

文章编号 1004-924X(2012)10-2222-07

嵌入式自动聚焦摄像模组控制系统的设计

马建设, 李合银, 程雪岷*, 林家用, 张志清

(清华大学 深圳研究生院 光盘国家工程研究中心 深圳分中心, 广东 深圳 518055)

摘要:针对手机等移动终端设备中的摄像模组,提出了一种嵌入式自动聚焦控制系统。该系统以 AD5820 作为聚焦电机的驱动 IC,以 OV5642 作为图像传感器,利用 68013 单片机进行数据处理并控制驱动 IC 调整镜头的位置,完成准确自动聚焦。系统通过控制音圈电机带动镜头行程变位,获取一系列图像;计算每幅图像清晰度评价价值构成清晰度评价曲线;采用梯度函数作为图像清晰度评价标准;并用全程搜索的方式找到图像清晰度最大值时镜头的位置,从而达到聚焦的目的。实验验证显示,系统的聚焦分辨率能达到 $5\sim 10\ \mu\text{m}$,响应速度小于 70 ms。自动聚焦实物拍摄图像清晰,能够很好地满足摄像模组自动聚焦的需求。

关键词:驱动 IC;图像传感器;摄像模组;自动聚焦;清晰度

中图分类号: TN929.5;TB853 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122010.2222

Control system for embedded auto-focusing camera module

MA Jian-she, LI He-yin, CHENG Xue-min*, LIN Jia-yong, ZHANG Zhi-qing

(Shenzhen Branch Center, Optical Memory National Engineering Research Center,
Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China)

* Corresponding author, E-mail: cheng-xm@mail.tsinghua.edu.cn

Abstract: A control system for embedded auto-focusing camera modules is proposed for mobile phones and other mobile devices. For the purpose of accurate auto-focusing, the system makes use of an AD5820 as the driver IC for a focusing motor, the OV5642 as an image sensor, and the 68013 micro-computer unit as the data processing and controlling driver IC for lens position adjustment. In auto focusing, the system obtains a series of clear images through controlling a voice coil motor to change lens positions at first, and a focusing evaluation curve is formed through calculating the definition evaluation for each image. Then, the image definition is evaluated by using gradient function as evaluation standard, and the lens position is found by the full search when the image definition comes to the maximum value. According to the experiment, the system can offer the focusing resolutions of $5\sim 10\ \mu\text{m}$ and response time less than 70 ms, which shows that the system has good automatic focusing performance, and can satisfy the requirements of automatic focusing system for the camera module.

Key words: driver IC; image sensor; camera module; automatic focusing; definition

收稿日期: 2012-04-17; 修订日期: 2012-06-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61275003, No. 60808015); 粤港关键领域重点突破项目 (No. 200920522800017, 2007A010301004); 深圳市基础研究计划资助项目 (No. JC201005310719A)

1 引言

自动聚焦是现代成像系统中必不可少的关键技术,数字成像系统中的自动聚焦技术已经受到人们的普遍关注^[1],并在传统相机中应用非常普遍,而现在将其用于数码相机上已成为一种发展趋势。在手机发展历程中,影像功能为手机带来越来越多的服务性应用,摄像模组嵌入到手机中的应用已成推广之势。随着手机摄像模组像素的提高以及聚焦马达小型化技术的成熟,自动聚焦技术已被广泛应用到手机摄像模组中。

从市场需求来看,目前国内各大手机厂家都在纷纷推出具有手机拍摄、二维码扫描等功能的自动聚焦手机。手机近焦拍摄自动聚焦技术的成熟,极大地促进了二维码在商品识别、商品防伪中的应用。以移动终端和移动互联网作为二维条码的存储、解读、处理和传播,将移动互联网和物联网有机结合起来形成的手机移动物联网,无疑具有广阔的市场前景及应用价值。利用手机识别二维条码,要求扫描摄像模组本身必须具备分辨率高、体积小、响应快速、误码率低、近焦(扫描)和远焦(摄像)切换速度快的特点,普通的手机摄像头很难满足这些要求,随着物联网的发展,手机的普遍智能化以及二维码信息传递的广泛兴起,具有自动调焦(Auto-focus, AF)功能^[2]就成为高端智能手机的必备技术。同时该模组也可作为关键部件广泛应用于二维条码扫描设备、平板电脑、微型监控系统等产品中。

