

相控阵三维声纳数据离线可视化处理系统

李长辉, 陈耀武, 刘清文

(浙江大学数字技术及仪器研究所, 杭州 310027)

摘要: 设计并实现一种相控阵三维声纳图像的离线数据处理系统, 并进行可视化建模。系统中精确配准采用最近点迭代配准, 结合外周点消除法, 通过拟牛顿进行最优化。拼接融合及多帧再重建采用多级分辨率, 同时支持低精度的快速显示和高精度的精细显示。测试结果证明, 该系统能较好地实现相控阵三维摄像声纳图像的处理及可视化。

关键词: 相控阵三维声纳; 单帧重建; 配准; 拼接; 可视化工具箱; 可视化

Off-line Visualization Processing System for Phased Array 3D Sonar Data

LI Chang-hui, CHEN Yao-wu, LIU Qing-wen

(Institute of Digital Technology and Instrument, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

【Abstract】 In this paper, an off-line processing and visualization system of 3D phased array sonar data is designed. The system consists of modules of sonar data parsing, single-frame reconstruction, accurate registration, mosaicing and multi-frame reconstruction. The accurate registration module which includes Iterated Closest Point(ICP) algorithm with robust outlier rejection and Quasi-newton optimization, improves the precision of registration. The mosaicing and multi-frame reconstruction module reconstruct a range of frames by multilevel resolutions, which supports rapid display at low resolutions and also precise display for details at high resolutions. Test results show that this system can successfully complete the processing and visualization of phased array sonar data.

【Key words】 phased array 3D sonar; single-frame reconstruction; registration; mosaic; Visualization Toolkit(VTK); visualization

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.17.080

1 概述

作为水下探测的一个重要分支, 水下声纳成像技术在水下探测领域发挥着不可替代的作用, 侧扫声纳、多波束测深声纳、测深侧扫声纳、合成孔径声纳等声纳技术不断涌现。相控阵三维声学摄像声纳作为三维图像声纳, 能够获得距离、水平、垂直三维空间的目标信息, 与目前通用的图像声纳相比具有图像清晰、可视性好等特点。为适应各种水下潜器的水下作业需要, 必须同时获得距离、角度和深度三维信息的分辨能力。但由于技术难度较大, 目前只有少数国家开展了水下三维成像系统的研究工作, 国际上比较先进的是挪威的 Echoscope 三维成像声纳系列。因此, 研究相控阵三维声学摄像声纳处理系统具有重要的工程实用价值和理论指导意义。

本文设计并实现了相控阵三维声纳图像的离线数据处理系统, 并进行可视化显示建模。该处理系统包括三维声纳图像数据读取、单帧多层重建、全局配准、拼接融合与多帧再重建等。

2 系统总体功能结构

相控阵三维声纳图像离线可视化处理系统通过读取在线存储的 GPS 和姿态信息, 对原始声纳数据进行再处理, 以弥补在线处理因为实时性要求而损失的配准和拼接融合精度。系统功能结构如图 1 所示。

相控阵三维声纳装置根据 48×48 个传感器进行实时电子聚焦形成波束, 并通过网络将数据发送至 PC 端, 当完整的一帧数据上传完毕时, PC 同时从 2 个串口分别读取全球定位系统(Global Positioning System, GPS)位移信息和船体姿态信

息, 将其和单帧三维数据一起存储在磁盘文件中, 以供离线处理。

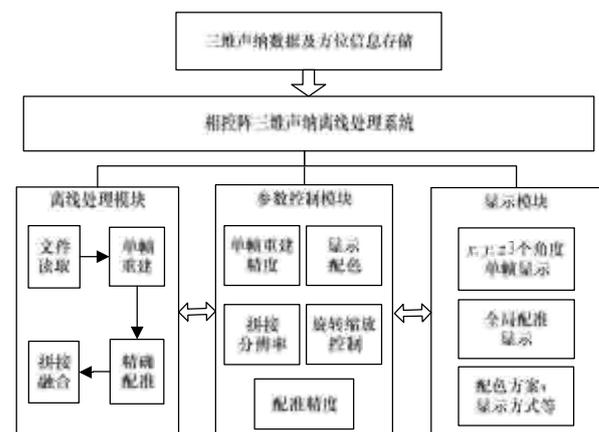


图 1 离线可视化处理系统功能结构

离线处理系统从磁盘读取数据, 并进行解析, 经过单帧重建、全局配准以及拼接融合后进行多帧再重建, 以进行三维可视化。在参数控制模块中, 可以对单帧重建的精度, 配

