

## 基于 FPGA 的图像调焦系统研究

孙国强, 白绳武

(西安电子科技大学 技术物理学院, 陕西 西安 710071)

**摘要** 采用基于图像技术的自动调焦方法, 根据图像分析出图形质量, 完成图像预处理、清晰度判别, 获得当前的成像状况。通过控制电机, 完成调焦操作。其中核心技术是分析图像质量评价函数。针对调焦算法计算量大、计算复杂等问题, 采用中值滤波和灰度线性变换的图像预处理方法, 流水线作业, “乒乓”操作, 双蝶形处理器复用, 基-2FFT 算法相结合的工作模式。实验结果证实, 本方法解决了自动调焦算法复杂系统控制的速度问题。

**关键词** 自动调焦; 图像处理; 调焦操作

**中图分类号** TP391.41 **文献标识码** A **文章编号** 1007-7820(2010)07-021-03

## Study of the Image Auto-Focusing System Based on FPGA

Sun Guoqiang, Bai Shengwu

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract** The auto-focusing based on image technology is used to accomplish image pretreatment, definition evaluation and judges the imaging state from the current image quality. The system can adjust focus distance correctly supervised by imaging state. The key technology is the image quality analysis function. Aiming at the enormous computation and high complexity of the auto-focusing algorithm, the preprocessing method for combining the median filter with the linear transform of gray value, the pipelining structure, the “ping-pong” working mode, the sharing processor of double butterfly shape and the base-2FFT algorithm are presented. The research indicates that the auto-focusing algorithm resolves the speed bottle-neck of complex control systems.

**Keywords** auto-focusing; image processing; focusing operation

基于图像技术的自动调焦方法, 是从与传统的自动调焦技术完全不同的角度出发, 直接对拍摄的图像采用图像处理技术, 对图像进行成像质量分析, 得到系统当前的对焦状态, 然后通过驱动机构调整成像系统镜头的焦距实现自动调焦过程<sup>[1-2]</sup>。

## 1 调焦算法分析

一幅图像是否聚焦, 反映在空域上是图像的边缘及细节是否清晰, 而图像的边缘及细节信息可以通过对图像进行微分来获取。因此, 利用信息作为聚焦的判据。这种提取图像边缘信息的函数称为聚焦评价函数, 图像经其处理后所得到的量值能够反映图像的清晰度。

聚焦评价函数应具有以下几个特性: 无偏性、单峰性、高灵敏度、较高信噪比、较小计算量。

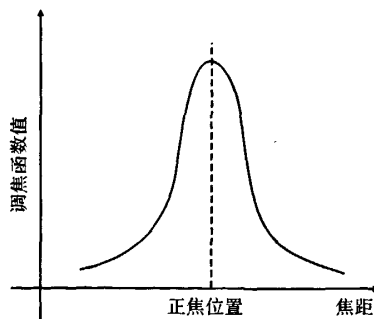


图1 调焦特性曲线

因此, 采用图像处理方法实现自调焦, 重要的就是找到一个理想的图像清晰度评价依据, 所以本系统的核心算法就是图像的清晰度评价函数实现算法和调焦实现算法。在图像的清晰度算法中主要对图像进行了图像的预处理过程, 清晰度评价算法, 电机控制算法3个部分<sup>[3]</sup>。

图像从空间域转换到频域进行分析是图像处理的

收稿日期: 2009-11-25

作者简介: 孙国强(1981-), 男, 硕士研究生。研究方向: 实时图像处理。白绳武(1984-), 男, 硕士研究生。研究方向: 实时图像处理。

常用手段。同时, 由于清晰图像比模糊图像包含有更多的图像信息和细节, 分析之后发现清晰度比较高的图像边缘信息清晰可辨, 对应于图像的傅里叶变换之后的高频分量加强, 低频分量减少, 而模糊图像则是低频分量增加, 高频分量减少, 这样基于功率谱的图像清晰度评价函数理论依据就产生了。

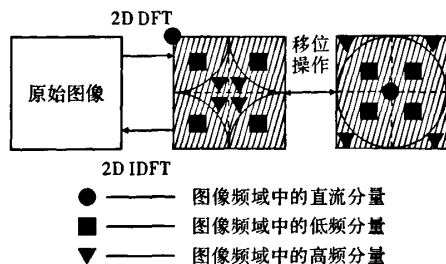


图2 图像空间域变换到频域的转换关系图

对于连续的图像  $f(x, y)$ , 当  $\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |f(x, y)| dx dy$  时, 可以求出其二维傅里叶变换