我国对自动聚焦摄像模组技术研究起步较晚,目前该模组仍以进口为主,高端模组更是处于空白阶段,随着智能手机及物联网技术的不断发展,其分辨率、体积、灵敏度、响应速度等性能指标会对自动聚焦摄像模组提出更高的要求,这就需要我们加快研发进程,促进产品的更新换代,提升企业的技术水平及竞争力。

本文提出一种用于手机摄像模组的自动聚焦控制系统,并对系统各组成单元硬件电路进行了设计,主要包含聚焦电机的驱动电路、图像传感器的外围电路、以及主控单元的电路;控制程序采用多区域法选择对焦窗口,采用能量梯度函数^[3]作为图像清晰度^[4]评价标准,依靠清晰度来控制聚焦电机带动镜头的行程变位,采用全程搜索的方

式找到图像清晰度最大值时镜头的位置,从而达到聚焦的目的。

2 手机摄像模组自动聚焦工作原理

手机摄像模组自动聚焦系统由高分辨率镜头、图像传感器(CMOS^[5] Sensor)、聚焦电机(这里采用音圈马达, Voice Coil Motor, VCM^[6])、电机驱动以及后端主控单元这几部分组成。其工作原理是:聚焦电机运动过程中,图像传感器通过镜头不断获取图像;然后,通过后端主控单元对图像进行处理提高图像清晰度;接着,采用聚焦搜索算法找到清晰度最大值;最后,主控单元根据清晰度的变化来计算出电机运动方向及步数,通过 CMOS Sensor 控制驱动 IC(模式一),或者直接控制驱动 IC(模式二),从而驱动电机带动镜头朝着清晰度最大值处运动,如果一次没达到最大值,则缩小电机步距,返回执行,直至完成聚焦过程,其工作原理如图 1。

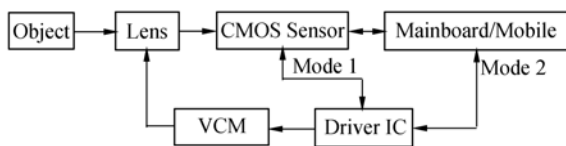


图 1 手机摄像模组自动聚焦系统工作原理

Fig. 1 Auto-focusing system schematic diagram of mobile phone camera module

3 自动聚焦模组控制系统硬件组成

以深圳盛泰光电有限公司生产的 500 万像素自动聚焦手机摄像模组为控制对象,其内部聚焦电机是 SHICOH 公司的音圈马达,图像传感器是美国 OmniVision 公司的产品 OV5642,本部分将对自动聚焦摄像模组控制系统的硬件电路进行设计。采用单片机 CY7C68013A-100AXC 作为主控单元,通过外围电路控制 OV5642 工作,并通过 OV5642 的模拟 I2C 端口发送聚焦指令给音圈电机的驱动 IC,控制电机带动镜头行程变位。

3.1 音圈马达驱动电路

本系统采用 I2C 驱动方式来对音圈马达进行驱动,使用 ADI 公司的 AD5820 作为马达的驱动芯片,参考其典型的应用^[7],驱动电路结构如图 2

所示。由外部上拉电阻和驱动芯片内部 DA 转换以及放大电路组成,其中 VDD 为驱动芯片的工作电压;XSHUTDOWN 为使能端口;SCL 和 SDA 为数据通信端口,需要使用上拉电压,一般需要大于 1.5 V; I_{sink} 为输出电流,用来控制 VCM 行程变位。主控单元发出的数字信号经过驱动芯片内部 DA 转换为电压信号,电压的大小随着数字信号的大小变化,经过放大电路输出的电压和 VCM 另一端电压 VDD 产生一个电压差,从而在 VCM 中产生电流,电流驱动着 VCM 行程变位。

