

无人机 DEM 测点插值算法的矿区沉陷测绘技术

朱涛

(河南省地质局矿产资源勘查中心, 郑州 454000)

摘要: 为实现对矿区沉陷深度的精准测量, 完善测绘技术的具体实施方案, 针对无人机 DEM 测点插值算法的矿区沉陷测绘技术展开研究; 根据 DEM 测点获取结果, 实施分维值测定处理, 再以此为基础, 确定插值拐点所处区域, 实现对无人机 DEM 测点插值算法应用流程的完善; 联合像控点布设原则, 定义空中三角区域, 并通过推导径向插值基函数的方式, 建立矿区沉陷区域的地理模型; 在空间坐标系转换条件的基础上, 确定矢量数据叠加的处理结果, 再结合像片倾角与旋偏角的实际取值, 求解测量精度评价指标, 完成无人机 DEM 测点插值算法的矿区沉陷测绘技术实施方法的设计; 实验结果表明, 上述测绘技术方法作用下, 沉陷深度测量结果与矿区真实沉陷深度之间的差值不超过 1 m, 符合精准测量的应用需求, 对于测绘实施方案的完善可以起到一定的促进性影响作用。

关键词: 无人机; DEM 测点; 插值算法; 矿区沉陷测绘; 插值拐点; 空中三角; 径向插值基函数; 空间坐标系

Mining Subsidence Mapping Technology Based on UAV DEM Survey Point Interpolation Algorithm

ZHU Tao

(Mineral Resources Exploration Center of Henan Geological Bureau, Zhengzhou 454000, China)

Abstract: In order to realize the accurate measurement of mining subsidence depth and improve the specific implementation plan of surveying and mapping technologies, a mining subsidence surveying and mapping technology based on the unmanned aerial vehicle (UAV) digital elevation model (DEM) survey point interpolation algorithm is studied. According to the results of the DEM measurement points, the fractal dimension value is measured and processed, and on this basis, it determines the region where the interpolation inflection point is located, so as to improve the application process of the UAV DEM measurement point interpolation algorithm. The principle of the photo control point layout is combined to define the air triangle area, and the geographic model of mining subsidence area is established by deriving the radial interpolation basis function. On the basis of the transformation condition of the spatial coordinate system, the processing results of the vector data superposition are determined, and then combined with the actual value between the dip angle and the rotation angle of the photograph, the measurement accuracy of evaluation index is solved, and it completes the implementation method of the mining subsidence surveying and mapping technology for the UAV DEM measurement point interpolation algorithm. The experimental results show that under the above surveying and mapping technology, the difference between the measurement result and the actual settlement depth of the mining area is not more than 1 m, which meets the application requirements of precise measurement, and it can play a certain role in promoting the surveying and mapping implementation scheme.

Keywords: UAV; DEM measuring point; interpolation algorithm; mining subsidence surveying and mapping; interpolation inflection point; air triangle; radial interpolation basis function; spatial coordinate system

0 引言

DEM 就是指数字高程模型, 可以通过数字化模拟地形高程数据的方式, 确定地面地形曲线的走向特征, 简单来说, 就是利用有序数值阵列来表示实体地面模型。分辨率是 DEM 模型刻画地形曲线的重要参考指标, 其取值水平既影响数字化模拟手段的实施准确性, 也影响有序数值阵列的实际排序形式^[1]。无人机 DEM 测点插值算法是以 DEM 模型为基础提出的测量数据处理思想, 对于所得地面地形数据可以进行按需排序, 并可以在不改变地形曲线走向特征的前提下, 得到不同的参考坐标取值结果, 从而在一次计算的过程

中, 得到更多的数据样本坐标值。近年来, 无人机 DEM 测点插值算法迅速发展, 在工程建设、地质勘探等多个领域中都得到了广泛应用^[2]。此外, 为保证数据坐标取值能够准确表现出地面地形曲线的走向特征, 还要求 DEM 模型不能在同一区域内对数值阵列向量进行重复取值。

矿区沉陷就是指由煤矿地下采矿行为引起的地表塌陷现象, 矿产资源被开采出来之后, 矿区周围岩体的力学平衡受到了破坏, 而随着这种破坏作用的持续累积, 矿区地表就会表现出区域性塌陷的情况。在实际应用过程中, 如何根据矿区地表的实际沉陷程度, 而制定具有针对性的测绘技术方案成为了一项亟待解决的难题。基于无人机激光

收稿日期: 2023-03-16; 修回日期: 2023-05-29。

作者简介: 朱涛(1984-), 男, 大学本科, 高级工程师。

引用格式: 朱涛. 无人机 DEM 测点插值算法的矿区沉陷测绘技术[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(3): 24-29.

