基于达芬奇技术的日面活动图像处理与识别系统*

胡新华[1,2]，邓元勇[1]，王先平[3]

(1. 中国科学院 国家天文台，北京 100012；2. 中国科学院 研究生院，北京 100049；3. 北京芯系嵌入式系统设计室，北京 100012)

摘　要：针对日面活动的多样性和复杂性，采用高性能的数字视频处理技术——达芬奇技术设计了日面活动图像处理与识别系统(SIPRS)。首先从 SIPRS 的系统架构出发，对系统的硬件设计进行了分析，特别是对 DM6437 与数字相机 MDC1004 之间的接口进行了详细的分析；在软件上按系统功能需求规划出八个核心任务，实现了 SIPRS 基于 Web 的远程系统配置及日面活动图像的预处理、处理和识别功能。整个系统采用高性能数字媒体处理器、优化的实时操作系统和优化的图像处理与识别算法，完全满足太阳望远镜终端实时图像处理的要求。

关键词：达芬奇技术；DM6437；数字相机；MDC-1004；日面活动图像处理与识别系统；日面活动；图像处理与识别

中图分类号：TP391.4；TH751　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-3695(2008)10-3165-04

Image processing and recognition system based on DaVinci technology for solar activities

HU Xin-hua[1,2], DENG Yuan-yong[1], WANG Xian-ping[3]

(1. *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100012, *China*; 2. *Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*; 3. *Beijing Xinxi Embedded System Design House, Beijing* 100012, *China*)

Abstract: This paper designed an solar activities image processing and recognition system (SIPRS) for the diversity and complexity of the solar activities based on high-performance digital video processing technology: DaVinci technology. First, analyzed system hardware design, particularly analyzed the interface between digital cameras MDC1004 and DM6437. Second, abstracted eight core tasks according to the demand of the system in system software design. Third, implemented the Web-based remote system configuration and the image preprocessing, processing and recognition on solar activities for the SIPRS. Experiments show that by using a high-performance digital media processor, optimized real-time operating system, and optimized algorithm of image processing and recognition, the entire system can perfectly meet the requirements of the real-time solar image processing.

Key words: DaVinci technology; DM6437; digital cameras; MDC-1004; SIPRS; solar activities; image processing and recognition

0　引言

在天文观测领域中，根据不同的观测内容要求望远镜系统具有不同的观测能力。对于太阳表面和太阳大气层中各种电磁活动现象[1]的研究，需要针对各种爆发现象的特点提出相应的观测方法。日面爆发性活动各有特点，如太阳耀斑爆发，它不同于太阳表面的其他电磁活动现象，是太阳色球层中局部小区域的突然发亮，并迅速增强的现象，也是各种太阳活动中对日地空间和地球环境影响最大的、最为剧烈的电磁活动现象。虽然耀斑可持续存在几个小时，但在它最开始迅速形成的过程中(几分钟至十几分钟)蕴涵着关键物理信息，可为耀斑机制的理论研究提供重要依据。由于太阳耀斑爆发没有固定的位置和形态，也很难从太阳物理学上寻找其与日面其他电磁活动现象的关系，耀斑爆发难以预测，造成在实际观测中常常漏掉爆发活动的最初始阶段，为理论研究带来不便。目前，国内外天文学界仍没有一套准确预报耀斑发生位置、高度、大小及其后随效应的理论体系，因此观测系统自动识别耀斑爆发、并准确记录耀斑迅速形成过程，将对太阳耀斑机制的研究和太阳活动预报具有极其重要的意义。

国家天文台怀柔太阳观测基地[2]拥有一套高时空分辨率、高灵敏度、适当光谱分辨率和高科学含量的综合望远镜系统，能同时测量太阳上不同层次、不同尺度的视频矢量磁场、速度场，以及通过光谱扫描获得光谱线轮廓和 Stokes 参数轮廓，主要用于太阳物理的基础研究、日地关系应用基础研究以及太阳活动对空间环境和通信干扰预报等应用研究。其中口径为 14 cm、观测波段为6 563 Å 的 H_α 全日面望远镜，可在日常观测中对日面爆发性活动进行监测，如对耀斑爆发进行监测。为满足实时处理与识别的需求，H_α 全日面望远镜的终端图像处理系统要具有以下功能：a)实时耀斑图像采集，并对观测图像进行分析与预处理；b)实时耀斑特征提取与识别；c)图像的压

收稿日期：2007-10-15；**修回日期**：2008-02-14　**基金项目**：国家重点基础研究发展规划项目(2006CB806301)；国家自然科学基金资助项目(60673158)

作者简介：胡新华(1978-)，女，辽宁沈阳人，工程师，博士，主要研究方向为图像采集与处理系统的设计与应用、数字图像处理与识别算法的高性能 DSP 和 FPGA 实现(hhflower22@gmail.com)；邓元勇(1965-)，男，研究员，博士，主要研究方向为太阳物理、天文仪器；王先平(1977-)，男，高级工程师，硕士，主要研究方向为嵌入式系统架构及其应用.