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp[-j2\pi(\mu x + \nu y)] dx dy \quad (1)$$

对于数字图像, 如考虑把  $f(x, y)$  在  $x$  和  $y$  方向上用抽样间隔  $\Delta x, \Delta y$  进行抽样得到, 则  $f(x_0 + m/M, y_0 + n/N) = f(m, n)$ ,  $M, N$  为横纵方向的像素数 ( $\Delta x = I/M, \Delta y = I/N$ ),  $m, n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$ 。

假设上式为周期性的, 即得

$$F(k, l) = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} f(m, n) W_1^{mk} W_2^{nl} \quad (2)$$

式中,  $W_1 = e^{-j2\pi/M}$ ;  $W_2 = e^{-j2\pi/N}$ 。

由于聚焦清晰的图像具有清晰可辨的边缘信息, 图像包含更多的高频分量从能量的角度看, 图像高频分量增加既信号能量增加, 这样可利用能量功率谱函数, 构建图像的清晰度评价函数得到

$$f(l) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} [P_1(u, v)] \quad (3)$$

$$P_1(u, v) = \frac{1}{MN} (F_m^2(u, v) + F_{im}^2(u, v)) \quad (4)$$

其中,  $P_1(u, v)$  为图像的功率谱函数,  $L$  为图像的序列号。

各种不同清晰度评价函数的区别在于判别图像高频分量成分的多少, 这里采用对图像高频分量加权的方法, 同时它的加权系数符合这样的规律: 随着频率的增加, 它的值也增加, 可以反映出图像中高频分量的成分多少, 实际处理过程中采用该像素到中心像素的距离。式(4)是对图像的频谱中各个高频分量

加权处理后, 得出能反映图像的评价参数。图3是经过C语言描述的基于功率谱的频域函数与其他方法的清晰度评价函数对比结果。

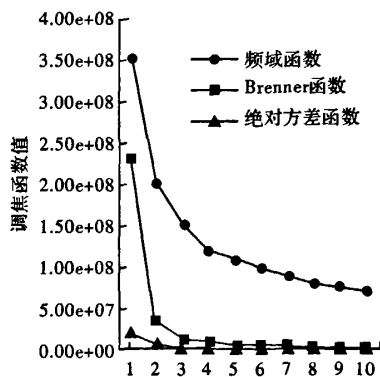


图3 频域分析函数与其他函数的结果比较

由图可以看出基于功率谱的图像清晰度评价函数具有较好的评判本领。

## 2 系统框图

基于FPGA的自动调焦系统框图, 如图4所示。其中图像的预处理过程, 清晰度评价函数的算法实现过程, 以及控制电机的算法实现和调焦过程都在FPGA中实现, 并且进行实时处理。该模块共包含了5个模块3个部分, 3个部分分别是输入端、处理过程和输出端。在处理过程中增加了SDRM与Flash芯片。输入输出采用DVI接口, 它们分别为TFP401输入DVI芯片和TFP410输出DVI芯片。FPGA核心处理芯片选用Cyclone3 EP3C5F256C8N芯片, 其中包含10万个逻辑门, 同时给图像数据提供缓冲使用2片IS4232400。

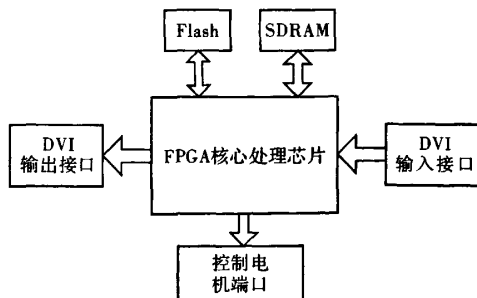


图4 调焦系统框图

由式(4)可知, 对于一幅  $640 \times 480$  的灰度图像, 需要经过 1 228 800 次乘法运算, 307 200 次开方运算, 614 400 次加法运算。由于计算量特别大, 而且每一幅图像的变化不大, 所以本系统采取了将图像划



