

引用格式: 陈亭, 祝善友, 张桂欣, 等. 高分辨率遥感影像阴影与立体像对提取建筑物高度比较研究[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(9): 1267-1175.
[Chen T, Zhu S Y, Zhang G X, *et al.* 2016. A comparative study on building height extraction based on the shadow information in high resolution remote sensing image and stereo images. *Journal of Geo-information Science*, 18(7): 1267-1175.] DOI:10.3724/SP.J.1047.2016.01267

高分辨率遥感影像阴影与立体像对提取建筑物高度比较研究

陈 亭¹, 祝善友^{1*}, 张桂欣¹, 高 瑒²

1. 南京信息工程大学地理与遥感学院, 南京 210044; 2. 南京市浦口区气象局, 南京 211800

A Comparative Study on Building Height Extraction Based on the Shadow Information in High Resolution Remote Sensing Image and Stereo Images.

CHEN Ting¹, ZHU Shanyou^{1*}, ZHANG Guixin¹ and GAO Yang²

1. School of Geography and Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. Pukou Meteorological Bureau of Nanjing, Nanjing 211800, China

Abstract: The accurate and quick acquisition of building height information has great significance to urban planning management and ecological environment assessment. In this paper, Geoeye-1 remotely sensed stereo images combined with the Google Earth data are used to estimate the building heights in Nanjing's central urban area by methods of single scene image and stereo images respectively, which are further validated using the field measured building heights. Firstly, after extracting the building shadow information by threshold segmentation and morphological optimization method, the building height can be calculated according to the geometric relationships between the sun, the satellite and the building. Secondly, the rational function model of stereo images is established based on the mathematical relationship between the three dimensional coordinates of the ground points and the coordinates of their corresponding image points in the image plane coordinate system, which can be further optimized using the measured ground control points data. The actual building height is then calculated by subtracting the terrain height from the height got from the rational function model. Finally, the measured building height data is used to validate the precision of the calculated results from two different methods. Furthermore, this paper compares the advantages and disadvantages of these two methods and analyzes their application precisions with respect to different building types. Results show that the method based on the stereo images is more accurate with a root mean square error within 2.8 m. The method of calculating building height through stereo images proves to be more practical because it obtains the building height information more quickly and accurately. The method of extracting building height using the shadow information from single image is suitable for tall buildings without shelter and keeping a long distance from the nearby buildings, while the method from stereo images is not affected by the surrounding buildings and is more capable for the condition of intensive building distribution with uniform heights.

Key words: remote sensing; high resolution images; image shadow; stereo images; building height

*Corresponding author: ZHU Shanyou, E-mail: zsyzg@163.com

摘要: 建筑物高度信息的快速准确获取对于城市规划管理、生态环境评价具有重要意义。本文以南京市主城区为研究区, 选

收稿日期: 2015-08-04; 修回日期: 2015-11-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401471, 41571418); 江苏高校优势学科建设工程资助项目。

作者简介: 陈 亭(1990-), 女, 江苏宿迁人, 硕士生, 研究方向为城市微气候。E-mail: 348787953@qq.com

*通讯作者: 祝善友(1977-), 男, 博士, 教授, 研究方向为热红外遥感与资源环境遥感。E-mail: zsyzg@163.com

择2011年Geoeye-1卫星高分辨率遥感影像立体像对数据,结合Google Earth数据及实地建筑物高度测量,分别利用单幅遥感影像和立体像对计算建筑物高度,并以实测建筑物高度数据验证不同方法的提取精度,进而比较这2类方法的优缺点。结果表明:利用立体像对提取建筑物高度的方法更加精确,提取结果误差在2.8 m以内,能够快速获取大范围建筑物高度,具有实用价值;单幅遥感影像阴影提取建筑物高度适用于建筑物高大、毗邻建筑物间隙大、周围无遮挡的情况,而立体像对提取建筑物高度不受建筑四周环境影响,在建筑物密集分布、高度均一的情况下,其普适性更强。

关键词 遥感;高分辨率影像;图像阴影;立体像对;建筑物高度

1 引言

城市是人口聚集、生产生活的重要场所,作为城市下垫面的重要组成部分,城市建筑物的高度信息是研究城市空间形态、微气候、生态环境的重要参数与基础数据。建筑物高度信息的快速获取已成为当今研究的热点^[1-3]。

目前,利用遥感影像提取建筑物高度的方法包括利用立体像对提取和利用单幅遥感影像阴影提取2大类。(1)利用立体像对提取建筑物高度的方法主要是通过城市三维建模中用数字高程模型DEM(Digital Elevation Model)识别获取建筑物高度^[4-9]。例如,尤红建^[10]利用机载三维成像仪得到DSM(Digital Surface Model)数据,开展建筑物高度与轮廓自动提取方法研究;卓莉^[11]提出了综合立体像对和高空间分辨率数据进行建筑物三维信息提取方法。(2)利用单幅影像获取高度信息研究中,大多数根据成像姿态和共线方程原理建立几何关系^[12-13],或根据建筑物阴影长度求解其高度^[14-16]。例如,何国金^[17]和谢军飞^[18]分别利用SPOT影像和IKONOS影像的建筑物阴影较准确地提取了城市建筑物高度信息;王菲^[19]利用ALOS影像研究塘沽地区的建筑物高度信息,提出了一种针对大范围区域的快速半监督的阴影提取和高度计算方法。

