

嵌入式在线航空摄影测量方法*

桂力, 郑顺义, 王晓南, 马电

(武汉大学 遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430079)

摘要:为满足空间数据实时处理的需求,提高航空摄影测量系统在线处理能力,研究一种在线摄影测量的理论与方法,运用嵌入式架构设计一种在线摄影测量系统,使用可编程门阵列(FPGA)方法、高级精简指令集机器组合数字信号处理器(ARM+DSP)方法等嵌入式计算技术建立专门的硬件运行环境,移植并优化现有算法到嵌入式系统中,实现摄影测量数据的在线处理。机载航摄实验结果表明,该方法能够实现对摄影测量数据进行快速稳定的在线处理,验证了运用嵌入式架构的在线摄影测量的可行性,把摄影测量的处理效率提高到了一个更高的水平,同时也进一步拓宽了摄影测量技术的应用领域。

关键词:在线摄影测量;嵌入式架构;可编程门阵列;高级精简指令集机器;数字信号处理器

中图分类号:P23 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2015)03-104-06

On-line aerial photogrammetry method using embedded technology

GUI Li, ZHENG Shunyi, WANG Xiaonan, MA Dian

(School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: In order to meet the demand of real-time spatial data processing and improve the online processing capability of photogrammetric system, a kind of online photogrammetry method is proposed. According to the proposed method, system based on embedded architecture is then designed. Online photogrammetric data processing is realized by using FPGA (Field Programmable Gate Array), ARM + DSP (Advanced RISC Machine coupled with Digit Signal Processor) and other embedded computing technologies to build specialized hardware operating environment as well as transplanting and optimizing the existing photogrammetric algorithm to the embedded system. Aerial photogrammetric experiment shows that the method can achieve high-speed and stable online processing of photogrammetric data. And the experiment also verifies the feasibility of the proposed online photogrammetric system based on embedded architecture, which can improve the processing the efficiency of photogrammetry to a higher level and broaden the application field of photogrammetry.

Key words: online photogrammetry; embedded architecture; field programmable gate array; advanced RISC machine; digit signal processor

目前摄影测量与遥感方面的数据处理基本都依赖于地面计算机处理系统,如常用的通用PC机、大规模集群系统等,计算机技术的发展使得基于这类处理系统的数据处理效率得到很大的提高^[1],但是此类系统普遍存在体积大、功耗高、可移动性差等缺点,难以进行在线装备。而通过无线传输数据到地面进行处理的方法也因传输速度慢、有效范围小等因素在实际应用中受到限制。当灾害、突发事件发生时,地面系统容易遭到破坏,这往往要求能够实时获取并在线处理空间数据,比如飞行器在飞行中在线计算并给出处理结果,目前尚无有效手段可以实现。由于飞行平台空间有限,载重受到限制,同时,还要考虑到功耗

设计因素等,这些都极大限制了在线处理系统的规模。而嵌入式计算技术具有功耗低、体积小、集成度高的特点,将空间数据处理与嵌入式技术相结合是在线摄影测量发展的方向之一。研究运用嵌入式技术的在线摄影测量可实现对突发事件的快速、实时监测,迅速了解观测区情况,无论是民用还是国防军事,对传统测绘还是应急响应,都具有重要的意义。

在线摄影测量的研究还处于初级阶段,目前相关的研究侧重于处理的实时性,如Wu等研究了一种实时摄影测量测图系统^[2],处理一个包括12个模型(15张影像)的测区仅需要42min;Förstner从特征提取、目标识别、影像的

* 收稿日期:2014-09-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41171357);国家科技支撑计划资助项目(2011BAH12B02)

作者简介:桂力(1986—),男,湖北黄冈人,博士研究生,E-mail:whuguli@whu.edu.cn;

郑顺义(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:syzheng@263.net

时空处理等方面讨论了实时摄影测量的发展^[3],给出了许多成功的应用实例。这些研究在处理速度方面有较大的提升,但使用的硬件平台仍然是通用 PC 机,在体积、功耗等方面不适宜于在线处理。

