

长江航道水下数字高程模型自动化处理系统

夏辉宇

(长江南京航道局, 江苏南京 210011)

摘要: 手动处理生成航道水下数字高程模型 (DEM) 费时耗力, 存在着效率瓶颈。提出并构建长江航道水下数字高程模型自动化处理系统。该系统由水深数据自动监测读取模块、DEM 自动处理模块、成果自动加工模块以及流程监控显示模块组成, 实现了从原始水深点自动监测到规则格网 DEM 及其专题图的快速自动化处理, 有效节省了人工操作, 提高了 DEM 产品的时效性, 解决了效率瓶颈问题。

关键词: 长江航道; 水下地形; 数字高程模型; 不规则三角网; ArcGIS

中图分类号: U 612.26

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)05-0110-06

Automatic underwater DEM processing system for the Yangtze River

XIA Hui-yu

(Changjiang Nanjing Waterway Bureau, Nanjing 210011, China)

Abstract: Manual processing of underwater digital elevation model (DEM) consumes more time and brings efficiency-bottleneck problems. An automatic underwater DEM processing system for the Yangtze River, which is composed of the automatic water depth data monitoring and reading module, automatic DEM processing module, automatic thematic map processing module and process monitoring and displaying module is proposed. The input water depth data could be processed into regular grid DEMs and thematic maps automatically and efficiently by the system. The system can reduce human workload and achieve real-time DEM data processing, and solve the aforementioned efficiency-bottleneck problems.

Keywords: the Yangtze River waterway; underwater terrain; DEM; TIN; ArcGIS

信息化技术在长江航道维护和管理中发挥着越来越重要的作用。近年来, 高速发展的地理信息系统 (GIS) 技术在航道冲淤分析、三维可视化、航道演变分析以及长江电子航道图等领域得到了深入的应用^[1-3]。DEM 是 GIS 中最常见的数据类型之一, 它以数字化的形式表达地表连续的高程信息^[4]。在长江航道 GIS 应用中, 水下地形 DEM 同样具有十分重要的作用, 水下地形 DEM 数据的生产是长江航道空间数据基础设施建设的重要工作内容。

航道水下 DEM 得到了广泛的研究和应用。文献[5]利用多种内插方法构建了数字航道水下 DEM

并比较了精度。文献[6]针对航道的带状区域特征, 提出了建立航道水下 DEM 的一种分区技术。文献[7]探讨了航道水下 DEM 在重庆市数字航道中的应用。现阶段长江航道水下 DEM 主要是在离散测量水深点基础上利用 ArcGIS 等专业地理信息系统软件手动进行处理生成。手动处理方式虽然能够满足小范围小批量的应用需求, 但在面对多区域多时相水下地形比较分析应用场景时, 存在着效率较低、无法满足实时性需求的缺陷。因此建立一套自动化处理系统快速批量地处理航道水下 DEM, 具有十分重要的意义。

本文设计并构建了长江航道水下数字高程模

收稿日期: 2015-11-17

作者简介: 夏辉宇 (1985—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为航道测绘及空间数据应用。

型自动化处理系统，实现了从离散水深点到 DEM 的全自动化处理。系统由水深数据自动监测读取模块、DEM 自动处理模块、成果自动加工模块以及流程监控显示模块组成。本系统创新点在于用户只需向指定输入目录提交原始水深数据，系统即可自动处理输出规则格网格式 DEM 及其可视化专题图成果，采用三角网误差自动剔除技术，避免手动操作，实现了真正的自动化处理。本系统有效解决了手动 DEM 处理方式存在的效率瓶颈问题，提高了工作效率，适用于大规模航道水下 DEM 批量生产。

1 系统总体功能结构

长江航道水下数字高程模型自动化处理系统主要由水深数据自动监测读取模块、DEM 自动处理模块、成果自动加工模块以及流程监控显示模块组成。系统的基础功能采用 C# 开发，GIS 相关功能采用 ArcGIS 技术架构，基于 ArcGIS Engine 进行开发（图 1）。

