基于达芬奇技术的SMFT终端实时图像处理系统研制*

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：针对太阳磁场望远镜(SMFT)终端海量图像数据的传输与处理等问题，设计并实现了基于达芬奇技术的嵌入式实时图像处理系统。利用UML建模抽象出核心对象，描述整个系统的行为并指导系统的设计。系统硬件上围绕双核(ARM+DSP)达芬奇处理器DM6446进行了设计和实现；系统软件上对ARM端的MontaVista Linux操作系统和DSP端的DSP/BIOS嵌入式实时操作系统进行了客制化裁减和BSP开发；用户软件上设计并实现了一系列图像处理和识别功能，包括CMOS图像传感器成像控制、图像预览、图像预处理、太阳磁图实时提取、太阳图像FITS文件的生成、文件格式转换和数据压缩等。良好地满足了(SMFT)终端实时采集与图像处理的要求，提高了望远镜的观测效率。

关键词：达芬奇技术；MontaVista Linux；DSP/BIOS；UML；太阳磁图提取；FITS文件
中图分类号：TP391 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-0086(2008)10-1388-05

Development of SMFT terminal real-time image processing system based on davinci technology

HU Xin-hua[1,2]**, DENG Yuan-yong[1], WANG Xian-ping[3]
(1. The National Astronomical Observatories, CAS Beijing 100012 China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Beijing XinXi Embedded System Design House, Beijing 100012, China)

Abstract: An embedded real-time image processing system is developed based on DaVinci Technology, which can deal with massive images data transmission and processing during solar observation. It is innovative to use the UML model to describe the entire system. And hardware was designed around the double-core (ARM+DSP) DaVinci processor DM6446; The MontaVista Linux operating system on the ARM side and the DSP/BIOS real-time operating system on the DSP side are customized, And the BSP for both are developed. A series of image processing algorithms are designed and implemented for the application software, including control of CMOS image sensor, image preview, image pre-processing, solar magnetic map real-time extraction, solar FITS file generation, file format conversion and data compression. The proposed system can preferably meet the demand of real-time image acquisition and processing of SMFT, and improves the efficiency of solar observation.

Key words: DaVinci technology; MontaVista Linux; DSP/BIOS; UML; Magnetic map extraction; FITS document

1 引 言

太阳磁场测量原理是基于光通过磁场产生的Zeeman效应[1]，本质上是一种对光的偏振测量[2]。与磁场有关的太阳有效光量是非常微弱的，通常只有背景信号强度的千、万分之一的量级。在帧速50 fps的情况下，信噪比约37 dB，只能测到百高斯以上的强磁场；要想测到10高斯以下的弱磁场，需要256帧以上的叠加，即需要长时间积分来提高磁场测量精度，这样就降低了测量的时间分辨率和空间分辨率。地基太阳磁场望远镜的观测精度还受大气抖动和望远镜跟踪振荡的影响，为了提高跟踪精度，减小大气抖动带来的观测误差，需要高帧速图像传感器进行图像过采样，需要导行中的图像处理系统能高速的进行图像相关运算而实现高精度的相关跟踪，需要终端图像处理系统具有实时降噪、去混叠、滤波和图像复原等一系列图像处理功能来提高观测精度。

达芬奇技术[3]是美国德州仪器公司近年来针对数字音视频及图像处理进行优化的，包含高性能数字信号处理片上系统、多媒体编解码标准、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及图像处理平台的统称，特别适用于实时音视频和图像处理领域。其双核架构的片上系统，即胜任复杂的系统管理任务，也满足实时算法处理的需求，结合

收稿日期：2007-08-25 **修订日期**：2007-11-06
* **基金项目**：国家自然科学基金资助项目(60673158)；中科院创新重大方向性资助项目(KJCX2-YW-T04)
** **E-mail**：hhflower22@gmail.com

万方数据

其开放的算法标准和应用程序框架,其功能与性能是其他基于单核处理器的音视频及图像处理系统所难以匹敌的。

针对上述需求并结合达芬奇技术的优势,提出了一种采用达芬奇技术进行设计的基于双核(ARM+DSP)达芬奇处理器 DM6446 的 SMFT 终端实时图像处理系统方案(下文简称 RTIPS)。首先采用 UML 对整个系统进行建模,再进行需求分析,指导硬件和软件设计流程,并对关键硬件接口进行了分析,移植和客制化了 MontaVista Linux 和 DSP/BIOS 嵌入式操作系统,最后设计了图像采集与处理应用软件及一系列相应的图像处理算法。