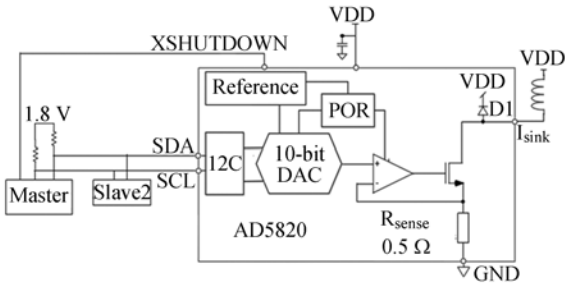


图 2 音圈电机 I2C 驱动电路结构
Fig. 2 I2C drive circuit structure of VCM

3.2 OV5642 外围电路设计

图像传感器的主要功能是获取图像数据。由于 OV5642 芯片的集成度比较高,很多功能已经集成到芯片内,其外围电路比较简单,主要是在理解芯片功能和工作方式的基础上,给芯片提供控制信号和电源信号,图 3 是 OV5642 的外接电路图^[8]。

当芯片以常用方式工作时,一些不必要的控制管脚可以悬空。控制信号 XCLK、PCLK、RESETB、HREF、STROBE、VSYNC、SIOC、SIOD 通过连接主控单元来实现通信,SIOC、SIOD 为主控和 OV5642 的 I2C 通信端口,需要上拉电压。使用 GPIO0、GPIO1 分别作为 AD5820 的 SDA、SCL 模拟 I2C 的控制端口。

电源采用外部电压控制及上电访问 I2C 控制端口的模式,外部电压控制指的是芯片的内核数字电压 DVDD 由外部决定。

D0~D9 是图像数据传输端口,用来传输采集到的 RGB 数据,主控单元和 OV5642 是每次 8 位数据通信传输,只需使用数据端口中的 D2~D9,D0 用于 AD5820 的使能端口,D1 悬空。

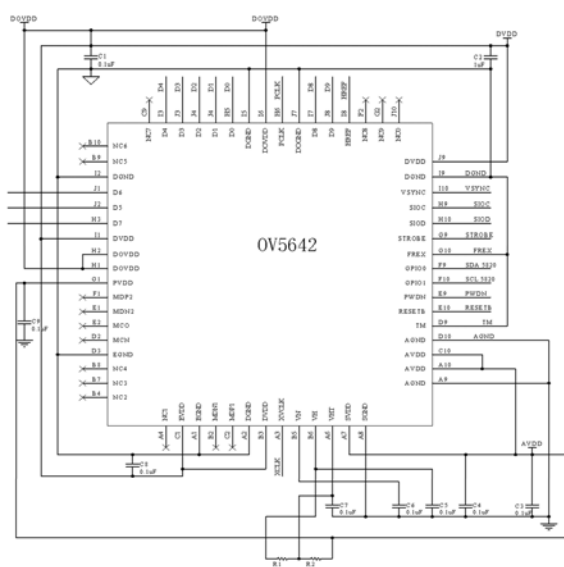


图 3 OV5642 芯片接线图
Fig. 3 Wiring diagram of OV5642 chip

3.3 单片机 CY7C68013A-100AXC 主控单元

以单片机 CY7C68013A-100AXC^[9]为核心的控制电路,主要完成图像传感器与 PC 数据传输和控制通信。根据 OV5642 的功能和工作方式,将 68013 与 OV5642 相应的控制端口、数据端口