Geoeye-1是近年来发射的高空间分辨率卫星,在建筑物密集的快速城市化区域中,利用其影像提取建筑物高度的精度如何,需要进一步开展研究。本文以南京市主城区为研究区,选择2011年Geoeye-1卫星高分辨率遥感影像,分别利用单幅遥感影像和立体像对计算建筑物的高度,并利用秣陵路社区和安品街社区建筑物高度实测数据与计算结果进行对比。最后,验证这2种方法估算建筑物高度的精度,以及比较2种方法的优缺点并分析方法的适用性。

2 研究区与数据源

2.1 研究区概况

南京市位于江苏省西南部,是长江三角洲重要

的中心城市之一,中心地理坐标为北纬31°54',东经118°48'。南京总体地势较低,主城区高楼林立。本文选取的研究区位于鼓楼区秣陵路社区和安品街社区,地处南京城市中心地带,建筑物主要是商业建筑与居民住宅,大部分建筑高度在20~100 m之间,个别商业建筑高达100 m以上。

2.2 数据

2.2.1 Geoeye-1 数据

2008年9月6日发射的Geoeye-1卫星不仅有较高的分辨率和强大的测图能力,而且在细微地物的解译与判读上更具优势。Geoeye-1卫星影像立体像对的全色波段(450~800 nm)分辨率高达0.5 m,多光谱波段分辨率为2 m,包括蓝光、绿光、红光以及近红外4个波段(450~920 nm)。本文选择2011年3月13日成像的Geoeye-1高分辨率遥感影像立体像对作为主要数据源,数据无云覆盖,质量较高。

2.2.2 Vertex 激光测距仪

Vertex激光测距仪具有超声波和激光2种测量方式:当视线开阔能够直接瞄准目标时,选择激光装置,其可进行超远距离测量;当所处环境有较多遮挡物时,则选择超声波装置进行测量,其适用于森林田野等植被茂密的区域。Vertex激光测距仪测量高度时,100 m水平距离以内测量精度为0.4 m,大于100 m距离时测量精度为1 m,表明水平距离越近则测量误差越小。本文使用Vertex激光测距仪的激光测量方式,随机测量秣陵路社区和安品街社区内的45栋建筑物的高度,用于验证遥感影像提取建筑物高度的精度,测量时保持仪器与目标建筑物之间水平距离在20 m以内,为减小偶然误差对每栋建筑物测量3次,取平均值作为最终高度。

2.2.3 地面控制点数据

使用手持式GPS定位仪获取研究区内6个地面控制点的数据,包括地面点的经度、纬度、高程信息。手持式GPS定位精度为5 m左右,其使用2台GPS同时观测,对同一控制点采用多次测量结合GPS差分技术来消除观测误差,以提高手持式GPS定位精度。地面控制点选择在道路的交叉口,遵循

满幅均匀选取的原则,地面控制点数据用于优化立体像对有理函数模型,来提高立体像对定位精度。

3 研究方法

本文分别利用单幅遥感影像和立体像对计算建筑物的高度。首先,对单幅遥感影像做图像预处理,利用阈值分割法提取阴影,优化阴影提取效果,根据太阳、卫星、建筑物之间的几何关系计算建筑物高度;然后,利用立体像对数据与地面控制点数据提取地物高度,与DEM数据作叠置分析,得到建筑物高度;最后,利用实测数据与计算结果进行对比,以验证这2种方法估算建筑物高度的精度,并根据不同建筑类型的提取高度对比结果,分析2种方法的优缺点与适用性。研究技术路线如图1所示。

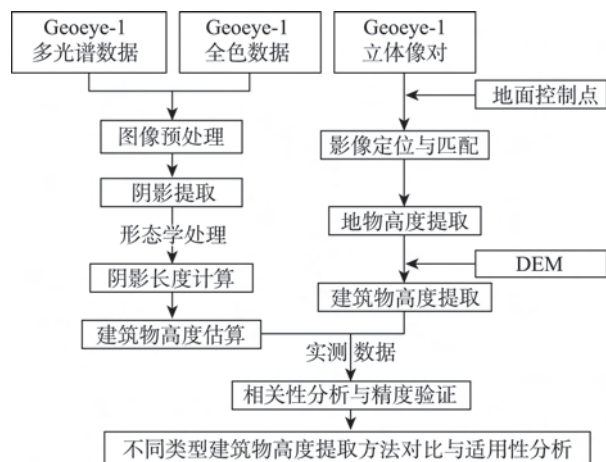


图1 建筑物高度提取流程图

Fig.1 Flowchart of building height extraction

3.1 利用单幅遥感影像估算建筑物高度

3.1.1 图像预处理

Geoeye-1 影像全色波段图像空间分辨率较高,多光谱波段空间分辨率较低,对全色与多光谱波段进行图像融合处理以提高影像分辨率。首先对多光谱波段中的近红外波段、红光波段、绿光波段进行RGB到HSV的空间变换,对全色波段进行直方图拉伸后作为变换的V波段,将HSV反变换回RGB空间,完成数据融合过程,融合后的图像分辨率为0.5 m。融合后的近红外、红光、绿光波段假彩色合成图结果如图2所示。

