

基于高分辨率影像的城市三维建模

史文中¹ 曹辉^{1,2} 张剑清²

(1 香港理工大学土地测量与地理资讯学系, 香港九龙红磡)
(2 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘要:介绍了利用倾斜摄影影像和垂直摄影影像相结合的三维城市重建方法,分析了利用有理多项式(RPC)恢复 IKONOS 立体影像的模型,在 VirtuZo 上实现了基于有理多项式(RPC)恢复 IKONOS 立体影像的模型方法,并利用其快速影像匹配技术,实现了数字地面模型 DEM 和正射影像,实现了手动和半自动人工地物的采集,如房屋等三维几何坐标和结构的采集;自动获取了基于不同传感器所获得影像的建筑物表面纹理,从而实现了基于多种影像快速三维城市建模。

关键词: GIS; 高分辨率影像; 有理多项式(RPC)

中图法分类号: TP751; P208; P236

三维可视化是城市基础建设、规划、环境保护、交通和通讯等方面的一个重要环节,是当今“数字城市”(digital city)的一个重要表现手段。三维可视化包括虚拟现实和真实再现两方面,而三维数码城市就是综合运用 GIS、遥感与摄影测量、网络、多媒体和虚拟仿真等高新技术手段^[1],对城市的基础设施、功能机制等基础数据进行自动采集、动态监测管理和辅助决策支持的技术服务系统。三维数字景观模型能更好地表达数字城市的三维信息,在城市规划、设施管理、电信与旅游等不同领域的具体应用中,能更多地顾及三维信息。因此,研究快速建立三维城市模型是构建数字城市的一个重要方面,而当今先进的遥感技术和数字摄影测量技术是三维城市景观模型重建的一个重要手段。特别是多种获取高分辨影像卫星的发射成功,给三维城市景观模型重建提供了一种新的建模手段,其过程参见文献[2]。

1 倾斜和竖直航空影像相结合的城市三维建模

1.1 基于立体影像对的几何重建

传统的航空摄影测量通常是对测区进行正直摄影,并保证航带之间有 15%~30% 的区域重

叠,航带内相邻像片之间有 60% 的重叠,以实现立体测图,提取各类地物的三维几何信息,此方法是进行城市三维重建的重要手段。具体在当今的数字摄影测量工作站上实现城市三维重建有以下内容:①全数字航空摄影测量空中三角测量,以确定每张航空影像的外方位元素;②利用全数字化摄影测量工作站(DPW)高精度、快速影像匹配技术,生成数字地面模型(DEM);③基于 DEM 对原始影像进行微分纠正,生成数字正射影像,以恢复地面纹理;④半自动化和人工的城市人工地物三维信息采集,如房屋的高度等。

1.2 基于倾斜摄影的航空影像和已知方位元素的表面纹理的自动提取

1) 倾斜像片外方位元素的获取。对倾斜像片的外方位元素是利用地面控制点和共线方程,通过对共线方程进行线性化,遵循最小二乘平差的原则,迭代求解得到。对于量测像机可用严格公式,而对于非量测像机则可以用直接线性变换进行求解。

2) 根据 DEM 和房屋的边缘数据,包括其地面 Z 坐标值,可以很容易地获取每个建筑物的高程和建筑物每个墙面角点的地面坐标,这样就形成了如图 1 所示的三维数据模型。进一步,根据摄影测量中的共线方程式以及像片的方位元素,

可以获得每个建筑物的顶面和墙面的角点在原始影像中的影像坐标。由形成墙面的各点在影像中的坐标,可以获得这个墙面的影像块数据,经重采样后覆盖到三维模型中它所对应的墙面上。