缩、存储和传输。

针对上述太阳望远镜终端图像处理系统的需求，本文采用 TI 公司最新一代高性能的数字视频处理技术——达芬奇技术[3]研制了一套日面活动高速图像处理与识别系统（high-speed solar activities image processing and recognition system, SIPRS）。达芬奇技术是针对数字视频进行优化，包括高性能数字信号处理片上系统、多媒体编解码器、嵌入式实时操作系统和应用程序框架构成的一整套开放的数字音频、图像及视频处理平台。

1 硬件设计

1.1 系统框图

太阳光经过 H_α 全日面望远镜在 CCD 相机上成像，相机选用 IMPERX 公司型号为 MDC-1004 的 CCD 相机，SIPRS 通过串口（集成在 Camera Link 中）配置 MDC-1004 的各种工作模式和参数控制 MDC-1004 的电子快门和曝光，然后将 MDC-1004 采集所得的全日面图像通过 Camera Link 读入，再进行图像预处理、分析、耀斑特征提取和识别，并将原始图像和结果图像通过以太网传送到高速存储和回放系统中。SIRPS 还可接收远程 Web 浏览器的访问、配置和控制。系统框架如图 1 所示。

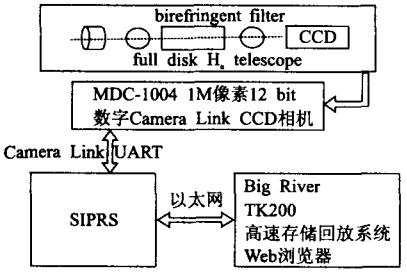

图1 H_α全日面望远镜观测处理存储系统框图

1.2 DM6437 达芬奇处理器简介

SIPRS 的核心是 DM6437 达芬奇处理器[4,5]。DM6437 作为 TI 公司新一代高性能的数字媒体处理器，拥有以下出色的性能：

a）采用高性能的 C64x + 内核、高达 600 MHz 的主频、短至 1.67 ns 的指令周期，每个时钟周期可并行执行 8 个 32 bit 的 C64x + 指令，性能高达4 800 MIPS。

b）VelociTI.2 超长指令体系结构，拥有 8 个独立的功能单元，即 6 个 ALU 单元和 2 个乘法单元，非对齐的 load-store 存取架构，支持字节寻址（8/16/32/64 bit 的数据操作），支持位提取、置位和清零；灵活的寻址方式有力地支持了数字信号处理。

c）双级缓存，32 KB 的 L1P 程序缓存、80 KB 的 L1D 数据缓存、128 KB 统一编址的 L2 可灵活分配的缓存，可极大地提高程序性能。

d）功能丰富的视频处理子系统。前端子系统支持 CCD 和 CMOS 图像传感器接口，实时图像处理预览引擎，对通用视频解码器的无缝接口，直方图模块，自动曝光、自动白平衡和自动对焦模块，缩放模块；后端子系统支持硬件在屏幕显示（OSD），4 个 54 MHz 的 DAC 支持复合 NTSC/PAL 视频、S-video 输出和 YPbPr 及 RGB 分量输出，8/16 位 YUV 和 24 位 RGB 数字视频输出，HD 分辨率，支持 2 个视频窗口。

e）外部存储器接口支持 256 MB 的 DDR2 RAM 内存，64 MB 的 NOR Flash，可用于存储和运行实时嵌入式操作系统 DSP/BIOS，复杂的音频、图像和视频处理算法，复杂的用户程序。

f）支持 2 个 UART，可用于控制数字 CCD 相机，1 个高端 CAN 用于构建现场总线网，3 个 PWM 输出用于控制云台的运动，多达 111 个 GPIO 引脚可用于特殊的控制，如数字相机的异步触发，10/100 Mbps 的以太网控制器用于与互联网通信，实现 SIPRS 的数据传输、远程配置和操作。