随着嵌入式计算技术的发展,基于嵌入式技术的实时图像处理成为研究的热点,近几年出现了大量的研究成果^[4-5],这些研究要么针对图像处理的某个具体算法^[6-7],要么是针对视频监控、医学图像^[8-9]等应用。虽然这些应用使用的图像幅面较小,处理任务单一,且不针对大幅面航空影像,但嵌入式计算技术领域的研究方法为从事航空影像在线处理提供了很好的思路。

1 嵌入式技术与摄影测量

1.1 嵌入式技术

可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)、高级精简指令集机器(Advanced RISC Machine, ARM)和数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)等嵌入式技术发展很快,已经应用到生产生活的各个方面,如图像实时处理、智能手机、机器人导航等领域。

(1)FPGA 作为一种硬件可编程芯片,具有丰富的内部资源,设计者可根据自己的需要将 FPGA 内部的逻辑模块连接起来,定制一块新的处理芯片。相比专用处理器,FPGA 的硬件可编程功能提供了更多的灵活性,能够根据需要修改内部程序以兼容多种硬件而不用更改系统结构。同时 FPGA 能够在硬件级别实现算法的并行和流水处理,具有强大的数据处理能力。

(2)ARM 属于一种通用处理器,有较强的系统管理和数据处理能力,并具有丰富的外部接口,适合完成与外部设备的通讯、数据传输等工作,其功能类似于通用电脑的 CPU,目前已大量用于智能手机、平板电脑、服务器等设备。

(3)而 DSP 具备较强的数字信号处理能力,有较好的数字运算性能,一般无缓存或缓存较小,系统开销极少,运行周期稳定可靠,适合对数字图像进行快速处理。

相比通用 CPU,以上三类芯片的共同点是重量轻、功耗小、成本低,系统自身不占用资源或占用极少资源,更适合小型化、嵌入式装备。其中 FPGA 与 DSP 一般作为协处理器(Coprocessor)进行专用计算处理,ARM 则适合做数据管理与外设交互等工作。

1.2 嵌入式技术与摄影测量相结合

结合三类嵌入式技术的优势,遵循以下思路设计一种适合在线摄影测量的处理系统:

(1)将 FPGA 作为数据传输与控制的核心设计模块,连接各种外部传感器获取影像和 POS 数据。利用 FPGA 的硬件可编程优势,对不同外部硬件类型可通过改变其内部电路连接方式予以兼容,提升系统的可扩展性。同时还可在 FPGA 里编制各类硬件处理算法对需要预处理的数据进行硬件加速处理,减轻后端数据处理压力。

(2)以 ARM + DSP 处理器作为数据管理和处理的核心。ARM 用来负责系统管理与数据流控制,而 DSP 具备很强的数字信号处理能力,可配合 ARM 对算法进行加速处理。

2 基于嵌入式架构的在线摄影测量系统

考虑到通用性及灵活可扩展性,设计运用 FPGA 芯片的数据传输模块和运用 ARM + DSP 的数据处理模块。与一般的嵌入式系统相区别,该模块的功能和接口面向摄影测量的特点而设计。从外部传感器获取的数据通过数据传输模块预处理并转发,分发至多个数据处理模块进行并行处理。

2.1 硬件模块设计

图 1 为数据传输模块的逻辑图,该模块以 FPGA 协处理器为核心,采取 CameraLink 接口连接航空相机接收影像数据,采用 RS485 接口连接 POS 系统接收位置姿态信息。影像与 POS 数据通过这两种接口输入到 FPGA 核心中,在 FPGA 内部可进行预处理和数据整合。设计了内存模块用于对数据进行缓存以及处理过程中的转存,为解决同时读写内存造成的 IO 瓶颈问题,设置两个内存模块进行“乒乓”读、写操作。在数据经过 FPGA 处理后,即可通过高速 PCIe 接口进行同步分发,供多个数据处理模块同时处理。