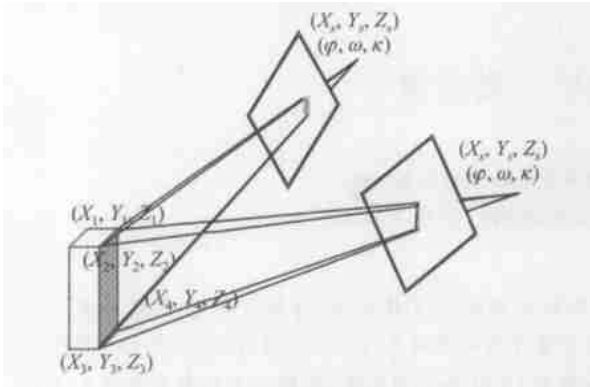


图1 倾斜像片的构像原理

Fig. 1 Principle of Oblique Photography

3) 应当注意的是,房屋的一些墙面在竖直或倾斜的影像中是不可见的,利用多张倾斜摄影的航空影像,能较好地解决这个问题,对于完全被遮挡的墙面,可以简单地将可见墙面的影像纹理数据拷贝到不可见的墙面上,房屋顶面所对应的影像数据同样可以获得。这样,以DEM和各建筑物的矢量坐标数据构成城区的三维数据模型,并将正射影像和各建筑物所对应的影像纹理数据渲染到三维数据模型上,就形成了城区的真实三维景观图^[3]。多张倾斜摄影的航空影像生成的真实三维景观图如图2所示。

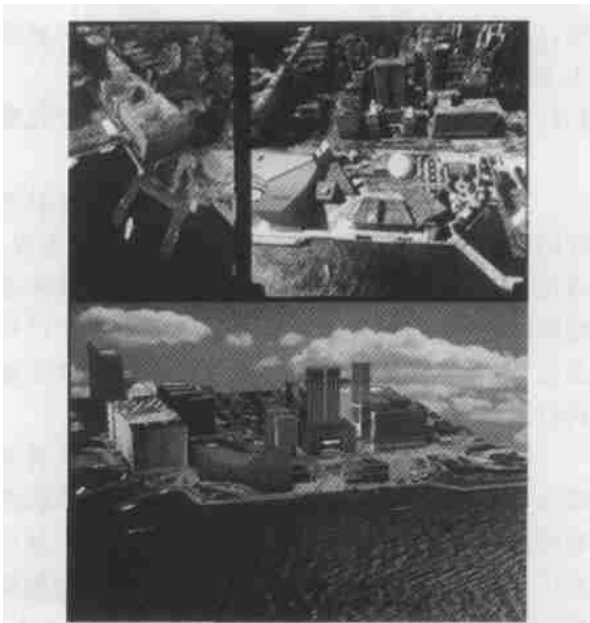


图2 利用多张倾斜摄影的航空影像生成的香港尖沙嘴三维景观

Fig. 2 Landscape from Multi-image

2 基于高分辨率卫星 IKONOS 立体影像对的城市三维恢复

自从 IKONOS 卫星于 1999 年 9 月 28 日成功发射上天后,它可获取 1m 分辨率黑白全色影像和 4m 分辨率的多光谱彩色影像,可用于民用的各种相关需求。其中一个非常重要的应用是代替航空摄影测量进行中、小比例尺测图与空间几何信息提取,而 IKONOS 像对的三维立体重建,则是其用于中、小比例尺测图与空间几何信息提取的关键。

Space Imaging 提供 IKONOS 立体影像对的同时也提供了一组多项式改正参数,可以实现从物方坐标(平面 WGS84, 高程 NAD83)到影像坐标的解算。利用这组多项式改正参数,就可以在如今的数字摄影测量工作站中实现 IKONOS 立体影像对三维几何信息的采集,其关键是推导出影像坐标到物方坐标的交会算法。

2.1 有理多项式系数 RPC^[3]

由于高分辨的卫星影像获取过程非常复杂,不能简单地利用中心投影过程来描述,有理多项式模型就是其中的一种,而其系数为有理多项式系数(rational polynomial coefficient, RPC),或称为快速定位系数(rapid positioning capability)。通常是在影像获取后,根据数字地面模型和卫星的相关参数,结合有理多项式进行最小二乘平差计算得到,因此,每一个 IKONOS 影像都有一组 RPC 参数。

有理多项式影像模型用两组不同的多项式函数分别计算从地面坐标(经度,纬度,高程)到影像的行列坐标,具体的数学表达式如下:

$$\text{Row}_n = \frac{P_1(X_n, Y_n, Z_n)}{Q_1(X_n, Y_n, Z_n)}, \text{Col}_n = \frac{P_2(X_n, Y_n, Z_n)}{Q_2(X_n, Y_n, Z_n)}$$