DM6437 功能框图[4,5]如图 2 所示。

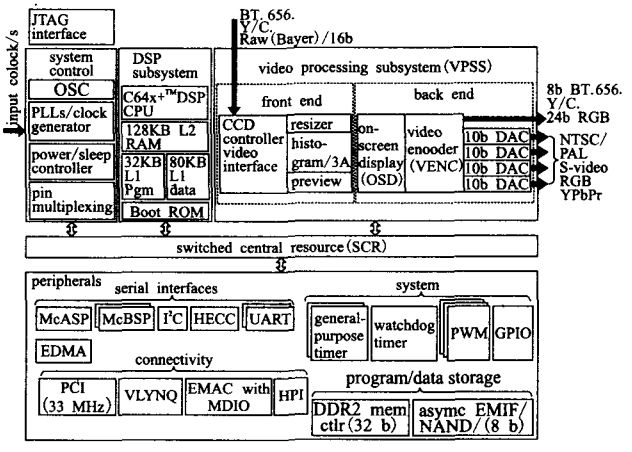

图2 TMS320DM6437功能框图

1.3 SIPRS 硬件框图

SIPRS 的核心子系统由一个主频为 600 MHz 的 DM6437 达芬奇处理器，两片 MT47H64M16 构成的 32 位 256 MB 的 DDR2 RAM，一片 S29GL512N 构成的 8 位 NOR Flash 构成。其功能子系统由两部分组成：a）通过 Channel Link 芯片 DS90LV048 和 LVDS 收发器 DS90C031BTM、DS90LV019TM 构成的 Camera Link 接口以及相机触发输入和脉冲输出的两条 GPIO 线，用于配置和控制 MDC-1004 并从中获取图像和状态信息；b）采用以太网 PHY DM9161A 和带隔离变压器的 RJ45 HR911105A 构成的 10/100 Mbps 以太网接口，用于向 Big River TK200 高速存储回放系统发送图像数据，接收 Web 浏览器的远程访问、配置和操作。SIPRS 的硬件框图如图 3 所示。

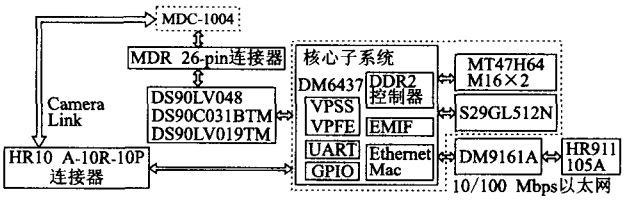

图3 SIPRS的硬件框图

1.4 MDC-1004 接口设计

限于篇幅，本文省略了 SIPRS 中 DDR2 RAM、NOR Flash、以太网 PHY、电源时钟和复位等常见设计，只对 SIPRS 中的视频接口——DM6437 的视频前端（VPFE）与 MDC-1004 数字相机之间的接口设计进行阐述。

MDC-1004[6]具有以下优秀的性能和灵活的配置：

a）7.4 × 7.4 μm^2 的矩形像素大小，1004 × 1004 像素高分辨率的逐行扫描单色 CCD 相机。

b）12 bit 数字输出，标准的 Camera Link 接口，最大分辨率下帧速可高达 48 fps。

c）可编程的工作模式和工作参数，包括分辨率、帧速、曝

光时间、电子快门、长积分时间、Gamma 校正、外部触发、脉冲输出、动态范围控制、增益和补偿以及内建的测试模式。

MDC-1004 与 SIPRS 的接口有两个，即相机数字信号接口和 IO 接口。其中，相机数字信号接口遵循基本 Camera Link 标准，提供视频数据、同步信号、控制和串行通信；IO 接口提供 LVDS 差分方式的一路触发输入和一路脉冲输出。由于 DM6437 的视频前端的可配置性[7]，MDC-1004 与 VPFE 之间的连接映射[8]比较直接，如图 4 所示。

