

大型实景地理模型 3D 喷绘机器人及其喷绘方法优化

陈新伟¹ 刘景泰¹ 林森¹ 石涛¹ 陈阔¹ 魏青¹

摘要 通过对卫星遥感数据的处理和分析, 得到地理信息的实景模型数据. 在此基础上, 对实景地理模型喷绘机器人核心技术展开研究, 包括机构、控制系统设计、模型优化、图像补偿等, 最终实现高精度、真彩色实景地理模型的自动喷绘方法.

关键词 卫星遥感, 实景模型, 真彩色, 机器人

DOI 10.3724/SP.J.1004.2012.00023

An Actual Scene Geographic Model Printing Robot and Optimization Method

CHEN Xin-Wei¹ LIU Jing-Tai¹ LIN Sen¹ SHI Tao¹ CHEN Kuo¹ WEI Qing¹

Abstract This paper gets geographic information data of actual scene model by processing and analysis of the satellite remote sensing data. On this basis, the technology of actual scene geographic model printing robot is studied, including the mechanical and control system design of the robot, model optimization, image compensation and so on. Finally, a fast processing method of high precision and true color actual scene model is implemented.

Key words Satellite remote sensing, actual scene model, true color, robot

近年来, 我国的卫星遥感数据服务与应用能力得到了很大加强. 通过制定对地观测遥感数据标准与政策, 在保证国家安全的前提下, 形成了卫星遥感数据共享机制, 促进了我国自主卫星遥感数据的商业应用和国际市场服务^[1-3].

卫星遥感服务的快速发展也带动了地理模型行业的技术革新和产业升级, 数字电子沙盘就此兴起^[4].

由于受到模型上色工艺的限制, 数字电子沙盘的高还原度的颜色信息没有办法脱离计算机显示系统在实体地形模型上得到体现. 目前实体沙盘的制作工艺由原来的传统手工制作逐渐过渡到雕刻机配合手工的技术方案, 制作材料范围的扩展使得模型的精度和展示效果有了很大的提升^[5]. 但是在表达信息的颜色制作部分, 仍是简单地利用人工上色^[6]或机器喷漆^[7]来实现. 复杂丰富的卫星遥感信息无法在实体沙盘上再现, 成为当前实体沙盘模型向更高精度和彩色还原度方面发展的技术瓶颈.

为了解决以上问题, 本文设计并实现了一种实景地理沙盘喷绘机器人, 该系统结合平面喷绘与机器人控制, 以数字压电喷墨控制及三自由度直角坐

标机器人为核心, 集雕刻与三维喷绘技术于一体, 实现真彩色实景地理模型快速加工, 加工幅面达到 $2.5\text{ m} \times 1.2\text{ m} \times 0.6\text{ m}$. 同时, 对其喷绘方法, 包括三维喷绘误差分析、模型优化、颜色补偿等展开研究, 最后通过多个地区的地理模型实验验证了该机器人及喷绘方法的可行性.

1 卫星遥感数据分析及实景地理模型提取

首先, 介绍卫星遥感数据和高程模型数据获取.

制作实景地理模型, 需要两种数据: 地形的数字高程数据 (Digital elevation model, DEM) 以及表面颜色数据. 表面颜色数据与沙盘的用途息息相关, 在不同波段、不同领域都有不同的信息表达.

在本文中, 采用最为直观的遥感卫星影像作为颜色信息表达. 对于卫星遥感数据的分析研究在国内外都已经比较成熟^[2-3]. 但在 Google 推出地理信息服务之前, 数据为地理信息服务提供商所垄断, 价格昂贵. 本文介绍一种利用 Google 提供的 API 接口获取地理高程信息及卫星影像的方法, 这在实景地理模型的制作中可以节约成本, 易于推广.

1.1 Google earth 高程数据提取

Google earth 提供了 COM 接口, 开发人员可以使用支持 COM 的可视化编程语言工具进行开发.

提取地理高程数据思路如下: 调用 SetCameraParams 函数调整视场摄像机的方位和角度, 找到目标区域, 放缩至屏幕大小. 然后利用 Google 提供的 GetPointOnTerrainFromScreenCoords 函数对屏幕进行遍历, 提取各点的高度值. 如果在所需区域需要多屏显示, 则进行视场摄像机的转换与重新定

收稿日期 2011-04-28 录用日期 2011-07-28
Manuscript received April 28, 2011; accepted July 28, 2011
国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2009AA04Z222), 天津市自然科学基金 (09JCZDJC23700) 资助
Supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2009AA04Z222), Natural Science Foundation of Tianjin (09JCZDJC23700)
本文责任编辑 谭民
Recommended by Associate Editor TAN Min
1. 南开大学机器人与信息自动化研究所 天津 300071
1. Institute of Robotics and Automatic Information System, Nankai University, Tianjin 300071

位.

提取多屏高程数据算法分为以下三步:

步骤 1. 获取初始窗口的摄像机参数, 得出摄像机初始焦点的经纬度 ($center_lon$, $center_lat$), 等待图像清晰后, 利用提取高程值函数遍历取值.