雷达技术的沉陷监测方法根据矿区沉陷特征的三维点云排列形式, 建立多期数字高程模型, 再通过 DEM 指标连续相减的方式, 确定核心沉陷区地表的下陷程度^[3]。基于 HOG 特征的检测方法提取施工区域的边缘特征, 并借助训练支持向量机原则, 对相关特征参量进行分类, 以便于实现对矿区沉陷程度的精准测量^[4]。然而在上述两种方法作用下, 所得沉陷深度测量结果与真实沉陷深度之间的差值水平并不满足实际应用需求, 故而按需所制定测绘技术的适用性也就相对较为局限。为解决上述问题, 针对无人机 DEM 测点插值算法的矿区沉陷测绘技术展开研究。

1 无人机 DEM 测点插值算法

无人机 DEM 测点插值算法是完善矿区沉陷测绘技术实施方案的基础, 本章节将分别从 DEM 测点获取、分维值测定、插值拐点求解 3 个方面, 分析该算法的应用流程。

1.1 DEM 测点获取

实施无人机测绘时, 所得 DEM 测点数据包括平面位置、高程两类信息参量^[5]。其中, 平面位置类的 DEM 测点数据对应矿区地表及外部岩体的基本地质特征, 所得信息参量仅具有横轴、纵轴两个方向上的取值结果; 高程类 DEM 测点数据对应矿区无人机航摄图像中的所有特征, 所得信息参量具有横轴、纵轴、空间轴 3 个方向上的取值结果^[6]。

对于平面位置信息的定义式公式为:

$$p_1 = \sqrt{\frac{\sum_{-\infty}^{+\infty} o_x \cdot o_y}{\delta_x \cdot \delta_y}} \quad (1)$$

o_x 、 o_y 分别表示横轴、纵轴方向上的矿区地质特征, δ_x 表示横轴方向上的测点参数, δ_y 表示纵轴方向上的测点参数。

对于高程信息的定义式为:

$$p_2 = \frac{\sum_{-\infty}^{+\infty} \sum_{-\infty}^{+\infty} \sum_{-\infty}^{+\infty} \frac{o_x \cdot o_y \cdot o_z}{\delta_x \cdot \delta_y \cdot \delta_z}}{\chi \times |\Delta O|^2} \quad (2)$$

o_z 表示空间轴方向上的矿区地质特征, δ_z 表示空间轴方向上的测点参数。

联立公式 (1)、公式 (2), 可将无人机 DEM 测点获取表达式定义为:

$$P = \frac{\sum_{-\infty}^{+\infty} p_1 \cdot p_2}{\chi \times |\Delta O|^2} \quad (3)$$

ΔO 表示无人机航摄图像中基本地质特征的单位累积量, χ 表示数据样本测量参数。由于矿区的沉陷程度并不可控, 所以 o_x 、 o_y 、 o_z 及 δ_x 、 δ_y 、 δ_z 的取值存在相等的可能。

1.2 分维值测定

对于无人机 DEM 测点插值算法而言, 分维值决定了测点参数之间的维数关系, 且出于精确性考虑, 分维值参数的取值应属于 $(0, 1]$ 的数值区间^[7]。分维值等于“0”, 表示所获取 DEM 测点信息完全不能描述矿区的沉陷特征, 在实际应用过程中, 即便是清晰度水平极低的无人机航摄图像中也不可能完全不存在可用信息, 所以这种情况并不会出现。分维值等于“1”, 表示所获取 DEM 测点信息能够 100% 精准描述出矿区的沉陷特征, 对于清晰度水平极高的

无人机航摄图像而言, 这种表现情况是可能出现的, 只是出现概率相对较小^[8]。对于分维值测定表达式的求解满足公式 (4)。

$$I = 1 - \lim_{\epsilon \rightarrow +\infty} \left| \frac{P}{\beta \cdot \log_2 \delta} \right|^\alpha \quad (4)$$

式中, α 表示无人机航摄图像中矿区地质特征的分维参数, β 表示矿区沉陷区域内的航测系数, \bar{O} 表示矿区地质的沉陷特征, $\bar{\delta}$ 表示核心测点参数。在无人机航摄图像中, 矿区沉陷特征保持三维数值状态, 所以在求解分维值测定表达式时, 更多参考高程类的 DEM 测点数据。