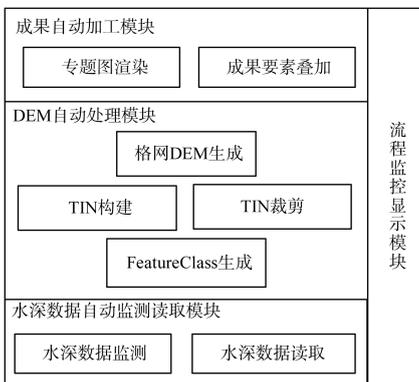


图 1 系统总体功能结构

水深数据自动监测读取模块包含水深数据监测和水深数据读取功能。水深数据监测功能实现了对指定用户输入目录的实时监控，一旦监测到用户将原始水深文件输入到目录中，即触发后续处理流程。水深数据读取功能首先对用户输入原始文件进行有效性检查，再将水深值信息读取到内存中。

DEM 自动处理模块是系统的核心模块，负责将离散水深值处理加工为规则格网格式的 DEM。

自动处理模块首先将具有坐标信息的水深值转换为 FeatureClass，再由 FeatureClass 构建不规则三角网 TIN，TIN 裁剪模块对构建的 TIN 进行修边裁剪，计算最大接边长度阈值来自动剔除三角网构建产生的误差，最后将 TIN 转换为规则格网 DEM 输出。

成果自动加工模块进一步将规则格网格式 DEM 自动加工为专题图形式输出，主要包括专题图渲染和成图要素叠加两部分功能。专题图渲染设定适合的颜色标记 DEM 不同水深区间。成果图要素叠加则将 DEM 所处水道区域的岸线码头、洲滩、锚地等航道要素，以及图名、图框、图例等制图要素，自动叠加到渲染后的 DEM 上，形成最终的专题图。

流程监控显示模块实时显示系统当前的运行状态及流程执行情况，以使用户掌握进度。此外，系统处理过程中出现的异常或错误信息也会在界面中显示，并记录到系统日志中。

长江航道水下数字高程模型自动化处理系统架构遵循了简单易用的设计原则。系统部署并运行于航道内网环境中，为不间断后台运行模式。系统自动化程度较高，处理过程中无需用户交互。用户向文件输入目录批量添加原始水深点文本文件，处理完成后直接访问输出目录即可获取最终 DEM 产品。系统管理人员通过系统日志检查系统运行情况及异常信息。长江航道水下数字高程模型自动化处理系统是一种典型的数据驱动型系统，其功能机制体现了数据即服务的设计思想。

2 系统关键技术

2.1 数据自动监测读取

长江航道水下数字高程模型自动化处理系统中，水深数据自动监测读取模块实时监听指定用户输入目录，用户只需将满足格式要求的水深值文本文件发送至该目录，数据监测模块即可发现并识别，后续处理流程由此触发。自动监听及触发机制的原理如图 2 所示。

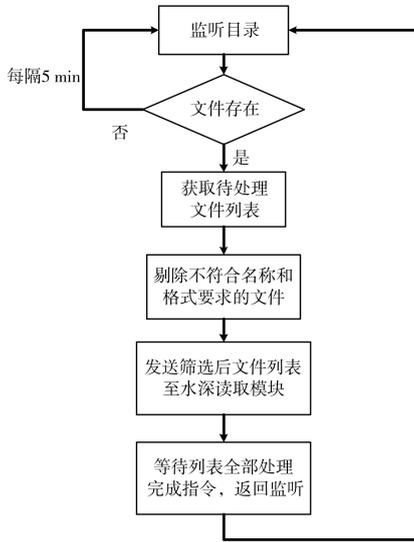


图2 自动监听及触发机制流程

1) 模块每隔 5 min 轮循监听指定的用户输入目录。一旦发现建立了新的文件, 即将所有文件加入待处理文件列表。

2) 遍历该文件列表, 检测文件是否为文本文件格式, 同时文件名格式是否满足“水深值描述-8位时间日期-比例尺信息”。例如“南通水道浅区检测图-20150731-5000”为一个符合命名格式的输入文件名。