分为  $128 \times 64$  大小的 5 个模块, 首先对  $28 \times 64$  大小的灰度图像进行傅里叶变换, 然后获得图像的功率谱, 再对其信号值进行加权, 得到一块图像的清晰度评价价值代替整个图像的清晰度评价价值。同时采用“乒乓”操作, 双蝶型处理器复用, 基 2FFT 算法的 FPGA 实现方案。

3 调焦效果分析

对于清晰度评价算法和基于 2-FFT 的乘法实现结构的分析, 得到这个图像的清晰度评价算法的乘法计算次数为  $(53\ 248 \times 3 + 64 \times 32 \times 3) = 165\ 888$  次, 所需的加法计算次数为  $(53\ 248 \times 3 + 64 \times 32 \times 2 - 1) = 163\ 839$  次。由这些数据可知调焦过程中系统延时主要是这两个方面计算的延时相加, 同时有电路系统的延时, 但是这个延时在设计电路时已经考虑, 限制在最小范围内, 采用“乒乓”操作延时再加大约 0.000 1 s 的延时。当系统主频率为 60 MHz 时, 经过实际的测试系统总延时大约为 0.05 s, 实时处理的系统 8 帧图像的采集时间间隔要求为  $8 \times 0.04 = 0.32$  s。满足实时性要求, 上述系统的调试在 Cyclone3 EP3C5F256C8N 芯片中实现, 效果比较满意。

将镜头的焦距调节范围设置为 60 段, 聚焦段的取值范围为 [1, 60]。测试时将一组由焦距从最远端开始发送过来的图像经过处理, 搜索步数  $K$ , 得到每次应该调焦的定位以及图像清晰度评价价值, 如表 1 所示。定位处为图像调焦效果最清晰处。

表 1 实验测试数据

搜索步数	电机定位、标定位置	对应标定位置的清晰度分析值
1	20	845.92
2	33	920.73
3	42	634.88
4	28	1 067.25
5	25	995.73
6	30	1 050.87
7	27	1 053.26
8	29	1 058.10
9	28	1 067.25

4 结束语

基于本模块的输入端口直接输入 DVI 信号, 并非直接的采集图像端口, 在实际应用中需要完成整个调焦过程, 增加控制电机的控制电路模块, 并对整个调焦过程的实时性进行综合评价。另外, 基于图像技术的自动调焦方法有一个非常重要的应用前景是与 CMOS 图像传感器集成。由于 CMOS 图像传感器与 FPGA 采用了相同的制造工艺, 所以是可以集成的。CMOS 图像传感器集成了自动调焦功能后, 不仅可以简化成像系统中自动调焦部分的设计, 还提高了其与 CCD 图像传感器的竞争力。

参考文献

[1] 王任华, 沈忙作. 自动对焦算法研究[J]. 光电工程, 2000, 27(4): 11-13.  
[2] 黄其昆. 自动调焦二十年[J]. 大众摄影, 2001(5): 52-55.  
[3] 陆杰, 赵忠旭. 图像质量评价的发展[J]. 计算机工程, 2000, 11(26): 4-5.

西安电子科技大学理学院简介

1999 年, 西安电子科技大学为了加强全校本科生的数学和物理基础, 全面建设“科研教学型”综合大学, 将原数学系和物理系合并成立为理学院。理学院设有数学学科和物理学科, 主要承担全校本科生的“高等数学”、“大学物理”、“大学物理实验”等基础课和专业课, 并开设全校博士生、研究生的数学和物理类课程。学院具有一支优秀的数理教师及科研队伍。数学学科: 现有“应用数学”博士点; “应用数学”、“计算数学”、“运筹学与控制论”3 个硕士点; “数学与应用数学(陕西省名牌专业)”和“信息与计算科学”2 个本科专业。物理学科: 现有“物理学”一级学科硕士学位授予权, 现有“物理学”博士后流动站; “无线电物理”和“光学”2 个博士点; “无线电物理”、“光学”、“等离子体物理”、“应用化学”4 个硕士点; “应用物理(陕西省名牌专业)”、“电子信息科学与技术(陕西省名牌专业)”和“应用化学”3 个本科专业。理学院在编教师 150 余人, 师资力量雄厚, 知识和年龄结构合理。目前全院在编教师中有教授 18 人, 副教授 35 人。其中博士生导师 16 人, 硕士生导师 35 人。教师中有博士学位的占 20%。科研主要承担“国家自然科学基金”项目、“863”项目、“973”项目、“国防科工委”项目和“横向”项目, 年科研经费 500 余万元。

