

文章编号 1004-924X(2004)05-0537-06

## 基于图像熵的自动聚焦函数研究

朱铮涛<sup>1,2</sup>, 黎绍发<sup>1</sup>, 陈华平<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学 计算机科学与工程学院, 广东 广州 510640;

2. 广东工业大学 信息工程学院, 广东 广州 510640)

**摘要:**从图像中熵的定义出发,研究了图像熵在成像系统自动聚焦判决函数中的应用,研究发现:图像熵作为聚焦判决函数出现了两类不同的判决准则,一类是图像清晰熵小,另一类是图像清晰熵大。对不同测试图像的分析,证实了这种非一致性的存在并分析了造成这种现象的可能原因,而且由于图像熵的峰值较小,数值仅在小数点后变化,不易找出全局最大值。在均方差判决函数的基础上,提出了条件加权均方的方法,得到了具有准则一致性的自动聚焦判决函数。实验证明:条件加权均方差判决函数在不增加运算量的前提下,可以加大函数的峰值,从而提高判决的准确性。实用中在测试条件变化不大的情况下,通过人机交互,可选用图像熵作为自动聚焦判决函数,否则优先考虑条件加权均方函数。

**关键词:**熵;聚焦函数;均方差

**中图分类号:**TP274 **文献标识码:**A

## Research on auto-focused function based on the image entropy

ZHU Zheng-tao<sup>1,2</sup>, LI Shao-fa<sup>1</sup>, CHEN Hua-ping<sup>2</sup>

(1. College of Computer Science and Engineering, South China Univ. of Tech.,  
Guangzhou 510640, China; 2. College of Information Engineering,  
Guangdong Univ. of Tech., Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Based on the definition of entropy in image, the application of the image entropy in auto-focused function is studied. It is found that there are two different rules in focusing function while using the image entropy. When the image is in the state of focus, one with the entropy is the largest, and the other with the entropy is the least. Through calculating and analyzing different kinds of test images, the existence of rule variance is confirmed, and the reason is analyzed. As the peak value and its shift are small, it is difficulty to find the largest in the four corners. Based on mean-square judge-function, a method weighted in condition is given, and an auto-focus judge-function with coherence rule is obtained. The experiment proves that the mean-square judge-function weighted in condition can enhance the peak of function and does not increase amount of calculation, so it can improve the veracity of judgement. If the test-condition does not change a lot, image entropy can be acted as an auto-focus judge-function through human-computer interface, otherwise the conditional weighted mean-square function is recommended.

**Key words :** entropy ;focusing function ;mean-square

## 1 引言

在高速、大批量、连续自动化生产流水线上,往往需要利用视觉进行质量检查、零件辨识和尺寸测量。视觉测量是采用摄像机作为传感器件,借助计算机强大的数据处理能力实现对物体(物点)空间位置、形状轮廓、面积、缺陷等参数的测量。视觉测量的精确程度,取决于成像系统的精密程度、成像的清晰与否以及计算机对图像的处理技术。其中,成像是否清晰,或者说被摄物体是否处于成像系统的焦平面上,是影响测量精度的一个关键问题。目前,许多学者在图像的自动聚焦以及聚焦判别函数的选取等方面做了大量的研究工作<sup>[1-15]</sup>,给出了一些判据和系统调焦策略。作者在对诸多判别函数的研究中发现,不同学者利用图像的信息熵作为聚焦评价函数给出了不同的评价准则,有人认为图像越清晰熵越大,或者图像越清晰熵越小。为此,作者着重研究了有关图像熵以及不同材质图像熵的计算。研究发现:依靠图像信息熵或灰度熵作为图像清晰的判据对不同材质、纹理的图片及光照条件的敏感性太大,不能简单地根据熵大或熵小作为调焦的一致性判据,需要根据处理的具体对象(图片)进行适应性的训练,或者直接采用一致性较好(或者说对材质等敏感性较小)的加权均方聚焦评价函数作为调焦判据。

## 2 图像熵<sup>[1]</sup>

图像作为一个二维信源,处于不同位置的像素取不同的灰度和颜色,图像灰度级  $n = 2^B$ , 像素灰度用  $x_i$  表示,若  $p(x_i)$  为各灰度级出现的概率,则熵的四种定义形式分别为:

(1) 假设各像素和各灰度是统计独立的,而且不考虑像素的几何位置,Shannon 熵为(信息熵):

$$H = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log(x_i), \quad (1)$$

(2) 把图像的 MN 个像素位置每个看作为一个陷阱,光子以不同概率独立地投入陷阱中,因而

每个像素表现出不同灰度,即亮度。设灰度与落入该陷阱的光子数成正比,又设投射到整幅图像的光子数为  $f_t$ ,则在  $(m, n)$  位置陷阱的光子数概率为:

$$p(f_{m,n}) = \frac{f_{m,n}}{f_t} = \frac{f_{m,n}}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f_{i,j}}$$