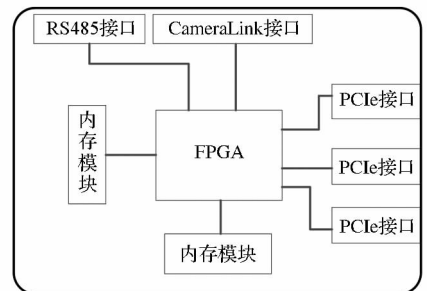


图 1 数据传输模块示意图

Fig. 1 Diagram of data transmission module

图 2 为运用 ARM + DSP 处理器的数据处理

模块逻辑图,其中 DSP 与 ARM 集成在同一块芯片中,DSP 作为协处理器用于算法加速。PCIe 高速接口用于连接外部数据输入端,实现高速数据传输;经过处理的数据则可以通过 SATA 接口连接存储设备进行存储,同时通过 HDMI 接口连接显示设备进行显示。为方便与其他系统的连接,该模块还设有千兆网口、USB 等接口。模块中的 SD 卡接口与 NAND 可用来提供系统的启动入口和相关程序的存储,如果要加入某个新程序,只需在编译完成后写入这种存储设备中即可,无需将整个模块与上位机连接。

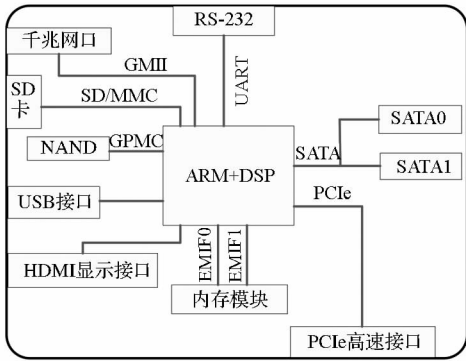


图 2 数据处理模块示意图

Fig. 2 Diagram of data processing module

数据传输模块主要用于连接摄影测量相关的设备,FPGA 的硬件可编程特性使得该模块能够兼容更多的设备而无须重新制板。数据处理模块则主要通过设计算法处理获得的数据并存储显示最终的结果。数据传输模块上可设计多个高速 PCIe 接口与数据处理模块相连接,每个数据处理模块中可设计不同的处理算法对数据进行快速处理。图 3 为多个模块连接的情况,针对算法需求设计了三个模块,在实际应用中可根据需要增减模块数量实现最佳处理效果。

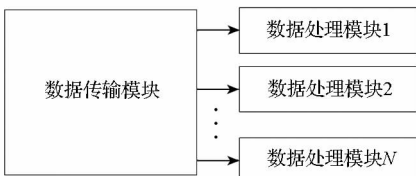


图 3 模块互连示意图

Fig. 3 Diagram of module connection

2.2 软件模块设计

以 FPGA 为核心的数据传输模块使用硬件描述语言 (Verilog 或 VHDL) 进行软件开发,设计好的电路程序可以经过简单的综合与布局,快速烧录至 FPGA 上进行测试,这也是现代 IC 设计验证

的技术主流。而运用 ARM + DSP 架构的软件设计则与通用 PC 程序设计较为类似,通常使用 C/C++ 语言编写程序实现算法,并移植到嵌入式操作系统上进行验证。使用自定义的嵌入式 Linux 系统作为该模块的底层操作系统,根据自己的需要选择保留必需的功能,裁剪无须使用的模块,保证系统内核最小化(如本研究中内核文件仅为 2.3MB)。这样的定制内核在载入嵌入式设备后仅使用少量的硬件资源,保证应用程序有足够的资源。

运用 ARM + DSP 架构的数据处理涉及处理器间的协同,该方式以 ARM 作为系统的主控端,以 DSP 作为协处理器对算法进行加速,ARM 端加载嵌入式 Linux 操作系统,而 DSP 端使用实时操作系统 SYS/BIOS (RTOS),两个处理核心使用内存共享机制实现数据共享,避免复杂而耗时的数据传递过程。如某个应用程序在运行过程中可使用 ARM 的外部接口与外设进行通信,同时使用 DSP 进行算法加速。程序可调用 Linux 函数库实现与外设的通信,如数据读取、存储、显示等,同时可通过调用实时处理函数库来控制 DSP 对数据进行实时处理。一般情况下数据接收与处理是串行进行,所花费时间为两者之和,为缩短时间,使用一种三级缓存机制^[10],可实现数据接收与处理的并行化,在理想情况下处理一次数据的耗时为两者中时间较长者。

