

# 调焦系统中数字图像清晰度评价函数的研究

冯精武<sup>1</sup>, 喻擎苍<sup>2\*</sup>, 芦 宁<sup>2</sup>, 冯海明<sup>2</sup>

(1. 浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江理工大学 信息电子学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 为了实现基于数字图像处理的自动调焦技术, 采用准确有效的图像清晰度评价函数是其实现的关键。通过实验分析比较了梯度函数、频谱函数和熵函数在自动对焦技术中的作用, 并研究了各评价函数在实验平台下所表现出来的性能和特点。研究结果表明, Tenengrad 函数、Brenner 函数和平方梯度函数在焦平面附近具有变化趋势明显和灵敏度高的特点, 而在离焦较远时变化不大, 适用于要求精确对焦的设备。而方差函数具有良好的单峰性和无偏性, 具有较好的计算效率, 相对其他的评价方法具有更高的信噪比、可靠性和清晰灵敏度, 更好地满足了对图像清晰度评价的要求, 适用于摄像头辅助调焦系统中。

**关键词:** 图像清晰度; 自动对焦; 评价函数; 焦平面

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)03-0354-03

## Definition evaluation function of digital image in auto-focusing system

FENG Jing-wu<sup>1</sup>, YU Qing-cang<sup>2</sup>, LU Ning<sup>2</sup>, FENG Hai-ming<sup>2</sup>

(1. Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;  
2. College of Electronics and Information, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of auto-focusing technology based on image processing, it is the key step to use the accurate and effective functions. The role of Gradient function, Spectrum function and Entropy function in auto-focusing system was analyzed and compared by experiment in auto-focusing system. The performances and features of these functions in experimental platform were studied. Experiments results indicate that Tenengrad function, Brenner function and Square Gradient function has high sensitivity features in focal plane, when defocus serious, the trend of change is not clear, this can be applied in accurate focus equipment. Variance function has good Single-Peak and sensitivity, characterize the preferable efficiency, has high single-to-noise, better reliability, than other ones. It can better meet the requirement of the image definition evaluation, can be applied in digital image auto-focusing system.

**Key words:** image definition; automatic focusing; evaluation function; focal plane

## 0 引 言

自动聚焦技术是机器人视觉和数字视频系统中的关键技术。视频涉及可视化信息, 包括静态图像和动态图像。不论静态或动态图像, 获取清晰的图像是第一步。

聚焦性能取决于调焦评价函数的准确性和有效性, 即评价函数必须具有无偏性好、单峰性, 能反映离焦的极性, 对噪声敏感度低等特性。图像模糊的本质

是高频分量的损失, 完全聚焦图像比离焦图像包含更多的信息和细节, 这是设计聚焦评价函数的基础。目前评价函数主要有频谱函数、灰度熵函数、梯度函数、基于灰度统计的函数<sup>[1-2]</sup>等几大类。

本研究通过实验对几种主要评价函数的性能和特点进行分析总结, 提出了一种基于窗函数的能量梯度评价函数的方法, 并给出了实验结果和分析。实验结果表明, 该函数具有较好的计算效率, 比起一般的评价方法具有更高的信噪比、可靠性和清晰灵敏度, 更好地

满足了对图像清晰度评价的要求。

## 1 常用评价函数

根据 Ng Kuang Chern 等人的工作<sup>[3]</sup>结果,可将常见的清晰度评价函数分成两大类:①以图像直方图法和能量方差法为代表的函数;②以拉普拉斯能量法和平方梯度能量法为代表的函数。研究表明,对于正常光照下拍摄的图像,常用评估函数都呈现出单峰特性,基本上可实现正确聚焦,只是在聚焦速度与准确度上略有不同。

### 1.1 梯度函数

在图像处理中,图像梯度可以用来进行边缘提取,离焦量越小图像边缘越锋利,应该具有更大的图像梯度值。常用的梯度函数有 Tenengrad 函数、能量梯度函数、Brenner 函数、方差函数等<sup>[4-5]</sup>。

Tenengrad 函数是使用 Sobel 算子来提取水平和垂直方向的梯度值。评价函数  $f(I)$  定义为梯度的平方和。梯度  $S(x,y)$  要高于一个阈值  $T$ ,即:

$$f(I) = \sum_x \sum_y [S(x,y)]^2 \quad (S(x,y) > T) \quad (1)$$

式中, $S(x,y)$ 是在点 $(x,y)$ 上与 Sobel 算子的卷积:

$$S(x,y) = \sqrt{G_x^2(x,y) + G_y^2(x,y)} \quad (2)$$

能量梯度函数与 Tenengrad 函数相似。它用相邻点的差分计算一个点的梯度值,此时:

$$f(I) = \sum_x \sum_y \{ [I(x+1,y) - I(x,y)]^2 + [I(x,y+1) - I(x,y)]^2 \} \quad (3)$$