3) 将筛选后的文件列表传递给水深值读取模块, 待收到列表文件全部处理完成指令后返回继续监听目录。

接收到文件列表后, 水深数据读取模块遍历该列表, 逐一读取各文件中水深值信息。输入文件中水深点数据采用了统一的“点序号, X坐标, Y坐标, 水深值”格式逐行记录, 以便模块自动读取。

2.2 DEM 自动生成

DEM 自动处理模块的主要功能是将水深点数据处理加工为规则格网(Grid)格式的 DEM。利用离散高程点建立格网 DEM 主要有 2 种途径: 一是直接根据离散高程点通过空间内插方法生成连续表面的格网 DEM; 二是先根据高程点生成不规则三角网(TIN), 再以 TIN 为基础内插生成格网 DEM。本系统采用的是第二种间接生成 DEM 的方法, 不仅由于该方法在航道水下地形生成中具有较高的精度^[5], 而且该方法在建立 TIN 的过程中

充分考虑了采样高程点自身的特性, 适用于任意复杂的水下地形。

离散水深点中包含了 X 坐标、Y 坐标以及高程值信息, DEM 自动处理模块首先将水深数据读取模块读取的水深信息处理生成 FeatureClass, 再调用 ArcGIS Engine 中 TIN 操作接口 ITinEdit, 由 FeatureClass 构建不规则三角网 TIN。图 3 为某区域离散水深点构建为 TIN 的效果图。

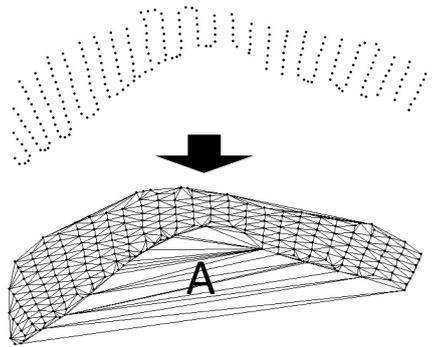


图3 离散水深点构建 TIN

需要注意的是, 由离散水深点构建的不规则三角网 TIN 不能直接用于内插生成规则格网 DEM。如图 3 所示, TIN 中所标记 A 区域属于陆域地表, 并不存在水深值。但 TIN 生成算法搜索三角接边点时无从判断 A 区域的地理属性, 构成了这种大块无效三角形。根据此 TIN 内插生成的 DEM 会将 A 区域的无效值也作为水下地形, 因此存在较大的误差。针对这类误差, 实际工作中通常会采用人工判断结合手动删除接边的方式来消除。然而自动化 DEM 处理模块需要一种自动的误差消除策略以实现无手动操作的批量处理。

本系统采用的误差消除手段为调用 ArcGIS 三维分析模块中 DelineateTinDataArea 方法对离散高程点构建的 TIN 进行自动修边裁剪。DelineateTinDataArea 方法的原理是给定参数值 maxEdgeLength, 将 TIN 中所有的至少有一条边大于 maxEdgeLength 的三角形去除, 不再参与后续内插运算。对航道测图来说, 水深点数据由船载测深仪器按照计划测深线以固定的时间间隔取样获得, 相邻水深点之间距离较为固定, 而 TIN 的错误接边往往存在于测量区域边界不同计划测深线的端点之间。调

用 DelineateTinDataArea 方法，首先需要计算统计测图各离散点的间距，再根据距离值分布情况，确定长边阈值作为 maxEdgeLength 参数，最终将超过该阈值边的三角删除，由此实现自动化 TIN 长边误差消除。图 4 中上半部分为经过自动长边消除后得到的三角网，可以看出大块无效区域已经删除。

