

# Spatial Data Interpolation and 3D Visualization System

Kuang-Yi Chen<sup>1</sup>, Liang-Shiuan Huang<sup>1</sup>, Pei-Cheng Liao<sup>1</sup>, Yu-Chi Lai<sup>1</sup>, Ping-Yu Chang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Taiwan University of Science and Technology, Taipei

<sup>2</sup>National Taiwan Ocean University, Keelung

Email: a910000@gmail.com

Received: Dec. 7<sup>th</sup>, 2012; revised: Dec. 24<sup>th</sup>, 2012; accepted: Dec. 29<sup>th</sup>, 2012

**Abstract:** Researchers use geophysical prospecting to measure different geological quantities. The measurements and derived data are generally recorded as numerical values with the location of the prospecting points. The large number of numerical values often makes researchers lost in numbers and be not able to discover the relationship among physical and derived measurements. If the values can be visualized graphically and analyzed with different graphics methods, the user can more easily understand the distribution of prospecting data and analyze the relationship among values. Therefore, a visualization system is designed in this study and is applied to delineate and analyze the realistic data sets, including the geothermal data set of Taiwan, the resistivity data set of Qing-Shui, and the resistivity data set of Xiao-Lin. Spatial interpolation functions such as inverse distance, nearest neighbor, and Kriging are provided in the system to generate a regular and structured grid representation from scattered measurements. Then a set of graphical visualization functions are equipped to let researchers easily analyze the relationship among numbers.

**Keywords:** Geological Visualization; Numerical Visualization; Spatial Modeling; Spatial Interpolation

## 整合空间数据反演算与三维可视化系统

陈光奕<sup>1</sup>, 黄亮轩<sup>1</sup>, 廖培成<sup>1</sup>, 赖佑吉<sup>1</sup>, 张并瑜<sup>2</sup>

<sup>1</sup>国立台湾科技大学, 台北

<sup>2</sup>国立海洋大学, 基隆

Email: a910000@gmail.com

收稿日期: 2012年12月7日; 修回日期: 2012年12月24日; 录用日期: 2012年12月29日

**摘要:** 在近地表地质科学研究中, 大多需要探勘地层用以获取各种不同的地质物理量进行分析, 但是, 探勘资料需要经过适当处理, 才能够进行分析, 其中处理手续主要包含两个重要的步骤: 就是将采集到的低密度离散数据反演算成高密度且均匀分布的格点数据, 及将数值数据以三维可视化显示。虽然市面上已有几款的不同软件提供反演算或是可视化系统, 但是, 这些系统通常要求高额的使用权利金, 或是需要理解及熟悉艰深的操作方式以及界面难以课制化成研究需求等, 让使用者难以接受使用, 因此本文将首先讨论各种数据反算法及三维可视化方法, 再将这些算法实作于一个可视化反演算系统, 系统中呈现多个不同的反演算及可视化选择, 让使用者可以依其分析需要做适当选择。最后, 我们将利用实际的数据来验证这系统的应用和价值。

**关键词:** 地质可视化; 数值可视化; 空间模型; 空间反演算

### 1. 引言

在进行地质研究分析时, 最后希望得到的往往是在某个地区是否有够高物理量分布或总含量等信息, 例如地热的研究, 通常这类的研究会有两个方面的问

题, 第一个是数据的采集, 一般会在少数几个选定的地点采样所需分析的物理量, 经过分析后再进一步挑选适当的区域做开发或是再次取样作为更精确分析的依据。取样的动作根据目标物理量不同而有所不

同,一种方法是钻一个足够深的井后,再用特别的仪器下去采取特定的物理量。钻井的动作很耗时及成本,而且有些地点如陡峭的山坡或机具难以到达的位置就要花更高的成本或根本无法探勘,也就是说在有限的预算下所能采集到的数据会是低密度且非均匀分布于三维空间的数据。另一个问题是数据的呈现,前面探勘所采取到的数据通常会以数据的方式储存,也就是三维空间的坐标位置以及在该位置所采集得到的物理量。大量的数字通常让研究者迷失在数字之中,而不容易理解数字中的重要讯息,而且前面提到这个数据集会是低密度且非均匀分布,这会导致分析上的困难,因此这种资料还需要做过预先处理才得以进行进一步的分析。