2 系统的 UML 描述

UML,(unified modeling language)系统建模语言,已经广泛应用于 OOA(面向对象分析)、OOD(面向对象设计)、OOSD(面向对象结构化设计)和嵌入式实时系统的分析、建模和设计[4]。本文采用 UML 规范中的一系列技术在 Rhapsody[5] 开发平台中对 SMFT 终端实时图像处理系统进行了分析,并构建了相应的 UML 模型[6],抽象并简化了系统、硬件和软件的设计。

2.1 关键对象抽象

根据 Top-down 方法学,先抽象出整个太阳磁场望远镜系统的对象模型图,如图 1 所示:SMFT 由跟踪系统控制实时指向太阳指定观测区域,SMFT 终端图像处理系统调节 SMFT 中的波片及焦点观测指定的偏振光,并根据各种同步需求控制 CMOS 图像传感器的曝光,将 CMOS 图像传感器采集所得的太阳图像进行预处理、分析、压缩和存储。由于篇幅所限,图 1 是实际系统图表的高度简化。图 1 中抽象的关键对象的属性和行为如表 1 所示。

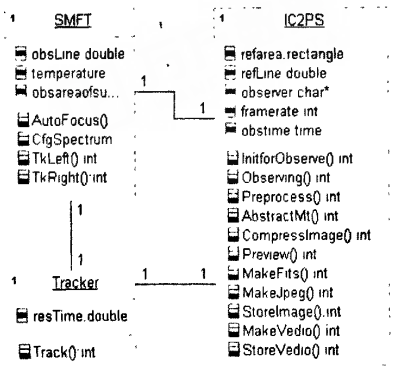

图 1　整个太阳磁场望远镜系统的对象模型图

Fig. 1　The object model diagram of the whole SMFT

表 1　关键对象的属性和行为描述表

Tab. 1　The description of the properties and the behaviors of the key objects

Object name		Property		Behavior	
Name	brief description	Name	brief description	Name	brief description
SMFT	The optical part of SMFT	Obsline	The observing spectral line	AutoFocus	Automatic focusing
		Temperature	The SMFT cavity temperature	CfgSpectrum	Configuring optical imaging
		Obsareaofsun	The observing area	TkLeft	System Measuring left-hand rotation light
				TkRight	Measuring right-hand rotation light
Tracker	Solar disk tracker	Restime	The dynamic response time	Track	Tracking in real-time
RTIPS	Image capturing, processing and storing system	refarea	The specified observing area	InitforObserve observing	Initialization for observing observing
		refLine	The specified observing spectral line	Preprocess abstractMt	Image pre-processing abstracting solar magnetic graph
		observer	The observer	Compressimage preview	Image compression image preview
		framerate	The frame rate of CMOS imager	Makefits makejpeg	Generating fits file generating jpeg file
		obstime	The local time	Storeimage make vedio store vedio	Storing image generating video storing video

2.2 系统行为描述

当观测者设定好观测区域、观测谱线和观测模式等初始化观测条件后,RTIPS 进入观测状态,同时启动多个任务进行图像预览、图像预处理、太阳磁图提取和相关文件的生成与保存。RTIPS 中主要任务的序列图如图 2(简化图)所示。图 2 中的各个任务根据其工作职责命名。

3 硬件设计

RTIPS 以双核达芬奇处理器 DM6446[7] 为核心进行构建,CMOS 图像传感器在 ARM 核的控制下进行图像采集,DSP 核对采集所得的图像进行预处理、磁图提取、文件格式转换和压