3.1.2 阴影提取

图像上的阴影区域灰度值低,与其它地物明显不同,利用基于图像灰度阈值分割方法^[20]可将阴影



图2 研究区假彩色合成图

Fig.2 False color composite image of the study area

区域从图像中提取出来。在多光谱波段中近红外波段波长最长,散射光最小,阴影区域与非阴影区域目标辐射值差异大。通过统计近红外波段图像灰度直方图,可发现直方图呈现双峰特征,灰度值低的阴影区域集中在第1个峰内,灰度值高的其他地物集中在第2个峰内,选取两峰之间的谷值作为图像分割的阈值。根据不同区域图像的直方图,选择最优的几组阈值,根据阈值将图像分为阴影和非阴影,通过增加和减少阈值来调整分割结果,选择阴影提取效果最好的阈值作为最终的图像分割阈值。本文最终确定阴影提取的分割阈值为45。

为了剔除阴影中夹杂的其它地物信息,需要对提取的阴影进行优化。利用近红外波段和红光波段计算NDVI值,提取图像中的植被信息,并结合感兴趣区选取的水体区域,掩膜阴影中的植被和水体信息。本文得到优化后的阴影分布信息。

3.1.3 阴影形态学处理

经过初步提取后的阴影图上存在一些零散分布的阴影图斑,而大块阴影区域内部却存在孔洞现象。由于地物中存在一些与阴影灰度值相近的物体,阈值分割时被作为阴影提取出来,表现为图像上的破碎图斑。而阴影区存在与阴影灰度值相差较大的物体,在阈值分割处理时被划分为非阴影,表现为阴影内部的孔洞。因此,需要对阴影初步提取结果图像进行形态学处理,去除图斑和填补孔洞。

数学形态学是一组形态学的代数算子组成的,包括膨胀、腐蚀、开运算和闭运算。膨胀是把连接成分的边界扩大一层的处理,而腐蚀则是把连接成分的边界点去掉从而缩小一层的处理^[21]。膨胀的

算符为“ \oplus ”, A 用 B 来膨胀定义为:

$$A \oplus B = \{x | [(B)_x \cap A] \neq \emptyset\} \quad (1)$$

式中: A 表示图像; B 表示结构元素。

腐蚀的运算符为“ \ominus ”, A 用 B 来腐蚀写成“ $A \ominus B$ ”, 其定义为:

$$A \ominus B = \{x | (B)_x \subseteq A\} \quad (2)$$

闭运算的运算符为“ \cdot ”, A 用 B 来闭合写作“ $A \cdot B$ ”, 其定义为:

$$A \cdot B = (A \oplus B) \ominus B \quad (3)$$

对图像进行二值化处理, 以便进行数学形态学操作, 设定阴影区域值为1, 非阴影区域值为0。去除错分的破碎图斑, 通过设置面积阈值将面积小的干扰区域去除。本文将面阈值设为10。用形态学中的闭运算填补阴影内部缺失的孔洞, 即先用 5×5 的矩阵对阴影图像进行膨胀以填补阴影中的孔洞, 再用该矩阵对阴影进行腐蚀以去除膨胀后多余的边缘部分。闭运算能有效地填充物体内部细小缺失, 实现阴影完整提取。阴影提取效果如图3所示。

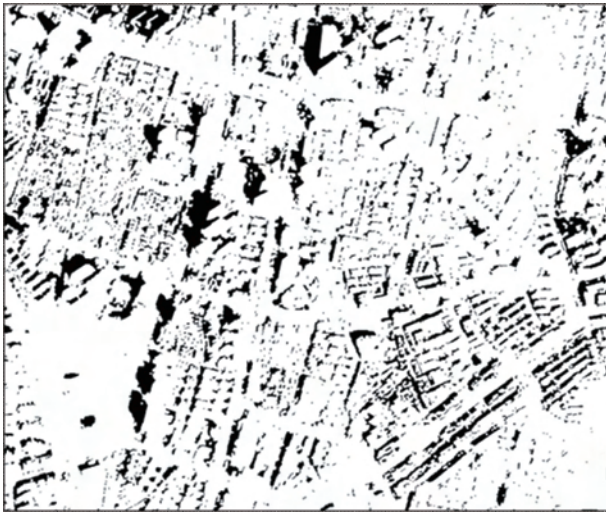


图3 阴影提取结果图

Fig.3 Image of shadow extraction results

3.1.4 阴影长度提取

为获取建筑物的阴影长度, 对提取的阴影图进行矢量化处理。沿着太阳光投射方向作一系列平行直线, 使其与阴影矢量图中的建筑物阴影区域相交, 取这些直线与各阴影区域的交线, 作为阴影的可见长度。根据太阳、卫星、建筑物三者之间几何关系, 选取交线中最大长度作为该建筑物阴影长度。

3.1.5 建筑物高度估算

当太阳光照射在建筑物上时, 所形成的阴影与

太阳方位角、高度角有关, 而且卫星成像方位角和高度角也会影响阴影在图像上的位置。假设建筑物处于平坦无地形干扰地区, 且建筑物垂直于地表, 则太阳、卫星、建筑物及阴影间的几何关系可分2种情况: 一种是卫星与太阳在建筑物同一侧; 另一种是卫星和太阳在建筑物两侧。