对探勘数据做预先处理的方法有很多种,本文只专注于反演算的部分。反演算就是用已知位置的数据去估计其他未知数据的位置,以得到较密集且均匀分布于指定范围内的数据集。得到反演算后的数据才能够进行的可视化和进一步的分析。但不同的物理量有不同的分布特性,因此就会需要专门的工具或软件。

将数据以图像方式呈现就是可视化,可视化的目的在于藉由图像上的空间立体信息及颜色信息加强用户理解量测值的分布情形及分析数字之间的相互关系,以地热数据来说,图像化后就能够用视觉直接判断哪个区域的地热含量较多,是较具开发可能性的区域。

数据反演算和可视化呈现都是市面上现有的软件,但使用这些软件通常面临高额的权利金、艰深的操作以及课制化等问题,而且大部分的软件都是由国外公司或研究单位开发,这些问题让国内使用的单位备受限制,因此我们结合了这两种技术领域中的多种算法包含反算法:反距离法(inverse distance)、限制反距离法(limited inverse distance)、最近距离法(nearest neighbor)及克利金法(Kriging)等,可视化方法有显示点、等高线(Contour Line)、等位面方法(Isosurface)、切面方法(clipping plane)、体渲染(volume rendering)等,同时也提供一个简易操作的用户界面。

## 2. 地质可视化系统

台湾地质属于新兴的岩层,因此富含大量地热及各种不同的地质特性。过去有大量的研究经费及人力

投入地质探勘研究中,当时产出大量的地质数据,因为从未有适当的数据整合可视化系统,而造成数据整合困难。在本章节中,我们将从地热研究的应用,来说明我们系统的重要性。接着再分析市面上可得系统限制来说明地质可视化系统的需要性。

### 2.1. 地热资料量测

随着石油价格上升及温室效应,寻找替代能源日益重要,北台湾地热潜能集中的大屯山及清水地区就适合开发地热做为替代能源。早期经济部能源会矿业研究所曾于民国 69 年,在台湾北部大屯地区使用地电阻方法、磁力探测与震测方式进行探测(经济部矿业研究所<sup>[1-4]</sup>)。为因应温泉之开发与探勘需求,台北市自来水处(2004)<sup>[5]</sup>也曾委托工程顾问公司,以地电阻方法与大地电磁法对北投行义路地区进行探勘。台北市产业发展局(2008)也曾委托顾问公司<sup>[6]</sup>,以大地电磁方法对大磺嘴一带进行地球物理探查,林正洪(2004)在根据大屯山区之微震监测器对地热做分析<sup>[7]</sup>,之后,林正洪(2009)亦提出由微震之频谱分析资料<sup>[8]</sup>等。另外,清水地热乃亦是台湾历史悠久的地热开发区域,因此,在过去已有密集之监测地震数据,包括蔡义本及余水倍等<sup>[9]</sup>的实地微震活动观测等。林静怡<sup>[10]</sup>曾根据布设于台湾北部地区之地震站监测纪录,结合柔性网格进行三维反演算,并建立宜兰地区之地下速度构造模型。除天然地震资料之外,早期经济部能源会矿业研究所曾于民国 63 年使用地电阻、重磁探测等方法,于清水以及土场地区进行地热探勘工作(经济部矿业研究所<sup>[11-15]</sup>)。最近由于地热之开发与探勘需求,工业技术研究院(2009)也以地电阻方法与大地电磁法重新对清水地热地区进行探勘。这二个区域的探勘皆产生大量的数值数据。但由于各种地球物理方法所凭借量测之物理原理及仪器灵敏度和数据分辨率之不同,同时因为执行团队记录的方式而造成所产出数据的分辨率、探查位置和格式的差异,而使得数据整合成为高度困难的工作。因为没有共同的数据格式,让这些大量未整合的数字,难以进行交叉分析,去呈现有意义的数字并建立数据间的相互关系。因此,要整合这些探勘资料需要建构一个可以整合不同尺度资料的平台,才能有效利用地质地热探勘数据,用以呈现估算地热资源。