式中, Row_n 、 Col_n 为影像坐标; X_n 、 Y_n 、 Z_n 为地面坐标;

$$P(X_n, Y_n, Z_n) = \sum_{i=1}^{20} C_i \cdot P_i(X_n, Y_n, Z_n) = C_1 + C_2X_n + C_3Y_n + C_4Z_n + C_5X_nY_n + C_6X_nZ_n + C_7Y_nZ_n + C_8X_n^2 + C_9Y_n^2 + C_{10}Z_n^2 + C_{11}X_nY_nZ_n + C_{12}X_n^3 + C_{13}X_nY_n^2 + C_{14}X_nZ_n^2 + C_{15}X_n^2Y_n + C_{16}Y_n^3 + C_{17}Y_nZ_n^2 + C_{18}X_n^2Z_n + C_{19}Y_n^2Z_n + C_{20}Z_n^3$$

$$Q(X_n, Y_n, Z_n) = \sum_{i=1}^{20} C'_i \cdot Q_i(X_n, Y_n, Z_n) = C'_1 + C'_2X_n + C'_3Y_n + C'_4Z_n + C'_5X_nY_n + C'_6X_nZ_n + C'_7Y_nZ_n + C'_8X_n^2 + C'_9Y_n^2 + C'_{10}Z_n^2 + C'_{11}X_nY_nZ_n + C'_{12}X_n^3 + C'_{13}X_nY_n^2$$

$$+ C'_{14}X_n Z_n^2 + C'_{15}X_n^2 Y_n + C'_{16}Y_n^3 + C'_{17}Y_n Z_n^2 + C'_{18}X_n^2 Z_n + C'_{19}Y_n^2 Z_n + C'_{20}Z_n^3$$

因此, 利用已有的数字地面模型和相关参数, 则可根据最小二乘平差原理和有理多项式解求三次多项式的系数 $C_i (i = 1, 2, \dots, 20)$ 、 $C'_i (i = 1, 2, \dots, 20)$ 。以下是 Spacing Imaging 公司提供的 IKONOS 影像的 RPC 参数:

LINE-OFF	影像坐标的行偏移
SAMP-OFF	影像坐标的列偏移
LAT-OFF	纬度偏移
LONG-OFF	经度偏移
HEIGHT-OFF	高程偏移
LINE-SCALE	影像坐标的行缩放比例
SAMP-SCALE	影像坐标的列缩放比例
LAT-SCALE	纬度缩放比例
LONG-SCALE	经度缩放比例
HEIGHT-SCALE	高程缩放比例
LINE-NUM-COEFF-1 to 20	行变换的第一组参数 $C_i (i = 1, 2, \dots, 20)$
LINE-DEN-COEFF-1 to 20	行变换的第二组参数 $C'_i (i = 1, 2, \dots, 20)$
SAMP-NUM-COEFF-1 to 20	列变换的第一组参数 $C_i (i = 1, 2, \dots, 20)$
SAMP-DEN-COEFF-1 to 20	列变换的第二组参数 $C'_i (i = 1, 2, \dots, 20)$

2.2 从物方坐标到像方的数学解算模型

假设物方点在 WGS84 和 NAD83 坐标系的经纬度及高程(Latitude, Longitude, Height)已知, 首先利用下式进行规格化, 得到规格化坐标 (P, L, H) :

$$P = \frac{\text{Latitude} - \text{LAT-OFF}}{\text{LAT-SCALE}}$$

$$L = \frac{\text{Longitude} - \text{LONG-OFF}}{\text{LONG-SCALE}}$$

$$H = \frac{\text{Height} - \text{HEIGHT-OFF}}{\text{HEIGHT-SCALE}}$$

由规格化坐标 (P, L, H) , 并按有理多项式和 Space Imaging 提供的 RPC 参数, 可计算出比例化的坐标 (X, Y) :

$$X = \frac{\sum_{i=1}^{20} \text{SAMP-NUM-COEFF}_i \cdot \rho_i(P, L, H)}{\sum_{i=1}^{20} \text{SAMP-DEN-COEFF}_i \cdot \rho_i(P, L, H)}$$

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^{20} \text{LINE-NUM-COEFF}_i \cdot \rho_i(P, L, H)}{\sum_{i=1}^{20} \text{LINE-DEN-COEFF}_i \cdot \rho_i(P, L, H)}$$

式中, SAMP-NUM-COEFF_i 、 SAMP-DEN-COEFF_i 、 LINE-NUM-COEFF_i 、 $\text{LINE-DEN-COEFF}_i (i = 1, 2, \dots, 20)$ 分