1.3 插值拐点

插值拐点是指矿区无人机航摄图像中 DEM 测点数据取值迅速发生改变的节点。所谓插值可以理解为安插在某一节点处的 DEM 测点数据, 该数据样本虽然具有当前节点处矿区沉陷地质的全部特征, 但由于其取值空间为无人机航摄图像, 所以测点数据结果仅具有运算作用, 并不能完全代替矿区沉陷特征^[9]。图 1 反映了插值拐点的取样原则。

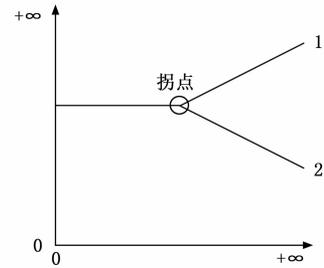


图 1 插值拐点取样原则

在无人机航摄图像中, 测绘方案实施方向并不一定与摄影方向保持一致, 所以插值拐点之后 DEM 测点数据的取值既有增大也有缩小的可能 (图 1 中 1 曲线表示 DEM 测点数据取值的增大变化状态, 2 曲线表示 DEM 测点数据取值的缩小变化状态)^[10]。

设 U_0 表示 DEM 测点数据的初始取值, U_{\max} 表示增大曲线上的 DEM 测点数据取值, U_{\min} 表示缩小曲线上的 DEM 测点数据取值, 联立公式 (4), 可将插值拐点定义式表示为:

$$E = I \times \left| \frac{U_0 - U_{\min}}{U_{\max} - U_0} \right| \quad (5)$$

定义插值拐点时, 如果不参考分维值测定条件, 则有可能导致测绘数据与矿区地表真实沉陷情况出现偏差。

2 矿区沉陷区域地理模型

在无人机 DEM 测点插值算法的作用下, 构建矿区沉陷区域地理模型, 还需根据像控点布设情况, 定义空中三角, 再联合相关数据参量, 求解径向插值基函数表达式。

2.1 像控点布设

像控点布设就是在矿区沉陷航摄图像中, 按照无人机 DEM 测点插值算法所定义的测绘节点, 一般来说, 为避免插值拐点取样结果无法真实反映出矿区地表的沉陷特征, 在每一航摄方向上, 都至少取两个像控点作为实际布设位置^[11]。如图 2 为标准的像控点取样结果。

对图 2 中的矿区沉陷航摄图像进行背景去除处理，得到如图 3 所示的像控点布设图像。

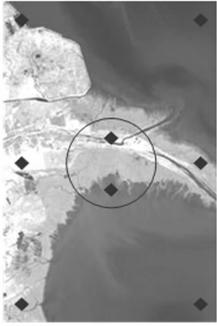


图 2 像控点取样

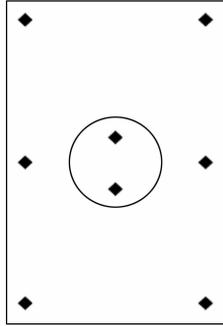


图 3 像控点布设原则

根据图 3 可知，对像控点进行布设时，应在矿区沉陷航摄图像中心定义一个标准控制区域，且该区域距离上、下两端边界的距离完全相等，距离左、右两端边界的距离也完全相等。航摄图像上、下端存在两组完全对称的像控点，且这些节点的布设位置非常靠近图像边界^[12]。左、右两端像控点布设位置与标准控制区域的圆心等高，且这两个节点的存在状态也是完全对称的。

2.2 空中三角

空中三角是辅助矿区沉陷测绘技术实施的必要条件，可以对已布设像控点对象进行分别取样，再联合所有数值结果，定义一个完整的空间数据集合，由于任意 3 个像控点都可以连接成一个三角形，所以该空间数据集合被简称为“空中三角”^[13]。简单来说，一个空中三角集合中所包含的全部数据样本都描述矿区地表的沉陷特征，且这些数据的获取完全依照无人机 DEM 测点插值算法。规定 w_x 、 w_y 、 w_z 分别表示横轴、纵轴、空间中方向上的地表沉陷数据取值，其定义式如下：

$$\begin{cases} w_x = \gamma_x E + R_x \\ w_y = \gamma_y E + R_y \\ w_z = \gamma_z E + R_z \end{cases} \quad (6)$$