# 基于FPGA的图像调焦系统研究

作者:	孙国强, 白绳武
作者单位:	西安电子科技大学, 技术物理学院, 陕西, 西安, 710071
刊名:	电子科技
英文刊名:	ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY
年, 卷(期):	2010, 23(7)
被引用次数:	0次

### 参考文献(3条)

1. 王任华, 沈忙作. 自动对焦算法研究[J]. 光电工程, 2000, 27(4): 11-13.
2. 黄其昆. 自动调焦二十年[J]. 大众摄影, 2001(5): 52-55.
3. 陆杰, 赵忠旭. 图像质量评价的发展[J]. 计算机工程, 2000, 11(26): 4-5.

## 相似文献(10条)

1. 期刊论文 白立芬,徐毓娴,于水,李庆祥, Bai Lifen, Xu Yuxian, Yu Shui, Li Qingxiang 基于图像处理的显微镜自动调焦方法研究 - 仪器仪表学报 1999, 20 (6)

自动调焦技术是提高显微镜测量精度的重要手段,本文介绍了采用图像处理法实现显微镜自动调焦的方法。对图像处理法实现显微镜自动调焦中的两腹、际甄辛哈博母致?其一是图像清晰度评价函数的选取,文中采用绝对方差函数和修正平方梯度函数分别作为粗精调焦评价函数;另外还针对提高图像信息质量的方法进行了探讨,采用线性拟合与同态滤波方法进行图像处理,为离焦判断提供高质量的图像信号。实验表明,该方法调焦精度达 $\pm 0.3 \mu\text{m}$ 。

2. 学位论文 耿道鹏 基于图像的光测成像系统自动调焦方法研究 2008

在靶场测量等的光测成像系统中,获取清晰的图像是进行高精度测量的必要条件。目前,这些系统均采用人工调焦的方式,效率低且受人因为因素影响大,很难保证得到全程清晰的目标图像。本文的目的就是研究基于图像的快速自动调焦系统,使之对运动速度较快、形状复杂的靶场目标能够进行准确调焦。

论文在系统介绍自动调焦原理和分类的基础上,阐述了基于图像处理的自动调焦方法,分析了其优越性。该方法利用对图像处理后的信息作为电动镜头调焦的判据,驱动电动镜头调焦直至最佳聚焦点,使成像清晰。论文首先对该方法的图像清晰度评价函数进行了系统论述,并通过实验对各清晰度评价函数的综合性能进行了分析和比较;然后针对运动目标成像特点,确定了适合本课题的调焦搜索控制策略。最后,根据现有条件搭建了自动调焦硬件系统,使用VC++编程语言编写了系统控制软件程序,设计了室内、室外运动目标自动调焦实验,并对实验结果进行了分析。实验表明本文所研究的针对运动目标的基于图像的处理调焦方法在理论及技术实现上都是可行的。

在“长距离轨道几何参数摄像测量系统”的测量过程中,需要对电动镜头的焦距、聚焦、光圈进行实时调节,本文对其中电动镜头自动调焦部分进行了改进,并完成了整个系统的外场实验,得出了满意的数据结果。另外,大气湍流对轨道几何参数摄像测量系统的精度有较大影响,为了解决这一问题,论文对大气湍流造成的成像抖动进行了理论分析,然后通过反复实验确定出“滑动窗口滤波”这一解决方案。实验结果表明,该方案能有效消除湍流大气的影响。

3. 期刊论文 许静玲 基于图像处理的自动调焦算法的探讨 -中国科技信息2005,""(8)

本文阐述了自动调焦的原理和方法,探讨了基于图像处理的自动调焦的算法,列举了几种常用的调焦判据函数,总结了自动调焦判据函数的选取方法。

4. 学位论文 孙文 调制传递函数测试仪的自动调焦技术研究 2009

人工调焦要求操作人员掌握一定专业知识、操作烦琐,而且靠人眼目测手动调焦产生的误差较大。与此同时,随着数字图像处理向自动化和智能化方向发展,能否快速有效地实现自动调焦,对焦点处图像进行采集和分析处理,已得到越来越多的重视。