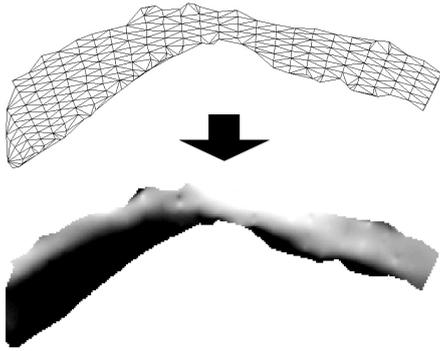


图 4 TIN 插值为规则格网 DEM

消除误差后的 TIN 经过内插运算可快速得到规则格网格式的 DEM。格网 (Grid) 是以规则排列的正方形网格来表示的地形表面，其数据结构简单，数据量较小，便于可视化，常说的水下 DEM 一般就是指规则格网格式的 DEM。ArcGIS 中提供的 Raster 类型数据正对应了规则格网格式数据，因此程序调用 ITINSurface 接口下的 QueryPixelBlock 方法自动将 TIN 内插为 Raster 格式的 DEM。调用 QueryPixelBlock 方法之前需要指定内插方法，可供选择的插值方法包括自然邻近插值和线性插值法两种。本系统采用的内插方法为自然邻近插值，这种插值方法采用了基于邻近区域参考点高程的加权方式得到待插入点的高程，其生成结果较线性插值更为平滑，适合航道水下地形应用。图 4 展示了由 TIN 到规则格网 DEM 的自动计算结果。需要指出的是，DEM 自动处理模块最终输出的规则格网 DEM 和用户输入水深值文本文件使用相同的名称，以使用户识别。

2.3 成果自动加工

成果自动加工模块对格网格式 DEM 进行颜色渲染，并叠加相关成图要素，以专题图形式输出以供可视化分析。航道水下 DEM 专题图能够详尽

地展示 DEM 所处区域范围内的航道要素，并辅以各种制图要素供用户判读。目前利用 ArcGIS 等平台辅助专题图制图需要用户的全程参与，存在效率低、大量重复作业等缺点^[8]。本系统中成果自动加工模块通过预先配置成图模板和渲染参数文件实现了自动 DEM 专题图生成。

航道测图具有十分明显的周期性特征，针对具体水道或者水道中的重点浅区，航道管理部门会按照一定的时间周期开展水下地形测量以掌握航道演变状况。对于同一区域不同时间的水下地形 DEM 专题图，许多航道要素及其位置都是相对固定不变的，例如岸线、锚地和整治建筑物等；对于一些成图要素，如专题图标题和采集时间等，也仅仅是元素值的变动，因此可以采用预先配置模板的方式实现成图自动化。成果自动加工模块预先配置存储了辖区所有水道及重点浅区 mxd 格式的成图模板文件，模板文件包含图名、比例尺信息、水深值颜色图例等制图要素，并叠加了图框范围内岸线码头、洲滩和锚地等较为固定的航道要素 Shapefile 文件。图 5 以土桥水道为例展示了一个标准的专题图 mxd 格式成图模板，图名中年月日信息由程序读取并动态填入，生成的水深值颜色图例也将自动嵌入图示的水深值图例区域。