## 2.2. SGeMS

SGeMS (Stanford Geostatistical Modeling Software)<sup>[16]</sup>是由史丹佛大学团队所开发的一套开放源码的空间反演算软件。系统包含多种克利金反演算方法,如一般的克利金(Kriging)、协同克利金(Cokriging)、指示克利金(indicator Kriging)、区块克利金(block Kriging)等。其数据输入储存为二位格式,易读取的文本文件档案是无法使用的,需要自行转换成规定格式。同时在使用各种克利金法都会需要提供模拟变异图(model variogram)用的多项参数,虽然 SGeMS 提供接口来让使用者去调整,但是该系统没有自动估算参数能力,因此使用上必需由使用者自行设定大部分的参数,所以操作上较复杂且需要专业统计分析能力以及对克利金法和变异图的相关知识,让一般地质工作者生畏。另外显示方面也比较不像 Voxler 那样完整,GPU 运算的版本也尚未推出。我们的系统提供较简单的操作,并提供比较多的预设参数和自动产生部分参数使得使用者能更容易操作。

## 2.3. Voxler

Voxler 是一款专业的三维数据可视化软件<sup>[17]</sup>,提供了简单、易操作的用户接口及弹性的数据格式。Voxler 的主要功能在于三维数据可视化,而非数据的网格化处理,因此在网格化的反演算方面仅搭配简单的反距离法(inverse distance)和局部多项式法(local polynomial gridding)。Voxler 在读入数据后会显示一个确认数据字段的界面,之后使用类似流程图的方式控制要显示的可视化效果与控制资料的范围以及反演算数据。

## 3. 数据处理

在数据处理的部分反算法几乎决定了结果的好坏,选错方法或参数会使结果的误差大增,因此好的反演算工具最好能提供多种的方法让使用者选择。除了反演算的方法,在数据格式上最好也能够尽量弹性或简单易懂,否则使用者可能会连怎么将手上的数据转成系统指定的格式都不清楚,甚至会因为数据字段选错而导致结果完全错误,因此我们的数据格式用最简单的文本文件储存,数据类型有两种,一种是离散数据集,每行的资料代表一个取样点,在每行储存了

4 个浮点数,分别为空间坐标的  $x$ ,  $y$ ,  $z$  和物理量,可以使用空白分开或逗号,另一种数据已经做过反演算的资料,和前一种不同的只有在第一行存的是  $x$ ,  $y$ ,  $z$  的分割数。而我们有实现的反算法共有如下 4 种:

### 3.1. 反距离法

为 D. Shepard 加以改进后发表的数据内插方法,其作法被称为谢别德法(Shepard Method)<sup>[18]</sup>,是 GIS 软件根据离散数据点生成规则网格数据时,最常使用的反算法。此法是依据附近所有取样点的权重与值来计算该点的值,而权重的计算方法则是与取样点和估计点的距离  $p$  次方成反比。演算式如下:

$$\text{估计函数: } u(x) = \frac{\sum_{i=0}^N \omega_i(x) u_i}{\sum_{j=0}^N \omega_j(x)} \quad (1)$$

$$\text{权重函数: } W_i(x) = \frac{1}{d(x, x_i)^p} \quad (2)$$

### 3.2. 限制反距离法

过去反距离法将所有的点拿来做内插运算,但在部分数据密度不均的情况下,会出现附近没有点导致过远的点却依然影响反演算结果,因此可以限制影响结果的点是最接近内插位置的  $n$  个点;或是在内插位置半径  $r$  内的所有点才能加入计算,或是可以包含两者,这样就可以减少较远的点影响结果的问题,而这种方法要注意的是,若内插位置的半径  $r$  内没有半个点时,系统默认会用一个边界值来取代,也可让使用者设定这个值。另外,系统使用了 K 维树(k-dimensional tree)来当作系统快速查找数据点的数据结构。演算式如下:

估计函数: 同反距离法

$$\text{权重函数: } W_i(x) = \frac{r - d(x, B_i)^p}{rd(x, B_i)}$$

### 3.3. 最近距离法

有时内插结果出人意料,数据点可视化提供的信息太少,想要进一步了解取样点的大概分布与构成时,最近距离法<sup>[19]</sup>就是最简单快速的办法。该点的值等同于最接近该点的取样点,假设平面上有  $n$  个互不重迭的离散数据点,则其中的任意一点  $P_i$ ,都有一个邻近范围  $B_i$ ,在  $B_i$  中的任一个点与点  $P_i$  的距离小于