万方数据

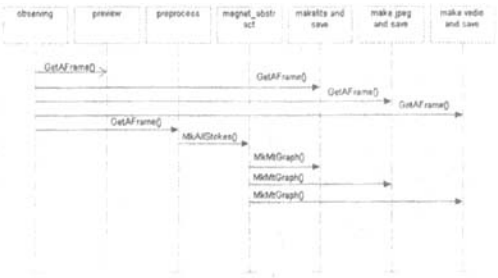

图2　RTIPS中主要任务序列图

Fig. 2　The sequence diagram of the key tasks in RTIPS

缩等计算密集型处理，ARM核将原始图像和处理后图像对屏幕进行分割同时显示，并将原始图像以图像和视频格式存储到硬盘上。

3.1　硬件框图

RTIPS由CMOS图像传感器、DM6446为核心的子系统、显示器、硬盘和通讯(以太网和串口)等几部分组成，如图3所示。其中核心子系统由DM6446、256MB DDR2内存和128MB NOR FLASH构成，Linux和BIOS两个操作系统的映象和用户程序都存储在FLASH内，系统启动后装入内存运行；硬盘只用来存储太阳图像和视频；显示器、鼠标和键盘组成了完整的人机界面；串口和以太网可分别用来跟其他系统进行低速和高速的数据交换，特别是可以通过以太网远程登录MontaVista Linux实现远程全面控制；而其应用功能由单色CMOS图像传感器和光学成像控制电路构成。整个RTIPS犹如一台客制化的微型电脑。

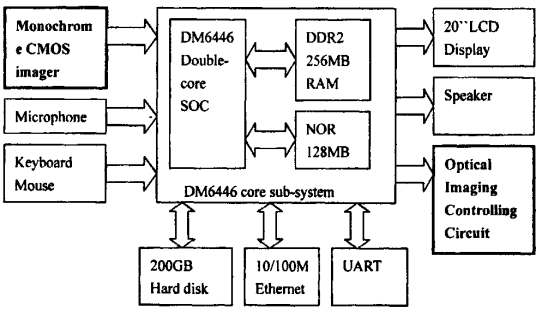

图3　RTIPS硬件框图

Fig. 3　The hardware framework of the RTIPS

3.2　关键接口分析

从图3可知，RTIPS犹如一台微型电脑，除单色CMOS图像传感器和光学成像控制电路的接口需针对应用定制外，其余部分都是标准接口，其分析此略[8]，而只分析DM6446与CMOS图像传感器和光学成像控制电路接口设计。本文采用的MICRON公司的MT9M001 CMOS图像传感器在同样谱线处的量子效率都超过了54%。

光学成像控制电路由一套波片旋转和调焦步进电机驱动系统、CMOS图像传感器曝光控制电路和KD*P电光晶体高压翻转控制电路组成。这套电路采用8个Luminary Micro公司基于ARM CortexTM-M3的LM3S2965微控制器构成的分布式控制系统[9](集散控制系统)，利用基于CAN2.0B规范的CANopen协议组建成现场总线网，受控于RTIPS，因为DM6446本身没有CAN控制器，因此通过其SPI总线扩展了一个CAN控制器MCP2515。

MT9M001[10]与DM6446的接口相对于KAI-1020而言简单许多，其外部接口由I2C控制总线、时钟同步状态线和10位数据总线构成。DM6446集成视频前端子系统[11](VPFE)，可以方便地和CMOS图像传感器相连：将MT9M001的I2C总线与DM6446的I2C主控器直接相连，10位数据总线与VPFE的视频总线低10位相连，像素时钟线对应相连，其余控制和状态线根据需要连接即可。

4　软件设计

RTIPS的软件设计包括系统软件、太阳观测软件和相关的一些图像处理算法设计。

4.1　系统软件设计

RTIPS中的DM6446作为双核的高性能图像、视频和音频处理平台，需要双操作系统来进行全面的管理和资源的充分利用。整个系统软件框图如图4所示：

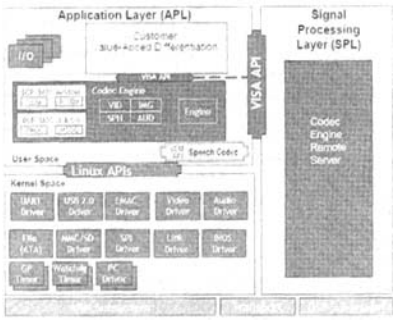

图4　RTIPS系统软件框图

Fig. 4　The system software framework of RTIPS

ARM子系统上运行的MontaVista Linux通过内核驱动管理所有的外设，诸如CMOS图像传感器、显示器、硬盘、鼠标和键盘等，通过标准的Linux API来操作这些设备；DSP子系统上运行的BIOS实时操作系统为各种编解码引擎的高效调度和运行提供了坚实的平台；ARM子系统将各种计算密集型的任务通过VISA API调用DSP上相应的编解码引擎来进行运算和处理，二者共享内存而无需数据搬移。为了使这些算法处理具有统一的封装和调用格式，TI在其以前的express DSP算法互用性标准(XDAIS)的基础上设计了一套xDM标准，使遵循该标准的算法实现了更进一步的互通互用性。

