引文格式：代青沁. 高程数据与遥感影像融合下精细地形起伏图 GMT 绘制[J]. 地理空间信息, 2025, 23(3): 118-120. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.03.027

高程数据与遥感影像融合下精细地形起伏图 GMT 绘制

代青沁[1]
（1. 大连地震监测中心站，辽宁 大连 116001）

摘　要：研究了高程数据与遥感影像融合下的交互式精细地形起伏图 GMT 绘制方法。首先采集并提取目标地形高程数据和遥感影像数据特征；再利用基于立体像对和激光点云的联合同名点搜索方法融合高程数据与遥感影像，得到地形三维彩色图像；最后将图像输入 GMT 软件，通过 Surface、PSXY 等命令对图像进行网格化处理、生成与调试 CPT 文件和梯度信息以及绘制点状图、直线等值线等操作，绘制交互式精细地形起伏图。结果表明，该方法可有效提取高程数据特征，较好地实现高程数据与遥感影像的融合，还可有效生成交互式精细地形起伏图的三维图和平面图，应用效果较显著。

关键词：高程数据；遥感影像；交互式；精细地形；起伏图；GMT 绘制
中图分类号：P283　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）03-0118-03

GMT Drawing of Fine Terrain Fluctuation Map Based on the Fusion of Elevation Data and Remote Sensing Images

DAI Qingqin[1]
(1. Dalian Earthquake Monitoring Center Station, Dalian 116001, China)

Abstract: We studied a GMT drawing method of interactive fine terrain fluctuation map based on the fusion of elevation data and remote sensing images. We collected target terrain elevation data and remote sensing image data, and extracted the features of elevation data and remote sensing image data at first. Then, we used a joint homonymous point search method based on stereo images and laser point cloud to fuse elevation data and remote sensing image, and obtained the 3D color images of terrain. Finally, we input the image into GMT software, and used Surface, PSXY and other commands to grid the image, generate and debug CPT files, gradient information, and draw point plots and linear contouring lines, to achieve interactive fine terrain fluctuation map drawing. The results show that this method can effectively extract the features of elevation data, effectively achieve the fusion of elevation data and remote sensing images, effectively generate 3D and planar interactive fine terrain fluctuation maps, and the application effect is significant.

Key words: elevation data, remote sensing image, interactive, fine terrain, fluctuation map, GMT drawing

地形起伏图是描述地球表面地形特征的重要工具，在地质调查、土地利用规划、环境保护等领域具有广泛的应用价值。随着科技的发展，获取地形数据的方法和手段不断进步，如肖友刚等[1]根据地形起伏数据动态调整飞行航线和高度，以确保SAR数据采集时，每个地面点都能以近似相同的视角被观测，提高了数据质量和测绘效率，适用范围较广，但实施难度和对硬件设备的要求较高；张书航等[2]结合重力梯度测量和无人机技术，利用无人机搭载的精密重力梯度测量设备对目标区域进行快速、高精度的地形测量，提高了测量效率，实现了快速响应和实时监测，但易受天气条件影响。高程数据与遥感影像是制作精细地形起伏图的关键数据源，将二者进行融合可提高地形起伏图的精度和可靠性[3]；但绘制这样的地形起伏图需要交互式的方法和技术，以便更好地处理复杂的地形变化。GMT软件可制作各种类型的地图，包括地形起伏图。通过GMT等绘图工具进行交互式绘制，用户可以更直观地观察地形数据的变化和分布情况[4]。本文提出了一种融合高程数据与遥感影像的交互式精细地形起伏图GMT绘制方法。

1　交互式精细地形起伏图GMT绘制方法

1.1　高程数据与遥感影像的融合方法

融合高程数据与遥感影像，首先需要提取目标地形高程数据的特征[5]，再采用最邻近算法将提取的特征内插为256级灰度图。对高程点云数据进行滤波处理，利用归一化高度算法差异模型获得地物点绝对高度信息（nDSM[6]）；再利用TIN滤波算法分离地面点和

项目来源：辽宁省青年基金资助项目（LZ201903）。
作者简介：代青沁（1993—），硕士，工程师，研究方向为地球物理，E-mail：onitorinion@163.com。

非地面点，建立数字高程模型的TIN模型；最后根据非地面点的平面坐标，采用最邻近算法内插得到TIN模型的高程 Z'，据此得到非地面点的归一化高度值，即高程数据特征。通过灰度共生矩阵算法获得描述目标地形遥感影像纹理特征的变异系数、角二阶矩、信息熵和同质性，得到遥感影像的纹理特征。根据高程数据和遥感影像特征，利用基于立体像对与激光点云的联合同名点搜索方法融合高程数据与遥感影像。