它与其它离散数据点之间距离。方法跟 K-NN(K nearest neighbor)是一样的，只是我们用的是  $K = 1$ 。

### 3.4. 克利金法

克利金法<sup>[20]</sup>也称为空间局部估计或空间局部内插法，本法充分利用了数据空间域的性质，在内插过程中可以反应空间域的各方向差异性，并且充分利用数据点之间的空间相关性。该法还可以自动识别取样点的空间分布。如果若干个取样点距离较近且在同一方向，那么距离目前计算的点较近的点其权值较大，而其它点的权值较小，这就消除了由于采样不均带来的误差。该法可以产生超出估计点的最大和最小值范围，甚至出现负值，因此在某些情况下更加符合实际情况。估计函数如下为如下的线性组合

$$\hat{u}(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(x) u(x_i)$$

比较复杂的在于算权重函数，我们使用了自动模拟参数来让克利金法的使用变得跟其他方法一样非常简单，在找参数上是使用非线性回归法(non-linear fitting)用已知数据去仿真出接近的结果，而使用非线性是因为表达式为非线性函数。克利金法使用变异图(variogram)去模拟距离和物理量的关系，变异图也具有方向性，但为了达到简单使用的目的我们只考虑距离，变异图有一些常见模型可以选择来仿真，常见的模型如下：

球状模型(Spherical model)

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & \text{if } h \geq 0 \\ c \left( \frac{3h}{2R} - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{R} \right)^3 \right), & \text{if } 0 < h \leq R \\ c, & \text{if } h > R \end{cases}$$

高斯模型(Gaussian model)

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & \text{if } h = 0 \\ c \left( 1 - e^{-\left( \frac{h^2}{R^2} \right)} \right), & \text{if } h > 0 \end{cases}$$

## 4. 3D 可视化显示

将数据以图像方式且在三维空间下呈现对使用者来说较为直觉，透过颜色来表现物理量的高低，这

样的呈现方式能更容易看出物理量的分布、走势和集中状况，为了提供在不同呈现方式下的分析，我们提供了多种可视化方法，有以下：

### 4.1. 顶点(Vertex)

数据点方法是将所有数据点直接显示在三维空间上，并以 4.5.1 中所介绍的颜色对应法来表示该点的值，这个方法能显示点的分布状况，对取样值间的空间关系分析很有帮助。

### 4.2. 等位面方法(Isosurface)

等位面是利用图学中的行进方块法<sup>[21]</sup>(marching cube)来取得等位面，显示在窗口中，并且提供用户可以来控制不同的等位值，同时加入计算机图学中灯光及阴影的效果，此作法将在实作部份做详细介绍。行进方块算法是一种计算机图学算法，用来对三维资料的等位面做建模，首先将格点数据取出，每八个邻近的点为一组得到一个立方体，再依切面的值来算出要削掉立方体是哪个部份，最后将削掉立方体后形成的三角面加入切面集合，而所有切面的集合，即为等位面。

### 4.3. 切面方法(Cliping plane)

切面方法用于关注某个平面数据，而且切面方法不只是横切或纵切，而是能自由改变切面的位置与角度，然后将切到有值得地方显示成一个平面，切面内的值将会从格点中取最近距离的值，再使用色表来找对应的颜色。

### 4.4. 体渲染(volume rendering)

以三维空间中的数据点的值与使用者设定的色彩做对应，并依取样点的值与深度来画出半透明三维的立体成像，可以清楚的显示出取样值高的部份颜色较深，与取样值低颜色较透明的部份。体渲染有很多实作的方法，也可以混和数种方法来使用，本系统是利用最简单且直觉的方法，立体光线投射(volume ray casting)。这个方法就是将每个图像都生成一道射线(ray)，然后从观察者(viewer)射出。每条射线上会经过数个采样点，这些采样点有时候不会刚好对到数据点，所以需要先做取样(sampling)来得到这些采样点，这部分可以用简单的线性内插完成。得到所有采样点