其中， γ_x 、 γ_y 、 γ_z 分别表示横轴、纵轴、空间中方向上的插值向量， R_x 、 R_y 、 R_z 分别表示横轴、纵轴、空间中方向上的测绘数据样本。

在公式 (6) 的基础上，设 φ 表示矿区航测图像沉陷特征的全域测定参数， φ 表示空间性标记参量，联立上述物理量，可将空中三角表达式定义为：

$$W_{xyz} = \varphi \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix} + \varphi \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

为保证数据样本空间的广域性，一般不会对同一类型像控点中的沉陷特征进行重复取样^[14]。

2.3 径向插值基函数

径向插值基函数是用于计算 DEM 测点数据精确度的算法，其计算原理就是以 1 个数据样本去无限逼近空中三角

中的信息参量，从而在统计插值向量的同时，判断矿区沉陷深度测量值与真实沉陷深度之间的差值水平。径向描述了 DEM 测点数据的传输行为，由于空中三角集合中不存在完全相同的数据参量，所以在求解插值基函数时，要求测点信息对矿区沉陷深度的描述，必须先取得极小值参量，再取得极大值参量^[15]。设 ϵ 表示无人机 DEM 测点数据的径向传输参量， \hat{d} 表示空中三角集合中的信息插值参量， d' 表示矿区沉陷信息的差值取样参量。在上述物理量的支持下，联立公式 (7)，可将径向插值基函数表达式定义为：

$$F = \sum_{\epsilon=1}^{+\infty} W_{xyz}(\hat{d}) + \sum_{-\infty}^{+\infty} W_{xyz}(d') \quad (8)$$

如果测绘区域的划定范围较大，利用无人机 DEM 测点插值算法对沉陷数据进行取值时，极有可能出现 DEM 测点数据与插值点高程信息不匹配的问题，此时空中三角集合中会出现不满足径向插值基函数表达式的数据样本^[16]。为避免上述情况的发生，在定义径向插值基函数表达式之前，应利用空中三角集合中的取样信息进行重复计算，直至将非合理信息参量完全去除。

3 测绘实施方法设计

测绘实施方法设计就是按照空间坐标系转换原则，对矢量数据进行叠加处理，再联合像片倾角与旋偏角，确定测量精度评价指标的取值范围，本章节将针对上述内容展开研究。

3.1 空间坐标系转换

空间坐标系转换是按照无人机 DEM 测点插值算法定义原则，确定在测绘矿区发生沉陷时，横向、纵向、空间向坐标轴之间的角度关系。转换之前，横向、纵向、空间向坐标轴之间的物理夹角均等于 90° ，这种定义模式只能适应微倾斜情况下的测绘行为，当无人机航摄方向处于水平或竖直状态时，至少有一个坐标轴在航摄图像中的投影为一个点，而二维图像中的点并不能描述出 DEM 测点数据的高程信息^[17]。在转换后的空间坐标系中，横向、纵向、空间向坐标轴之间的夹角呈现出增大或缩小的数值变化状态，在面对水平或竖直方向的测绘射线时，坐标轴在航摄图像中的投影至少是具有一定程度的线段，而线段具有描述 DEM 测点数据高程信息的能力^[18]。

对于空间坐标系转换原则的定义满足如下表达式：

$$G_{xyz} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{+\infty} \frac{h_x \cdot h_y \cdot h_z}{\lambda F}}}{\hat{j} \times |\Delta H|^2} + 1 \quad (9)$$

式中， ϵ 表示坐标轴转换参数， h_x 表示横轴方向上的坐标偏移量， h_y 表示纵轴方向上的坐标偏移量， h_z 表示空间轴方向上的坐标偏移量， \hat{j} 表示坐标轴投影点的平移向量， ΔH 表示原点坐标的平移变化总量。如果在转换过程中坐标轴末端超出了矿区航摄图像的边界，就表示当前情况下，DEM 测点数据的取值过大。