根据高程数据分布状态建立三角网，通过光线和与其相交的三角形交点可得到光线和地面的交点[7]，利用快速求交算法可得到遥感影像空间光线和点云地面的交点。其计算公式为：

$$R(t)=O+t\times D \tag{1}$$

式中，O 为高程数据三角网的起点；t 为光线交点；D 为遥感影像光线方向。

令 A_0、A_1、A_2 为三角形的3个顶点，则在该三角平面上的点可表示为：

$$T(u,v)=A_0-u\times A_0-v\times A_0+u\times A_1+v\times A_2 \tag{2}$$

令 $G_1=A_1-A_0$、$G_2=A_2-A_0$、$T=O-A_0$，联立上述方程，则有：

$$\begin{bmatrix}t\\u\\v\end{bmatrix}=1/\left[(D\times G_2)\times G_1\right]-\begin{bmatrix}(T\times G_1)\times G_2\\(D\times G_2)\times T\\(T\times G_1)\times D\end{bmatrix} \tag{3}$$

u、v 均大于等于0且二者之和小于等于1时，说明 $T(u,v)$ 位于三角形平面内。通过式（3）计算得到 t，根据上述条件判断光线和三角形的相交状态，最小 t 值对应的三角形即为与光线相交的第一个三角形[8]，该交点即为式（2）结果；再计算该特征点对应的地面坐标 $[X,Y,Z]$。在光线方向上[9-10]遥感影像特征点对应的高程数据空间辅助坐标系转换公式为：

$$\begin{bmatrix}X\\Y\\Z\end{bmatrix}=\boldsymbol{\Omega}\begin{bmatrix}x-x_0\\y-y_0\\-f\end{bmatrix} \tag{4}$$

式中，x_0、y_0 为遥感影像特征点初始内方位元素；$\boldsymbol{\Omega}$ 为旋转矩阵；x、y 为高程数据与遥感影像特征点的相交点坐标。

通过共线方程计算第二幅遥感影像的像点[11]，在以该像点为中线的40×40区域内检索同名点。同名点坐标的计算公式为：

$$x-x_0=-f\times\frac{(\eta_1X-\eta_1X_S)+(\delta_1Y-\delta_1Y_S)+(\zeta_1Z-\zeta_1Z_S)}{(\eta_3X-\eta_3X_S)+(\delta_3Y-\delta_3Y_S)+(\zeta_3Z-\zeta_3Z_S)} \tag{5}$$

$$y-y_0=-f\times\frac{(\eta_2X-\eta_2X_S)+(\delta_2Y-\delta_2Y_S)+(\zeta_2Z-\zeta_2Z_S)}{(\eta_3X-\eta_3X_S)+(\delta_3Y-\delta_3Y_S)+(\zeta_3Z-\zeta_3Z_S)} \tag{6}$$

式中，η_1~η_3、δ_1~δ_3、ζ_1~ζ_3 分别为3个坐标方向的旋转矩阵元素。

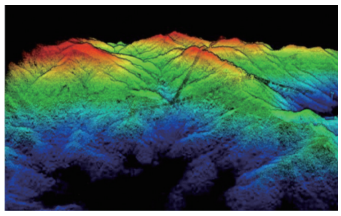
根据同名点坐标即可融合高程数据与遥感影像数据[12-13]，得到三维彩色影像。为得到准确的融合结果，需对地面点的角元素和外方位元素进行修正。修正时可将实际测量得到的高程数据与遥感影像的同名点作为一组数据，利用最小二乘法对其进行分析。

1.2　GMT绘制方法

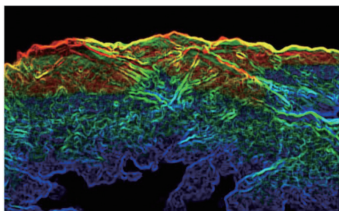
将三维彩色影像导入GMT软件，具体绘制过程为：①GMT软件通过Surface命令对三维彩色影像进行网格化处理[14]，将dat%设置为网格数据，–G设置为grd，–R设置为网格经纬度范围，–I指定为 X、Y 方向增量；②通过grd2cpt命令制作交互式精细地形起伏图颜色表文件，将–C设置为CPT文件类型，–S设置为颜色极值间隔，–Z设置为产生连续颜色的CPT文件；③在GMT软件内启动Grdgradient命令，可得到一个梯度方向上的导数，将其格式设置为tmp.grd，导数方向设置为270°，并导出文件存储，得到交互式精细地形起伏图梯度信息网格文件；④分别绘制交互式精细地形起伏图的点状图、线状图、等值线、面状图。在GMT软件内启动PSXY命令绘制点状图，该结构内files为数据文件；绘制交互式精细地形起伏图直线时，使用的命令同上但结构不同[15]，绘制水准路线图时，其数据格式变更为大地经度、纬度、线路号，每个数据线直接以“>n”分隔；通过Grdcontour命令绘制等值线，将–C、–A、–G和–T分别设置为等值线间距、标注线间距、标注字大小、标注间隔以及地形坡线间隔和长度；通过Grdview和Grdimage等命令绘制面状图，命令结构需根据交互式精细地形起伏图的实际需求设置，如网格平均高度、地形修正数值等，使生成的交互式精细地形起伏图精度满足±0.05 m要求。