后依据遇到的先后顺序作排序, 然后根据不透明度进行累加, 不透明度到 1(完全不透明) 时就能停止。方程式如下:

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \prod_{j=0}^{i-1} (1 - A_j)$$

$$A = 1 - \prod_{j=0}^n (1 - A_j)$$

$C$  是图像最后的颜色,  $A$  是不透明度,  $C_i$  和  $A_j$  分别为穿过的第  $i$  个点的颜色及不透明度,  $n$  为会穿过的点的个数, 每个取样点的权重就是到该点之前的透明度  $(1 - A_j)$  乘积, 也就是说越后面的点的权重就越低, 当权重或  $A_j$  到 0 时之后的点就不需要再作累加计算了。

## 5. 系统

在我们的系统中使用了 VTK (Visualization Toolkit)<sup>[22]</sup> 做为显示系统, VTK 是一款开放源码的可视化软件, 除了提供现成的可视化系统也提供开发链接库供软件工程师开发属于自己的软件, 我们的系统运用 VTK 及自定义的数据型态来作可视化显示。反演算部分使用第 3 节说明的算法实现, 包含了 K 维树和克利金法用到的非线性回归算法 LMA(莱文贝格 - 马夸特方法, Levenberg-Marquardt algorithm)<sup>[23]</sup>。K 维树的用途在于加速搜寻最近点, 因为输入的取样点是固定的, 因此一旦建好树之后就能让每个输出点在  $O(\log N)$  的时间找到最近点或范围内的点。而 LMA 是知名的解非线性优化问题的方法, 此算法的关键在于修改参数时结合高斯-牛顿法(Gauss-Newton)及梯度下降法 (gradient descent) 的优点, 在两种方法间切换并调整参数来找到最佳解。在模拟克利金使用的参数时, 使用到 LMA 来求得最佳参数, 也因此使用者不需要烦恼该如何设定这些参数。

## 6. 结果与比较

为了验证我们的反演算和可视化系统, 我们使用海洋大学提供的三笔实际地质数据作测试, 数据的种类有地热及地电阻两种, 每笔数据都各别使用反距离法、限制反距离法、克利金法、最近距离法计算得到均匀分布且密度为  $150 \times 150 \times 150$  的网格数据, 图 1 到 6 是各种可视化方法呈现的结果。三笔数据分别是台湾地

热资料(300 个地热温度取样点)、清水地电阻资料(708 个地电阻取样点)及小林村地电阻资料(432 个地电阻取样点)。

所有测量时间数据的装置皆为处理器 AMD Athlon(tm) II X4 630, 4GB 内存, 使用显示适配器是 NVIDIA GTX460 1GB 及 Windows 7 的操作系统。从图上能清楚的看出物理量的分布情况, 也能知道在哪个区域有最多的物理量分布, 以地热数据来说, 就能知道哪个区域适合做地热能的发展, 也能将此数据作为下次采样的区域标准。从结果图中可以看出各个方法所计算出来的成果有明显的差异, 除了反距离法和限制反距离法, 这两个方法因为只差在使用的取样点数量, 但从表 1 可以看出限制反距离法都能明显比反距离法快出数倍。

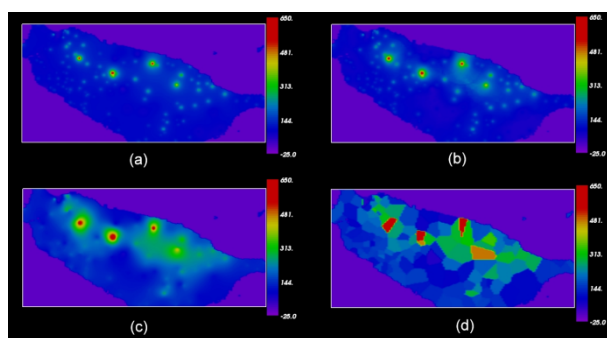


Figure 1. This shows a slide at sea level of -3500 meters when rendering the geothermal data sets of Taiwan. The inversion using (a) inverse distance, (b) limited inverse distance with limitation of 5000 meters radius, (c) Kriging, (d) nearest neighbor  
图 1. 此图为台湾地热数据可视化结果, 可视化方法为切面方法, 切于海拔-3500 公尺。使用的反算法分别为: (a) 反距离法, (b) 限制反距离法, 限制范围 5000 公尺, (c) 克利金法, (d) 最近距离法