3.2 矢量数据叠加

在实施测绘的过程中，矢量数据叠加就是将相似的

DEM 测点数据整合到一起，且处理后数据样本的高程信息并不会发生改变^[19]。对于矢量数据的叠加处理主要遵循如图 4 所示的原则。

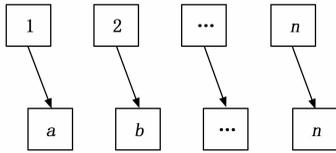


图 4 矢量数据叠加原则

无人机 DEM 测点插值算法规定，在空中三角集合中提取出的沉陷深度测量值保持矢量状态。所谓矢量值是指同时具有方向特性与数值特性的数据样本，在空间坐标系中，与无人机航测方向保持一致的数据样本的取值方向为“+”，与无人机航测方向保持相反的数据样本的取值方向为“-”^[20]。两个数值相同但取值方向相反的测绘数据样本必须处于同一沉陷区域内，但两个取值方向相同、数值不同的测绘数据样本有可能不属于同一沉陷区域。设 l_1, l_2, \dots, l_n 表示 n 个不相等的测绘数据样本， $\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_n$ 分别表示与测绘数据样本匹配的叠加系数，联立公式 (9)，可将矢量数据叠加原则表示为：

$$L = \frac{\kappa_1 l_1 + \kappa_2 l_2 + \dots + \kappa_n l_n}{G_{xyz}} \quad (10)$$

若存在数据样本与 DEM 测点信息不完全匹配的情况，则表示叠加处理后，会剩余取值方向与数值水平都不固定的数据参量。

3.3 像片倾角与旋偏角

像片倾角是指无人机航摄图像中测绘射线与沉陷深度所在地面水平线之间的物理夹角，如图 5 中的 ω 。旋偏角是指测绘射线全旋角与像片倾角之间的差值，在图 5 中可以表示为 $\mu - \omega$ 。实施矿区沉陷测绘时，像片倾角的数值水平越大，就表示空间坐标系转换处理过程中，坐标轴之间的物理夹角越大；而旋偏角越大，则表示 DEM 测点数据高程信息与真实沉陷数据之间的差值水平越大^[21]。为实现对矿区沉陷深度的精准测量，应同时控制像片倾角、旋偏角的实际取值。具体的像片倾角与旋偏角定义原则如图 5 所示。

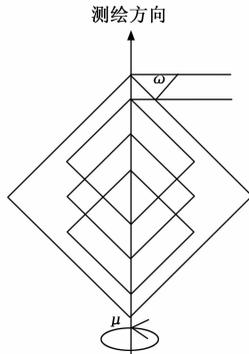


图 5 像片倾角与旋偏角定义

在无人机航摄图像中，全旋角数值一般等于 180° ，而

像片倾角数值则小于 90° ，因此旋偏角取值属于 $90^\circ - 180^\circ$ 的数值区间^[22]。

3.4 测量精度评价指标

测量精度评价指标影响无人机 DEM 测点插值算法对矿区沉陷程度的测绘处理能力，由于 DEM 测点数据高程信息始终保持定值状态，所以即便在测绘方案不符合实际应用需求的情况下，测量精度评价指标的计算数值也不会表现出波动变化行为^[23-24]。如果沉陷区域面积保持不变，那么像片倾角与旋偏角数值也可以保持定值状态，当前情况下求解所得的测量精度评价指标也就能符合测绘矿区的实际应用需求。对于测量精度评价指标的计算满足如下表达式：

$$b = \hat{Z}^2 \cdot \frac{\sin \omega}{\cos(\mu - \omega)} \cdot L \quad (11)$$

其中： \hat{Z} 表示测绘区域内的地表沉陷能力度量值。由于沉陷是一种不可控的变化行为，所以参数 \hat{Z} 的取值属于 $(0, +\infty)$ 的数值区间，当其取值趋近于无限大时，则表示矿区地表的沉陷程度过大，不宜再进行开采。

4 实例分析

本次实验的主要目的是分析无人机 DEM 测点插值算法的矿区沉陷测绘技术、基于无人机激光雷达技术的沉陷监测方法、基于 HOG 特征的检测方法的实用性能能力，在不考虑其他干扰条件的情况下，设计如下对比实验。

4.1 矿区情况

选择位于中海拔地区的某土石矿区作为实验环境，利用遥感技术对该区域的地质特征进行检测，详情如图 6 所示。

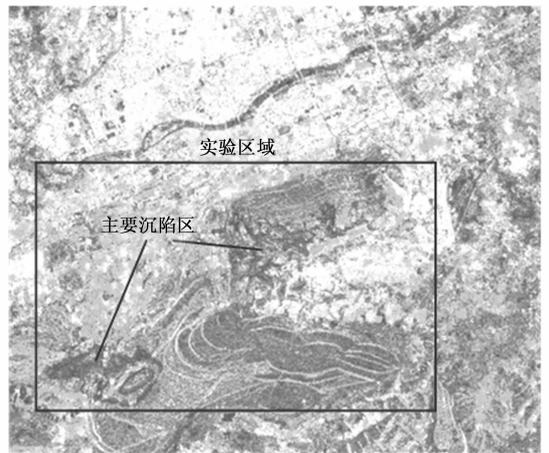


图 6 矿区地质遥感图像

图 6 中部、下部两块小型区域的颜色明显比其他遥感区域的颜色更深，根据遥感成像特点可知，这两个区域为主要沉陷区，在上述两区域外侧划定一片区域作为本次测绘的具体实验区。为避免开采行为对矿区地质造成严重影响，实验过程中必须借助遥感技术对矿区沉陷程度进行实时监测。