2　实验分析

以某省西部区域为实验区，区域内包括丘陵、山脉、部分丹霞地貌和平原，地形类型复杂。遥感影像利用无人机搭载遥感摄像头采集，高程数据来源于Velodyne VLP–16三维激光雷达。提取高程数据和遥感影像的特征是融合的基础，利用本文方法提取某组高程数据特征，以验证特征提取能力。测试结果见图1，可以看出，本文方法能够清晰提取高程点云数据的轮廓特征，且特征轮廓与原始高程点云完全吻合，说明本文方法可精确捕捉地形表面的细节和形状，具有强大的高程数据特征提取能力。



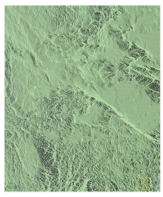
a 原始高程数据点云



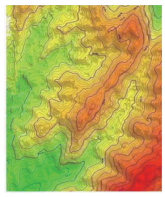
b 特征提取结果

图1 高程数据特征提取结果

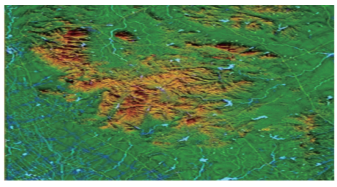
为验证本文方法对高程数据与遥感影像的融合能力，以一组高程数据和一幅遥感影像为实验对象，融合处理后的地形三维彩色图像见图2，可以看出，本文方法可有效融合高程数据和遥感影像，未出现数据不匹配或信息冲突的情况，表明本文方法在处理这两种数据源之间的差异方面具有显著优势；此外生成的地形三维彩色图像清晰地呈现了山峰、山谷等地形要素，充分说明本文方法能准确提取地形特征并实现高程数据和遥感影像的精确融合。



a 遥感影像



b 高程数据



c 融合结果

图2 高程数据与遥感影像融合

以某区域为实验对象，利用本文方法绘制其等值线图，分析本文方法绘制交互式精细地形起伏图的能力，结果见图3，可以看出，本文方法生成的精细地形起伏图等值线平滑且连续，表明本文方法在处理地形数据时具有优秀的插值和曲面拟合能力，能清晰描绘地形的起伏和走势，使用户直观地了解地形特征，具备与用户良好的交互能力。

利用本文方法生成的交互式精细地形起伏图见图4，图中可以清晰地看出山峦的走势和河谷的分布状态，且从图像边缘可看出该区域的地形起伏状态；

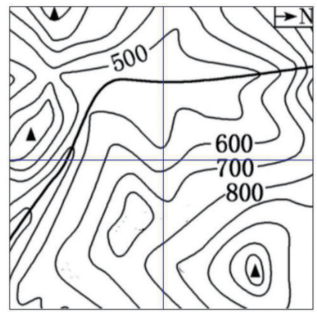
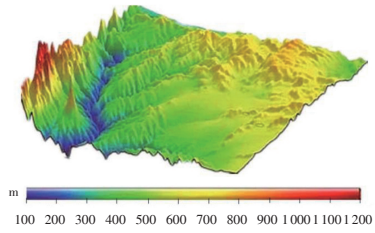
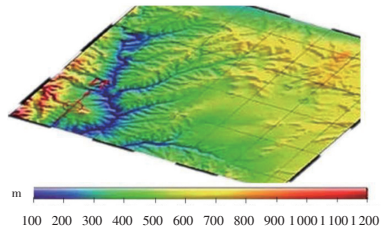


图3 交互式精细地形起伏图等值线绘制结果

此外，通过颜色区分地形起伏状态，使得平面地形起伏图与三维地形起伏图的地形走势相同，进一步证实了本文方法在生成交互式精细地形起伏图方面的优势。



a 三维地形起伏图



b 平面地形起伏图

图4 交互式精细地形起伏图绘制结果

为进一步验证本文方法绘制交互式精细地形起伏图的能力，在实验区设置10个标点，以 X 方向为例，对比10个标点与实际标点的坐标差值，结果见表1，可以看出，通过本文方法绘制的交互式精细地形起伏图中标点 X 方向坐标与实际标点坐标数值非常接近，最小差值为0 m，最大差值绝对值为0.04 m，满足绘制精度要求。

表1 交互式精细地形起伏图精度检验/m

标点编码	起伏图标	实际标点	差值
H–1	17.28	17.24	0.04
H–2	26.54	26.55	–0.01
H–3	10.48	10.47	0.01
H–4	9.55	9.55	0
H–5	24.77	24.79	–0.02
H–6	8.21	8.24	–0.03
H–7	16.60	16.59	0.01
H–8	21.06	21.04	0.02
H–9	33.21	33.19	0.02
H–10	14.96	14.96	0

（下转第133页）