别为三次有理多项式的系数, 用 a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i 表示。以下是 c_i 表达的三次有理多项式:

$$\sum_{i=1}^{20} c_i \cdot \rho_i(P, L, H) = c_1 + c_2 \cdot L + c_3 \cdot P + c_4 \cdot H + c_5 \cdot L \cdot P + c_6 \cdot L \cdot H + c_7 \cdot P \cdot H + c_8 \cdot L^2 + c_9 \cdot P^2 + c_{10} \cdot H^2 + c_{11} \cdot P \cdot L \cdot H + c_{12} \cdot L^3 + c_{13} \cdot L \cdot P^2 + c_{14} \cdot L \cdot H^2 + c_{15} \cdot L^2 \cdot P + c_{16} \cdot P^3 + c_{17} \cdot P \cdot H^2 + c_{18} \cdot L^2 \cdot H + c_{19} \cdot P^2 \cdot H + c_{20} \cdot H^3$$

最后, 可以根据求得的 (X, Y) 和下式得到影像坐标系中的坐标 (Row, Column):

$$\text{Column} = X \cdot \text{SAMP-SCALE} + \text{SAMP-OFF}$$

$$\text{Row} = Y \cdot \text{LINE-SCALE} + \text{LINE-OFF}$$

式中, Row 为影像中的行, 以像素为单位, 并以第一行的中心为零值; Column 为影像中的列, 以像素为单位, 并以最左边的像素中心为零值。

2.3 IKONOS 立体像对的前方交会迭代解法

根据以上有理多项式解算模型, a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i 表示三次有理多项式系数 (即 Space Imaging SAMP-NUM-COEFF_i 、 SAMP-NUM-COEFF_i 、 LINE-NUM-COEFF_i 、 $\text{LINE-DEN-COEFF}_i (i = 1, 2, \dots, 20)$ 提供的), 则地理坐标 (P, L, H) 与影像坐标 (x, y) 的关系如下:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^{20} a_i \cdot \rho_i(P, L, H)}{\sum_{i=1}^{20} b_i \cdot \rho_i(P, L, H)}, y = \frac{\sum_{i=1}^{20} c_i \cdot \rho_i(P, L, H)}{\sum_{i=1}^{20} d_i \cdot \rho_i(P, L, H)}$$

根据上式分别乘 $\sum_{i=1}^{20} b_i \cdot \rho_i(P, L, H)$ 和 $\sum_{i=1}^{20} d_i \cdot \rho_i(P, L, H)$, 整理后, 并根据左右同名像点 (x, y) 与 (x', y') 可列出下列 4 个方程, 并分别以 F_x 、 F_y 、 $F_{x'}$ 、 $F_{y'}$ 表示:

$$F_x = \sum_{i=1}^{20} a_i \rho_i(P, L, H) - x \sum_{i=1}^{20} b_i \rho_i(P, L, H) = 0$$

$$F_y = \sum_{i=1}^{20} c_i \rho_i(P, L, H) - y \sum_{i=1}^{20} d_i \rho_i(P, L, H) = 0$$

$$F_{x'} = \sum_{i=1}^{20} a'_i \rho_i(P, L, H) - x' \sum_{i=1}^{20} b'_i \rho_i(P, L, H) = 0$$

$$F_{y'} = \sum_{i=1}^{20} c'_i \rho_i(P, L, H) - y' \sum_{i=1}^{20} d'_i \rho_i(P, L, H) = 0$$

将以上方程线性化得到 4 个线性方程:

$$\frac{\partial F_x}{\partial P} \Delta P + \frac{\partial F_x}{\partial L} \Delta L + \frac{\partial F_x}{\partial H} \Delta H + F_x(P_0, L_0, H_0) = 0$$

$$\frac{\partial F_y}{\partial P} \Delta P + \frac{\partial F_y}{\partial L} \Delta L + \frac{\partial F_y}{\partial H} \Delta H + F_y(P_0, L_0, H_0) = 0$$

$$\frac{\partial F_{x'}}{\partial P} \Delta P + \frac{\partial F_{x'}}{\partial L} \Delta L + \frac{\partial F_{x'}}{\partial H} \Delta H + F_{x'}(P_0, L_0, H_0) = 0$$

$$\frac{\partial F_y'}{\partial P} \Delta P + \frac{\partial F_y'}{\partial L} \Delta L + \frac{\partial F_y'}{\partial H} \Delta H + F_y'(P_0 L_0 H_0) = 0$$