式中: $I(x,y)$ —图像在点 $(x,y)$ 的灰度值。

由于能量梯度函数已经将梯度值平方,这样已经把边缘的贡献加强了,没有必要再设一个阈值。

Brenner 函数是最简单的与梯度有关的评价函数。它只是计算相差两个单位的两个像素的灰级差。基于与 Tenengrad 函数和能量梯度函数同样的原因,这个差值也进行了平方处理:

$$f(I) = \sum_x \sum_y [I(x+2,y) - I(x,y)]^2 \quad (4)$$

方差函数是一个比较流行的自动聚焦的评价函数。因为清晰聚焦的图像应有比模糊的图像更大的灰级差异,方差函数可以作为一个对焦清晰的评价标准。方差函数定义为:

$$f(I) = \sum_x \sum_y [I(x,y) - \mu]^2 \quad (5)$$

式中: $\mu$ —平均灰度。

即:

$$\mu = N^{-2} \sum_x \sum_y I(x,y) \quad (6)$$

### 1.2 频谱函数

这种评价方法是基于傅里叶变换的<sup>[6]</sup>。傅里叶变换的高频分量对应图像边缘,而聚焦图像总是具有锋利的边缘,即包含更多的高频分量,这样可以根据图像傅里叶变换后高频量的含量作为评价函数。

通过二维傅里叶变换可以对构成图像的空间频率进行分析。对于连续图像  $g(x,y)$ ,当  $\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |g(x,y)| dx dy < \infty$  时,可由下式求出二维傅里叶变换  $G(\mu,\nu)$  :

$$G(\mu,\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x,y) \cdot \exp\{-j2\pi(\mu x + \nu y)\} dx dy \quad (7)$$

对于数字图像,如考虑把  $g(x,y)$  在  $x$  和  $y$  方向上用抽样间隔进行抽样  $\Delta x, \Delta y$  得到  $g(m,n)$  :

$$g(x_0 + m/M, y_0 + n/N) = g(m,n) \quad (8)$$

式中: $M, N$ —横纵方向的像素数 ( $\Delta x = 1/M, \Delta y = 1/N$ );  $m, n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$ 。

假定上式为周期性的,即得:

$$G(k,l) = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} g(m,n) W_1^{mk} W_2^{nl} \quad (9)$$

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

将一幅图像进行二维傅里叶变换后,其频率分布图<sup>[7]</sup>如图1所示。

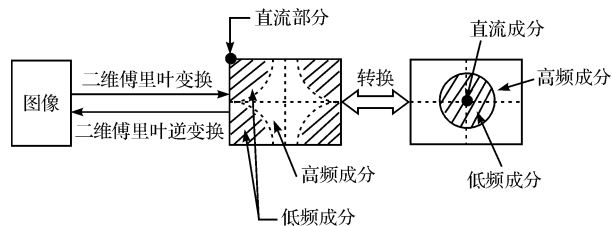


图1 二维傅里叶变换频率分布图

### 1.3 熵函数

熵函数<sup>[8]</sup>是基于这样一个前提:对焦良好的图像的熵大于没有对焦清晰的图像。因此可以作为一种评价标准。对于一幅图像,图像能量  $E(I)$  和图像熵  $H(I)$  分别定义为:

$$E(I) = \sum_x \sum_y I(x,y) \quad (10)$$

$$H(I) = - \sum_x \sum_y I(x,y) \ln[I(x,y)] \quad (11)$$

根据香农信息理论,熵最大时信息量最多。将此原理用于对焦过程中,可以认为当  $E(I)$  一定时,  $H(I)$  越大,则图像越清晰。

## 2 实验及分析

为了验证各评价算法的效果,选择了在不同焦距下拍的一组标志的图片(720 × 576)。在离焦→聚焦→离焦的顺序排列的 15 副测试图像如图 2 所示。

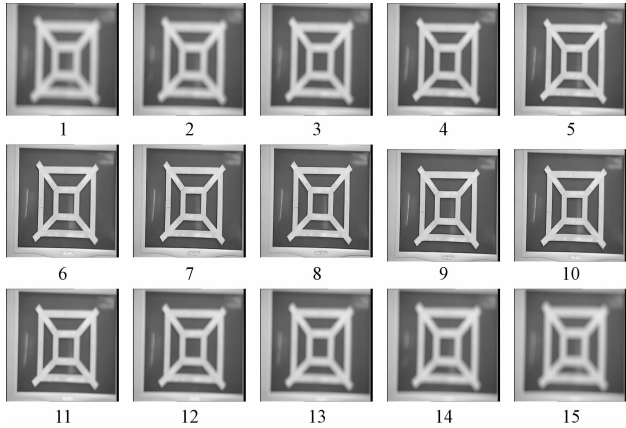


图 2 按照调焦顺序采集到的不同焦距的图像序列

为了便于比较各种算法的性能和特点,笔者将各种算法的计算结果描绘出来,如图 3 所示。它的纵坐标表示进行了各种算法的图像清晰度评价,横坐标表示不同程度的离焦图片的序号。该图片序列是严格按照调焦时从一个方向到另一个方向顺序采集得到的(如图 2 所示)。