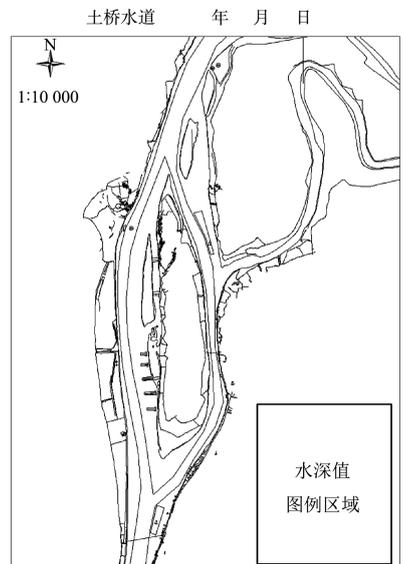


图 5 专题图成图模板

渲染参数文件以 XML 格式记录 DEM 的渲染方式供程序读取。模块调用 ArcGIS 中的分级渲染

类型操作函数对 DEM 进行分层设色，程序在执行 DEM 分级渲染前，需要先从 DEM 对应的渲染参数 XML 文档中读取分级数目、各级别水深范围值区间以及各级别的 RGB 颜色值信息。范围值区间和颜色的确定不仅需要考虑逐级色彩的渐变性以及适应用户的视觉习惯，同时还要考虑 DEM 所处水道维护尺度。模块运行时首先根据水深点描述信息匹配到相应的 mxd 成图模板并加载，再读入配置 XML 中的渲染参数，调用 rasterRender 接口对栅格 DEM 进行水深值渲染，然后在已经打开的成图模板中使用 addLayer 将渲染后的 DEM 叠加进来。根据输入文件名中水深描述信息和比例尺信息对 mxd 模板中标题和比例尺要素进行动态更新，最终形成 DEM 专题图。

3 系统部署及应用

现有长江航道水下数字高程模型自动化处理系统部署在航道内网云计算平台上，云计算平台以 IaaS 的形式在内网环境中提供虚拟机服务，灵活弹性地分配计算存储资源，通过远程连接云端的方式对虚拟机进行操作。本系统所使用的虚拟机实例配置为 Intel Xeon 双核 CPU，4GB 内存以及 500GB 硬盘存储空间，使用 Windows Server 2012 操作系统，并安装了 ArcGIS 相关运行环境。系统运行前需配置相关参数，包括系统监听目录地址、输出路径、成图模板库位置等信息，系统启动时会自动读取这些参数进行初始化。

长江航道水下数字高程模型自动化处理系统现在已经服务于日常航道浅区冲淤分析比较，水下地形演变动态可视化分析以及断面生成等应用。此外，现阶段正在进行的航道历史纸图数字化工程每日都会生产大量历史水深值文件，利用本系统可快速批量地建立历史航道图水下 DEM，进而开展长时间序列的水下地形分析。后期，在上游数字航道工程航道空间数据库建成后，这些 DEM 数据将进入航道空间数据库进行统一管理。图 6 是长江下游土桥全水道 2014 年 9 月 22 日 DEM 专题图，原始航道测图共包含 7 103 个水深

点，系统仅用时 21 s 即完成了从原始水深文件输入到最终结果的输出，且全过程无人工干预。图 7 为不同时相的福姜沙南水道中部浅区 DEM 专题图。用户批量输入 4 个时间点的水深值文件，系统便能够迅速识别并处理输出为多时相专题图用于水下地形时间序列分析，每幅图平均处理时间仅为 11 s。

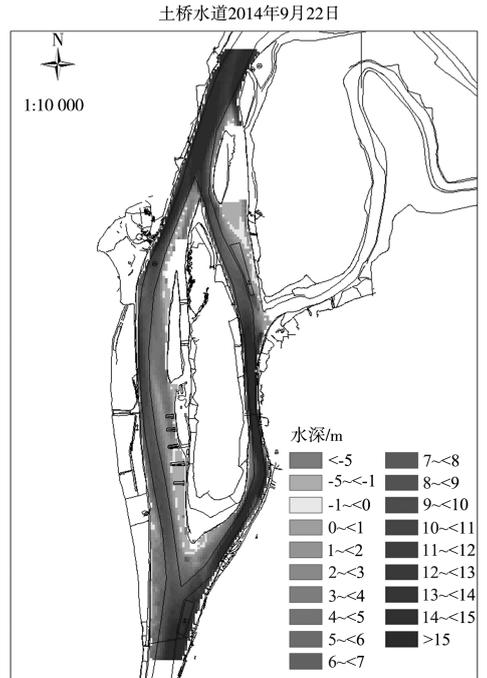
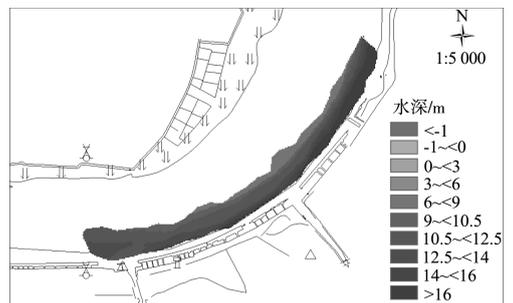
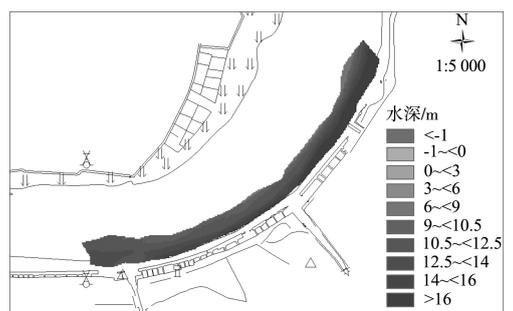