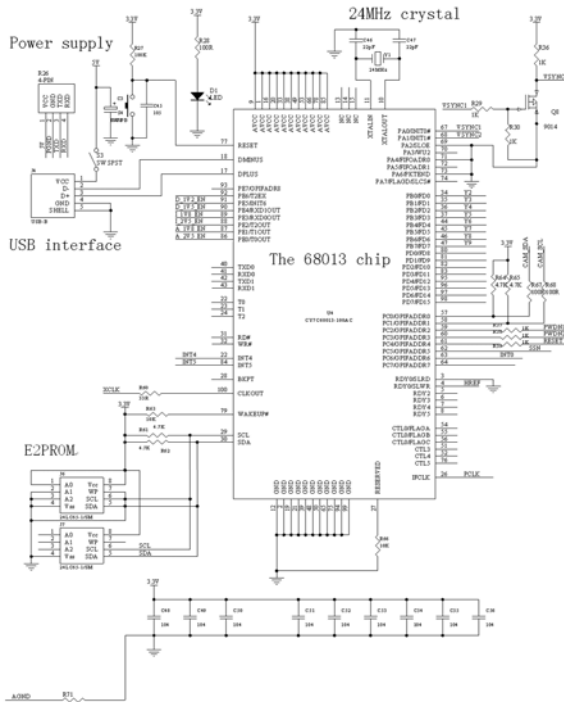


图 4 CY7C68013A-100AXC 主控单元接线图
Fig. 4 Wiring diagram of CY7C68013A-100AXC main control unit

连接起来。同时给芯片提供所需的电源、时钟信号等。

68013 产生的控制信号 XCLK、PCLK、HREF、VSYNC 连接 OV5642 相应端口,使用模拟的 I2C 控制口与 OV5642 的 SIOC、SIOD 连接,完成图像采集控制功能,Y2~Y9 连接 OV5642 的 D2~D9,完成图像数据的传输功能。

68013 与 USB 电路利用 DPLUS(17)、DMINUS(18)端口与 USB 接口连接,图 4 是 68013 的主要外围电路图。

68013 贯穿于整个系统,控制图像传感器进行图像采集,并通过 CMOS Sensor 给马达的驱动芯片发送聚焦指令,所拍摄的图像数据通过 USB 传入上位机,最终图像在上位机中得到显示。

4 自动聚焦摄像模组控制程序设计

自动聚焦摄像模组控制系统包含主控单元对 CMOS Sensor 的控制和对聚焦电机的控制,整个系统软件流程图如图 5。系统首先进行初始化工作,而后进入数据采集和计算阶段。采用多区域选择算法选取对焦窗口,对所选区域进行清晰度评价函数计算,采用能量梯度函数作为聚焦评价函数,即数据采集完成后,马上计算相邻像素的灰度差值的平方和^[10],一帧图像的数据采集都完成后,将每一行像素的灰度差值平方和累加,就得到这一帧图像的聚焦评价函数^[11]。采用全程搜索算法进行聚焦搜索,电机带动镜头先以等步长走一遍全程,电机每走一步,系统都进行数据采集和聚焦评价函数计算,将聚焦评价函数的最大值处的电机的步数记录下来,而后电机以一个较大的步长朝着最大聚焦评价函数值处前进,在靠近全程最大聚焦评价函数区域后,将电机步长减小,在最大值区域内进一步搜索更精确的聚焦位置,直至镜头停止在聚焦评价函数最大值处,使系统完成准确聚焦^[12]。

由以上可以看出,自动聚焦的控制算法主要包括三方面,一是对焦窗口的选择,二是计算对焦窗口内的清晰度值,三是搜索清晰度最大值点。

对焦窗口的选择原则是,在像素数据处理能力允许的情况下,尽可能选择大一点的窗口作为聚焦区域,并尽可能选择边缘信息丰富的图像区域。在本设计中,OV5642 本身有较强的数据处

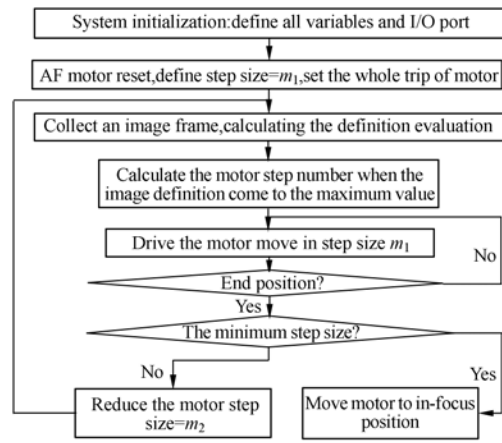


图 5 自动聚焦摄像模组控制系统软件流程图
Fig. 5 Control system software flowchart of auto-focusing camera module