因为TI为DM6446提供的DVSDK(数字视频软件开发包)给客制化提供了一个与其评估板TMDSEVM6446对应的BSP(板级支持包)，包含了大部分设备的驱动程序。本文在其基础上按linux 2.6内核驱动模型开发了MT9M001和MCP2515的驱动程序，以备图像采集子程序和SMT光学系统

万方数据

控制子程序(集成在太阳磁场观测软件中)调用。

4.2 用户软件设计

按系统管理和太阳观测的需要,主要移植和开发了两个 RTIPS 上的用户软件:一个是太阳观测软件;另一个是 FTP 服务器 vsftpd,用于系统的远程管理和太阳的远程观测。

vsftpd 是遵循 GPL 授权的开源软件,安全、快速而且稳定,支持虚拟 IP 配置、虚拟用户、IPv6、带宽限制等许多特色。本文将其移植到 RTIPS 的 MontaVista Linux 平台上,并配置到系统的启动文件中,使其随系统启动而启动。采用一般的 FTP 客户端软件如 filezilla 即可登录该 FTP 服务器,对整个系统进行远程配置,设置了用户名、密码和 SSL 支持来保证远程访问的安全性。而系统采集和生成的各种太阳图像放在硬盘上特别配置的目录下,可以匿名访问,方便观测资料的共享和使用,特别是对于其中的太阳 JPEG 图像文件一般浏览器都可显示,可让使用户快速找到所需的资料。

5 图像处理算法设计

太阳图像处理主要包括:预处理、磁图提取、FITS 文件生成、JPEG 文件生成和数据压缩。这 5 个处理都封装成遵循 xDM 标准的 CODEC(Compression and DECompression 的缩写,视频压缩和解压缩),以便采用统一的 xDM API 进行调用,编码时大量采用 EDMA 来进行图像数据在任务间的搬移以提高算法性能。

5.1 图像预处理

针对图像退化的原因进行相应的预处理:

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

· 去除图像几何畸变。采用最邻近内插法、双线性内插法和 3 次卷积法等插值方法进行几何畸变失真校正。

本文将采用双线性内插法(一阶插值算法)进行图像处理,设 $0<x<1, 0<y<1$,具体计算如下:

首先可以通过一阶线性插值得出 $f(x,0)$:

$$f(x,0)=f(0,0)+x[f(1,0)-f(0,0)] \tag{1}$$

再对 $f(x,0)$ 进行一阶线性插值:

$$f(x,1)=f(0,1)+x[f(1,1)-f(0,1)] \tag{2}$$

最后对垂直方向进行一阶线性插值,以确定 $f(x,y)$:

$$f(x,y)=f(x,0)+y[f(x,1)-f(x,0)] \tag{3}$$

合并(1)、(2)、(3)式可得:

$$\begin{aligned} f(x,y)=&[f(1,0)-f(0,0)]x+\\ &[f(0,1)-f(0,0)]y+[f(1,1)+f(0,0)-\\ &f(0,1)-f(1,0)]xy+f(0,0) \end{aligned} \tag{4}$$

在程序中进行双线性插值计算时直接用 3 次一阶线性插值,需要进行 3 次乘法和 6 次加减法运算;用上述合并公式只需要 4 次乘法和 8 次加减法运算,提高了图像预处理的速度。