步骤 2. 获取该屏幕四角的经纬度坐标 p_1 (左上角), p_2 (右上角), p_3 (右下角), p_4 (左下角), 定义:

$$\Delta x = 1/2 \times (p_2.Lon + p_3.Lon - p_4.Lon - p_1.Lon);$$

$$\Delta y = -1/2 \times (p_2.Lat - p_3.Lat + p_1.Lat - p_4.Lat);$$

则第 r 行, 第 c 列的窗口的焦点经纬度为 ($center_lon+c \times \Delta x$, $center_lat+r \times \Delta y$).

步骤 3. 以步骤 2 坐标计算邻近屏幕中心点, 重新设置视场摄像机, 重复步骤 1, 直至所有高程提取完毕.

1.2 Google map 影像数据提取

Google map 采用墨卡托 (Mercator) 投影方式, 将世界地图约束成一个正矩形, 然后再按二分之一比率的四叉树分割原理将整个世界地图分割, 共 20 级, 每一级的图片数量为 4^{n-1} ($n = 1, 2, \dots, 20$). 在 Google map 的数据库中, 为了便于检索, 图片按照金字塔形式储存并对应一个 URL 值, 通过向服务器发送 URL 服务器便会返回对应的图片.

具体实现方法如下:

1) 根据区域左上角、右下角的经纬度和缩放级别算出 x 方向和 y 方向的图片数量;

2) 算出每张图片左上角和右下角的位置, 得到其 URL 值, 并从服务器中获取图片;

3) 创建一幅容纳所有图片大小的图像, 把获得的图片按照位置复制到创建的新图像中得到拼接图像.

2 实景模型 3D 喷绘机器人机理研究

2.1 实景模型喷绘机器人机构及控制系统设计

传统的平面喷绘是无法在地形模型上进行喷墨的, 因为墨滴的体积非常小, 要求喷头与被喷物体的距离在一个严格的范围之内. 为此, 本文设计一种实景模型喷绘机器人, 该机器人能够控制 CMYK 四色喷头沿着模型的表面运动, 并控制喷头进行精确喷绘. 图 1 为其喷绘原理及机构设计图.

在实景模型喷绘机器人总体设计上, 采用三自由度直角坐标机器人作为基础平台. 该平台充分考虑到实景模型底部平整的特点, 同时能够满足模型喷绘的大幅面需求. 该机器人具有高可靠性、高速度、高精度的特点, 同时在扩展性及控制上也有着较

大的优势.

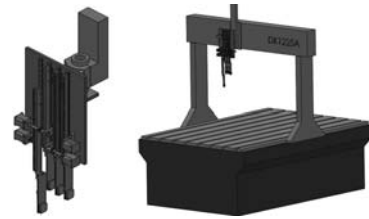


图 1 实景模型喷绘机器人原理及机械结构图

Fig. 1 Principle and mechanical structure of the actual scene geographic model printing robot

实景模型喷绘机器人作业包括模型雕刻与喷绘两个步骤. 在设计上, 利用直角坐标机器人可扩展性强的特点, 通过 Z 轴末端夹持机构的改造, 雕刻过程中 XYZ 与主轴联动, 喷绘过程中辅以 CMYK 四色喷头的 Z 轴, 形成 7 轴联动系统, 同时满足雕刻与喷绘的需求, 实现实景模型雕刻喷绘一体化功能.

实景模型喷绘机器人涵盖机器人控制及喷绘印刷两个领域, 其控制系统包括多轴运动控制系统及喷墨控制系统. 上位机通过以太网向多轴运动控制系统及喷墨控制系统发送命令, 运动控制系统与喷墨控制系统之间的同步通过位置触发信号来实现, 位置触发的精度为单位墨滴的直径, 并由三维负压供墨系统实现稳定的墨水供应.

实景模型喷绘机器人如图 2 所示, 由 3 个交流伺服电机驱动, 四色喷头运动装置由 4 个步进电机驱动. 运动控制系统的实现以 PMAC (Programmable multi-axes controller) 多轴运动控制器为核心, 与上位机的通讯通过网络实现, 在核心板的基础上增加 4 轴通道扩展卡, 使其满足 8 轴协同控制的需求, 实现模型雕刻与喷绘控制系统切换. 7 轴码盘以及限位信号反馈到 PMAC 中, 实现基于位置反馈的闭环控制系统. 上位机控制软件通过计算实景模型的曲面特征, 确定喷头的角度与运动轨迹, 并将该轨迹离散化, 按系统控制周期将各轴的当前目标点发送至 PMAC 执行, 实现 7 轴运动协调控制.