本文主要基于调制传递函数测试仪的自动调焦系统开展研究。该测试仪主要用于透镜成品的检测,判断其成像质量,淘汰不合格的产品。自动调焦系统在该测试仪中起着重要的作用,能否使得图像采集系统在焦点处进行图像采集关系到最后测得的MTF值的准确度,而MTF值是判断镜头成像好坏的重要参数。

本文阐述了自动调焦的基本原理,分析了多种调焦判断函数,重点分析了频域类的调焦判断函数,通过傅立叶变换得出调制传递函数,作为调焦判断函数,并设计了一套切实可行的自动调焦算法。

本文在自动调焦系统的硬件上, 基于原先的设备进行了改造, 采用了百万像素的CCD摄像头, 使得采集的图像效果更佳。同时在电机控制方面, 更换了步进电机的脉冲发生器, 使其可以脱离工控机, 在普通的PC机上就能实现脉冲控制。

本论文还为调制传递函数测试仪的自动调焦系统设计了友好的用户界面,实现了计算机自动控制,操作简易,大大提高了测试效率和准确度。

最后,对本课题的工作进行了总结,分析了工作中存在的不足,并对将来的工作做了展望。

5. 期刊论文 王学影, 张洪涛 基于图像处理的CCD摄像机自动调焦方法研究 - 计量技术2005, "" (8)

自动调焦技术是提高 CCD 摄像机测量精度的重要手段,特别是在小景深及高精度的测量中,本文介绍了采用图像处理法实现自动调焦的方法,并提出了几种图像清晰度评价函数,经实验结果论证效果良好。

6. 学位论文 倪军 基于图像处理的自动调焦变焦技术研究 2007

自动调焦、连续变焦是新一代光电跟踪设备的关键技术,为了改善光电跟踪产品的性能,本文对自动调焦、变焦技术进行了深入研究,包括自动调焦理论与方法,调焦评价函数及算法,调焦窗口规划技术,同时也研究了自动变焦技术。研究的内容与成果有以下几点:

本文深入研究了基于图像处理的自动调焦理论和方法。通过实验,分析了频谱函数、梯度函数和熵函数在自动调焦应用时的性能,讨论了移动目标调焦的特殊性以及它对调焦评价函数曲线的影响,给出了移动目标调焦的前提条件和计算方法。

本文提出一种基于排序梯度和的调焦评价函数。原有的基于梯度算子的评价函数是以所有梯度为统计对象,在目标或背景有变化时,大量的低值梯度对评价函数的单峰性产生影响,易导致调焦失败。该函数以排序在前 $n$ 位的梯度作为统计对象,计算其梯度和,作为调焦评价函数。实验验证了该函数在目标有一定范围内大小变化时具有良好的调焦评价性能。为了减少大的尖锐噪声对评价曲线的影响,本文又提出一种基于阈值梯度数统计的调焦评价,该算法比较前后帧图像中大于某一动态阈值的梯度数量,得到调焦的方向,通过实验曲线图可以看出该方法可以有好的准确性和稳定性。

本文通过对连续自动调焦的流程分析,说明了在调焦前对图像做清晰度判断的必要性。通过实验,分析了图像清晰程度与目标边缘锐度的对应关系,提出一种基于边缘法向梯度分布特征的单帧图像清晰度判断算法。该算法以参数的形式把图像的清晰程度反映出来。通过实验证明了该算法对光电跟踪设备的图像有良好的判断性能。通过对当前图像的清晰度判断,减少了自动调焦的误触发。

选取合适的调焦窗口是自动调焦过程中重要的技术。调焦窗口中应包含尽可能多的成像主体,使背景的影响尽可能小。本文根据光电跟踪设备图像

的特点, 结合目标跟踪技术, 提出两种调焦窗口动态规划算法: 基于动态阈值质心跟踪调焦窗口算法和自适应相关匹配跟踪调焦窗口算法。质心跟踪窗口规划适合背景简单, 目标大小合适的序列图像场合, 具有速度快, 稳定的特点。相关跟踪窗口规划具有较强的局部抗干扰能力, 适合信噪比不高, 背景复杂的场合。

本文研究了基于图像处理的连续自动变焦原理, 提出连续自动变焦流程。基于图像处理的连续自动变焦技术关键是要准确提取目标的成像大小。实验分析了图像单阈值分割和自适应阈值分割的优缺点。提出基于边缘梯度的阈值分割方法。通过选取边缘过渡区上的灰度作为动态分割阈值。减少了背景起伏的影响和噪声点的影响。

