

基于 OMAP3530 的声/光一体化成像系统*

周天^{1,2}, 徐剑², 李海森², 魏波³, 胡洪涛²

(1 哈尔滨工程大学水下智能机器人技术国防科技重点实验室 哈尔滨 150001;

2 哈尔滨工程大学水声技术重点实验室 哈尔滨 150001)

摘要: 本文主要研究基于 OMAP3530 高性能 DSP 芯片的水下声/光一体化成像系统实现, 利用 DSP 核实现多子阵幅度-相位联合检测算法, 根据 DSP 核计算出的深度值利用运行于 PowerVR 核中的 OpenGL ES 库实现三维声学成像, 利用 ARM 核实现光学图像采集以及辅助设备数据采集, 并利用 QT/E 设计的人机交互界面对声学三维图像信息和光学成像信息同时进行实时显示。本方案充分发挥了 OMAP 处理器的三核性能。系统对松花湖实验数据进行有效处理, 证明了系统技术方案的正确性和技术指标的先进性。

关键词: 水下声学成像; 水下光学成像; OMAP3530; QT/E; 水下目标探测

中图分类号: TB57 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.60

Integration of an underwater acoustic and optical imaging system based on OMAP3530

Zhou Tian^{1,2}, Xu Jian², Li Haisen², Wei Bo², Hu Hongtao²

(1 National Defence Key Laboratory of Autonomous Underwater Vehicle Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2 Science and Technology on Underwater Acoustic Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: This paper introduces the design of an underwater acoustic/optical integrated imaging system, which respectively uses the DSP core to implement the multi-subarray amplitude-phase united detection algorithm, uses the OpenGL ES library run in the PowerVR core to realize the reconstruction of the 3-D acoustic image based on the depth values from the DSP core, uses the ARM core to realize the data collections of the optical image and from peripheral equipment, and displays the acoustic and optical images on the man-machine interface designed with QT/E software. The proposed system scheme sufficiently utilizes the power of the three cores in OMAP3530 processor. The system was used to effectively process the experiment data from the Songhua Lake and exhibited a stable status, which verifies the validity of the system scheme and the advancement of the technical performance.

Key words: underwater acoustic imaging; underwater optical imaging; OMAP3530; Qt embedded; underwater target detection

收稿日期: 2010-05 Received Date: 2010-05

* 基金项目: 国家 863 计划资助项目(2007AA09Z124); 中国高等学校博士点基金项目(20070217022); 哈尔滨工程大学自然科学基金培育基金项目; 水下智能机器人技术国防科技重点实验室开放课题研究基金资助课题; 中央高校基本科研业务费专项资金项目(HEUCFR1012)资助

1 引言

目前国内外对水下目标探测主要采取两种方法:第一种是光学探测^[1-2],其原理是通过光源照射在物体表面的反射光显示出物体表现的图像信息,利用光学摄像仪器对水下目标直接进行光学照像,其优点是设备体积小、成像清晰度高、适于人眼直接观察。但是探测距离有限,对光源的依赖性高;第二种是声学探测^[3-4],其原理是通过探测声波在目标表面的散射回波估计出目标的尺寸和强度信息,进而对目标进行声学成像,典型的声学成像设备如多波束测深仪、侧扫声呐等。这种探测方法的优点是探测距离远,对水下光源没有依赖,但是成像分辨率较低,不适用于精细探测。

当前,水下光学成像系统已比较成熟^[5],而水下声学成像系统的工程实现还存在一些难点,主要集中在目标信息高分辨率估计算法的工程实现和三维声学图像的实时显示两个方面,前者有文献曾在 6 片 C54DSP 并行处理平台上实现了多子阵幅度-相位联合检测算法^[6],而三维声学图像的显示则一般利用 PC 平台实现^[7]。可见,已有的方案规模复杂、集成度低。本文结合美国德州仪器最新推出的包含 ARM、DSP、PowerVR 三核的 OMAP3530 高性能处理器提出水下声/光一体化成像系统实现新方案,大大提高了系统的集成度。此系统能够同时满足远距离粗测和近距离精细成像的探测需求,经过松花湖实验数据处理证明了此系统的稳定性与有效性。