本文所用 Geoeye-1 卫星图像成像时刻, 太阳高度角为 50.9° 、太阳方位角为 149.9° 、卫星高度角为 62.3° 、卫星方位角为 326.2° , 太阳与卫星在建筑物两侧, 三者之间的几何关系可用图4表示。

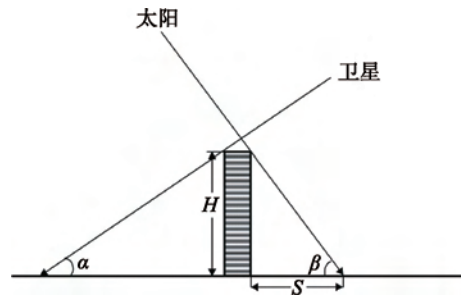


图4 太阳、卫星、建筑物几何关系

Fig.4 Geometric relationships between sun, satellite and buildings

图4中 α 是卫星高度角; β 是太阳高度角; H 是建筑物高度; S 是阴影长度。由图4可得式(4)。

$$H = S \times \tan \beta = S \times 1.23 \quad (4)$$

3.2 利用遥感影像立体像对提取建筑物高度

利用立体像对建模可得到研究区地面地物的高度信息, 去除DEM的影响, 即可提取出建筑物实际高度。

3.2.1 有理函数模型

Geoeye1 卫星数据提供了能够用于影像定位的有理函数模型参数。有理函数模型^[22]是指将像元坐标 (l_n, s_n) 以对应地面点的空间坐标 (X_n, Y_n, Z_n) 的有理函数表示, 反映了地面点三维空间坐标与相应像点在像平面坐标系中的数学关系。基于 WGS84 大地椭圆坐标系的有理函数模型如式(5)所示。

$$\begin{cases} l_n = \frac{P_1(X_n, Y_n, Z_n)}{P_2(X_n, Y_n, Z_n)} \\ s_n = \frac{P_3(X_n, Y_n, Z_n)}{P_4(X_n, Y_n, Z_n)} \end{cases} \quad (5)$$

式中: l_n, s_n 为标准化后的像元坐标; X_n, Y_n, Z_n 为标准化后的地面点坐标, X 代表经度, Y 代表纬度, Z 代表高度。根据有理函数数学模型, 多项式 $P(X_n, Y_n, Z_n)$ 为三次多项式, 其通用形式如式(6)所示。

$$P(X, Y, Z) = \sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} a_{ijk} X^i Y^j Z^k = a_1 + a_2 X + a_3 Y + a_4 Z + a_5 XY + a_6 XZ + a_7 YZ + a_8 X^2 + a_9 Y^2 + a_{10} Z^2 + a_{11} XYZ + a_{12} X^3 + a_{13} XY^2 + a_{14} XZ^2 + a_{15} X^2 Y + a_{16} Y^3 + a_{17} YZ^2 + a_{18} X^2 Z + a_{19} Y^2 Z + a_{20} Z^3 \quad (6)$$

式中: a_{ijk} 是有理多项式系数 RPC(Rational Polynomial Coefficients); m_1 、 m_2 、 m_3 的取值在 0-3 之间, 且 $m_1 + m_2 + m_3 \leq 3$ 。展开式(6)可得:

$$\begin{cases} P_1(X_n, Y_n, Z_n) = a_1 + a_2 X_n + a_3 Y_n + a_4 Z_n + a_5 X_n Y_n + a_6 X_n Z_n + a_7 Y_n Z_n + a_8 X_n^2 + a_9 Y_n^2 + a_{10} Z_n^2 + a_{11} X_n Y_n Z_n + a_{12} X_n^3 + a_{13} X_n Y_n^2 + a_{14} X_n Z_n^2 + a_{15} X_n^2 Y_n + a_{16} Y_n^3 + a_{17} Y_n Z_n^2 + a_{18} X_n^2 Z_n + a_{19} Y_n^2 Z_n + a_{20} Z_n^3 \\ P_2(X_n, Y_n, Z_n) = b_1 + b_2 X_n + b_3 Y_n + b_4 Z_n + b_5 X_n Y_n + b_6 X_n Z_n + b_7 Y_n Z_n + b_8 X_n^2 + b_9 Y_n^2 + b_{10} Z_n^2 + b_{11} X_n Y_n Z_n + b_{12} X_n^3 + b_{13} X_n Y_n^2 + b_{14} X_n Z_n^2 + b_{15} X_n^2 Y_n + b_{16} Y_n^3 + b_{17} Y_n Z_n^2 + b_{18} X_n^2 Z_n + b_{19} Y_n^2 Z_n + b_{20} Z_n^3 \\ P_3(X_n, Y_n, Z_n) = c_1 + c_2 X_n + c_3 Y_n + c_4 Z_n + c_5 X_n Y_n + c_6 X_n Z_n + c_7 Y_n Z_n + c_8 X_n^2 + c_9 Y_n^2 + c_{10} Z_n^2 + c_{11} X_n Y_n Z_n + c_{12} X_n^3 + c_{13} X_n Y_n^2 + c_{14} X_n Z_n^2 + c_{15} X_n^2 Y_n + c_{16} Y_n^3 + c_{17} Y_n Z_n^2 + c_{18} X_n^2 Z_n + c_{19} Y_n^2 Z_n + c_{20} Z_n^3 \\ P_4(X_n, Y_n, Z_n) = d_1 + d_2 X_n + d_3 Y_n + d_4 Z_n + d_5 X_n Y_n + d_6 X_n Z_n + d_7 Y_n Z_n + d_8 X_n^2 + d_9 Y_n^2 + d_{10} Z_n^2 + d_{11} X_n Y_n Z_n + d_{12} X_n^3 + d_{13} X_n Y_n^2 + d_{14} X_n Z_n^2 + d_{15} X_n^2 Y_n + d_{16} Y_n^3 + d_{17} Y_n Z_n^2 + d_{18} X_n^2 Z_n + d_{19} Y_n^2 Z_n + d_{20} Z_n^3 \end{cases} \quad (7)$$