4.2 沉陷测绘点取样

在实验区域内选择 8 个不重复、深度水平也不相同的

测绘节点作为实验对象，并对每一节点处的地表沉陷深度进行测量，详情见表 1。

节点编号	沉陷深度 /m
1	9.65
2	4.21
3	6.94
4	22.58
5	8.76
6	3.52
7	0.07
8	18.25

分析表 1 可知，该实验区域内，地表沉陷程度的差异性较大，4 号测绘点的最大沉陷深度与 7 号测绘点的最小沉陷深度之间的数值差达到了 22.51 m。

4.3 实验结果分析

分别利用无人机 DEM 测点插值算法的矿区沉陷测绘技术、基于无人机激光雷达技术的沉陷监测方法、基于 HOG 特征的检测方法对 8 个测绘节点处的地表沉陷深度进行测量，其中第一组为实验组方法、第二组为对照 A 组方法、第三组为对照 B 组方法。

图 7 记录了实验组、对照组矿区地表沉陷深度的具体实验数值。

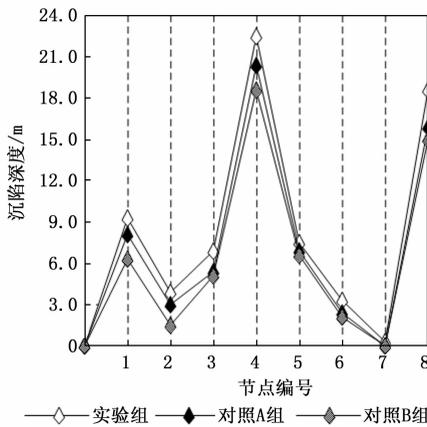


图 7 矿区地表沉陷深度实验数值

分析图 7 可知，第 7 个测绘节点处，对照 A 组、对照 B 组沉陷深度测量值均为零，在精度分析方面的参考价值不大，因此在后续分析过程中，必须去除该测量结果。实验组方法所测得的矿区地表沉陷深度均值水平相对较高，对照 A 组方法次之，而对照 B 组测量值最小。

取第 4 测绘节点处的最大实验数值进行计算，可知沉陷深度测量结果与矿区真实沉陷深度之间的差值为：

$$\begin{cases} M_1 = 0.56 \\ M_2 = 2.55 \\ M_3 = 4.24 \end{cases} \quad (12)$$

其中， M_1 表示实验组差值， M_2 表示对照 A 组差值， M_3 表示对照 B 组差值，单位均为 m。

根据公式 (12) 可知，实验组方法作用下，沉陷深度测量结果与矿区真实沉陷深度之间的差值最小，对照 A 组方法次之，对照 B 组方法最大。

由上述实验结果，可得出以下结论：

1) 基于无人机激光雷达技术的沉陷监测方法的应用，对于沉陷深度测量结果与矿区真实沉陷深度之间差值水平的控制能力有限，不足以实现对矿区沉陷深度的精准测量；

2) 相较于基于无人机激光雷达技术的沉陷监测方法，基于 HOG 特征的检测方法的测量能力相对较强，能够适当控制沉陷深度测量结果与矿区真实沉陷深度之间的差值水平，但依然达不到完善测绘技术实施方案的实际应用需求；

3) 无人机 DEM 测点插值算法的矿区沉陷测绘技术的应用，可有效控制沉陷深度测量结果与矿区真实沉陷深度之间的差值水平，使其计算数值不超过 1 m，不但实现了对矿区沉陷深度的精准测量，还可以对测绘技术具体实施方案进行完善，与无人机激光雷达技术的沉陷监测方法、基于无人机激光雷达技术的沉陷监测方法相比，更符合实际应用需求。