基金项目: 国家“863”计划海洋技术重大专项基金资助项目(2006 AA09Z109)

作者简介: 李长辉(1984—), 男, 硕士研究生, 主研方向: 可视化技术, 嵌入式系统; 陈耀武, 教授、博士生导师; 刘清文, 硕士研究生

收稿日期: 2011-03-10 **E-mail:** sheers@126.com

准精度以及拼接融合的分辨率进行设置。显示模块可以对当前正处理的图像进行不同角度的三维显示、配色，显示方式可以是图像的点云、网格或面片。

该系统与在线处理系统的区别为：由于离线系统可以不考虑实时性，而更注重精确性，故采用 ICP 结合外围点去除法进行全局配准，以提高配准精度。同时离线拼接融合采用多级分辨率，以满足拼接后大范围图像的快速显示和对局部精细显示的要求。由于采用全局配准，需要对所有帧处理完后，拼接窗口才会显示最后的处理结果。

3 数据处理流程

要实现对三维声纳数据全景图的可视化，需要读取三维声纳数据，进行单帧多层重建、精确配准，拼接融合以及多帧再重建。具体流程如图 2 所示。

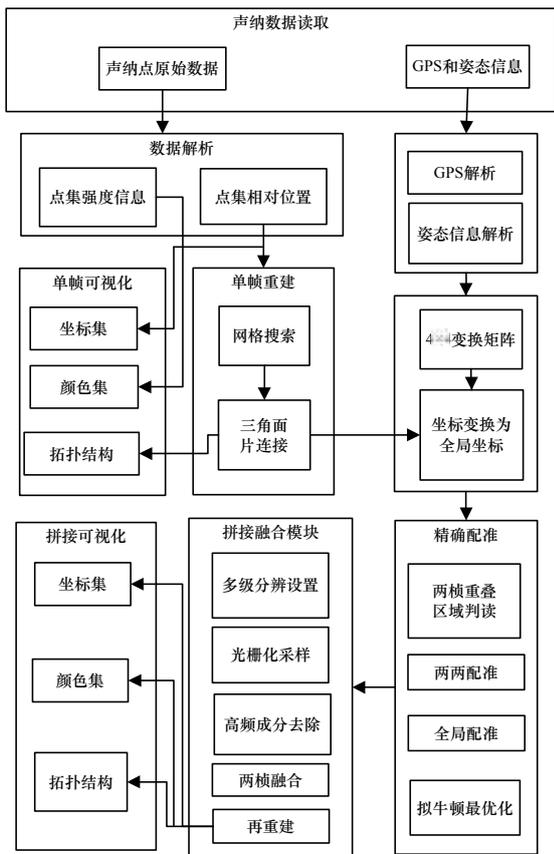


图 2 三维声纳数据处理流程

3.1 三维声纳图像数据读取与解析

三维声纳数据读取模块，包括 GPS 坐标信息读取、姿态信息读取、声纳点数据读取和解析，并将球面坐标转换为 x, y, z 三维坐标。

3.2 单帧多层重建模块

单帧重建模块包括网格搜索和三角面片连接。网格搜索确定三维声纳点所在的扫描波束和层数以及反射强度信息，将每个扫描波束上的点按照层数顺序进行排序，然后按预设边长大小的网格搜索相邻非空点。三角面片连接，将搜索到的非空点按顺序依次连接成三角面片，便于后续光栅化插值处理。

3.3 精确配准模块

一般配准的方法是将依次生成的两帧图像进行配准直到所有的图像都配准完毕，其优点是速度快，适合实时处理，但缺点也很明显：由于配准误差的积累，越后面配准的图像，

其误差也越来越大。本模块对配准采用了全局优化处理，不仅利用时间序列相邻的两帧图像之间的配准信息，还包括时间序列不相邻但仍然有很大重叠部分的两帧的配准信息，使配准误差均衡化，其过程包括两帧重叠区域判断、两两配准、全局配准以及最优化处理。

3.3.1 两帧重叠区域判断

将单帧重建后的所有图片两两配对组合，通过获取两帧的边界坐标信息，判断两帧图片之间是否有重叠部分，并对有重叠区域的配对进行光栅化插值，记录融合点的个数，以判断重叠区域的大小。对于没有重叠区域或重叠区域小于阈值的配对，它们之间的配准矩阵设为 4×4 单位矩阵。