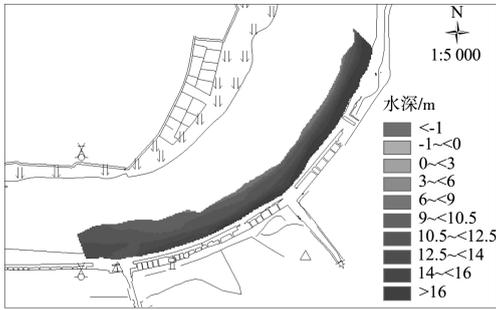
图 6 土桥水道 DEM 专题图



a) 2015-05-22



b) 2015-07-29



c) 2015-08-21



d) 2015-09-19

图 7 福南水道中部浅区多时相 DEM 专题图

4 结语

本文设计构建了一套长江航道水下 DEM 自动化处理系统，实现了从原始水深数据监测到规则格网 DEM 及其专题图的全过程自动化处理。系统将数据自动监测读取、DEM 自动处理和专题图自动加工等核心功能模块有机地结合，同时采用了 TIN 长边误差自动剔除技术避免了人工交互，实现了真正的自动化处理。本系统部署运行在航道内网云计算平台上，在 DEM 处理精度和效率等方

面均很好地满足了实际应用需求，有效减少人工操作，提高数据产品的时效性。下一步工作将继续对本系统进行完善，包括以 B/S 模式提供数据上传及获取服务，并支持多种格式的原始水深值输入。在长江数字航道空间数据库建成后，本系统将与其对接，为长江航道空间数据基础设施建设提供服务。

参考文献：

- [1] 何明究, 蔡忠亮. 面向电子航道图生产成果资料管理的电子航道图管理系统设计[J]. 水运工程, 2011(8): 28-32.
- [2] 宫彦萍, 杨品福. 基于 GIS 的内河航道通航状态监测监控技术[J]. 水运工程, 2013(1): 130-134.
- [3] 王杰, 王晓斌, 张咪妮. 基于 GIS 的港口腹地划分模型[J]. 水运工程, 2014(10): 91-96.
- [4] 李志林. 数字高程模型[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 2000.
- [5] 曾涛, 杨武年, 卢秀明, 等. 航道水下数字高程模型的构建方法[J]. 物探化探计算技术, 2011(1): 83-86.
- [6] 李党辉, 游涟. 航道数字高程模型建立中的分区技术研究[J]. 测绘信息与工程, 2005(5): 7-8.
- [7] 傅博, 陈雪洋. 基于数字高程模型的重庆市数字航道系统应用[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2011(5): 1 001-1 003.
- [8] 陈丽. 基于 ArcGIS Engine 的遥感影像专题图自动制作系统的设计与实现[J]. 电脑知识与技术, 2013(9): 2 204-2 208. (本文编辑 郭雪珍)

· 消 息 ·

四航局获 1 项发明专利

近日，经国家知识产权局评定，四航局研发的“一种在新吹填淤泥地基上快速修筑道路的方法”获得国家发明专利证书。

此专利解决了在新吹填淤泥场地快速修筑道路的技术难题，可有效减少工后沉降、降低工程造价，为在超软弱土地基快速修筑临时施工便道或永久性道路提供了一种新的技术。

http://en.ccccltd.cn/pub/ccccltd/xwzx/zgsdt/201604/t20160429_47438.html (2016-05-10)