2 系统方案

本系统的核心处理器采用 TI 公司推出的具有三核结构的 OMAP3530,芯片内部集成了 600 MHz 的 ARM-A8 核、430 MHz 的 C64 + DSP 核,以及适用于 3D 模型构建的 Power SGX530 处理器^[8],系统总体结构如图 1 所示。其中 DSP 核负责声学多子阵幅度-相位检测算法的实现、PowerVR 核负责声学三维成像、ARM 核负责光学图像的采集以及人机交互界面的实现。

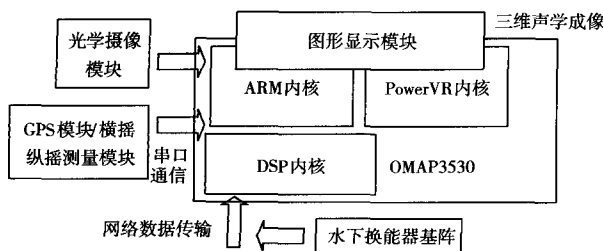


图 1 系统结构

Fig. 1 System structure diagram

3 硬件系统

系统核心处理板采用 DevKit8000,负责系统中信号处理、数据处理以及嵌入式应用程序运行,利用 LCD 显示声学学和光学成像结果以及人机交互界面,并能够显示 GPS 数据以及载体姿态信息,系统硬件整体结构如图 2 所示。

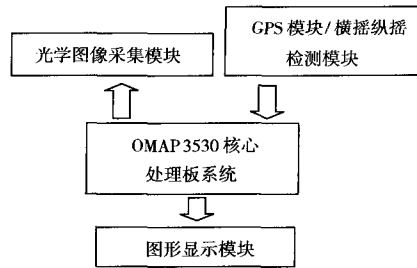


图 2 系统硬件方案

Fig. 2 Structure diagram of the hardware platform

4 系统软件研发

系统软件分为声学学和光学成像两部分,其中主要包括多子阵幅度-相位联合检测、OpenGL ES 3D 成像、以及 QT/E 显示等三个功能模块,分别在 DSP、PowerVR 和 ARM 核中实现。

声学成像软件首先利用 DSP 核实现多子阵幅度-相位联合检测算法并进行目标成像^[9],利用 ARM 核接收 GPS 与温度等参数^[10],利用 PowerVR 核完成声学回波信息的三维成像,通过双缓冲的方式把图像信息传递给 QT/E 人机交互模块并在 LCD 上进行实时显示,同时可以通过 QT/E 人机交互界面控制数据的保存与回放。

光学成像软件将摄像头采集到的信息实时传送到 ARM 核中进行软件像素算法插值,在 QT/E 界面上显示图像信息,同时将图片信息流保存在系统上。软件模块结构框图如图 3 所示。

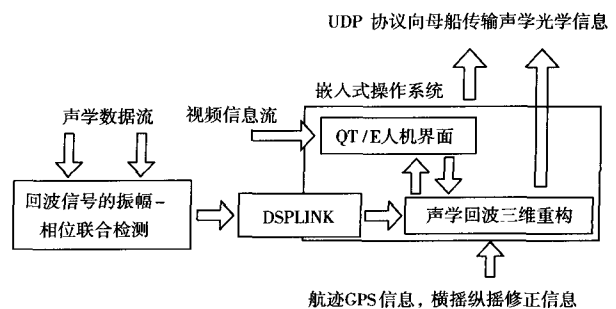


图 3 软件模块结构框图

Fig. 3 Structure diagram of the software modules

4.1 多子阵幅度-相位检测模块

针对浅水应用环境信噪比较高、波束脚印较小的特

点,系统选用多子阵幅度-相位联合检测算法解算海底深度信息^[11-13]。

DSP核中接收到网络端口采集到的数据后首先完成动态Q值的定标实现浮点数到定点数的转换,根据前置换能器基阵的情况,将换能器基阵划分为多个子阵列,针对划分出来的子阵列对每一个重叠子阵进行波束形成,并利用多个子阵列同号波束间的相位信息计算出子阵函数,如式(1)所示:

$$\theta_k = Kx_i + c \quad (1)$$

式中: x_i 为第 i 个子阵的坐标位置; θ_k 为第 k 个子阵接收信号的相位; K 为斜率; c 为第一个基元接收信号的初相位(为常数)。对 θ_k 进行解卷绕后,对 K 进行最小均方差估计,并对 K 图像进行平滑降噪。

在DSP核完成多子阵幅度-相位联合检测算法得到目标区域深度数据和强度信息后,将结果保存在系统存储区域内,通过消息队列的形式把存储空间地址返回给ARM核。

在本文中,结合C64+DSP核,对多子阵幅度-相位联合检测算法进行了相关优化并最终实时实现了此算法,与原有的6片CS416处理平台相比,算法实现复杂度大为简化。

4.2 OpenGL ES 3D 成像

系统的OpenGL 3D成像部分需要实现由声呐处理结果到3D图像的转换。本文提出了基于PowerVR SGX530图形加速器的解决方案。对于三维图像重构选择使用DEM模型中的标准顶点模型。首先将经DSP核处理得到的水深数据点进行分块处理。对每块数据使用一阶线性插值算法快速补齐数据点^[14],内插的点取相邻经度轴和纬度轴上相邻点的和做平均,剔除粗差并对块内数据点实行滤波处理,提高水深数据的质量,如图4所示。

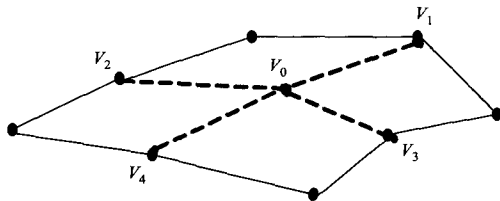


图4 一阶线性插值示意图

Fig. 4 Schematic diagram of first order linear interpolation

图中, V_0 是由 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 4个邻近数据点进行一阶线性内插运算得出的欠采样点深度数据。在欠采样点补齐后,将数据处理成标准格式即每行数据点都有相同的经度,每列数据点都有相同的纬度。矩阵中的元素表示为 $V(x, y, z)$, x 表经度, y 表示纬度, z 表示水体深度。按直线连接方式连接各个数据点,如图5所示。三角网格法从第一个点开始,按点的顺序依次连成网格,其构网原理如图6所示。

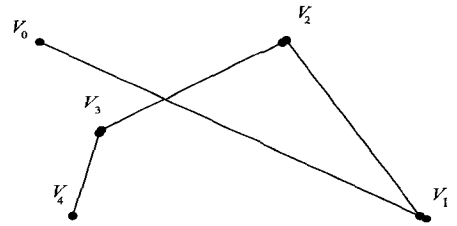


图5 直线连接方式

Fig. 5 Line connection mode

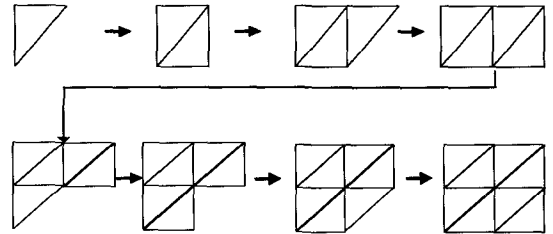


图6 三角网格构网

Fig. 6 Triangle mesh network

光照处理需要为每个回波数据点添加法向量,单点的法向量可由点周围面片的法向量确定^[15],即平面内任意两条向量, $\vec{l}_1 = (x_1, y_1, z_1)$, $\vec{l}_2 = (x_2, y_2, z_2)$ 作叉乘,得到这两条向量所在平面法向量,如式(2)。

$$\vec{l} = \vec{l}_1 \times \vec{l}_2 = \begin{pmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