法化、迭代求解:

$$P_{k+1} = P_k + \Delta P_k$$

$$L_{k+1} = L_k + \Delta L_k$$

$$H_{k+1} = H_k + \Delta H_k \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

每次以 $P_{k+1}, L_{k+1}, H_{k+1}$ 代替 P_0, L_0, H_0 进行下一次计算。解算出 P, L, H 后, 再将其转换成大地坐标。

2.4 IKONOS 立体像对处理的具体实现

将 IKONOS 立体像对的前方交会方法与数字摄影测量系统 VirtuoZo^{1.4} 的影像匹配方法及相关处理功能相结合, 构成一个 IKONOS 高分解率遥感影像对的三维立体重建处理系统, 具体有以下几个关键步骤。

1) 由 IKONOS 立体影像对经相对定向后进行核线影像重采样, 生成核线影像对;

2) 引入多项式参数, 并根据三次有理多项式实现从物方坐标(平面 WGS84, 高程 NAD83)到影像坐标解算;

3) 同时利用最小二乘平差原理建立误差方程式, 经线性化迭代求解, 可由任意同名点的一对影像坐标, 计算其对应的地面坐标;

4) 利用控制点进行空间变换, 将物方空间坐标规划到国家地面坐标系;

5) 基于核线影像的影像匹配;

6) DEM 快速生成;

7) 根据有理多项式(RPC)参数生成正射影像;

8) 半自动和人工相结合的人工地物采集。

通过对实际影像进行了 IKONOS 高分解率遥感影像对的三维立体重建的试验, 验证了 IKONOS 立体像对的前方交会方法与公式的正确性。

3 试验与结论

1) 多张倾斜摄影的航空影像可以自动提取建筑物表面纹理, 从而避免大量的实地考察工作量, 降低工作强度, 提高作业效率, 更重要的是实现了三维重建的真实纹理。

2) 基于有理多项式模型方法建立的 IKONOS 高分解率遥感影像对的三维立体重建处理系统, 可完成从 IKONOS 立体像提取空间几何信息的所有工作。但由于确定有理多项式参数是由 Space Imaging 根据卫星的轨道参数和数字表面模型确定的, 因此, 其绝对定位精度并不能达到中小比例尺的相关要求。表 1 是基于有理多项式模型

IKONOS 立体像对中相应地面点上的残余误差。对于三维城市建模是一种新的解决方法, 图 3 就是利用 IKONOS 立体像对实现的三维城市建模。

表 1 检查点误差

Tab. 1 Errors of Check Points

检查点号	V_x	V_y	V_z
SD-GCP7:	+5.3	+3.8	+1.1
SD-GCP10	+5.8	+3.9	+2.1
SD-GCP14:	+2.6	+6.7	-6.4
SD-GCP57	+0.3	+6.4	-7.0
SD-GCP67:	+2.4	+5.9	-8.1
SD-GCP90	+7.1	+3.3	+3.1
SD-GCP110	+6.2	+2.0	+0.8
SD-GCP137:	+2.5	+4.1	+5.9
SD-GCP142:	+3.0	+4.5	+5.6

3) 从表 1 的结果来看, 在没有地面控制点的情况下, 简单地利用有理多项式参数来完成立体 IKONOS 影像对的三维空间解算, 并不能达到很高的精度。这其中的主要原因是有理多项式参数精度较低, 因此, 利用适当的地面控制点来校正利用有理多项式参数的解算结果, 可以有效地提高立体 IKONOS 影像对的几何定位精度, 而三维仿射变换就是一种提高定位精度的有效解决方法, 其精度可以达到 1m 以内^[3]。