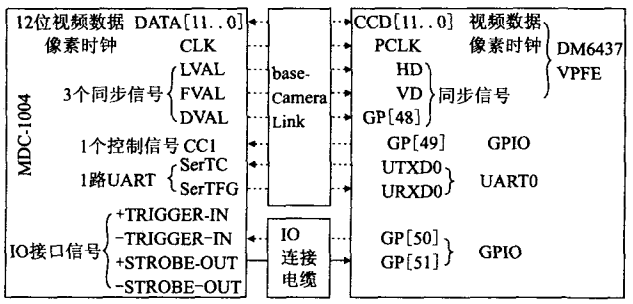

图4　MDC-1004数字相机与VPFE之间的连接

图 4 中的虚线箭头表示对应的信号需要按 Camera Link 规范采用 Channel Link 芯片和 LVDS 收发器进行信号转换后对应连接；实线箭头表示直连。其中，+TRIGGER IN 与 GP[50]之间需要串联一个 300 Ω 的电阻；GP[51]需要用 1 kΩ 的电阻上拉，-TRIGGER IN 和 -STROBE OUT 接地，这些 IO 接口信号在相机内部已经采用了光耦隔离，因此外部无须再采用隔离措施。

2　软件设计

SIPRS 软件开发在 CCS(code composer studio)3.2 集成开发环境中进行，采用与 CCS 无缝集成的 DSP/BIOS[9]实时操作系统作为软件运行平台，采用 Framework Components 作为应用程序框架，采用 XDAIS Developer's Kit 和 Codec Engine 作为图像处理和识别算法框架，采用 BIOS/DDK[10]开发外设驱动程序，采用 NDK(network developer's kit)开发 Web 服务程序[11]。运用这些经过 TI 公司针对其 DSP 特别优化的软件模块，增强了 SIPRS 软件的性能、可移植性和可维护性。

2.1　SIPRS 任务规划

针对 SIPRS 的应用需求，采用 OOA(面向对象分析)和 OOD(面向对象设计)方法将 SIPRS 的实际任务映射到 BIOS 中的具体任务，结合 Framework Components 规划出如表 1 所示的八个任务。

表 1　SIPRS 任务描述

任务名称	任务描述
tskInit	SIPRS 系统初始化，读取系统 Flash 配置区域，对各部件进行配置，特别是 MDC-1004 的工作模式和工作参数；创建其余任务，然后删除自己
tskCapture	控制 MDC-1004 进行太阳观测，获取全日面太阳图像
tskPreprocess	图像预处理，去除图像中的随机噪声和几何畸变，提高信噪比，尽可能去除成像中的图像退化，使图像接近其真实对象
tskProcess	图像处理，直方图统计，时域频域信息分析
tskPattenRec	太阳活动现象自动识别：耀斑特征提取与识别
tskHTTP	HTTP 服务器远程交互信息处理，如 SIPRS 的远程访问、配置和操作
tskCompress	去除图像像素间的相关性或冗余，对观测所得的图像进行无损压缩
tskSend	将观测所得的原始压缩图像、识别处理后的图像信息一起打包发送给 Big River TK200 高速存储回放系统

上述八个任务占用三个优先级。其中，tskInit 优先级为 7 最高，tskHTTP 优先级为 5 最低，其余六个任务优先级居中为 6。太阳观测图像和相关信息以同步传输队列和同步传输消息的形式在任务间进行传递，任务通过 BIOS 驱动程序来操作相应的硬件，如 MDC-1004、串口和以太网。

2.2　Web 配置设计

NDK 包含硬件抽象层、网络控制模块、TCP/IP 协议栈、DSP/BIOS 操作系统抽象层和网络工具五个库，支持核心 TCP/IP 协议如 TCP、UDP、ICMP、IGMP、IP、ARP 及 PPP，还支持 HTTP、TELNET、TFTP、DHCP、DNS 高层协议服务，采用 Berkeley 套接字做应用程序编程接口，方便网络应用程序开发。

采用 NDK 的 HTTP 高层协议服务，在 SIPRS 内构造了一个微型的 Web 服务器，通过 Web 浏览器如 IE、Navigator 和 Firefox 等即可远程访问、配置和操作 SIPRS。其中的网页以嵌入式文件系统存于 NOR Flash 中，tskHTTP 作为 CGI 函数，处理来自浏览器的 Post 和 Get 请求，完成相应的功能。为了使 SIPRS 更具有适应性，尽可能将其有实用价值和可配置的参数提取出来，如表 2 所示。