理能力,根据相关寄存器的设置坐标通过多区域法选择对焦窗口。多区域选择法如图 6 所示,一幅图像除了中心 C 点是人的视觉要点之外,还有另外 A、B、D、E 4 个点也可能是视觉关键点,清晰度评价函数可取各点加权之和为最终的清晰度值。

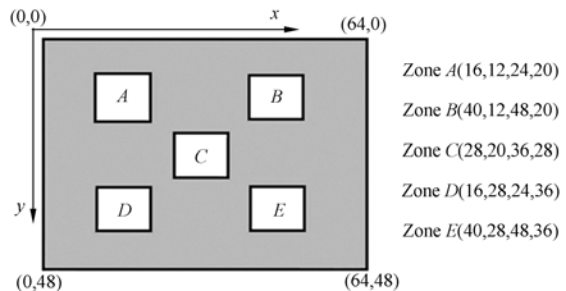


图 6 多区域选择法选择对焦窗口
Fig. 6 Focus window selected by using multi-region selection method

采用能量梯度函数对各区域图像进行清晰度计算,在计算图像清晰度之前,对图像的预处理非常重要,尤其对图像的去噪处理。OV5642 自带图像处理器,该图像处理器集成了 OV 厂商提供的滤波算法,通过设置相应寄存器即可实现去噪。

计算出对焦窗口内图像的清晰度之后,第三步即是搜索清晰度最大值点。本设计分别采用了爬山法和全程搜索算法控制摄像模组进行聚焦搜索,并记录了同一摄像模组在不同搜索算法下聚焦时对焦窗口内清晰度值,如表 1 所示(每次聚焦

时间均小于 70 ms):

表 1 爬山搜索算法下各区域清晰度值

Tab. 1 Clarity values with climbing search algorithm (bit)

	聚焦 1	聚焦 1 (遮光)	聚焦 2	聚焦 2 (遮光)	聚焦 3	聚焦 3 (遮光)
A	86	94	77	96	85	98
B	71	82	62	83	60	72
C	109	100	110	112	94	90
D	90	95	77	89	105	106
E	82	89	80	95	69	78

表 2 全程搜索算法下各区域清晰度值

Tab. 2 Clarity values with full search algorithm (bit)

	聚焦 1	聚焦 1 (遮光)	聚焦 2	聚焦 2 (遮光)	聚焦 3	聚焦 3 (遮光)
A	91	108	94	116	90	106
B	97	117	81	103	79	102
C	89	89	105	100	110	110
D	81	94	90	103	95	102
E	91	106	83	100	86	101

取每次聚焦时,各区域的最小值为聚焦清晰度值,由以上表格可以看出,采用全程搜索算法的清晰度值普遍高于爬山算法所得到的聚焦清晰度值,而聚焦时间相差无几,主要原因是手机摄像模组的调焦行程较小,采用爬山搜索算法对于抖动误差十分敏感,这在移动的小型化设备中影响较大,所以在本设计中,最后选择了全程搜索算法作为聚焦搜索策略,其算法流程如图 5 所示。

聚焦电机的驱动 IC 由 CMOS Sensor 通过模拟的 I2C 端口发送控制指令,AD5820 本身的写地址值为 0x18h,读地址为 0x19h,按照其 I2C 时序图来进行数据传输^[7],如图 7 所示,AD5820 的