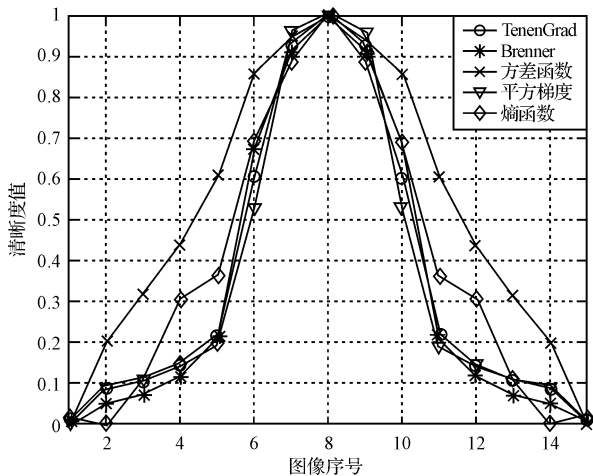


图 3 不同程度离焦图像各函数归一化后的清晰度评价

将各种算法写成独立的函数,在 Windows 平台下对各种算法处理图 2 中 15 幅图像所需全部时间进行计量以便比较各种算法的时间性能,所得结果如表 1 所示(实验所用计算机基本配置如下: Pentium(R) Dual-Core CPU E5200 @ 2.50 GHz, 2.00 GB 内存)。

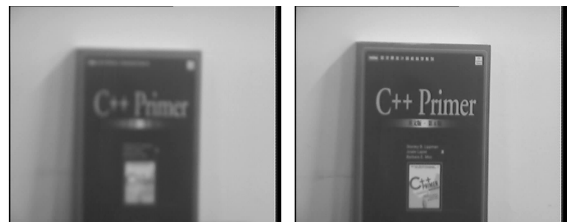
表 1 对图 2 中 15 副图像进行评价所需全部时间 (单位: ms)

Tenengrad 函数	Brenner 函数	方差函数	平方梯度函数	熵函数
140	137	140	120	105

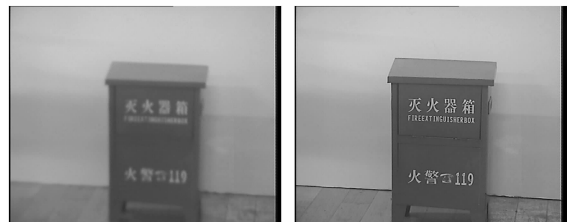
由图 3 看到各种算法的清晰度评价都随着图像的清晰程度变化而变化,都在第 8 幅图像位置取得最大值,这和肉眼看到的事实是相符合的。从图中可以看出,能量熵算法清晰度评价变化起伏不定,不具有良好的单峰性,所以它的灵敏性最差; Tenengrad 函数、Brenner 函数和平方梯度函数算法的评价在焦点附近变化剧烈,但在图像严重离焦时变化不大,这个特点在某些需要精确对焦的观测设备中有重要的应用价值,如显微镜的细调过程<sup>[9]</sup>。由图可以看出,方差函数在调焦前期过程中清晰度评价变化率稳定,具有良好的整体灵敏性,适用于摄像头的视频自动对焦系统中。

## 3 对焦实验

本研究选取了书封面和消防栓等目标物进行了对焦实验。目标物体对焦前后的对比图如图 4 所示,对焦前后图像清晰度的评价参数如表 2 所示。



(a) 书封面对焦前后对比图



(b) 消防栓对焦前后对比图

图 4 快速对焦实验结果图

表 2 快速对焦实验结果数据

对焦目标	对焦前清晰度评价值/pixel	对焦后清晰度评价值/pixel	对焦时间/s	平均对焦时间/s
书封面	207	262	2.9	2.5
消防栓	187	398	2.1	