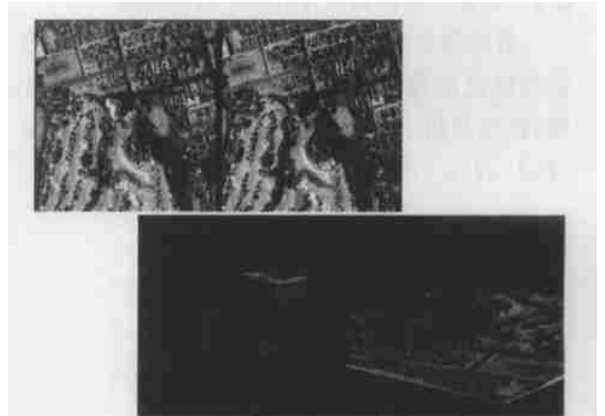


图 3 IKONOS 立体影像对及城市三维重建模型

Fig. 3 Sample of 3D Building Modeling

from IKONOS Stereo Pair

参 考 文 献

- 1 朱 庆, 李德仁, 龚健雅, 等. 数码城市 GIS 的设计与实现. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(1): 8~11
- 2 Fraser C, Baltasavias E P, Gruen A. Ikonos Geo stereo Images: Geometric Potential and Suitability for 3D Building Reconstruction. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation, Geodaten Schaffen Verbindungen, 2001
- 3 张祖勋, 张剑清, 张 力. 一种利用影像匹配的城区三维景观图生成途径. 武汉测绘科技大学学报, 1999, 24

(4): 283~289

- 4 Gruen A. Automation in Building Reconstruction. Photogrammetric Week '97, Stuttgart, 1997
- 5 Baltasvias E P, Pateraki M, Zhang L. Radiometric and Geometric Evaluation of Ikonos Geomages and Their Use for 3D Building Modelling. In: Zhang J Q, Zhang Z X, eds. VirtuoZo NT Digital Photogrammetry System Based on Personal Computer. Spatial Information Science, Technology and Its Applications-RS, GPS, GIS, Their Integration and Applica-

tion. Wuhan: Publishing House of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1998. 168~174

第一作者简介: 史文中, 博士, 博士生导师, 副教授。研究领域包括地理信息系统 GIS, 遥感和虚拟现实, 空间数据质量分析, GIS 中三维和动态数据建模, GIS 软件的设计和开发, GIS 与遥感的集成技术, 以及基于遥感影像的特征提取等。

E-mail: lswzshi@polyu.edu.hk

3D Urban Building Modeling Based on High Resolution Satellite Images

SHI Wenzhong¹ CAO Hui^{1,2} ZHANG Jianqing²

(1 Department of Land Surveying and Geo-Infomatics, The Hong Kong Polytechnic University, Kowloon, HongKong)

(2 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University,
129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: There are two main aspects in 3D city reconstruction: 3D geometric information collection and surface texture restoration. The new methods for reconstructing the 3D city with both the oblique and perpendicular photographic images are presented. The mathematical model for restoring IKONOS stereo images by rational polynomial coefficients (RPC) is analyzed and performed in VirtuoZo digital photogrammetric workstation. Using its rapid image matching technique, this paper realizes the generation of digital elevation model (DEM) and orthoimage and the ground feature collection either manually or semi-automatically.

Key words: GIS; high resolution satellite images; RPC

About the first author: SHI Wenzhong, Ph. D. Ph. D supervisor associate professor. His research interest includes GIS remote sensing and virtual reality, spatial data quality, three dimensional and dynamic data modeling in GIS.

E-mail: lswzshi@polyu.edu.hk

(责任编辑: 晓晨)

欢迎订阅《武汉大学学报·信息科学版》

《武汉大学学报·信息科学版》即原《武汉测绘科技大学学报》,是以测绘学为主的专业学术期刊。其办刊宗旨是:立足测绘科学前沿,面向国际测量界,通过发表具有创新性和重大研究价值的测绘理论成果,展示中国测绘研究的最高水平,引导测绘学术研究的方向。本刊为中国核心期刊,国家优秀科技期刊,并入选中国期刊方阵。

本刊主要栏目有院士论坛、学术论文、科技信息等,内容涉及摄影测量与遥感、大地测量与物理大地测量、工程测量、地图学、图形图像学、地球动力学、地理信息系统、全球定位系统等。收录本刊论文的著名国际检索系统包括 EI、SCI、PK、CSA 等,其影响因子名列中国高校学报前列。

本刊国内外公开发行,读者对象为测绘及相关专业的高级研究人员。本刊为月刊, A4 开本, 96 面, 每月 5 日出版, 每册定价 8.0 元。本刊邮发代号: 38-317, 欢迎广大读者到邮局订阅。漏订者可与本刊编辑部联系补订, 邮购价加 25%。