为了稳定模型参数的求解过程, 需要把地面点坐标和对应像元坐标进行标准化。地面点三维坐标标准化公式如式(8)所示。

$$\begin{cases} X = \frac{Lon - Lon_f}{Lon_k - Lon_f} \\ Y = \frac{Lat - Lat_f}{Lat_k - Lat_f} \\ Z = \frac{H - H_f}{H_k - H_f} \end{cases} \quad (8)$$

式中: Lon 、 Lat 、 H 是 WGS84 坐标系的经度、纬度、

大地高程; Lon_f 、 Lat_f 、 H_f 是经度、纬度、大地高程的偏移参数; Lon_k 、 Lat_k 、 H_k 是经度、纬度、大地高程的比例参数。

像元坐标标准化公式如式(9)所示。

$$\begin{cases} l_n = \frac{l - l_f}{l_k - l_f} \\ s_n = \frac{s - s_f}{s_k - s_f} \end{cases} \quad (9)$$

式中: l 、 s 是影像坐标所在的行列数; l_f 、 s_f 是行列的偏移参数; l_k 、 s_k 是行列的比例参数。

代入式(5), 整理可得式(10)。

$$\begin{cases} l_n = \frac{(1, X_n, Y_n, Z_n, \dots, X_n^3, Y_n^3, Z_n^3)(a_1, a_2, a_3, \dots, a_{20})^T}{(1, X_n, Y_n, Z_n, \dots, X_n^3, Y_n^3, Z_n^3)(b_1, b_2, b_3, \dots, b_{20})^T} \\ s_n = \frac{(1, X_n, Y_n, Z_n, \dots, X_n^3, Y_n^3, Z_n^3)(c_1, c_2, c_3, \dots, c_{20})^T}{(1, X_n, Y_n, Z_n, \dots, X_n^3, Y_n^3, Z_n^3)(d_1, d_2, d_3, \dots, d_{20})^T} \end{cases} \quad (10)$$

式(10)共有 80 个系数, 即 Geoeye1 卫星数据提供的有理多项式系数(RPC)。将文件提供的 RPC 系数代入式(10), 即可实现卫星影像与地面点的定位。在影像定位时, 通过在影像上添加地面控制点对影像的 RPC 系数进行修正, 优化有理函数模型, 从而使立体像对定位精度提高, 模型更加稳定。

3.2.2 建筑物高度提取

利用立体像对提取建筑物高度, 必须实现立体像对匹配以获取地面同名点。利用计算机自动识别同名点, 在此基础上实行人工干预, 调整和添加同名点, 使同名点匹配误差控制在 1 个像元以内, 最后利用三维立体测量工具获取对应地面点的高度信息。结合利用 Google Earth 提取的研究区 DEM 数据, 对已经提取的研究区高度信息进行空间叠置分析, 去除已知地面点高度信息中的 DEM 干扰, 即可得到建筑物实际高度。

3.3 建筑物高度提取精度评价

利用实测建筑物高度分别与遥感影像建筑物高度提取结果作相关性分析, 计算相关系数 r (Correlation coefficient) 式(11) 和均方根误差 RMSE (Root mean square error) (式(12)), 用于评价高度提取精度。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (11)$$

式中: x_i 、 y_i 分别表示建筑物高度实测值与估算值; \bar{x} 、 \bar{y} 分别表示实测值与估算值的均值; n 表示样本

数量。相关系数 r 取值在 -1 至 1 之间,其绝对值越大表明相关性越强。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (12)$$

均方根误差反映估算值偏离真实值的程度, $RMSE$ 值越小,表明模拟结果越好。

4 结果与讨论

根据 Vertex 激光测距仪测量的 45 栋建筑物(图 5)高度数据,分别对单幅遥感影像估算建筑物高度结果与立体像对提取高度结果进行验证,建立了实测值与估算值之间的散点分布(图 6)。由图 6 可知,这 2 种方法提取结果与实测建筑物高度都较吻合。

根据单幅遥感影像估算建筑物高度的方法原理,其结果精度受阴影提取结果影响明显。如果建筑物阴影无法完整获取,则无法计算建筑物高度。45 栋实测建筑物中只有 40 栋建筑物能够准确提取其阴影。编号为 1、2、3 的建筑物高度太低,阴影长

