带来一系列不容忽视问题。本文仅就其中的阴影与遮挡两个关键问题进行研究与讨论,并提出基于数字建筑模型(DBM)的阴影与遮挡检测方法。最后本文以丹佛市城区数据为例,应用此方法生成了该地区的大比例尺真正射影像。然而,对真正射影像的研究,这仅仅是个开始,如本文提出的一些算法如阴影检测只是针对框幅式航空影像,对于线阵扫描航空影像的大比例尺真正射影像生成算法还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] AMHAR F, JOSEF J, RIES C. The Generation of True Orthophotos Using a 3D Building Model in Conjunction with a Conventional DTM[J]. *Int Arch Photogrammetry Remote Sensing*, 1998, 4(32): 16-22.
- [2] XIE W, ZHOU G. Urban 3D Building Model Applied to True Orthoimage Generation[C]// *First Workshop of the EARSel Special Interest Group on Urban Remote Sensing*. Berlin: [s. n.], 2006: 2-3.
- [3] ZHOU G, CHEN W, KELMELIS J, et al. A Comprehensive Study on Urban True Orthorectification [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*, 2005, 43(9): 2138-2147.
- [4] NIELSEN M. True Orthophoto Generation, Informatics and Mathematical Modelling[D]. Copenhagen: Technical University of Denmark, 2004.
- [5] RAU J Y, CHEN N Y, CHEN L C. True Orthophoto Generation of Built-up Areas Using Multi-view Images[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2002, 68(6): 581-588.
- [6] BIASON A, DEQUAL S, LINGUA A. A New Procedure for

- the Automatic Production of True Orthophotos [C] // *Int Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Istanbul: ISPRS Congress, 2004: 12-23.
- [7] BREUNIG M. Integration of Spatial Information for Geoinformation Systems[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1996.
- [8] GRAZ M G. Managing Large 3D Urban Databases[C]// *Photogrammetric Week*. Stuttgart: [s. n.], 1999: 341-349.
- [9] GRUN A, WANG X. CC-Modeler: A Topology Generator for 3D City Models [J]. *ISPRS J Photogramm Remote Sensing*, 1998(53): 286-295.
- [10] TSENG Y H, WANG S. Semiautomated Building Extraction Based on CSG Model-Image Fitting[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2003, 69(2): 171-180.
- [11] GEIGER D, LADENDORF B, YUILLE A L. Occlusions and Binocular Stereo[C]// *European Conference on Computer Vision*. London: Springer-Verlag, 1992: 425-433.
- [12] ZITNICK C, KANADE T. A Cooperative Algorithm for Stereo Matching and Occlusion Detection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(7): 675-684.
- [13] XU Miaozhong, YU Zhihui. Automated Extraction of Shadows in Very-High Resolution Spatial Satellite Images [J]. *Journal of Geomatics*, 2003, 28(1): 20-22. (许妙忠, 余志惠. 高分辨率卫星影像中阴影的自动提取与处理[J]. *测绘信息与工程*, 2003, 28(1): 20-22.)
- [14] WANG Shugen, GUO Zejin, LI Deren. Shadow Compensation of Color Aerial Images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2003, 28(5): 514-516. (王树根, 郭泽金, 李德仁. 彩色航空影像上阴影区域信息补偿的方法[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2003, 28(5): 514-516.)
- [15] HUANG Hao, ZHANG Youjing, MA Xuemei. A Shadow Automated Extraction Method of IKONOS Images Based on Image Fusion[J]. *Remote Sensing Information*, 2004(4): 29-31. (黄浩, 张友静, 马雪梅. 基于影像融合的 IKONOS 影像阴影信息自动提取方法[J]. *遥感信息*, 2004(4): 29-31.)
- [16] WANG Shugen, WANG Junli, WANG Aiping. Shadow Detection and Extraction from Imagery Based on Total Variation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(8): 663-666. (王树根, 王军利, 王爱萍. 基于整体变分模型的影像阴影检测算法研究[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2006, 31(8): 663-666.)

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2008-09-18

修回日期: 2009-07-02

第一作者简介: 谢文寒(1977—),男,博士,研究方向为航空摄影测量。

First author: XIE Wenhan (1977—), male, PhD, majors in aerial photogrammetry.

E-mail: xiewh@casm.ac.cn