采用双线性内插法先对每一帧图像进行处理,然后采用帧数可调多帧累加法累加多幅图像,并封装在一个 CODEC 内实现,构成图像预处理 CODEC。

5.2 太阳磁图提取

RTIPS 的核心处理就是从观测所得的图像中提取出太阳磁图。太阳磁场的测量原理是基于太阳光谱线的 Zeeman 效应,即在具有磁场的太阳大气中,太阳光的谱线会发生分裂。这些分裂的单色光具有一定的偏振态,裂距与磁场强度成固定的函数关系。选择 Stokes 参数来描述此时太阳光的偏振状态,并在一定的大气和磁场模型及吸收机制的假定下,求解 Stokes 参数转移方程,得到 Stokes 参数轮廓,通过偏振测量与望远镜定标,可以计算出谱线的裂距,从而推导出矢量磁场的相关物理量。怀柔太阳观测基地 SMFT 利用双折射滤光器在一个特定的窄波带范围内观测选定的区域中每个空间点的 Stokes 参量:$I(\lambda)$,$Q(\lambda)$,$U(\lambda)$ 和 $V(\lambda)$,然后把 Stokes 参量转换成矢量磁场。采用图像预处理 CODEC 对采集所得的图像做多次累加和去除几何畸变,并将所得的左旋光图 A_Q、A_U、A_V 和右旋光图 B_Q、B_U、B_V,对 Stokes 参数进行归一化,即可得到效果较好的太阳磁图。具体计算如下:

$$\begin{cases} \dfrac{Q}{I}=\dfrac{A_Q-B_Q}{A_Q+B_Q} \\ \dfrac{U}{I}=\dfrac{A_U-B_U}{A_U+B_U} \\ \dfrac{V}{I}=\dfrac{A_V-B_V}{A_V+B_V} \end{cases} \tag{5}$$

5.3 FITS 文件生成

根据 FITS[12](flexible image transport system)文件最新规范 2.1B 版的要求,FITS 文件由文件头数据单元(HDU)、兼容的扩展(可选)和别的特殊记录(可选)构成。最基本的 HDU 由数据块和一个包含一个逻辑记录的文件头构成,逻辑纪录长度固定为 2880 个字节,包含 36 条长度固定为 80 个字节的卡片映像,每条卡片映像由 ASCII 字符描述的关键字和关键值对构成,用于描述图像相关信息。

生成 FITS 文件的核心在于根据观测信息生成 FITS 文件头,SMFT 观测数据的 FITS 文件头中需要包含如下信息:

· 文件类型。第一条卡片映象必须为 FITS 规范规定的"SIMPLE=T",表示该文件格式遵循 FITS 文件格式规范。

· 图像信息。坐标维数,每维点数和位深。

· 观测信息。观测起始、结束时间,观测区域,观测谱线,大气视宁度,增益,暗流水平,曝光时间,帧数,STOKES 参数。

· 观测台和观测者信息。

在 DDR2 中开辟一块 2880 字节的内存(对于非标准 FITS 格式,文件头字节数可扩展)用于 FITS 文件头的构造,在对其设置完相关信息后,与对应的观测或者处理的图像数据合并在一起,即可生成需要的 FITS 文件。

5.4 图像格式转换

常见的浏览器和流行的图像处理软件一般都不能直接支持对 FITS 文件的浏览,虽然有的通过相关插件可以浏览,但是 FITS 文件一般都在几兆字节以上,大小为 1024×1024,无论本地浏览还是通过互联网进行浏览都非常不便。采用如下步骤将 FITS 图像转换为 JPEG2000[13]格式的图像:

· 采用二维 EDMA 将 FITS 图像数据行列都隔三取一,数据量缩小为原来的 1/16;

· 采用 JPEG2000 编码器将缩小后的图像压缩成 JPEG 图像。

采用 EDMA 将生成 JPEG2000 格式的图像以硬盘的 UltraDMA 模式搬迁到 vsftpd 设置好的目录内,以便在线浏览。

万方数据

5.5 图像数据压缩

FITS图像一般所占用的空间都很大，其文件大小为：2880＋NAXIS1×NAXIS2×2字节，比如怀柔太阳观测基地SMFT太阳单色像的大小就有2100032个字节，需要进行压缩存储[14]。数据压缩的原理来自信息论，通常图像的像素之间、行或帧之间存在着一些相关性，或者说冗余，压缩就是去除这些相关性或者冗余，而使数据量减少[15]。现在新兴的压缩编码技术有人工神经元网络编码、分形和小波等编码。