取 $\vec{i}_1 = V_0V_1$ 、 $\vec{i}_2 = V_0V_2$ 、 $\vec{i}_3 = V_0V_3$ 、 $\vec{i}_4 = V_0V_4$ 。从向量开始逆时针旋转求相邻两个向量所在平面的法向量,可以求得 $\vec{j}_1 = \vec{i}_1 \times \vec{i}_2$ 、 $\vec{j}_2 = \vec{i}_2 \times \vec{i}_3$ 、 $\vec{j}_3 = \vec{i}_3 \times \vec{i}_4$ 、 $\vec{j}_4 = \vec{i}_4 \times \vec{i}_1$ 四个平面法向量,将这四个平面法向量做一阶线性内插运算,得到向量 $\vec{m} = (\vec{j}_1 + \vec{j}_2 + \vec{j}_3 + \vec{j}_4)/4$,对向量 \vec{m} 归一化,得到 V_0 顶点的法向量 \vec{V} ,从而完成点的法向量的绘制。

基于POWER VR核的实现方案与传统的PC机实现方案相比,避免了大量数据的芯片间传输,系统结构更为紧凑,功耗更低。

4.3 QT/E 显示界面设计

系统的人机交互界面能够实时显示成像系统载体的GPS坐标、航迹、航速、横/纵摇等参数信息以及光学摄像头照像信息和声学三维成像信息。

本文的QT/E界面采用C++开发,程序通过操作QT/E控件,运用QT/E特有图形引擎技术完成对底层LINUX内核中FrameBuffer的绘图操作,从而实现人机交互界面。采用继承方法添加第三方串口类和V4L2视频

信息类,实现同 GPS、横/纵摇传感器之间的串口通信以及对于光学图像采集设备的操作。

光学成像的显示采用基于 Linux 内存映射的 V4L2 协议,相比于传统的直接截取光学采集图片的形式,在节省系统内存消耗的同时提高了视频帧率。视频设备采集的视频数据通过内存映射方式映射到用户空间,实现用户空间中对视频数据流的操作。程序利用 V4L2 提供 I/O 口控制函数及视频缓冲命令字、缓冲队列命令字与 LINUX 底层的 V4L2 驱动程序进行数据交互,实现分配视频内存和查询内存的功能,进而通过 mmap 内存映射方式实现驱动设备内存信息映射到用户空间的过程。视频数据的界面显示采用视频流创建 JPG 格式图片的形式,通过使用 QT/E 的定时机制在界面中显示光学采集图像。将视频信息从内存空间映射到用户空间,在缓冲队列中将视频信息压缩成图片,利用 QT/E 中定时机制,以 50MS 为间隔不断读出图片并同步刷新显示信息,使人眼可以流畅观看光学图像采集设备采集到的目标区域图像信息。针对光学图像采集设备采集到的原始光学图像亮度差、对比度低的缺点,系统进行了光学采集图像信息的再处理,通过均匀再分布的方式增强原始光学图像中像素的色差,完成在 QT/E 界面中亮度和对比度的调节。

5 实验数据处理

2009 年松花湖实验中,实验船航迹为北正南。基于多通道接收换能器接收到的湖底回波信号,利用 DSP 核中的多子阵振幅-相位联合检测算法计算出每个回波数据点对应的深度值,同时采用中值滤波算法剔除野点,并对野点剔除后的位置和声学欠采样区域使用一阶线性插值补齐采样点,依据数字高程模型使用高度数据进行声学回波信息 3D 地形的重构,可以达到 25 FPS 的图形刷新率。光学摄像头实时显示水下焦点区域的探测信息, GPS 和横/纵摇信息可以通过串口传输到 QT/E 的人机界面上实时提供载体航迹等信息。系统运行效果如图 7~10 所示。