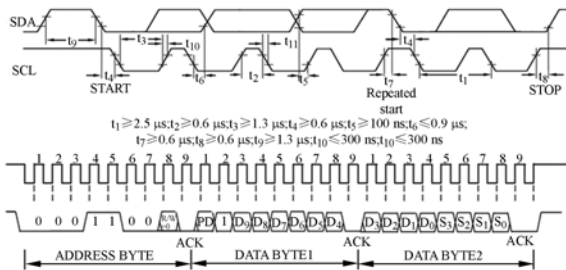


图 7 AD5820 I2C 数据通信方式

Fig. 7 Data communication mode of AD5820 I2C

DA 转换器是 10 bit 的,所以在发送数据的过程中是每次发送 2 bit,发送方式是从高位到低位,先发送高 8 位 MSB 数据,再发送低 8 位 LSB 数据。

5 实验

按照以上方法设计的摄像模组自动聚焦控制系统,采用卡驰诺变位传感器测试了马达的行程变位曲线,测试系统及结果如图 8 所示。

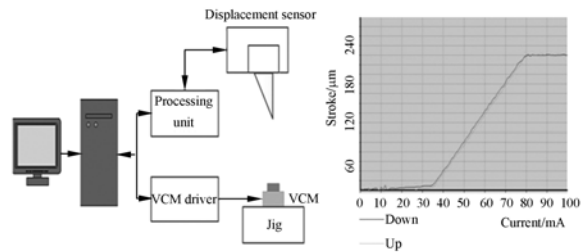


图 8 自动聚焦马达行程变位测试

Fig. 8 Stroke displacement test for auto-focusing motor

如图 8 中变位-电流值测试曲线,随着电流值增加(减小),聚焦机构 VCM 按照相应规律运动,由于要克服载重物镜的预压力,马达需要一定的启动电流才能开始运动,由测试图可知,启动电流为 30 mA 左右,随后马达按照大约 $5 \mu m/mA$ 的步距开始运动(步距可以通过驱动 IC 的控制程序进行设置),当电流达到 80 mA,行程到达最大值 0.21 mm(根据马达性能不同,行程最大值有所区别)。以上结果表明,主控单元通过控制 CMOS Sensor 给 AD5820 发送指定规律的数据,可以控制聚焦电机按照如图 8 中的规律发生行程变位动作。

以上实验表明聚焦机构 VCM 在驱动控制下能按照指定的规律发生变位,加入图像清晰度评价控制模块,在采集图像的过程中,依靠图像清晰度值的大小来定义驱动电流值,从而控制 VCM 带动镜头朝着指定的位置运动,完成拍摄过程中的聚焦动作,摄像模组自动聚焦控制系统拍摄二维码实物如图 9,聚焦前后拍摄的二维码图像效果对比如图 10 所示。



图 9 摄像模组自动聚焦控制系统拍摄二维码实物图
Fig. 9 Photo of 2D code taken by auto-focusing control system of camera module



图 10 聚焦前后成像效果对比

Fig. 10 Comparison of the image before and after focusing

参考文献:

- [1] 冯华君,毛邦福,李奇.一种用于数字成像的自动对焦系统[J].光电工程,2004,31(10):69-72.
FENG H J, MAO B F, LI Q. An auto-focusing system used for digital imaging [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(10): 69-72. (in Chinese)
- [2] 陈立国,王明月,杨治亮,等.显微视觉快速自动调焦方法及实验[J].光学精密工程,2010,18(6):1361-1366.
CHEN L G, WANG M Y, YANG ZH L, et al.. Fast autofocus method for microscopic computer vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6): 1361-1366. (in Chinese)
- [3] 罗钧,孙力,闵志盛.变焦跟踪曲线在对焦中的应用[J].光学精密工程,2011,19(10):2326-2332.
LUO J, SUN L, MIN ZH SH. Application of zoom tracking curves in focusing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2326-2332. (in Chinese)
- [4] 范媛媛,沈湘衡,桑英军.基于对比度敏感度的无参考图像清晰度评价[J].光学精密工程,2011,19(10):2485-2493.
FAN Y Y, SHEN X H, SANG Y J. No reference