表 2　SIPRS 配置参数

配置对象	配置参数	参数取值范围及说明
MDC-1004 数字相机	输出模式	单输出或双输出
	分辨率	最低 1 个像素，最高 1 004 × 1 004
	帧速	a)一般情况下为曝光时间倒数，frame rate[fps] = 1/exposure time [sec] b)采用垂直图像窗，可提高帧速，FR[fps] = 1/[(7.2 × 10^{-6} × (1010 - WS)) + 60.83 × 10^{-6} + (WS × TL)]。其中：WS 为垂直窗尺寸；TL 为有效行持续时间 c)长时间积分，帧速 = 1/积分时间
	镜像	是否，仅对单输出模式有效
	垂直图像窗	垂直窗尺寸 = 末行 - 起始行
	水平图像窗	水平窗尺寸 = 末列(末像素) - 起始列(起始像素)
	垂直 2：1 并行	是否
	水平 2：1 并列	是否
	电子快门	1/16 000 ~ 1/30 s
	长积分时间	40 ms ~ 10 s
	外部触发	硬件触发或软件触发，可灵活控制帧速和曝光时间以及照相同步
	增益	0 ~ 1 023
	偏移	0 ~ 255
	动态噪声修正	是否
	Gamma 修正	是否
	测试模式	是否
	启动模式	用户设置或工厂设置
以太网	IP 地址获取方式	动态或静态
	IP 地址	由实际网络情况决定
	子网掩码	
	网关	
	主要域名服务器	
	次要域名服务器	
	管理者名字	缺省值 admin
	管理者密码	缺省值 admin

表中的 MDC-1004 数字相机的设置由 tskHTTP 调用 UART0 的驱动程序来完成，通过特定的格式实现对 MDC-1004 里面的寄存器的访问和修改。串口通信格式为 8 bit 数据位，1 bit 停止位，无奇偶校验，缺省波特率为9 600。MDC-1004 中寄存器的具体读写格式如下：

a)8 bit 寄存器写，0xA5 + 寄存器地址 + 0x5A + 要写的数据；

b)16 bit 寄存器写，0xA5 + 寄存器地址低字节 + 0x5A + 要写的数据低字节 + 0xA5 + 寄存器地址高字节 + 0x5A + 要写的

数据高字节;

c)8 bit 寄存器读,0xA5 + 寄存器地址 + 0x55 + 0x55,相机通过串口返回被读寄存器数据;

d)16 bit 寄存器读,0xA5 + 寄存器地址低字节 + 0x55 + 0x55,相机通过串口返回被读寄存器数据低字节;0xA5 + 寄存器地址高字节 + 0x55 + 0x55,相机通过串口返回被读寄存器数据高字节。

3 日面活动图像处理与识别

3.1 图像预处理

tskPreprocess 任务是实现日面活动观测图像的预处理。由于下列因素的影响,如望远镜对太阳的跟踪误差、风等因素使望远镜产生的抖动以及光学系统离焦等,观测所得的图像会产生几何畸变,即图像发生退化。图像预处理的目的是去除噪声提高信噪比,尽可能去除成像中的图像退化,使图像接近其真实对象。根据图像退化的原因进行相应的预处理[12]:

a)去除图像中的随机噪声,可采用图像积分、加长曝光时间或多帧累加的方法提高信噪比;

b)去除图像几何畸变,采用三次卷积法、双线性内插法和最邻近内插法等内插方法进行几何畸变失真校正。

对于原始观测所得日面图像的预处理部分,为了获得高速实时预处理速度并为后续处理留有余地,SIPRS 采用计算量较小的最邻近内插法作图像预处理,每处理一帧图像后采用帧数可调、多帧累加法累加多幅图像,这些预处理被封装在一个 CODEC 内实现,构成图像预处理 CODEC。

3.2 图像特征提取与处理

由于太阳耀斑爆发没有固定的位置和形态,也很难从太阳物理学上寻找耀斑爆发与日面其他电磁活动现象的关系,造成耀斑爆发最初阶段难以识别。根据日面活动的特点,除耀斑爆发外,其他日面大尺度特征的寿命相对较长、短期变化不明显,在短时间(如 1 h)的采像过程中可将除耀斑外的日面看做宁静的背景,识别的目的则是在宁静的背景中分割出活动的耀斑区域[13]。本系统根据日面图像灰度变化率特征进行图像分割,选择合适的灰度阈值,将日面图像分割成耀斑爆发区域与太阳背景两部分。算法上采用 Ostu 灰度阈值分割方法,即最大类间方差法[14,15],其基本原理为将直方图在某一阈值处分割成两组,当被分成的两组方差为最大时以决定阈值。观测实验表明该方法可快速有效地将耀斑从太阳背景中分割出来。