3.3.2 两两配准

若有 2 个在不同的参考系中的三维点集 X 和 Y ，两两配准的目标就是找到一个变换矩阵作用于 Y 后，能使这两个点集之间的距离最小。用数学公式表示为：

$$\min_{R,t} \sum_{i=1}^N \|x_i - (Ry_i + t)\|^2 \tag{1}$$

其中， R 为 3×3 旋转矩阵； t 为 3×1 平移向量； i 为点集 X 和 Y 中点的下标。当点集的关系未知时，通常可以用邻近点迭代 (Iterated Closest Point, ICP) 算法配准^[1]。通常，当一个点集是另一个点集的子集时，ICP 能给出非常精确的配准结果，但若只有部分重叠，则配准精度会降低。因而针对部分重叠的点集，本系统采用了一种 ICP 配合外围点消除法的算法^[2]，其基本思想是：用 $X/4$ ^[3] 设定动态阈值，消除在这个阈值范围外的点，以获取较为精确的两帧配准矩阵。

3.3.3 全局配准

通过两两配准，可以得到一帧的点集 j 到另一帧点集 i 的配准矩阵 $M^{i,j}$ 。若以第 1 帧为参考帧，由于 $M^{i,i-1}, M^{i-1,i-2}, \dots, M^{2,1}$ 均可通过两两配准求得，因此可以计算全局配准矩阵 M^i 为：

$$M^i = \prod_{j=2}^i M^{j,j-1} \tag{2}$$

这样第 i 帧就可以配准到第 1 帧 (参考帧)。但是由于连乘带来了配准误差的累积，将使得在配准末端的图像产生较大的误差，因此需要全局优化处理。

3.3.4 全局优化处理

全局最优化的目标就是充分利用两两配对的配准矩阵 (包括时间序列相邻的和不相邻的配对，只要有足够大的重叠区域)，得到相对于参考帧的全局优化配准矩阵 M^i 。第 j 帧到参考帧的配准矩阵可以拆开成两部分：

$$\begin{cases} R^j = R^i R^{i,j} \\ t^j = R^i t^{i,j} + t^i \end{cases} \tag{3}$$

为使配准误差均衡的分布在所有的全局配准矩阵当中，设定一个非线性的目标函数^[4]：

$$\min_{i,j} \sum (\text{angle}(R^i R^{i,j} (R^j)^T) + \|R^i t^{i,j} + t^i - t^j\|) \tag{4}$$

其中， $\text{angle}()$ 的输入为旋转矩阵并返回一个绕合适的坐标的旋转角度。要求解式 (4)，可以利用四元素表示法^[5]，该方法良好的数学性质使其非常适合表示旋转和平移。通过拟牛顿最优化后可以得到最后的解。目标函数的初值可以通过式 (2) 计算得到。

3.4 拼接融合与多帧再重建

拼接融合模块包括多级分辨率设置、光栅化采样、高频成分去除、两帧融合以及再重建与可视化。

多级分辨率设置是指根据当前处理的所有帧总的坐标范

围, 设置从低到高的分辨率, 保证低精度快速显示和高精度精细显示的要求。光栅化采样是依次根据所设分辨率, 对 x, y, z 3 个方向进行线性插值采样处理, 得到各个采样点的位置、方向、权重等信息。高频成分去除是对同一帧中, 方向相反, 且在同一条光栅网格边上的两点删除其一, 消除高频成分。两帧融合将属于不同帧, 但方向相同, 并且在一定距离范围内的两点融合为一点, 通过参与融合的两点的权重来计算融合点所在的位置。再重建与可视化对融合完后的所有点进行三角面片的重建, 使多帧重建为一个整体, 并利用 VTK 进行三维可视化显示。

图 3 为拼接融合后的效果图, 图 3(a)两帧中间部分有明显的重叠区域, 图 3(b)显示在拼接融合后两帧已融合为一个整体。

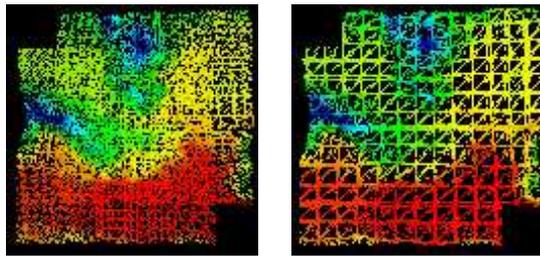


图 3 拼接融合前后的效果

4 系统实现

本系统开发语言为 C++, 在 Microsoft Visual C++ 开发环境下利用可视化开发工具包 VTK 进行开发。

4.1 VTK 可视化管道的建立

VTK 软件系统有两大对象模型: 图形模型和数据流模型。数据流模型提供的对三维数据的操作是通过一个管道体系完成的, 其使用过程为: 设置数据源; 对读取数据进行滤波; 渲染滤波后的数据; 在窗口中显示渲染后的数据。实际操作中如果想要更新显示画面, 只要更新数据源, 并执行窗口刷新操作, 管道机制就能自动载入最新显示数据, 并刷新画面^[6]。