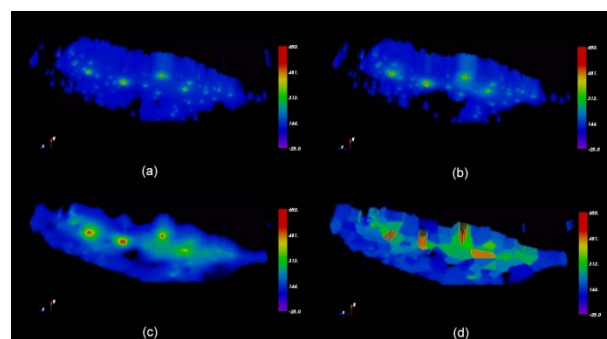


Figure 2. This shows the volume rendering results when rendering the geothermal data sets of Taiwan. The inversion using (a) inverse distance, (b) limited inverse distance with limitation of 5000 meters radius, (c) Kriging, (d) nearest neighbor  
图 2. 此图为台湾地热资料可视化结果, 可视化方法为体渲染。使用的反算法分别为: (a) 反距离法, (b) 限制反距离法, 限制范围 5000 公尺, (c) 克利金法, (d) 最近距离法



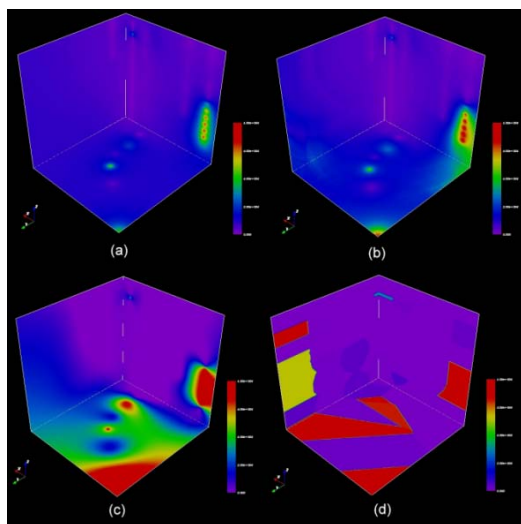


Figure 3. This shows three slides in each axis with respectively ( $x = 121.645^{\circ}E, y = 24.600^{\circ}N, z = -2474$  meter) where rendering the geothermal data sets of Qing-Shui. The inversion using (a) inverse distance, (b) limited inverse distance with limitation of 1000 meters radius, (c) Kriging, (d) nearest neighbor  
 图 3. 此图为清水地电阻数据可视化结果, 可视化方法为切面方法, 3 个切面分别切于  $x = 121.645^{\circ}E, y = 24.600^{\circ}N, z = -2474$  公尺。使用的反算法分别为: (a) 反距离法, (b) 限制反距离法, 限制范围 1000 公尺, (c) 克利金法, (d) 最近距离法

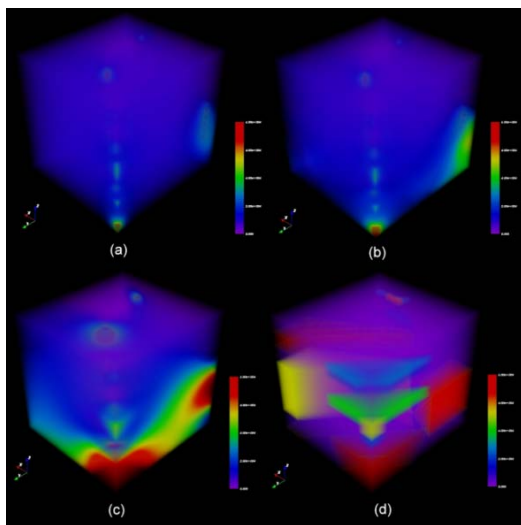


Figure 4. This shows the volume rendering results rendering the geothermal data sets of Qing-Shui. The inversion using (a) inverse distance, (b) limited inverse distance with limitation of 1000 meters radius, (c) Kriging, (d) nearest neighbor  
 图 4. 此图为清水地电阻数据可视化结果, 可视化方法为体渲染。使用的反算法分别为: (a) 反距离法, (b) 限制反距离法, 限制范围 1000 公尺, (c) 克利金法, (d) 最近距离法