2.3 原型系统功能设计

基于上述方法设计了原型系统,并选择三种算法进行嵌入式移植:全景图拼接、几何质量评定以及云、阴影检测。全景图拼接算法在数字微分纠正的基础上针对嵌入式计算的特点进行改进,算法具体细节可参考文献^[10],可为应急情况下在线提供具有地理参考价值的全景图;几何质量评定功能主要对拍摄过程进行监控,判断航摄影像是否漏拍、航向旁向重叠度是否过小、影像旋偏角是否过大、航线弯曲度是否超限等^[11],对发现的问题可及时在线补拍,避免落地后再返飞;云、阴影检测功能则用来检测所获取的影像是否存在大片云、阴影等现象,可在线指导飞行器选择更合适的位置和角度进行拍摄,该算法选取能够有效检测阴影和云的特征组合实现阴影^[12]、云^[13-14]的自动检测,检测涉及 Otsu 阈值计算、色调亮度饱和度 (Hue Intensity Saturation, HIS) 色彩空间变换以及条件判断等过程。

如图 4 所示为原型系统结构,航空相机和 POS 系统分别通过 CameraLink 接口、RS485 接口

与系统连接,发送影像数据和 POS 数据到 FPGA 模块中,FPGA 模块通过 PCIe 接口将数据分别发送到三个功能模块进行处理,在航拍过程中即可获取处理结果。

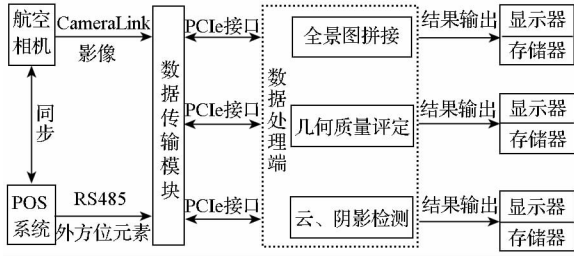


图4 在线摄影测量原型系统结构

Fig.4 Prototype system architecture of online photogrammetry

3 试验结果与分析

3.1 原型系统实现

为验证所述方法的有效性,实现了数据传输模块、数据处理模块的原型系统,并制作了相应的电路板卡,图5、图6分别为数据处理板卡、数据传输板卡的电路图和板卡实物。其中 FPGA 板卡采用 Altera 公司的 CycloneII 系列芯片^[15]作为核心处理器,数据处理板卡使用 TI 公司的 C6A8168 芯片^[16]设计实现。为方便硬件调试和功能验证,

分开制作两种模块的硬件板卡,图7展示了三块数据处理板卡与一块数据传输板卡集成在一个小机箱内部的情况。通过对两种板卡上电测试发现,FPGA 板卡功耗为 8.12W,ARM + DSP 板卡功耗为 10.8W,两种板卡功耗远低于通用计算机,非常适合对功耗有严格限制的应用场合。从计算性能上看,1个 ARM + DSP 模块有 2个计算节点,1个 FPGA 模块可实现至少 1个计算节点(利用 FPGA 的硬件可编程特性可实现更多计算节点数),整个硬件结构实际可提供至少 7个计算节点,且能够并行处理。

3.2 机载飞行试验与分析

为验证系统在实际飞行环境下的有效性,通过搭载机载平台在湖北省荆州市沙市城区进行了航飞试验。所使用航摄仪为成都中科院光电所自主研发的国产相机,其影像分辨率为 4032 × 4032,原始影像为 31MB 大小的 Bayer 格式数据。本次航飞试验平均飞行高度为 800m,共规划了 9条航带,平均每条航带设置 36个曝光点,拍摄了 359张影像(包括 1条补飞航带)。在试验过程中,实现了在航拍的同时同步处理数据并输出结果的功能,飞行完成即得到整个测区的拼接全景图,如图8所示。