度太短且受到周围道路和植被覆盖遮挡的影响,无法准确提取;9 号建筑物与周围建筑之间距离很近,导致阴影被周围建筑物遮挡,阴影部分投射在其他建筑物上,无法准确获取实际阴影长度;27 号建筑物临近河边,周围遍布植被,建筑物较高大,阴影长度长,部分投射在水中,无法获取完整的建筑物阴影,进而无法计算建筑物高度。对于能够获取完整阴影的建筑物来说,单幅遥感影像阴影估算的建筑物高度与实测高度之间的相关系数达到 0.9927。

立体像对提取建筑物高度时,不受建筑物地理位置的影响,能准确地提取 45 栋建筑物高度,建筑物高度估算结果与实测数据之间的相关系数达到 0.9952。对比分析可知,在研究区范围内,利用立体像对提取建筑物高度更为准确。

对于不同类型的建筑群,2 种方法模拟估算建筑物高度的准确程度也不同。通过实地勘测与调查,将研究区实测建筑物划分为商业建筑和民用住宅建筑 2 类,并比较这 2 种方法提取不同类型建筑物高度的精度,结果如图 7 所示。分别计算 2 种方法模拟建筑物高度的均方根误差 $RMSE$,计算结果



图 5 实测建筑物样点分布图

Fig.5 The distribution image of measured sample buildings

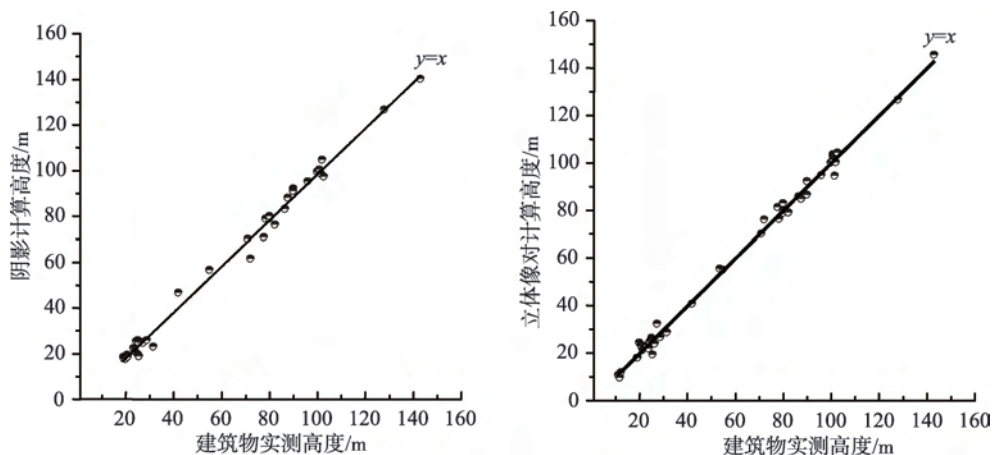


图6 计算高度与实测高度关系图

Fig.6 The relationship between the calculated building height and the measured building height

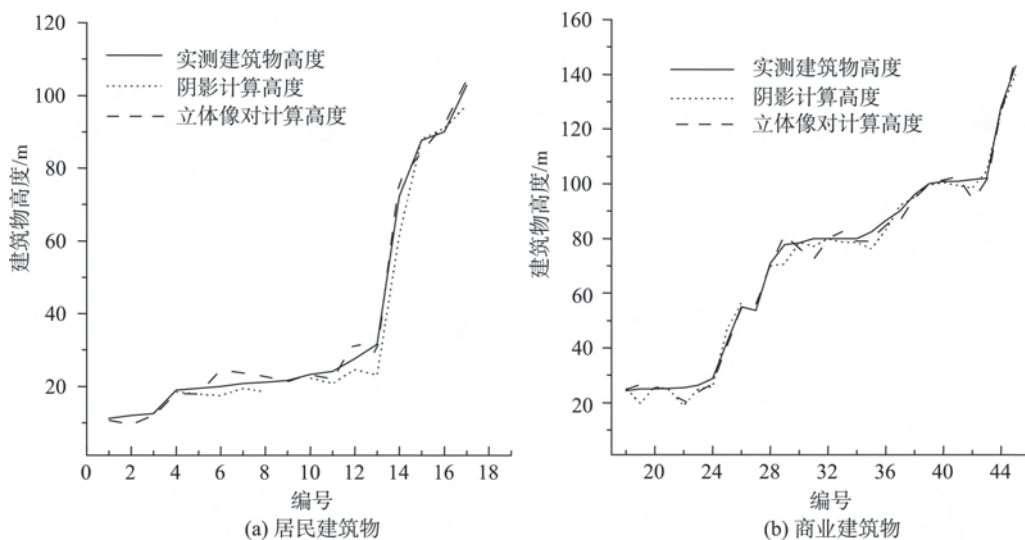


图7 不同类型建筑物高度提取结果对比图

Fig.7 Contrast of the building height extraction results for different building types