3.3 日面活动识别

H_α 望远镜终端实时采集所得的图像,经过阈值分割处理后,可根据检测结果得出是否有耀斑爆发。由于耀斑爆发时图像局部区域亮度明显增加,为了不使 CCD 局部像素饱和造成亮度值溢出,一旦确认有耀斑爆发现象发生时,系统将调用 CCD 曝光控制以减少曝光时间和采像时间间隔。图 5 是识别程序的流程图(图中虚线部分是基于历史观测资料进行的离线处理,进行分类器设计,将设计好的分类器运用到 SIPRS 中)。

阈值的选取对于耀斑的识别性能至关重要。在实际测试中,该系统对耀斑发生区域的图像灰度变化非常敏感。由于目前国内地基式太阳望远镜尚未有耀斑自动识别处理功能,需要在日常观测中对耀斑识别结果进行统计分析,再进行反复的分类器训练,以期待得到更恰当的灰度阈值。

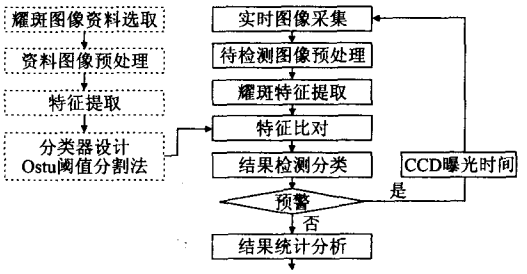

图5 太阳耀斑处理与识别流程图

4 结束语

SIPRS 的核心——达芬奇处理器 DM6437 以 600 MHz 的时钟高速运行,控制数字 CCD 相机 MDC1004 在其最高分辨率 1 004 × 1 004下以帧速 48 fps 进行太阳图像采集与处理。实时获取的日面图像在针对达芬奇处理器特别优化的实时操作系统 DSP/BIOS 的控制下,以同步传输队列的方式流经图像预处理、图像处理、日面活动识别和图像压缩四个经过算法优化的任务的实时处理,最后通过以太网以最高 100 Mbps 的速率传送给高速存储和回放系统。整个系统完全满足太阳观测、处理和存储的严格实时要求。尤其是耀斑识别功能,填补了目前国内这一领域的空白,对天文学理论研究具有重要的意义。同时,这项技术可为我国正在推进的空间科学项目,如空间太阳望远镜、夸父、SMESE 等的太阳活动爆发现象的观测积累技术和经验。

参考文献:

[1] HAHN M, GAARD S, JIBBEN P, *et al.* Spatial relationship between twist in active region magnetic fields and solar flares[J]. The Astrophysical Journal, 2005, 629(2): 1135-1140.

[2] 北京天文台怀柔太阳观测基地[EB/OL]. http://sun.bao.ac.cn/index1.html.

[3] DaVinci technology, digital video innovation product bulletin(Rev. D)[R]. Chicago: Texas Instruments Incorporated, 2007.

[4] TMS320DM6437 data sheet[R]. Chicago: Texas Instruments Incorporated, 2007.

[5] Overview of DaVinci™, TMS320DM643x digital media portfolio (Rev. B)[R]. Chicago: Texas Instruments Incorporated, 2007.

[6] MDC-1004 and MDC-1004C-I, mega pixel 12 bit Camera Link digital Cameras user's manual[K]. Boca Raton: IMPERX Incorporated, 2004.

[7] TMS320DM643x DMP video processing front end(VPFE) user's guide[K]. Chicago: Texas Instruments Incorporated, 2007.

[8] Specifications of the camera link interface standard for digital cameras and frame grabbers[S]. [S. l.]: Camera Link Incorporated, 2004.

[9] DSP/BIOS device driver developer's guide[R]. Chicago: Texas Instruments Incorporated, 2002.

[10] TMS320 DSP/BIOS user's guide[R]. Chicago: Texas Instruments Incorporated, 2002.

[11] TMS320C6000 network developer's kit(NDK) software programmer's reference guide(Rev. D)[K]. Chicago: Texas Instruments Incorporated, 2007.

[12] 何斌, 马天予. Visual C++数字图像处理[M]. 北京:人民邮电出版社, 2001.

[13] 耿则勋, 王振国. 改进的天文斑点图像高清晰重建方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(7): 1151-1156.

[14] 林国余, 张为公. 基于进化规划的最大类间方差的图像分割算法[J]. 传感技术学报, 2006, 19(1): 179-182.

[15] 孔明, 孙希平, 王永骥. 一种改进的基于类间方差的阈值分割法[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2004, 32(7): 46-47.