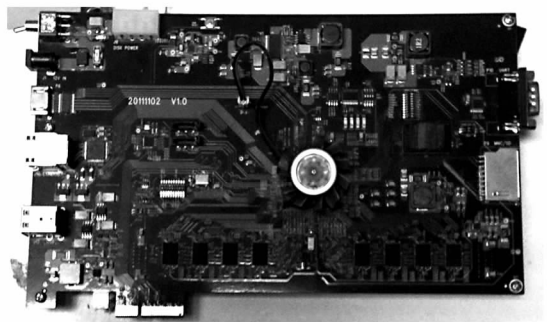
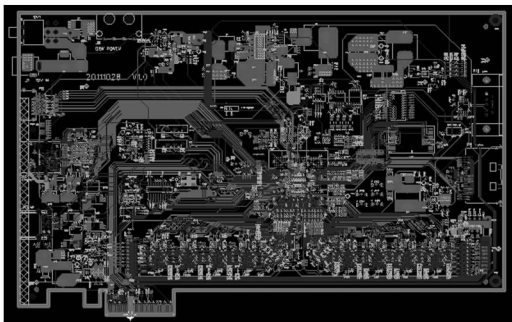


图5 运用 ARM + DSP 的数据处理板卡

Fig.5 Data processing board using ARM + DSP

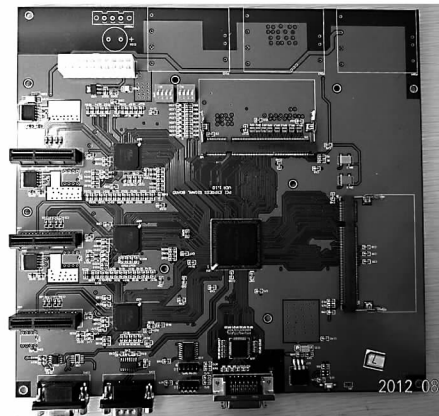
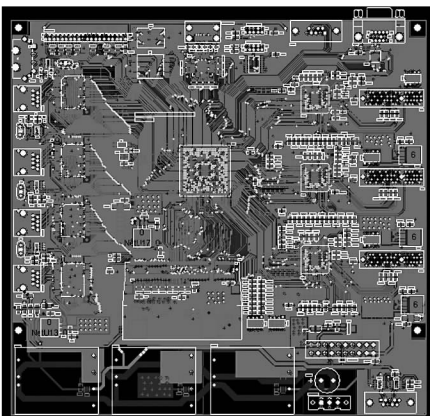


图6 运用 FPGA 的数据传输板卡

Fig.6 Data transmission board using FPGA



图 7 原型系统集成

Fig. 7 Integration of prototype system

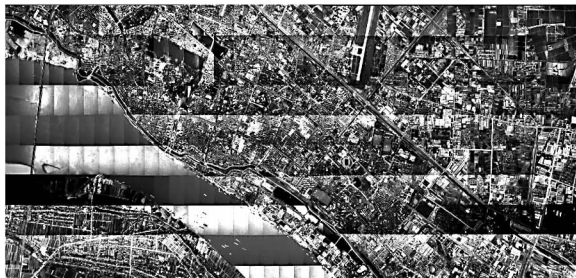


图 8 拼接全景图

Fig. 8 Result of on-line mosaicking

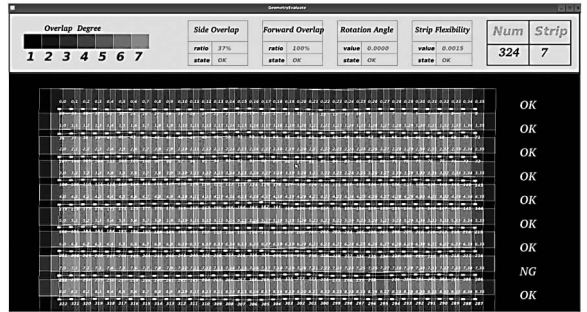
几何质量评定结果如图 9 所示,同航带内的相邻几组影像间具有航向重叠,相邻航带间的影像则有旁向重叠,即图中四边形的重叠区域,其中颜色越亮区域表明重叠度越大。从图 9(a)可以看出,在对第 8 号航带区域航拍过程中漏拍一张影像,在飞完第 9 号航带后及时指导飞机在线进行了补飞,其结果如图 9(b)所示。另外,此次飞行天气环境较好,飞行高度较低,未出现云和明显的阴影区域。