就以视觉分析来说克利金能得到最平滑且可靠的结果, 但未必任何资料都适合用克利金法, 各种反算法比较如下:

- 反距离法: 并没有特别的用途, 可以完全被限制反

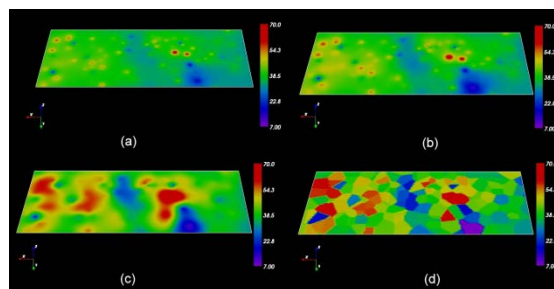


Figure 5. This shows a slide at sea level of  $-23$  meters when rendering the resistivity data sets of Xiao-Lin. The inversion using (a) inverse distance, (b) limited inverse distance with limitation of 30 meters radius, (c) Kriging, (d) nearest neighbor  
 图 5. 此图为小林村地电阻数据可视化结果, 可视化方法为切面方法, 切于地下 23 公尺。使用的反算法分别为: (a) 反距离法, (b) 限制反距离法, 限制范围 5000 公尺, (c) 克利金法, (d) 最近距离法

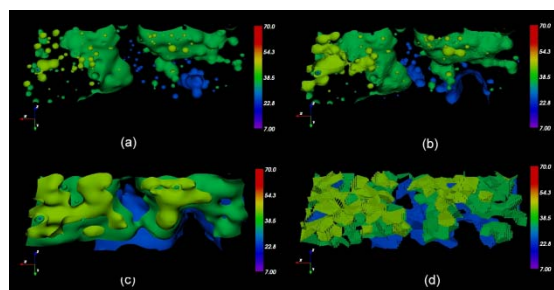


Figure 6. This shows the isosurface of respectively of  $25 \Omega$  for blue,  $35 \Omega$  for green and  $45 \Omega$  for light green when rendering the geothermal data sets of Xiao-Lin. The inversion using (a) inverse distance, (b) limited inverse distance with limitation of 5000 meters radius, (c) Kriging, (d) nearest neighbor  
 图 6. 此图为小林村地电阻数据可视化结果, 可视化方法为等位面法, 蓝色代表 25 欧姆, 绿色代表 35 欧姆, 浅绿代表 45 欧姆。使用的反算法分别为: (a) 反距离法, (b) 限制反距离法, 限制范围 5000 公尺, (c) 克利金法, (d) 最近距离法

Table 1. This shows the statistics of the resistivity data set of Xiao-Lin, the resistivity data set of Qing-Shui and the geothermal data set of Taiwan.  $N = 20$ , Xiao-Lin  $R = 20$ , Qing-Shui  $R = 1000$ , Taiwan  $R = 5000$

表 1. 统计小林村地电阻数据、清水地电阻数据及台湾地热数据的各种反算法运算时间。每组资料的 N 皆为 20, 小林村 R 为 20, 清水 R 为 1000, 台湾 R 为 5000

地点	小林村	清水	台湾
取样点数量	432	708	300
最近距离法	2.644	6.634	2.545
反距离法	74.122	121.212	51.223
限制反距离法(N)	8.340	7.441	8.133
限制反距离法(R)	15.712	21.625	3.585
克利金法	2522	6616	1349

距离法取代, 主要是展示和限制反距离法的差别。

- 限制反距离法: 指令周期比起克利金法来的快许

多, 参数上只要设定范围, 适合作快速预览物理量分布情况。

- 最近距离法: 通常得到的结果会是明显分块的图形, 除了指令周期非常快以外, 特别适合像地电阻这种并非以距离长短来界定, 因为地电阻在相邻但不同的岩层就会有有很高的差值。
- 克利金法: 计算上较为费时, 当输入的取样点包含过多的奇异点或过于剧烈的变化时, 很有可能发生无法模拟参数或得到不合理的参数。