如表1所示。

由图7和表1可知,利用单幅遥感影像估算建筑物高度时,商业建筑的估算结果精度明显优于住宅建筑,这是由于利用单幅遥感影像估算建筑物高度的方法依赖于建筑物阴影提取效果,商业建筑和住宅建筑分布位置与地理环境不同,这些因素对阴影提取产生了影响。主要原因有:(1)住宅建筑普遍比较密集,如编号4、7、8、11等建筑物是居民小

区,建筑物高度普遍较矮,高度均一,每栋建筑之间的距离较近,位于中间部分的建筑物阴影不能完全投射在地面上,而是投射在其他建筑物上并产生形变;(2)住宅小区周围的绿化设施对建筑物阴影产生了遮挡,如编号1、2、3的建筑物坐落在人行道旁,人行道两边种较多树木,建筑物本身高度较低,阴影在图像上较短,阴影提取时更容易丢失信息或被其他信息干扰,无法完整提取;(3)商业建筑通常较为独立高大,建筑物之间的距离也较远,如编号33、44、29、38、28、20等建筑物分布在道路边,图像中的阴影也较为完整,阴影提取效果更好,从而可获得更准确的建筑物高度信息。

利用立体像对计算建筑物高度时,居民区和商业建筑的计算结果误差相近,居民住宅建筑的高度

表1 不同类型建筑物高度估算均方根误差(m)

Tab.1 RMSE of the building height estimation for different building types (m)

建筑物类型	阴影方法	立体像对方法
居民住宅建筑	4.4	2.5
商业建筑	3.1	2.8

提取结果总体上略优于商业建筑,利用立体像对计算建筑物高度的依据是物方与像方的成像关系,外在环境对计算结果影响较小,不受建筑物周围植被、水体及建筑物地理位置和密集度的约束,误差主要来源于有理函数模型计算中的系统误差、地面控制点精度以及同名点匹配误差。高大建筑物在影像上的位置畸变更明显,在定位时受到各个参数的影响更大,因此,高度估算误差要略高于低矮建筑物,但总体提取效果优于利用单幅遥感影像阴影提取方法。

由以上结果可知,2种提取建筑物高度的方法各有优缺点。对于利用单幅遥感影像阴影提取建筑物高度的方法来说,当阴影映射到河流、绿化带等较暗的地物上时,会造成阴影的误判;当高层建筑阴影叠加在一起时,会导致阴影提取失败;对于形状不规则的建筑物,准确提取高度更为困难。利用立体像对提取建筑物高度虽然不受建筑物地理位置的影响,但存在影像定位的系统误差,如何优化立体像对的有理函数模型,提高立体像对匹配的精度都将是建筑物高度提取及其精度提高的重点。

5 结论

本文分别利用单幅遥感影像的阴影与建筑物实际高度的几何关系估算建筑物的高度,以及遥感影像立体像对提取建筑物高度,并通过实测建筑物高度评估、比较了这2类方法的提取精度。结果表明,2种方法均能较准确地提取出建筑物高度,立体像对提取建筑物高度的精度相对更高,这2类方法用于建筑物高度提取时各有优缺点,主要表现为:

(1)利用阴影提取建筑物高度的方法受到建筑物位置,建筑物自身高度以及周围环境的影响较大,对于独立高大的商业建筑,阴影提取建筑物高度的效果很好,而对于密集分布的低矮居民住宅区,阴影提取建筑物高度结果误差略大;

(2)利用立体像对提取建筑物高度不受建筑物所处外在环境的影响,误差主要是由于有理函数模型本身存在的系统误差,以及在建筑物图像定位和影像匹配时产生的误差造成的,而通过地面控制点的修正能够减少该方法的误差;

(3)单幅遥感影像阴影提取建筑物高度适用于毗邻建筑物间隙大、建筑物高大、周围无遮挡的情况,而且单幅遥感影像获取成本低,计算便捷;

(4)利用立体像对提取高度的方法,在建筑物密集分布、高度均一的情况下,普适性更强,但其获取成本较高。

参考文献(References):

- [1] 安洁玉,程朋根,丁斌芬.基于Google Earth二维影像获取建筑物高度的方法[J].地理与地理信息科学,2010,26(6):31-33. [An J Y, Cheng P G, Ding B F. Method for acquiring buildings height from 2D images in Google Earth[J]. Geography and Geo-Information Science, 2010,26(6):31-33.]
- [2] 宋仁波,李文慧,王细元,等.基于双张影像的城市建筑物高度提取方法[J].测绘工程,2014,23(9):66-69. [Song R B, Li W H, Wang X Y, et al. A method of extracting urban building heights from double images[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2014,23(9):66-69.]
- [3] Marzorati S, Luzi L, Petrini V, et al. Detection of local site effects through the estimation of building damages [J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2003,23(6):497-511.
- [4] 朱洪亮,万剑华,郭际明,等.城市三维建模的数据获取[J].工程勘察,2002(3):43-46. [Zhu H L, Wan J H, Guo J M, et al. Data acquisition for 3D city model reconstruction [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2002,3:43-46.]
- [5] 曹治国,陈华. IKONOS 卫星图像的快速三维场景重建[J].计算机与数字工程,2006,11(34):9-15. [Cao Z G, Chen H. Quick 3D reconstruction of the IKONOS-satellite stereo images[J]. Computer and Digital Engineering, 2006,11(34):9-15.]
- [6] 李二森.基于遥感影像的人工地物高度信息快速提取技术研究[D].郑州:解放军信息工程大学,2008. [Li E S. A study on the fast height information extraction of the man-made feature based on the remote sensing image[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2008.]
- [7] 王继周,林宗坚,李成名,等.基于UAV遥感影像的建筑物三维重建[J].遥感信息,2004(4):11-15. [Wang J Z, Lin Z J, Li C M, et al. 3D reconstruction of buildings with single UAV image[J]. Remote Sensing Information, 2004,4:11-15.]
- [8] 陈爱军,徐光佑,史元春.基于城市航空立体像对的全自动3维建筑物建模[J].测绘学报,2002,31(1):54-59. [Chen A J, Xu G Y, Shi Y C. Automated 3D building modeling based on urban aerial stereopair[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2002,31(1):54-59.]
- [9] 邵振峰,李德仁,程起敏.基于航空立体影像对的复杂房屋三维拓扑重建[J].武汉大学学报·信息科学版,2004,29