三种算法模块耗时统计如图 10 所示。从图 10 中可以看出全景图拼接与几何质量评定最大耗时都不超过 0.25s,这两种算法计算量仅与要处理的数据大小相关,在每张影像都是同样大小的情况下,时间消耗较为均匀。云、阴影检测算法最大耗时不超过 0.5s,该算法处理时间与具体的影像内容有关,耗时有一定的波动性,符合算法特性。

表 1 统计了系统的实测性能,对于 31MB 的原始影像最大可满足 5fps 的传输速度,算法部分最快能达到 5fps 的处理效率,而最后的计算结果数据量都较小,可快速存盘,若系统在后续扩展出无线传输功能,也可将结果实时传输到其他终端。航飞期间在航带内每隔 5s 拍摄 1 张影像,本系统的处理性能可满足该时间要求。

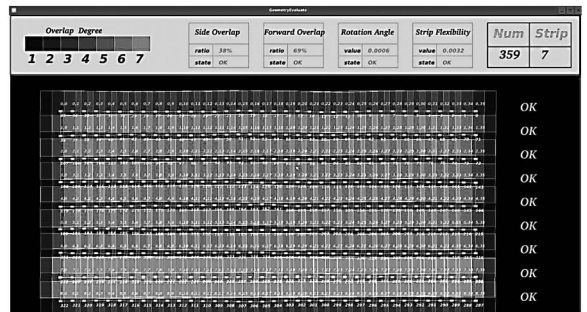
该方法主要针对应急等需求的快速在线处理

进行设计,因而没有考虑影像匀光匀色等处理,从图 8 中可以看出拼接后有色调不均匀的情况,在后续的研究中将加以改进。



(a) 在线监测影像漏拍结果

(a) Result of a missing image online



(b) 在线补飞结果

(b) Result of an added flight online

图 9 航空摄影测量几何质量评定

Fig. 9 Geometry quality evaluation for aerial photogrammetry

表 1 系统性能统计表

Tab. 1 Statistics of system performance

IO 性能/ (MB/s)	算法项目	算法效率/ fps	结果数据 量/KB
PCIe 传输:160	全景图拼接	4	平均 610
结果存储:100	几何质量评定	5	小于 1
—	云、阴影检测	2	小于 1

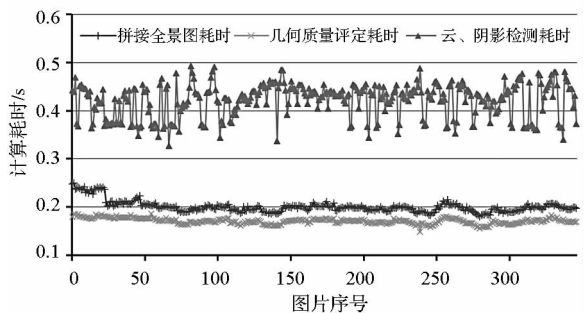


图 10 算法耗时统计

Fig. 10 Time consumption of each algorithm

4 结论

本文提出了一种运用嵌入式架构的在线摄影测量方法,设计了一套在线摄影测量软硬件系统并完成了系统原型。该系统面向摄影测量的实际应用,体积小,功耗低,有较好的扩展性和灵活性,对推进摄影测量系统向小型化、实时化发展有一定的应用价值。在实际应用中可根据需要对系统进行裁剪、集成,或者增加更多的处理单元,将两种模块集成到同一个板卡上以增加集成度,可更好地应用于无人机、星载等对重量、体积、功耗有更严格限制的平台。该方法作为一种新的尝试,为摄影测量向嵌入式和在线处理方向发展探路,后面将会把更多的摄影测量算法移植并优化到系统环境中,以满足各种不同的应用需求。