图 2 实景模型喷绘机器人实体图

Fig. 2 Physical figure of the actual scene geographic model printing robot

2.2 3D 喷绘误差分析及模型数据优化

通过模型喷绘的实验发现, 在地理模型高度落差比较大的地方, 会出现颜色不均、撒墨现象, 影响整体效果. 为此, 利用杭州凡江科技公司研制的墨滴观测仪, 对墨滴在实景复杂曲面的着色过程进行观察, 如图 3 所示, 得到颜色失真的原因, 并建立起失真模型. 式 (1) 为墨滴偏离角度的概率分布函数^[8-9].

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{(2\sigma)^2}} \quad (1)$$

引起喷绘失真原因归结为两点: 喷绘点所在平面的倾斜角 α 以及喷绘点的喷墨距离 h , 如图 4 所示. 在喷绘过程中, 墨滴是否能够落在理想落点将对喷绘的效果造成很大影响, 表 1 为不同喷绘距离情况下, 利用模型 (1) 计算得到的墨滴落在理想落点的概率. 数据分析表明, 为保证三维喷绘的效果, 倾斜角 α 的角度应不大于 70 度, 喷墨平均距离 h 不应超过 10 mm.

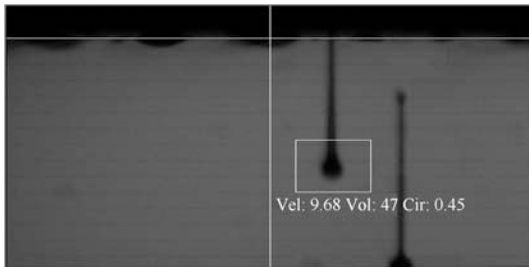


图 3 墨滴下落速度、体积、形态分析
Fig. 3 Falling speed, size, and shape analysis of ink droplet

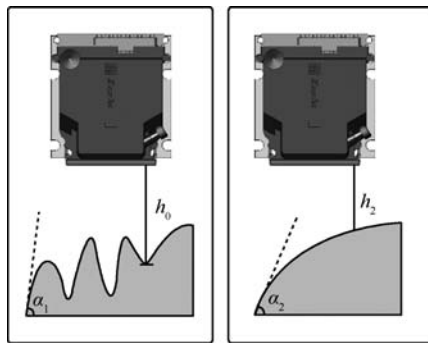


图 4 3D 喷绘误差示意图
Fig. 4 Error diagram of 3D printing

以上两个限制条件用于判定地理模型是否适合三维喷绘. 本文设计一种模型数据优化算法, 使实景地理模型喷绘适应更多的应用场合. 优化步骤分为两步:

1) 对地理高程模型进行滤波, 滤波的目标是在减小平均喷绘距离 (小于 10 mm) 的同时, 保证与

高程模型的误差均值尽量小.

2) 计算特定模型条件下, 不同的喷绘角度对喷绘距离的影响, 选取距离值最小的角度作为该模型的喷头喷绘角度.

通过比较几种常见的滤波算法, 包括多阶小波变换、单线性取平均、双线性取平均以及低通滤波等, 选取傅里叶变换结合巴特沃斯低通滤波器的方法进行模型数据优化, 可以有效地减小三维喷绘的平均距离, 增加墨滴落在理想区域的概率, 同时与原始模型的误差均值较小, 表 2 为各种滤波算法对喷绘误差的影响.

表 1 喷绘距离与墨滴理想落点关系
Table 1 Relationship between printing distance and ideal placement of ink droplet

喷绘距离 H (mm)	墨滴理想概率 P (%)
1	99.9
2	99.4
3	93.3
5	72.9
8	50.9
10	41.8
15	28.6

表 2 优化算法比较 (mm)

Table 2 Comparison of optimization algorithms (mm)

	平均距离	最大距离	误差均值
原始模型	14.1	84	0
小波变换 (1 阶)	12.3	62	7.1
小波变换 (2 阶)	11.3	60	11.9
小波变换 (3 阶)	9.6	52	16.7
均值滤波	12.4	77	1.1
中值滤波	12.2	77	0.8
巴特沃斯滤波 (截止频率 20)	8.3	41	3.1
巴特沃斯滤波 (截止频率 15)	7.5	33	4.0
巴特沃斯滤波 (截止频率 5)	6.4	17	5.8

巴特沃斯的变换函数如式 (2) 所示:

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + \left[\frac{D(u, v)}{D_0} \right]^{2n}} \quad (2)$$

其中, D_0 表示截止频率, n 为滤波器的阶数, $D(u, v) = \sqrt{u^2 + v^2}$. 算法流程如图 5 所示, 包括傅里叶变换、巴特沃斯滤波、反傅里叶变换等几个步骤.

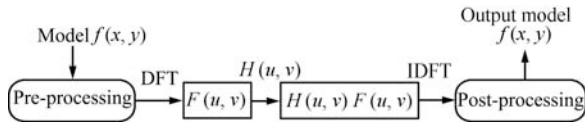


图 5 巴特沃斯滤波流程图
Fig. 5 Flow chart of Butterworth filter

图 6 和图 7 为原始数据以及截止频率为 15 的滤波器处理后的模型及等高线视图. 从图中可以看出, 经过处理后, 模型较为平滑且等高线分布也较为稀疏. 表 3 为两者的喷墨距离及墨滴理想分布概率比较, 通过调整不同的截止频率可以获得所需要的符合喷绘参数需求的模型数据.