- (11):999-1003. [Shao Z F, Li D R, Cheng Q M. 3D topological reconstruction of complicated buildings[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004,29(11):999-1003.]
- [10] 尤红建,刘彤,苏林,等.城市DSM的快速获取及其三维显示的研究[J].遥感学报,2001,5(1):8-12. [You H J, Liu T, Su L, *et al.* Fast acquiring urban DSM image and displaying 3D image[J]. Journal of Remote Sensing, 2001,5(1):8-12.]
- [11] 卓莉,黄信锐,王芳,等.基于高空间分辨率与立体像对遥感数据的建筑物三维信息提取[J].遥感技术与应用,2013,28(6):1062-1068. [Zhuo L, Huang X R, Wang F, *et al.* A 3D building reconstruction method based on stereo images and high spatial resolution images[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013,28(6):1062-1068.]
- [12] 韩艳丽,陈映鹰.单幅航空影像建筑物三维建模研究[J].山东建筑大学学报,2005,20(3):17-22. [Han Y L, Chen Y Y. An exploration of 3D reconstruction of house with single image[J]. Journal of Shandong University of Architecture and Engineering, 2005,20(3):17-22.]
- [13] 王继周,林宗坚,李成名. GIS信息辅助的单影像立体量测[J].测绘科学,2005,30(2):60-63. [Wang J Z, Lin Z J, Li C M. GIS-supported 3D information acquisition of buildings from a single image[J]. Science of Surveying and Mapping, 2005,30(2):60-63.]
- [14] 王永刚,刘慧平.利用角点最近距离统计平均法计算建筑物阴影长度[J].国土资源遥感,2008(3):32-36. [Wang Y G, Liu H P. The calculation of building shadow length using statistical average method based on corner shortest distance[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2008,3:32-36.]
- [15] 王京卫,郭秋英,郑国强.基于单张遥感影像的城市建筑物高度提取研究[J].测绘通报,2012(4):15-17. [Wang J W, Guo Q Y, Zheng G Q. Research on urban building height extraction from single satellite image[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2012,4:15-17.]
- [16] Thiel K H. Delimiting the building heights in a city from the shadow in a panchromatic SPOT-image - Part 1. Test of forty-two buildings[J]. International Journal of Remote Sensing, 1995,16(3):409-415.
- [17] 何国金,陈刚,何晓云,等.利用SPOT图像阴影提取城市建筑物高度及其分布信息[J].中国图象图形学报,2001,6A(5):425-428. [He G J, Chen G, He X Y, *et al.* Extracting buildings distribution information of different heights in a city from the shadows in a panchromatic SPOT image [J]. Journal of Image and Graphics, 2001,6A(5):425-428.]
- [18] 谢军飞,李延明.利用IKONOS卫星图像阴影提取城市建筑物高度信息[J].国土资源遥感,2004,4(4):4-6. [Xie J F, Li Y M. The extraction of building distribution information of different heights in a city from the shadows in a IKONOS image[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2004,4(4):4-6.]
- [19] 王菲,蔺启忠.利用阴影提取大范围建筑物高度的研究[C]. International Conference on Remote Sensing, 2010: 371-374. [Wang F, Lin Q Z. The study of the extraction of buildings' height on a large scale with shadows[C]. International Conference on Remote Sensing, 2010:371-374.]
- [20] 李森.基于二维直方图的图像阈值分割法研究[D].湘潭:湘潭大学,2014. [Li M. Image thresholding segmentation algorithm based on two dimensional histogram[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2014.]
- [21] 黄贝莹,左小清,唐立娜,等.基于数学形态学的IKONOS影像提取建筑物高度方法研究[J].遥感信息,2014,29(2):68-76. [Huang B Y, Zuo X Q, Tang L N, *et al.* A study of extracting building height from IKONOS remote sensing image based on mathematical morphology[J]. Remote Sensing Information, 2014,29(2):68-76.]
- [22] 王伟玺.基于广义立体像对的三维重建方法研究[D].葫芦岛:辽宁工程技术大学,2006. [Wang W X. The 3D reconstruction methods study based on generalized stereo-pair[D]. Huludao: Liaoning Technical University,2006.]