## 7. 讨论

本文讨论了我们所实作的三维空间数据反演算及可视化系统, 该系统可用于呈现地热及地电阻数据, 其呈现内容符合地质探勘分析之需求, 我们认为这系统有机会可以符合地热开发及石油探勘等研究单位及企业的需求, 且系统设计初期便针对地质研究开发设计, 因此更容易针对这类的探勘需求做客制化, 也能针对地质探勘的需要做调整。

未来有几个不同的研究方向: 一、增加更多的反演算方法, 让使用者有更多选择以贴近研究需求。二、改进用户界面, 让其更容易让研究者使用及接受。三、加速反算法: 因为在研究之初, 研究者也许无法得知哪个反演算方法最适合目前探勘的资料, 因此, 若能快速根据资料反演算得到结果, 可以增加研究分析的效率。当观察这几种反算法时, 发现每个格点的计算都不需要其他格点的演算结果, 因此这些运算都是独立运算, 十分适合平行加速运算。加上近几年来 GPU 已经广泛地应用在各个领域的数值运算, 而且一般家用的显示适配器也具 GPU 的平行运算功能, 因此, GPU 的平行加速是加速的最重要方向。

## 参考文献 (References)

[1] 经济部联合矿业研究所. 大屯火山群地热探勘工作报告之一

- [R]. 1969.
- [2] 经济部联合矿业研究所. 大屯火山群地热探勘工作报告之二 [R]. 1970.
- [3] 经济部联合矿业研究所. 大屯火山群地热探勘工作报告之三 [R]. 1971.
- [4] 经济部联合矿业研究所. 大屯火山群地热探勘工作报告之四 [R]. 1973.
- [5] 台北市自来水处. 北投温泉系统规划[Z]. 台北: 陆岛工程顾问有限公司, 2004.
- [6] 台北市产业发展局. 台北市行义路温泉区地球物理探勘及地质调查委托技术服务期末报告书[Z]. 台北: 联兴工程顾问公司, 2008.
- [7] 林正洪. 大屯火山群潜在岩浆库研究: 微震监测之初步结果 [J]. 国家公园学报, 2004, 14(2): 103-118.
- [8] 林正洪. 听诊大屯火山群的微震[J]. 科学报导, 2009, 437: 20-25.
- [9] 余水倍, 刘文相, 蔡义本. 清水土地热区微震研究报告[R]. 台北: 中央研究院地球科学研究所, 1977.
- [10] 林静怡. 以地震层析法推求台湾北部地区的速度构造并探讨流体的可能分布[D]. 国立中央大学, 2001.
- [11] 经济部联合矿业研究所. 台湾地热资源探勘工作报告之一 [R]. 1974.
- [12] 经济部联合矿业研究所. 台湾地热资源探勘工作报告之二 [R]. 1977.
- [13] 经济部联合矿业研究所. 台湾地热资源探勘工作报告之三 [R]. 1978.
- [14] 经济部联合矿业研究所. 台湾地热资源探勘工作报告之四 [R]. 1979.
- [15] 经济部联合矿业研究所. 台湾地热资源探勘工作报告之五 [R]. 1979.
- [16] SGEMS. <http://sgems.sourceforge.net/?q=node/20>
- [17] Voxler. <http://www.goldensoftware.com/products/voxler/voxler.shtml>
- [18] D. Shepard. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference, New York: ACM, 1968: 517-524.
- [19] Shuhong Zhou. A study of combine different interpolation methods with RTK and geometric determined Undulation to Estimate Orthometric Heights—A Case of Taichung City. Technical Report, 2004.
- [20] M. L. Stein. Interpolation of spatial data: Some theory for Kriging. New York: Springer, 1999.
- [21] H. E. C. William E. Lorensen. Marching cubes: A high resolution 3d surface construction algorithm. Technical Report, 1987.
- [22] VTK. <http://www.vtk.org/>
- [23] K. Levenberg. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. Quarterly of Applied Mathematics, 1944, 2: 164-168.