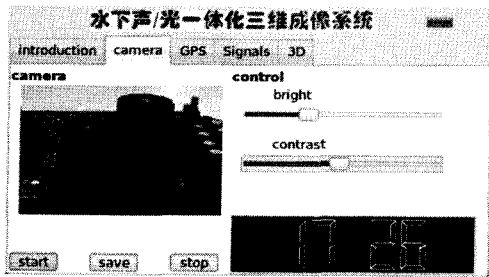


图 7 光学摄像头采集视频信息显示界面
Fig. 7 Display interfere of the video information captured by optical cameras

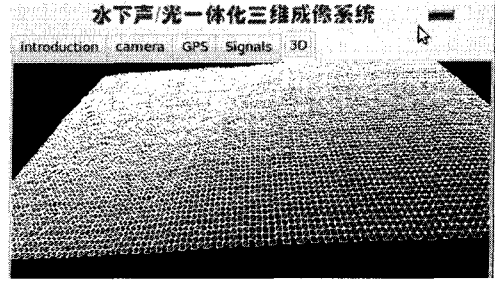


图 8 未填充颜色的网格
Fig. 8 Local grid map with no color filled

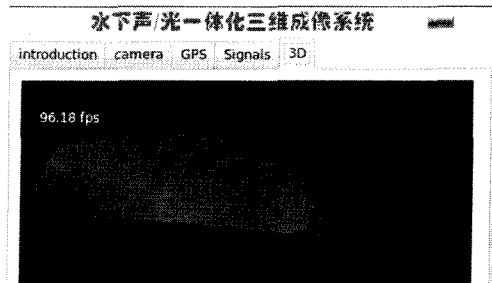


图 9 填充颜色后的全景
Fig. 9 Panorama filled with color

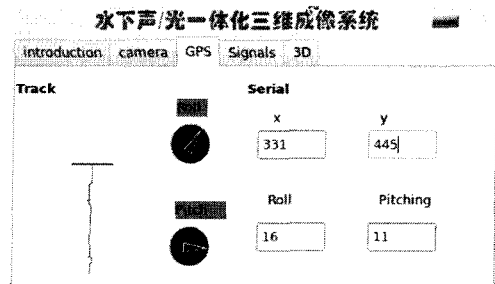


图 10 航迹和摇摆信息
Fig. 10 Information of track path and swing

图 7 为针对系统光学成像功能的测试,系统可以实时清晰的显示通过 V4L2 协议传输的光学图像信息,并且操作人员可以通过 QT/E 人机界面对成像信息进行图片保存。图 8、9 为利用松花湖试验所采集的实验数据进行的声学三维成像结果,其中图 8 为原始深度信息的三角网构图结果,图 9 为声学信息的 PowerVR 三维成像,从图中可以看出,系统可以很好地完成声学三维信息的成像显示。图 10 显示了系统通过外设接口采集的 GPS 和姿态传感器等辅助测量设备的输出信息。

6 结 论

经实验室和湖上实验数据测试,水下声/光一体化成像系统运行稳定可靠,软件系统工作正常,内核文件系统

稳定,界面操作方便,能够完整流畅地显示三维声学图像以及光学摄像头的照相信息。经测试,基于 OpenGL 的三维水下声学图像可以平均输出 20.7 帧到 30 帧图像并可以调整视角,达到了设计指标要求。本系统中涉及的 DSP 核和 ARM 核的通信实时性还不够高,有待后续改进。