FTIS图像包含太阳磁场信息，需要进行无损压缩。本文参照无损压缩性能非常高的开源压缩软件KGB Archiver[16]，将其核心压缩代码移植，并封装成CODEC，用于FITS图像文件的无损压缩。

6 结　论

本文为国家天文台怀柔太阳观测基地SMFT研制的RTIPS已经实现了太阳磁场观测的主要功能，所有的CODEC在一轮完整的观测中都能很好地满足硬实时的时间要求，采集到的原始图像和提取出的太阳磁图都具有良好的效果。但还有一些需要完善的地方：一是将连续观测的图像压缩成视频，以便于对太阳活动变化的快速浏览；二是给系统配备高速存储和回放系统，并配置具有工业级性能的开源大型数据库MySQL来对所有的观测数据进行管理，以便于太阳物理工作者查询、统计和分析观测所得的太阳图像。

参考文献：

[1] The zeeman effect[DB/OL]. http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/zeeman-split.html, Feb 2007.

[2] Solar Polarimetry: The Zurich imaging stokes polarimeters[DB/OL]. http://www.hindsinstruments.com/media/peam-1.pdf, 1995.

[3] DaVinci Technology-Digital Video Innovation Product Bulletin(Rev.D)[M]. Texas Instruments Incorporated, 2007.

[4] Unified Modeling Language: Superstructure[DB/OL]. http://heim.ifi.uio.no/~trygver/2003/umlStatic/Static-17-05.pdf, Object Managemnet Group, 2005.

[5] Rhapsody in C++ Tutorial[DB/OL]. http://www.cs.missouri.edu/~skubic/RTEC/tutorialcpp.pdf, I-Logix Inc., Jul 2000.

[6] Jim Rumbaugh. Using UML for Modeling Complex Real-Time Systems[DB/OL]. http://www.ibm.com/developerworks/rational/library/content/03July/1000/1155/1155-umlmodeling.pdf, Rational Software Corporation, March 11, 1998.

[7] TMS320DM64346 Digital Media System-on-Chip datasheet[DB/OL]. http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tms320dm6446.pdf, Texas Instruments Incorporated, 2007.

[8] LIU Shuang, ZHAO Kai-sheng, LONG Zai-chuan, et al. Embeeded CCD acquisition system based on ARM and FPGA[J]. Journal of Optoelectronics·Laser(光电子·激光), 2007, **18**(11): 1296-1298. (in Chinese)

[9] PENG Xiao-jun, HE Ping-an, YUAN Bing-xia. Design and implementation of a new linear CCD driver based on CPLD[J]. Journal of Optoelectronics·Laser(光电子·激光), 2007, **18**(7): 803-807. (in Chinese)

[10] MT9M001: 1/2-inch megapixel digital image sensor datasheet[DB/OL]. http://www.icpdf.com/PdView.asp? id=20667-72452, Micron Technology, Inc., 2004.

[11] Video processing front end(VPFE) user's guide[DB/OL]. http://focus.ti.com.cn/cn/lit/ug/sprue38c/sprue38c.pdf, Texas Instruments Incorporated, Oct 2007.

[12] Hanish J, Pence D, Schlesinger M, et al. Definition of the flexible image transport system(FITS)[EB/OL]. http://legacy.gsfc.nasa.gov/documents/fits-info/office/fits-standard.tdf, 1999-03-29/2004-03-01.

[13] JPEG2000 standard[DB/OL]. http://www.jpeg.org/jpeg2000/index.html, Elysium Ltd, 2007.

[14] JIA Zhi-hong, GENG Li-hobng, SUN Cai-hong, et al. Compression technique for onboard CCD image of space solar telescope[J]. Journal of Optoelectronics·Laser(光电子·激光), 2007, **18**(3): 285-288, 313. (in Chinese)

[15] Data Compression[EB/OL]. http://en.wikipedia.org/wiki/Data-compression, 2007.

[16] KGB Archiver 2[CP]. http://kgbarchiver.net/? page=download, 2007.

作者简介：

胡新华　(1978－)，女，辽宁沈阳人，博士，工程师，从事图像采集与处理系统的设计和研究，数字图像处理与识别算法的高性能DSP和FPGA实现研究.

万方数据