为了进一步减小喷墨头与模型之间的距离, 在机械设计上, 增加喷头在 XY 平面上的旋转自由度, 旋转刻度为 15 度. 对优化后的模型, 结合喷头的物理结构, 计算其等高线的朝向, 得到模型的总体朝向角, 选取离该朝向角最为接近的喷头旋转角度, 使特定模型的喷绘距离降至最小, 获得最好的喷绘效果, 具体的角度选择算法见文献 [10].

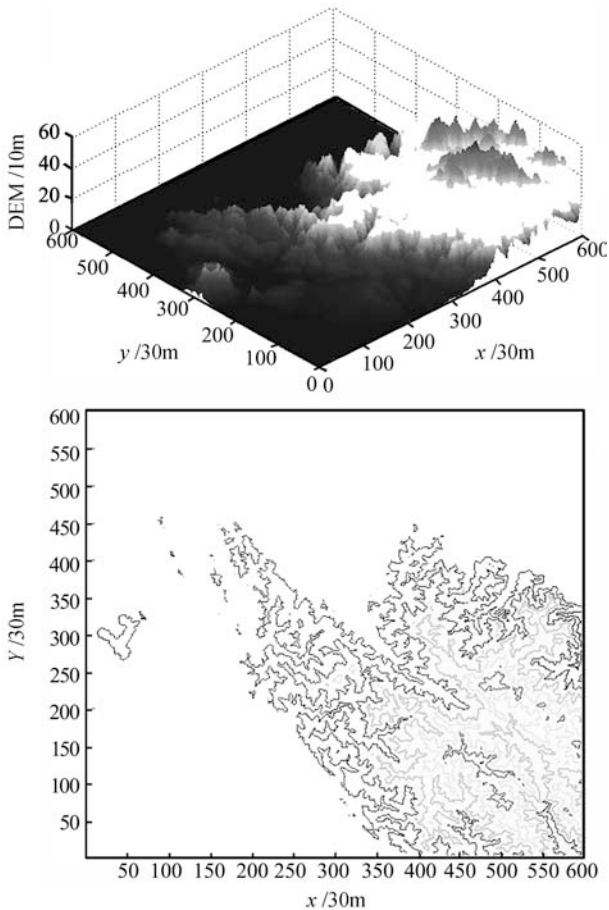


图 6 原始数据模型及等高线分布
Fig. 6 The original data model and the distribution of contour

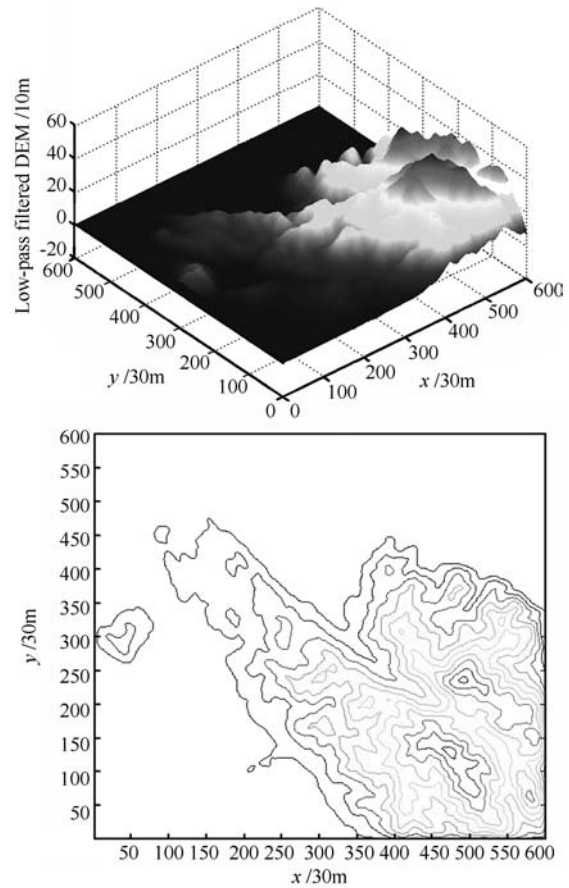


图 7 截止频率为 15 的低通滤波后数据模型及等高线分布
Fig. 7 Low-pass filtered data model and the distribution of contour ($f_c = 15$)

表 3 原始数据及优化数据参数对比
Table 3 Comparison between the original data and the optimized data

	喷墨平均距离 (mm)	喷墨最大距离 (mm)	理想墨滴概率 (%)
原始数据	14.05	84	56.8
滤波数据	8.47	33	73.5

图 8 为某地理模型在喷头不同角度下喷绘的平均误差分布图, 通过计算得到最为合适的喷头角度为 47.6 度, 对该模型喷绘采用 45 度旋转角将使得喷绘距离降至最小.