6 结 论

本文针对手机等移动终端设备中的摄像模组提出自动聚焦控制系统,以图像清晰度来控制聚焦电机,完成自动聚焦的动作。由于电机驱动以及整个控制系统设计合理,使得聚焦精度达到 $5 \sim 10 \mu\text{m}$,响应速度小于 70 ms 。该自动聚焦控制系统完全能满足手机中摄像模组驱动系统、手机摄像模组检测设备的要求,可以在采集图像的过程中进行实时跟踪以及数据处理从而获得良好的清晰度。下一步的工作主要是采用手机主板/DSP 处理器替代计算机完成自动调焦控制系统的功能。

image sharpness assessment based on contrast sensitivity[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2485-2493. (in Chinese)

- [5] 王忠立,刘佳音,贾云得.基于 CCD 与 CMOS 的图像传感技术[J].光学技术,2003,29(3):361-364.
WANG ZH L, LIU J Y, JIA Y D. Image sensing technology based on CCD and CMOS[J]. *Optical Technique*, 2003, 29(3): 361-364. (in Chinese)
- [6] SUZUKI K, TSUDA S, DEGUCHI T. VCM design with round coil and axe-shaped magnet for hard disk drive actuator[J]. *Microsystem Technologies*, 2007, 13(8-10): 1093-1101.
- [7] ANALOG DEVICES. AD5820 datasheet[EB/OL]. [2012-02-11] <http://www.datasheet4u.net/download.php?id=574609>.
- [8] OMNI VISION INC. OV5642 datasheet[EB/OL]. [2012-04-16] <http://download.csdn.net/detail/lishrise/3535073>.
- [9] 张彦军,梁炜.基于 DSP 和单片机的图像存储系统设计[J].通信技术,2010,43(2):66-67.
ZHANG Y J, LIANG W. Design of picture memory system based on DSP and singlechip[J]. *Communications Technology*, 2010, 43(2): 66-67. (in Chinese)

- [10] 梁敏华,吴志勇,陈涛.采用最大灰度梯度法实现经纬仪自动调焦控制[J].光学精密工程,2009,17(12):3016-3021.
LIANG M H, WU ZH Y, CHEN T. Auto-focusing adjustment of theodolites by the largest gradient method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12): 3016-3021. (in Chinese)
- [11] GAMADIA M, KEHTARNAVAZ N. Real-time implementation of single-shot passive auto focus on DM350 digital camera processor [J]. *Proc. SPIE*, 2009, 7244: 24408-24415.
- [12] 胡涛,陈世哲,刘国栋.大范围自动调焦快速搜索算法[J].光电子·激光,2006,17(4):464-467.
HU T, CHEN SH ZH, LIU G D. Algorithm of rapid auto-focusing with a long-range[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2006, 17(4): 464-467. (in Chinese)

作者简介:



马建设(1969—),男,河南人,博士,副教授,2000年于哈尔滨工业大学获得博士学位,2003年于清华大学仪器科学与技术专业博士后出站,主要从事信息存储及处理技术方面的研究。E-mail: mjs888@126.com



林家用(1986—),男,广东湛江人,工程师,2007年于深圳职业技术学院毕业,主要从事嵌入式系统集成软、硬件开发,以及产线设备的研发。E-mail: linjiayong123@126.com



李合银(1985—),男,湖南邵阳人,硕士研究生,2009年于中国矿业大学(北京)获得学士学位,主要从事图像采集及自动聚焦控制技术的研究。E-mail: lhydmr@163.com



张志清(1980—),男,湖南长沙人,工程师,2005年于湖南工业技术学院毕业,主要从事 VCM 工艺工程及可靠性的研究。E-mail: BENSENZHANG@163.com



程雪岷(1976—),女,北京人,博士,副教授,硕士生导师,2004年于北京理工大学获得博士学位,2006年于清华大学仪器科学与技术专业博士后出站,主要从事技术光学领域的研究。E-mail: cheng-xm@mail.tsinghua.edu.cn