参考文献

- [1] Jaffe, Jules S. Multi autonomous underwater vehicle optical imaging for extended performance [C]. OCEANS 2007- Europe. 2007.
- [2] Jones, Ian S. F. Dimensional images from a high-resolution underwater acoustic imager [C]. Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference, 2000: 581-585.
- [3] 么彬. 多子阵空间建模水声成像技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2009.
YAO B. Study on multiple sub-array special module underwater acoustic imaging technology [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009.
- [4] 黎子盛. 多子阵波束域海底地形地貌高分辨探测技术 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2007.
LI Z SH. Multiple sub-array beamspace high resolution methods for swath bathymetry [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006.
- [5] ZHOU J H, Wu T H, Wu R F. Real time image collection and processing based on OMAP3530 [C]. Proceedings - 2009 International Conference on Information Engineering and Computer Science, 2009.
- [6] 周天,陈宝伟,魏玉阔,等. 便携式多波束测深仪的设计与实现 [C]. TI DSP 大赛获奖成果汇编, 2006: 486-501.
ZHOU T, CHEN B W, WEI Y K. A portable multi-beam echo sounder [C]. Texas Instruments Technology for Innovators. 2006:486-501.
- [7] LU D, LI H S, WEI Y K, et al. An improved merging algorithm for delaunay meshing on 3D visualization multi-beam bathymetric data [C]. IEEE ICIA2010, June 20-23, 2010, Harbin, China.
- [8] WU T H, ZHOU J H, PAN J J. A research of DCT algorithm based on OMAP3530 [C]. 2nd International Workshop on Computer Science and Engineering. 2009: p144-148.
- [9] 李海森,陈宝伟,么彬,等. 多子阵高分辨海底地形探测算法及其 FPGA 和 DSP 阵列实现 [J]. 仪器仪表学报, 2010(02):281-286.
LI H S, CHEN B W, YAO B, et al. Implementation of high resolution sea bottom terrain detection method based on FPGA and DSP array [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010(02):281-286.
- [10] 于晓,王家礼. 嵌入式系统网络实时性能的优化 [J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(3):60-64.
YU X, WANG J L. Real-time performance optimization of network for embedded system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009, 23(3):60-64.
- [11] 周天,李海森,朱志德,等. 多波束测深系统多子阵检测法的改进及其性能分析 [J]. 声学技术, 2005(05):152-156.
ZHOU T, LI H S, ZHU ZH D, et al. Performance analysis of improved multiple sub-array detection method in multi-beam bathymetry system [J]. Technical Acoustics, 2005(05):152-156.
- [12] 么彬,李海森,周天,等. 多子阵超宽覆盖海底地形探测方法试验研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(10):1076-1081.
YAO B, LI H S, ZHOU T, et al. Test study of multiple sub-array ultra-wide coverage seabed terrain detection method [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2008, 29(10):1076-1081.
- [13] 周天. 超宽覆盖海底地形地貌高分辨探测技术研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2005.
ZHOU T. Research on techniques of super wide coverage seafloor bathymetry and physiognomy detection [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005.
- [14] 曹文明,王耀南,印峰,等. 遥操作机器人运动的实时三维监控方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(4):727-735.
CAO W M, WANG Y N, YIN F, et al. Study on real-time 3D monitoring of telerobot movement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(4):727-735.
- [15] 魏东,池聪伶. 三维地形可视域分析的显示技术 [J]. 沈阳工业大学学报, 2009, 31(4):458-461.
WEI D, CHI C L. Displaying technology of 3D terrain viewshed analysis [J]. Journal of Shen yang University of Technology, 2009, 31(4):458-461.

作者简介



周天, 2005 年于哈尔滨工程大学获得博士学位, 现为哈尔滨工程大学副教授, 主要研究方向为水声信号处理和空间信号处理。

E-mail: zhoutian@hrbeu.edu.cn

Zhou Tian received his Ph. D. degree from Harbin Engineering University in 2005. Currently he is an associate professor, and his main research interest is under-water acoustic and spatial signal processing.



徐剑(通讯作者),2007年于哈尔滨工程大学获得学士学位,现为哈尔滨工程大学水声工程学院博士研究生,主要从事嵌入式仪器开发和通讯技术研究。

E-mail: xujian@hrbeu.edu.cn

Xu Jian (Corresponding author) received

his B. Sc. degree in 2007 from Harbin Engineering University. Currently he is a Ph. D. candidate in Underwater Acoustic Engineering College, Harbin Engineering University. His main research interest is embedded instrument and communication technology.