2.3 模型误差分析及图像补偿算法

上节提出的模型优化算法, 通过滤波算法丢失了一些原模型的细节信息, 在高度上有一定的误差. 为了使实景模型保持更好的还原度, 下面提出一种图像补偿算法, 利用图像颜色、明暗的变换来弥补此类误差.

假定原始 DEM 数据是 F , 经过滤波后, 得到雕刻使用的 DEM 数据 G . 两者的误差定义为 D , 有

$D(i, j) = F(i, j) - G(i, j)$. 黑色表示 $D < 0$, 灰色表示 $D = 0$, 浅灰色代表 $D > 0$, 如图 9 所示. 图像补偿的目的是为了表达由于模型高程精度下降导致的部分丢失数据, 比如一些陡峭的山脊或山谷地形. 通过观察卫星影像发现, 在 $D > 0$ 的区域, 多为高度比周边高, 在图像上显现为白色; 相反, 在 $D < 0$ 的区域, 多为褐黑色. 为此, 在补偿过程中, 根据 $|D|$ 的大小进行图像亮度对比的增强, 如图 10 所示.

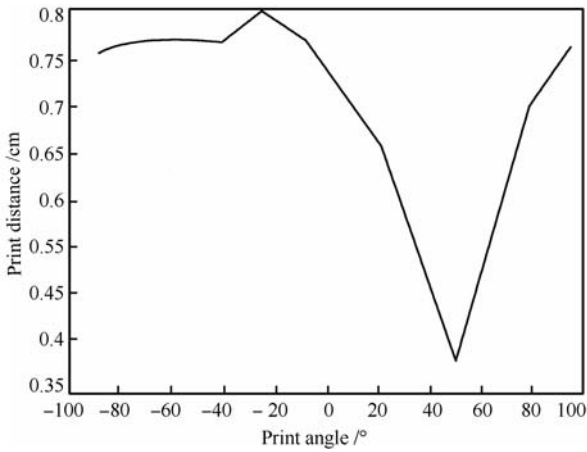


图 8 某地理模型喷绘平均距离与喷墨头偏角关系

Fig. 8 Relationship between average printing distance and nozzle angle of one geographic model

改变像素亮度理论上应先将图像从 RGB 颜色空间转换到 HSV 颜色空间, 其中, H (Hue) 代表色调, S (Saturation) 代表饱和度, V (Value) 代表亮度, 再根据需要进行转换. 我们的目标是改变 V , 保留 H 和 S . 通过分析 HSV 与 RGB 值的转换算法可知, 只要等比例扩大或缩小 R, G, B 三个分量的灰度值就可以只改变 V 而保持 H 和 S , 具体算法如下:

设点 (i, j) 原先的颜色为 $R(i, j), G(i, j), B(i, j)$, 新的颜色为 $R'(i, j), G'(i, j), B'(i, j)$.

1) 归一化 $D(i, j)$, 得到 $|D'(i, j)|$, 且 $|D'(i, j)| < 1$;

2) 对于图像任一点,

$$R'(i, j) = R(i, j) \times (1 + D'(i, j) \times x)$$

$$G'(i, j) = G(i, j) \times (1 + D'(i, j) \times x)$$

$$B'(i, j) = B(i, j) \times (1 + D'(i, j) \times x)$$

其中, x 为比例系数, 其确定方法结合原始图像的直方图分布, 确保新图像 RGB 值不会产生越界情况. 在本实验采用的图片中, x 取 0.4 达到较好的效果, 如图 11 和图 12 所示. 左图为原始图像, 右图为补偿后的图像, 从图 12 结合图 9 可以看出, 图像变化大的地方恰好是高程误差大的地方, 其细节和立体效果有较为明显的改进.