参考文献 (References)

- [1] 张剑清,柯涛,孙明伟,等. 并行计算在航空摄影测量中的应用与实现[J]. 测绘通报, 2008(12): 11-14.
ZHANG Jianqing, KE Tao, SUN Mingwei, et al. Application and realization of parallel computation in aerophotogrammetry [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2008(12): 11-14. (in Chinese)
- [2] Wu S S C, Hutton J, Kletzli B, et al. A real-time photogrammetric mapping system[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2004, 35 (B2): 61-66.
- [3] Förstner W. Real-time photogrammetry [C] // Proceedings of Photogrammetric Week, 2005, 5: 229-239.
- [4] Hu J H, Zhang T X, Zhong S, et al. A novel parallel architecture for real-time image processing [C] // Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering, 2009: 7497.
- [5] 杨乾明,文梅,伍楠,等. MGR-SAT:一种基于流模板的多粒度可重构数字信号处理器[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(4): 65-72.
YANG Qianming, WEN Mei, WU Nan, et al. MGR-SAT: A multi-granularity reconfigurable DSP based on stream architecture template [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33 (4): 65-72. (in Chinese)
- [6] 王远模,赵宏钟,张军,等. 用FPGA实现浮点FFT处理器的研究[J]. 国防科技大学学报, 2004, 26(6): 61-64.
WANG Yuanmo, ZHAO Hongzhong, ZHANG Jun, et al. The realization of floating-point FFT processor with FPGA chip [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2004, 26(6): 61-64. (in Chinese)
- [7] Dillinger P, Vogelbruch J F, Leinen J, et al. FPGA-based real-time image segmentation for medical systems and data processing [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006, 53(4): 2097-2101.
- [8] 张辉,夏明新,焦骝,等. 基于FPGA的实时X线医学图像处理系统[J]. 中国生物医学工程学报, 2008, 27(1): 39-44.
ZHANG Hui, XIA Mingxin, JIAO Jian, et al. A FPGA based real-time X-ray image processing system [J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2008, 27 (1): 39-44. (in Chinese)
- [9] Martin V, Dunand G, Moncada V, et al. New field programmable gate array-based image-oriented acquisition and real-time processing applied to plasma facing component thermal monitoring [J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(10): 10E113.
- [10] 郑顺义,马电,桂力,等. 一种ARM+DSP架构的机载影像实时拼接方法[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2014, 39(1): 1-7.
ZHEN Shunyi, MA Dian, GUI Li, et al. A real-time airborne image mosaic method using the ARM+DSP architecture [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(1): 1-7. (in Chinese)
- [11] 乔瑞亭,孙和利,李欣. 摄影与空中摄影学[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2008.
QIAO Ruiting, SUN Heli, LI Xin. Photography and aerial photography [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2008. (in Chinese)
- [12] 高贤君,万幼川,郑顺义,等. 航空遥感影像阴影的自动检测与补偿[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2012, 37(11): 1299-1302.
GAO Xianjun, WAN Youchuan, ZHENG Shunyi, et al. Automatic shadow detection and compensation of aerial remote sensing images [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37 (11): 1299-1302. (in Chinese)
- [13] Abraham L, Sasikumar M. Cloud extraction and removal in aerial and satellite images [C] // Proceedings of the International Symposium on Intelligent Informatics ISI' 12, 2013: 341-347.
- [14] Li B Y, Li X. Cloud detection based on segmentation with statistical and geometry features [C] // Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE International, 2012: 6020-6023.
- [15] Cyclone II Device Handbook [EB/OL]. <http://www.altera.com.cn/literature/lit-cyc2.jsp>.
- [16] TI TexasInstruments Inc. , DM816x, C6A816x and AM389x Overview [EB/OL]. [2011-06-07]. http://processors.wiki.ti.com/index.php/DM816x_C6A816x_AM389x_Overview.