从上面的实验数据可以证明系统对焦较为稳定,且具有较高的对焦精度。对焦平均速度大约为 2.5 s 左右,与普通相机对焦速度相当,能满足实际应用要求。

## 4 结束语

数字图像的清晰度判定是数字图像处理的一个重要内容,对于实现精密仪器的自动对焦具有重要的意

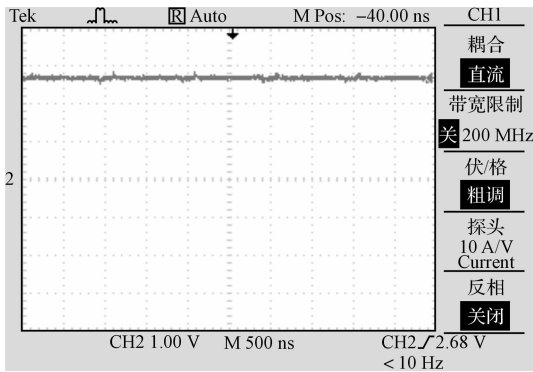


图 7 按键按下时 KEY 处的波形

### 4 结束语

通过分析电容式触摸的基本原理,提出了使用 PSoC 通用型芯片设计低成本电容式触摸按键的方案,并给出了具体的软硬件设计方法。系统具有触摸检测灵敏度可调节的特性,提高了触摸的精确度和灵敏度。当不工作时系统进入低功耗唤醒状态<sup>[9]</sup>,这样可以在保证产品正常使用的前提下,最大限度地降低控制器的待机功率,既绿色节能又能大大提高它在手机、MP3、PC 外设、遥控等便携式低功耗产品中的推广普及程度<sup>[10]</sup>。最后的测试结果表明,该触摸按键具有灵敏度高、误操作率低的特点,具有一定的实用价值。

### 参考文献 (References) :

[1] 陈 林. 轻松实现电容式触摸感应按键开关设计[J]. 电子产品世界,2009,16(10):74

[2] Cypress Semiconductor Corporation. CY8C20x34 Technical Reference Manual(TRM)[M]. Cypress Semiconductor Corporation,2006.

[3] Cypress MicroSystems. CY8C20234, CY8C20334, and CY8C20434 Final Data Sheet[M]. Cypress MicroSystems, 2005.

[4] Cypress MicroSystems. CY8C24123, CY8C24223, and CY8C24423 Final Data Sheet[M]. Cypress MicroSystems, 2004.

[5] 叶朝辉,华成英. 可编程片上系统(PSoC)原理及实训[M]. 北京:清华大学出版社,2008:84-92.

[6] 高申勇,张 颖,曾 红. 一种电容式触摸输入模块设计[J]. 杭州电子科技大学学报,2009,29(2):56-60.

[7] 袁忠根. 一种基于 PSoC 的电容感应式触摸按键系统的设计与实现[D]. 上海:上海交通大学,2008:30-42.

[8] 韩 俊,戎蒙恬. 低成本电容式触摸按键设计[J]. 信息技术,2006,30(8):42-45.

[9] 朱明程,李晓滨. PSoC 原理与应用设计[M]. 北京:机械工业出版社,2008.

[10] 从秋波. 新的电容式触摸控制器实现超低功耗[J]. 电子设计技术,2009(11):10. [编辑:李 辉]

(上接第 356 页)

义。研究表明,所研究的几种函数中方差函数最适合于系统中的数字成像系统的清晰度评价,因为它具备如下的性质:

- (1) 评价函数有效,并且能够迅速得出评价因子,指导完成自动对焦功能。
- (2) 评价函数在一点上达到峰值对应于最佳对焦参量,并当物体离开最佳点时单调递减,即具有良好的单峰性。
- (3) 在存在噪音的情况下,评价函数具有鲁棒性,即噪音产生不确定的评价值对评价结果影响很小。

### 参考文献 (References) :

[1] ESKICIOGLU A M, FISHER P S. Image quality measures and their performance[J]. **IEEE Transactions on Communications**,1995,43(12):2959-2965.

[2] SUBBARAO M, CHOI T S, NIKZAD A. Focusing techniques[J]. **Optical Engineering**,1993,32(11):2824-2836.

[3] CHERN N K, POO A N, MARCELO H, et al. Practical Is-

sues in Pixel-based Auto-focusing for Machine Vision[C]// Proceedings of the 2001 IEEE, International Conference on Robotics and Automation. Seoul, Korea: [ s. n. ], 2001: 2791-2796.

[4] SUBBARAO M, TYAN J K. Selection the optimal focus measure for Autofocusing and depth-from-focus[J]. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**,1998,20(8):864-870.

[5] 黄剑琪. 基于频谱分析的数字对焦技术研究[D]. 杭州:浙江大学光电信息工程学系,2001:21-31.

[6] 赵荣椿. 数字图象处理导论[M]. 西安:西北工业大学出版社,1999:37-54.

[7] 李 奇,冯华君,徐之海,等. 数字图像清晰度评价函数研究[J]. 光子学报,2002,31(6):736-768.

[8] 康宗明,张 利,谢 攀. 一种基于能量和熵的自动聚焦算法[J]. 电子学报,2003,31(4):551-555.

[9] 袁 珂,徐蔚鸿. 基于图像清晰度评价的摄像头辅助调焦系统[J]. 光电工程,2006,33(1):144.

[编辑:李 辉]