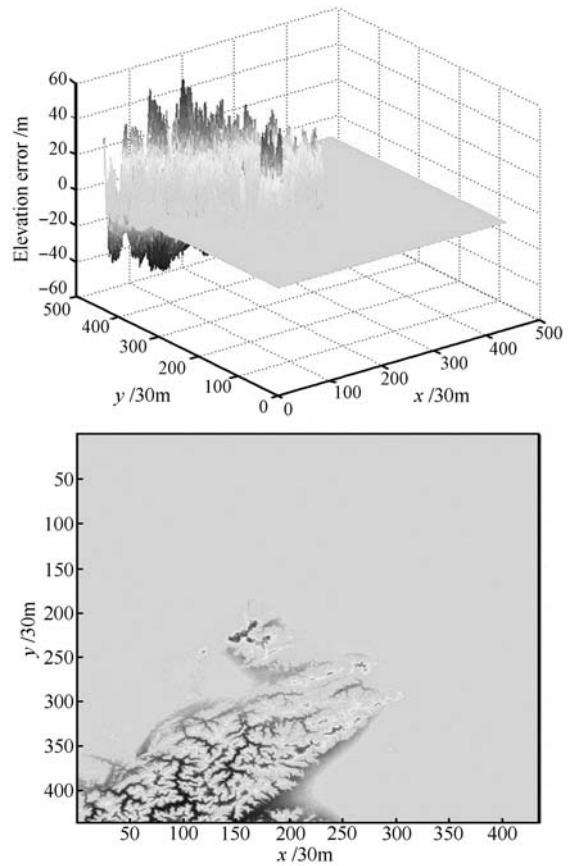


图 9 模型高程误差示意图

Fig. 9 Elevation error diagram of model

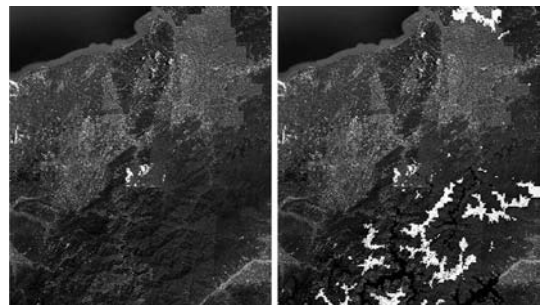


图 10 图像补偿原理示意图

Fig. 10 Principle diagram of image compensation

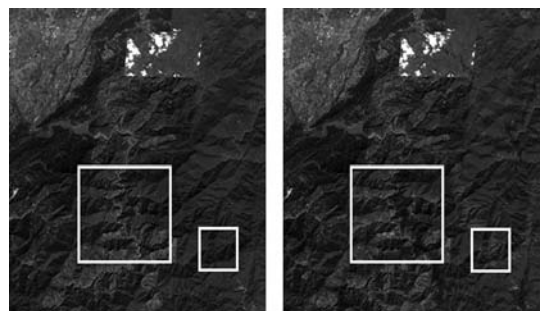


图 11 图像补偿前后对比

Fig. 11 Comparison of images before and after compensation

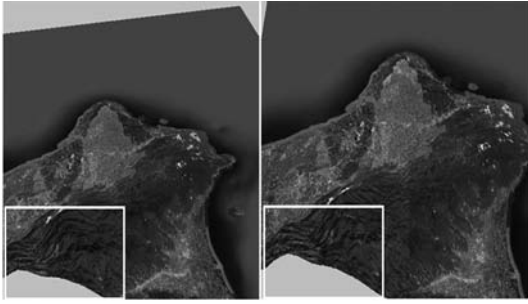


图 12 三维仿真示意图

Fig. 12 3D simulation diagram

3 实景地理模型喷绘流程及实验结果

3.1 实景地理模型雕刻及涂层处理

有关模型雕刻的研究较为成熟, 并已应用到相关的行业中. 但是地理模型制作有其特殊性: 幅面大、高度落差大, 同时对精度的要求没有传统的浮雕作品高. 传统的雕刻方法 (如行切法、环切法) 存在雕刻时间过长的缺点, 为此, 在本文中, 受到小波变换的原始点云的多分辨率简化方法的启发, 提出一种基于多分辨率简化模型的点云曲面加工工艺规划, 具体的算法见文献 [11–13], 图 13 为该雕刻算法流程图, 该算法不仅缩减了数据规模, 消除冗余数据, 而且保持模型的整体形状, 更为高效. 得到雕刻后的地理模型后, 在喷绘之前, 还需要进行两道工序处理: 底色处理及吸墨涂层处理. 底色处理是指在喷绘之前, 需要把模型表面处理成光滑的白色, CMYK 四色喷绘后才能把图片原有的颜色高还原度地表现出来. 吸墨涂层是为了使墨水表面喷绘后不流动、不扩散, 在白色底色上喷涂的一层透明胶体, 在彩色的鲜艳度、饱和度、细部层次、清晰度、色彩还原性等都能达到最佳水平. 使用到的成分包括: 轻质碳酸钙、二氧化硅、PVA、分散剂、消泡剂、固色剂、增白剂以及其他助剂适量. 图 14 为地理模型雕刻处理后的图片.

3.2 实景地理模型喷绘

经过涂布工艺处理后的地理模型, 即可进行实景地理模型喷绘, 其中包括图像处理、格式转换、最后通过控制机器人以及 FPGA (Field-programmable gate array) 喷墨控制器分别进行 CMYK 四色喷绘等, 有以下 6 个步骤, 图 15 为模型喷绘流程图.

1) 采用二次线性插值算法对图像进行插值变换.

2) 针对插值后的图像数据, 进行 CMYK 颜色空间的分色, 分色过程中采用坡度补偿算法实现总墨量平衡.