4.2 系统界面

系统界面在 VC++ 开发环境下, 利用 MFC 类进行开发。单帧重建后的数据在下方 3 个小窗口以 3 个角度实时显示; 全局拼接结果在上方大窗口显示。

在显示过程中, 对数据点的配色方案可以选择按强度配色或按海拔高度配色。用户可以在任意窗口中对三维模型进行旋转、平移、缩放操作, 以选择最佳观察角度, 也可以选择三维模型的显示方式, 如点云、网格、面片。本系统还提供三维坐标和辅助线、面等以辅助显示三维模型。

5 实验结果

相控阵三维声纳系统分别进行了湖上实验和海洋实验, 采集回了大量数据。离线处理系统对这些原始数据进行了单帧多层重建、配准, 并应用多级分辨率进行融合拼接和多帧再重建。图 4 是海试采集到的数据, 通过重建和配准等处理后显示出的海底地形图, 从中容易看出海底的起伏地形和船的运动轨迹。

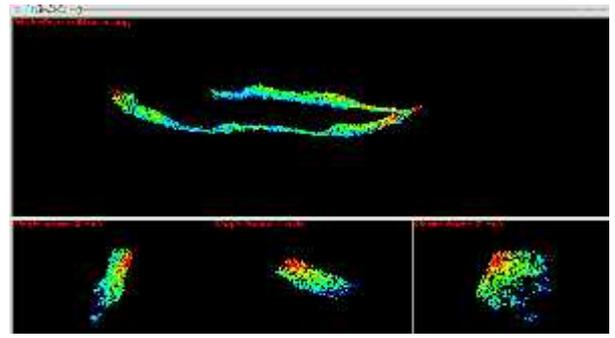


图 4 海试数据单帧重建和拼接

图 5 为在千岛湖水声实验站采集到的湖底数据, 其中有一条锚链从湖面延伸到湖底 40 m。

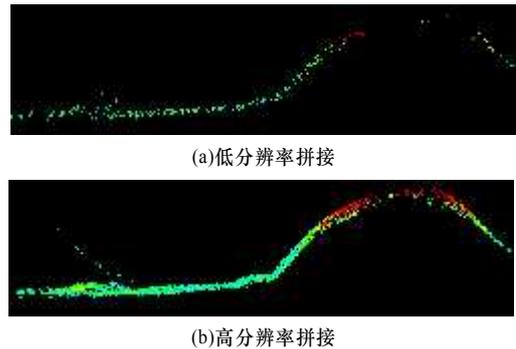


图 5 千岛湖水下探测数据处理效果

6 结束语

本文描述了相控阵三维声纳数据离线处理及可视化系统。实验结果表明, 该系统配准精度较高, 融合后的效果较为理想, 可视化效果较好, 达到了对地形、水下物体的观测作用。由于数据处理量太大, 该系统处理的速度还不是很快, 系统资源开销比较大。如何进一步提高系统算法的效率、减少资源占有率是下一步的改进方向。

参考文献

- [1] Besl P, McKay N. A Method for Registration of 3-D Shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.
- [2] Zhang Zhengyou. Iterative Point Matching of Free-form Curves and Surfaces[J]. International Journal of Computer Vision, 1994, 13(2): 119-152.
- [3] Hampel F R, Rousseeuw P J, Ronchetti E M. Robust Statistics: The Approach Based on Influence Functions[M]. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2005.
- [4] Hall M. ARROV Project Data Transfer Specification[R]. Melbourne, Australia: ARROV Project Office, Monash University, Tech. Rep.: GRL-MSH-127, 2002.
- [5] Ikeuchi K, Wheeler M D. Iterative Estimation of Rotation and Translation Using Quaternion[R]. Pittsburgh, Pennsylvania, USA: Carnegie Mellon University, Tech. Rep.: CMU-SC-95-215, 1995.
- [6] 王晓宇, 陈吉红, 唐小琦. 基于 VTK 的线框仿真组件实现技术[J]. 计算机工程, 2010, 36(4): 226-228.

编辑 金胡考