本文设计了一个基于PC机的调焦、变焦实验系统。通过对实物目标和仿真目标的实验。验证了本文研究的自动调焦、变焦技术的准确性、可靠性。  
关键词: 光电目标跟踪, 自动调焦, 评价函数, 变焦镜头, 图像质量评价

## 7. 期刊论文 [刘海萍. 苏世彬. 基于局部图像处理的自动调焦系统设计 -科技风2009, 7\(9\)](#)

随着现代计算技术的发展和数字图像处理理论的日益成熟, 自动调焦技术进入了一个新的数字时代, 越来越多的自动调焦算法运用的是图像处理理论。

## 8. 期刊论文 [麻恒阔. 魏国强. MA Heng-kuo. WEI Guo-qiang 基于图像处理自动调焦方法的稳定性研究 -航空精密制造技术2007, 43\(2\)](#)

本文对几种常用的图像聚焦评价函数进行了比较、研究, 并在此基础上针对由于图像噪声导致评价函数不稳定, 调焦重复精度不够的现象, 首次提出了调焦区域选择, 图像预处理, 改进算法, 曲线拟合四项措施结合起来提高调焦重复精度。

## 9. 学位论文 [刘斌 基于图像技术的自动调焦方法研究与实现 2004](#)

自动调焦已成为各种成像系统的重要功能, 与国外相比, 国内在这方面的做得还比较少, 同时图像处理技术的发展使得自动调焦趋于数字化和智能化, 提出基于图像技术的自动调焦方法具有重要的实际意义。基于图像技术的自动调焦方法采用了与传统调焦技术完全不同的方式进行调焦, 传统的调焦方法是通过传感器检测焦点或测量距离的方式实现的, 而基于图像技术的调焦方法直接根据图像分析出图像的质量, 从而获得当前的成像状态, 然后完成调焦操作。图像质量分析是该调焦方法中的关键技术, 本文从三种途径详细论述了图像质量分析方法的实现: (1) 基于对比度的图像质量分析方法从图像的时域、频域及信息熵三个角度建立能表示图像对比度的一些调焦函数, 并对这些评价函数做了详细的比较, 最后确定出时域的Brenner函数和绝对方差函数具有更好的综合性能; (2) 基于功率谱的客观图像质量分析方法假设场景的功率谱具有不变特性, 引入了人类视觉系统, 加入了维纳噪声滤波器, 对图像质量进行评价可得到一个确定的IQM数值, 该数值与人的视觉评价具有很高的相关性; (3) 基于小波与神经网络的图像质量分析方法利用小波分析对图像进行多分辨率分解, 分析其细节信息并采用统计的方法提取图像特征, 再利用人工神经网络对图像特征进行质量模式识别, 得到图像的质量等级, 实验表明, 该方法达到了不错的识别率。调焦的实现对于对比度法是计算每次成像的调焦函数值, 结合一维搜索方法, 不断逼近正焦位置; 对于功率谱方法和小波与神经网络方法是根据评价出的图像质量, 确切地改变焦距调整量。在自动调焦理论的基础上提出了自动调焦系统的设计, 分析了系统的总体性能并作为软硬件设计的依据, 调焦系统采用DSP+FPGA的高速硬件系统方案。

## 10. 期刊论文 [蒋汉元. 李雪雷. 张涛. 康绿松. Jiang Hanyuan. Li Xuelei. Zhang Tao. Lian Lvsong 光电经纬仪图像测距中的自动调焦系统研究 -计算机测量与控制2010, 18\(1\)](#)

针对经纬仪传统自动调焦中因目标距离数据不足而无法使用的缺点, 从获取的数字图像中提取表征图像清晰度特征的聚焦量入手, 设计实现了经纬仪自动调焦系统; 首先对自动调焦系统进行了总体结构设计, 其次设计开发了图像采集存储处理控制单元的软硬件, 设计了自动调焦的控制过程, 实现了基于图像处理的经纬仪自动调焦; 实验结果表明, 在外场工作条件下, 应用该系统对静止目标和多数运动目标均能获得良好的调焦效果。

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_dzkj201007008.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_dzkj201007008.aspx)

授权使用: 陕西理工学院(sxlgxy), 授权号: 6ab37dfb-5d35-4af5-b272-9df2010c62da

下载时间: 2010年9月15日