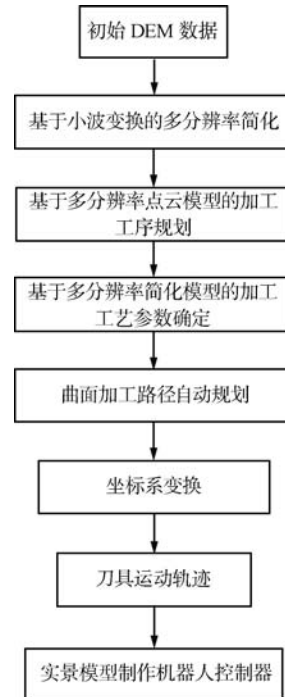


图 13 多分辨率简化模型的点云曲面加工工艺规划
Fig. 13 Point surface machining process planning according to multi-resolution simplified model



图 14 地理模型雕刻图片

Fig. 14 Engraved geographic model

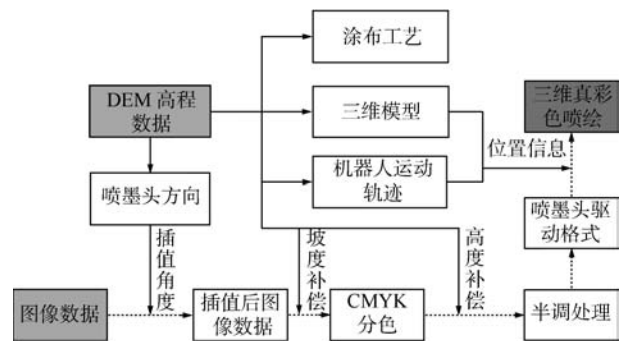


图 15 三维喷绘作业流程图

Fig. 15 Flow chart of 3D printing process

3) 对分色数据进行基于曲面特征的三维喷绘半色调处理^[14]. 对于每个颜色点信息, 在 Floyd-

Steinberg 半色调算法的基础上, 引进 DEM 高程数据, 进行高度及喷绘距离补偿。

4) 根据喷墨头的驱动方式, 将四色图像数据拆分成以 64 行为单位的分块图像, 同时实现图像数据从 byte 到 bit 表示方式的转换. 将得到的喷墨头驱动格式数据通过网络储存到喷墨控制系统的存储设备中。

5) 机器人通过标定四色喷墨头在地理模型中的位置, 根据 DEM 高程数据生成三维喷绘过程的机器人运动轨迹. 机器人夹持喷墨头沿着模型运动, 实时地将位置信息反馈至喷墨控制系统, 触发喷墨控制系统中断, 执行喷墨动作。

6) CMYK 四色喷墨头紧贴模型完成所有喷墨动作, 实现实景地理模型喷绘。

3.3 实验结果

通过以上章节, 较为系统地介绍了实景地理模型的制作过程, 包括数据获取、机器人设计、制作步骤等. 在此基础上, 就深圳、钓鱼岛及台湾三维真彩色实景地理模型做一展示, 如图 16 所示。



图 16 深圳、钓鱼岛及台湾模型展示图

Fig. 16 Processed models of Shenzhen, Diaoyu Islands, and Taiwan

模型的最大幅面达到 $800\text{ mm} \times 2000\text{ mm}$, 最

大落差达 120 mm , 从图 16 中可以看出, 实景地理模型的细节通过 3D 彩色喷绘很好地表现出来, 其精度是传统的人工上色模型所不能够达到的. 同时, 机器的精度保证在生产大面积模型过程中, 可以采用多块拼接技术, 如图中的钓鱼岛模型所示。

4 总结

本文从实景地理模型制作背景出发, 提出并设计一种能用于制作大型实景地理模型的 3D 喷绘机器人系统, 并对模型喷绘的机理展开研究, 提出模型优化算法. 该方法可以有效地提高实体沙盘的精度和颜色信息表达手段, 同时实现了全自动加工, 是当前模型制作领域的一个突破, 极具实用性, 能够广泛运用于相关行业。

References

- 1 He Guo-Jin, Li Ke-Lu, Hu De-Yong, Cong Bo-Lin, Zhang Wen-Hua. Information fusion of multisensor satellite remote sensing data: theory, methodology and experiment. *Journal of Image and Graphics*, 1999, 4(9): 744–750 (何国金, 李克鲁, 胡德永, 从柏林, 张雯华. 多卫星遥感数据的信息融合: 理论, 方法和实践. 中国图象图形学报, 1999, 4(9): 744–750)
- 2 Yang Qing-Hua, Qi Jian-Wei, Sun Yong-Jun. The application of high resolution satellite remotely sensed data to landuse dynamic monitoring. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2001(4): 20–26 (杨清华, 齐建伟, 孙永军. 高分辨率卫星遥感数据在土地利用动态监测中的应用研究. 国土资源遥感, 2001(4): 20–26)
- 3 Cai Ai-Min, Zha Liang-Song. Research on the method of GIS data sharing. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science)*, 2005, 28(2): 226–229 (蔡爱民, 查良松. GIS 数据共享机制研究. 安徽师范大学学报 (自然科学版), 2005, 28(2): 226–229)
- 4 Zhu Chu-Hong, Ou Wei-Lin, Wen Xiao-Yue. Implementation of modeling 3D electric sand table. *Geospatial Information*, 2009, 7(2): 112–115 (朱楚宏, 欧为林, 文小岳. 三维电子沙盘构建方法与实现. 地理空间信息, 2009, 7(2): 112–115)
- 5 Yang Hong-Wei, Liu Yong, Xu Min, Jiang Zhi-Yong, Zhang Xing-Yu. Design and making of the sand table models. *Geospatial Information*, 2010, 8(6): 95–97 (杨红卫, 刘勇, 许民, 蒋志勇, 张兴余. 沙盘模型设计与实践. 地理空间信息, 2010, 8(6): 95–97)
- 6 付华林. 再谈如何给化石模型上色. *化石*, 1999(3): 25–26
- 7 Zhang Yong-Gui. Study on Some Key Techniques for Spray-Painting Robot [Ph.D. dissertation], Xi'an University of Technology, China, 2008 (张永贵. 喷漆机器人若干关键技术研究 [博士学位论文], 西安理工大学, 中国, 2008)
- 8 Chen X W, Liu J T, Sun L, Wang H P, Lin S, Shi T. Ink drop and color distortion modeling in three dimensional printing. In: *Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Jinan, China: IEEE, 2010. 335–340
- 9 Chen Xin-Wei. Three-Dimensional Printing Robot System [Master dissertation], Nankai University, China, 2009 (陈新伟. 三维喷绘机器人喷墨机理研究 [硕士学位论文], 南开大学, 中国, 2009)