5 结束语

新型矿区沉陷测绘技术在无人机 DEM 测点插值算法的基础上，通过计算分维值测定结果的方式，确定插值拐点取样条件，又联合径向插值基函数表达式，定义空间坐标系转换原则，从而推导出测量精度评价指标的实际取值范围。实用性方面，无人机 DEM 测点插值算法的矿区沉陷测绘技术的作用下，沉陷深度测量结果与矿区真实沉陷深度之间的差值水平得到了有效控制，有利于实现对矿区沉陷深度的精准测量，对于完善测绘技术的具体实施方案，可以起到一定的促进性影响作用。

参考文献：

- [1] 董双玺. 无人机摄影测量系统在矿山地形测量中的应用优势及实践研究 [J]. 世界有色金属, 2022, 608 (20): 30-32.
- [2] 王 靖, 赵明伟, 杨灿灿, 等. 基于 UAV 点云兼顾及形态特征的城市道路 DEM 构建方法 [J]. 地理与地理信息科学, 2022, 38 (2): 10-16.
- [3] 亓立壮, 安士凯, 田 超, 等. 基于无人机激光雷达技术的开采沉陷监测方法与参数反演 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (12): 4752-4761.
- [4] 王志勇, 李 路, 王 建, 等. 基于 HOG 特征的 InSAR 矿区开采沉陷盆地检测方法 [J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50 (2): 404-410.
- [5] 付翔翔, 邓运员, 郑文武, 等. 基于无人机影像密集匹配点云的传统村落地面点提取及 DEM 生成——以湘西德夯村为例 [J]. 测绘通报, 2021, 537 (12): 1-5.
- [6] 苏 玲, 高婵婵, 曹闪闪, 等. 长三角地区空气质量国控环境监测点空间代表性评价——以 PM2.5 为例 [J]. 环境科学学报, 2021, 41 (11): 4377-4387.
- [7] 何旭辉, 吉晓宇, 敬海泉, 等. 高速铁路全封闭声屏障列车压力波和微气压波数值模拟研究 [J]. 空气动力学学报, 2021,

39 (5): 142-150.

- [8] 王朋朋, 程杰, 张艳昆, 等. 0.005 级压力式水深测量仪器检定装置的测量不确定度评定 [J]. 计量学报, 2021, 42 (8): 1053-1060.
- [9] 彭佳伟, 潘树国, 高旺, 等. 基于加窗插值和 ZoomFFT 的电网宽频信号自适应测量方法 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46 (8): 172-180.
- [10] 许富景, 杜少成, 荆蕊蕊. 基于压缩感知与分段 Hermite 插值的二维温度场重构方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36 (4): 40-47.
- [11] 蓝贵文, 李壁宏, 凌聪聪, 等. 小区域单镜头无人机倾斜摄影航线布设及建模精度研究 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2022, 45 (8): 1061-1065.
- [12] 王迎慧, 宋春光, 陈顺龙, 等. 变风量空调末端单元中均速管流量计的布设方法及优化 [J]. 江苏大学学报 (自然科学版), 2022, 43 (3): 277-281.
- [13] 孟永东, 袁昌纬, 田斌, 等. 基于无人机 RTK 及空中三角测量的坡体表面位移监测试验研究 [J]. 地球物理学进展, 2022, 37 (5): 2188-2195.
- [14] 张晶, 魏森. 基于 Delaunay 三角划分策略的 WSN 区域覆盖优化研究 [J]. 计算机工程与科学, 2021, 43 (11): 1944-1951.
- [15] 杜超凡, 郑燕龙, 章定国, 等. 基于径向基点插值法的旋转 Mindlin 板高次刚柔耦合动力学模型 [J]. 力学学报, 2022, 54 (1): 119-133.
- [16] 王海波, 刘韬, 刘圣军, 等. 使用局部支撑径向基函数的隐

(上接第 16 页)

无线模块及 ADC 芯片等设计系统硬件, 固件程序实现多通道的信号无线采集和 PID 控制, 结合 LabVIEW 开发上位机软件, 采用多线程低耦合的 QMH 队列框架和 PSP 服务器协议, 实现了网络设备多线程的并发, 采用增量式积分分离 PID 算法, 实现了传动机构与传感器的联合控制, 系统在解决了航天器展开机构参数测试无线化的基础上, 提高了数据采集频率和通道数, 较少了 PID 控制周期, 提高了系统的测控响应速度, 减小了系统超调, 提高了 PID 控制精度, 系统具备高精度和高稳定性等特点。

参考文献:

- [1] 李建中, 高宏, 等. 无线传感器网络的研究进展 [J]. 计算机研究与发展, 2008, 45 (1): 15.
- [2] 任丰原, 黄海宁, 林闯, 等. 无线传感器网络 [J]. 软件学报, 2003, 14 (7): 10.
- [3] 于海斌. 智能无线传感器网络系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2006 (4): 3.
- [4] 于海斌, 梁炜, 曾鹏, 等. 智能无线传感器网络系统 [J]. 工业控制网络与系统研究室, 2013 (8): 2.
- [5] 钱志鸿, 王义君, 等. 面向物联网的无线传感器网络综述 [J]. 电子与信息学报, 2013, 35 (1): 13.
- [6] 蔡逢煌, 杨富文, 林鸿, 等. 改进型积分分离 PID 控制的设计 [J]. 福建电脑, 2003 (9): 2.
- [7] 王晓东. 一种积分分离 PID 控制器的设计 [J]. 山西科技, 2006 (6): 3.

式曲线曲面几何迭代算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2021, 33 (11): 1755-1764.

- [17] 邱晓初, 赵英豪, 唐洪波, 等. 一种新型不对称三相准四电平四桥臂逆变器及 abc 坐标系下三维空间矢量脉宽调制算法 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41 (8): 2844-2856.
- [18] 李志淮, 曲智国, 韩伟, 等. 临近空间高超声速目标跟踪制导雷达搜索空域确定模型 [J]. 火力与指挥控制, 2021, 46 (12): 15-19.
- [19] 王艳东, 邵鑫, 刘波, 等. 一种利用 Mask R-CNN 的遥感影像与矢量数据配准方法 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2022, 47 (4): 623-631.
- [20] 沈宝鸿, 夏青, 吴传均, 等. 面向 3D WebGIS 的屏幕空间矢量数据绘制方法 [J]. 测绘科学技术学报, 2021, 38 (5): 529-536.
- [21] 罗生虎, 田程阳, 伍永平, 等. 大倾角煤层长壁开采顶板受载与变形破坏倾角效应 [J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50 (6): 1041-1050.
- [22] 韩建, 姜明达, 张凯, 等. 基于干涉条纹傅里叶分析技术对接接光栅调整偏角的计算分析 [J]. 中国激光, 2021, 48 (3): 126-135.
- [23] 衣小龙, 方伟, 林延东, 等. 空间低温绝对辐射初级基准实验特性及测量精度评估 [J]. 光学精密工程, 2021, 29 (1): 10-20.
- [24] 付扬, 李国龙, 徐凯, 等. 基于多源融合理论的机床圆度误差测量不确定度评定 [J]. 工程设计学报, 2021, 28 (3): 278-286.
- [8] 胡祝兵, 易江, 王娟, 等. 积分分离 PID 控制在温控系统中的仿真研究 [J]. 承德石油高等专科学校学报, 2006, 8 (4): 3.
- [9] 郑光华, 丁轲轲, 等. 积分分离 PID 控制算法研究 [J]. 计算机仿真, 1990 (3): 35-38.
- [10] 马毅. 航天器展开机构虚拟样机动力学仿真研究 [D]. 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2006 (6): 5.
- [11] 胡洁, 杨莹, 等. 太阳帆航天器展开机构柔性动力学建模 [J]. 微计算机信息, 2012 (4): 3.
- [12] 何柏岩, 王树新, 等. 航天器帆板展开过程动力学建模与仿真 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18 (2): 5.
- [13] 尹勇, 龙毅宏, 等. 入式无线传感器网络节点设计 [J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28 (3): 4.
- [14] 张瑞华, 袁东风, 等. 基于嵌入式无线传感器网络平台的实现 [J]. 计算机工程与设计, 2006, 27 (18): 4.
- [15] 王艳辉. 嵌入式无线传感器网络基础研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008: 5.
- [16] 王骏. 嵌入式无线传感器网关: CN205160556U [P]. 2016, 30 (6): 2.
- [17] 房晶, 吴昊, 白松林, 等. 嵌入式无线传感器网络节点与通信平台的构建 [J]. 2009, 28 (8): 6.
- [18] 夏显秋, 童玲, 田雨, 等. 无线传感器网络的嵌入式网关硬件设计 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2009 (8): 29-32.
- [19] 张玉萍, 荣见华, 付俊庆, 等. 基于 LabVIEW 的网络通信技术研究 [J]. 自动化仪表, 2004, 25 (4): 3.
- [20] 黄国兴. 基于 LabVIEW 的网络通信方法 [J]. 新技术新工艺, 2008 (10): 40-42.