- 10 Chen Xin-Wei, Liu Jing-Tai, Shi Tao, Qian Hai-Li, Chen Kuo, Wei Qing. An error statistical and angle optimization method in 3D printing. In: Proceedings of the Chinese Control and Decision Conference. Mianyang, China: IEEE, 2011. 1345–1350
(陈新伟, 刘景泰, 石涛, 钱海力, 陈阔, 魏青. 三维喷绘误差统计及角度优化算法. 中国控制与决策学术年会. 绵阳, 中国: IEEE, 2011. 1345–1350)
- 11 Sun L, Chen X W, Liu J T, Liu Z, Niu X J. 3D terrain model approach by an industrial robot. In: Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. Chongqing, China: IEEE, 2008. 2345–2349
- 12 Niu X J, Liu J T, Sun L, Liu Z, Chen X W. Robot 3D sculpturing based on extracted NURBS. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Sanya, China: IEEE, 2007. 1936–1941
- 13 Niu X J, Liu J T, Sun L. Multi-resolution analysis of grid point clouds based on wavelet transform. In: Proceedings of the 27th Chinese Control Conference. Kunming, China: IEEE, 2008. 341–345
- 14 Liu Jing-Tai, Chen Xin-Wei, Sun Lei, Liu Zheng, Lin Sen, Shi Tao. Three dimensional halftoning algorithm based on surface features. *Journal of High Technology Letters*, 2011, **21**(2): 215–221
(刘景泰, 陈新伟, 孙雷, 刘征, 林森, 石涛. 基于曲面特征的三维半色调处理算法. 高技术通讯, 2011, **21**(2): 215–221)



陈新伟 南开大学机器人与信息自动化研究所博士研究生. 主要研究方向为智能机器人技术.
E-mail: chenxw@robot.nankai.edu.cn
(**CHEN Xin-Wei** Ph.D. candidate at the Institute of Robotics and Automatic Information System, Nankai University. His main research interest is intelligent robotic technology.)



刘景泰 南开大学机器人与信息自动化研究所教授. 主要研究方向为机器人技术, 计算机应用与信息自动化系统, 智能科学与技术. 本文通信作者.
E-mail: liujt@robot.nankai.edu.cn
(**LIU Jing-Tai** Professor at the Institute of Robotics and Automatic Information System, Nankai University. His research interest covers robotic technology, computer

applications, automatic information system, and intelligence science and technology. Corresponding author of this paper.)



robotic technology.)

林森 南开大学机器人与信息自动化研究所硕士研究生. 主要研究方向为智能机器人技术.
E-mail: lins@robot.nankai.edu.cn
(**LIN Sen** Master student at the Institute of Robotics and Automatic Information System, Nankai University. His main research interest is intelligent



robotic technology.)

石涛 南开大学机器人与信息自动化研究所硕士研究生. 主要研究方向为智能机器人技术.
E-mail: shitao@robot.nankai.edu.cn
(**SHI Tao** Master student at the Institute of Robotics and Automatic Information System, Nankai University. His main research interest is intelligent



陈阔 南开大学自动化与智能科学系学生. 主要研究方向为智能科学与技术.
E-mail: chenkuo@mail.nankai.edu.cn
(**CHEN Kuo** Bachelor student in the Department of Automation and Intelligence Science, Nankai University. His research interest covers intelligence science and technology.)



魏青 南开大学自动化与智能科学系学生. 主要研究方向为智能科学与技术.
E-mail: weiqing@mail.nankai.edu.cn
(**WEI Qing** Bachelor student in the Department of Automation and Intelligence Science, Nankai University. His research interest covers intelligence science and technology.)