不考虑  $f_{m,n}$  间的相关性,可以写出(Frieden 定义的熵)

$$H = - \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left( \frac{f_{m,n}}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f_{i,j}} \right) \log \left( \frac{f_{m,n}}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f_{i,j}} \right), \quad (2)$$

(3) 若考虑像素之间的相关性,可以写出(Pnatt 定义的熵)

$$H(\bar{f}) = \sum_{q=1}^{MN} H[f_q | f_{q-1}, f_{q-2}, \dots, f_2, f_1], \quad (3)$$

这里,  $H[f_q | f_{q-1}, f_{q-2}, \dots, f_2, f_1] = - \sum_{i=1}^T p(\bar{f}_i) \log p(f_q | f_{q-1}, f_{q-2}, \dots, f_2, f_1)$ , 其中  $T = 2^{MNB}$ 。式(3)右边表明了像素间的相关性。显然,若图像相关性大,则熵小。

(4) 在图像压缩中,用差信号作为样本传输具有较好的效果,因而可以用灰度差作为统计单元,建立灰度直方图,定义  $p(x_i) = n(x_i) / MN$ , 则差信号的熵为:

$$H_d = - \sum_{i=1}^{2^B} p(x_i) \log(x_i), \quad (4)$$

在以上 4 个熵的计算公式中,(3)、(4)的计算比较烦琐,所以在实时图像处理系统中,基于图像熵的评价函数一般采用公式(1)、(2)或者其变形的形式。

## 3 关于图像熵的聚焦评价函数

利用图像熵作为聚焦评价函数,是许多学者在计算机视觉技术中常用的一种方法,目前常用公式可以归纳为以下 2 种:

(1)  $H(X) = - \sum p_i \log p_i$ , 但在具体处理上,文献[2,8]和[3,7,9]的作者给出了截然不同

的结论(两者的叫法不同)。

文献[2,8]认为对于离散无记忆信源,信息熵具有极大值定理,即当事件出现的概率相等时,信息熵最大。显微镜输出图像中,不同调焦位置对应不同模糊程度的图像,离焦量越大,图像越模糊,图像像素的分布越趋于平均,信息熵  $H$  越大;当正确调焦时,图像最清晰,像素灰度分布脱离平均分布状态,  $H$  值为最小。显微镜调焦过程就是找出  $H$  最小值的过程。

文献[3,7,9]认为图像灰度熵大小表示图像像素点灰度分布的离散程度的大小,当计算区域内图像像素点的灰度值变化较大时灰度熵也较大,而当计算区域内所有图像像素点的灰度值相等时灰度熵最小。当图像完全模糊时,像素点的灰度值分布离散度较小,灰度熵较小,而当图像较锋利时,像素点灰度值分布离散度大,从而灰度熵较大。所以灰度熵在一定程度上可以表征图像的锋利程度。

(2) 文献[4]认为,对于一幅  $N \times N$  大小的图像,其总能量可表示为  $E = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y)$ , 同时定义  $H_f = - \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \ln[f(x, y)]$ , 由于  $H_f$  的结构类似于信息论中熵的表示法,所以称它为图像的熵,根据山农信息论原理,熵最大时信息量最多,将此用于调焦过程中,当  $E$  一定时,  $H_f$  最大,二维图像最清晰。

## 4 影响聚焦函数判别准则的因素

为什么几个作者在应用图像熵作为自动聚焦判别函数时选取了不同的准则,而且在各自的系统中都能很好地完成相应的任务。笔者对多种类型的图像进行了计算分析,认为可能有以下因素影响了准则的一致性。

(1) 镜头的视野不同。由于物距不同,成像在 CCD 上的物体范围不同,对于观察金相图片测定各相含量的应用场合,由于表面组织相对一致,不同视野下图片对熵的影响不大,而对于观测其它情况如带有网格孔的音箱前面板,熵对于视野变化具有敏感性。

(2) 被测表面的纹理和结构。如果放大倍数

不大,图像本身纹理和结构不影响图像熵的计算,如图 2 中 f-h 这组照片,离焦量只影响宏观物体的清晰程度,这时有熵越小图像越清晰的结论。

(3) 灰度图和真彩图。灰度图和真彩图不仅在存储方式上不一样,而且图像清晰的判据有可能不一样,对于图 2 中 a-c、d-e 两组真彩图,我们有图像熵越大越清晰的结论。而 f-h 这组图像,正焦时,图像熵最小。

(4) 文献[4]中的  $f(x, y)$  应该是归一化后的像素灰度级,否则加上一个负号,灰度熵变为负值。

## 5 自动调焦策略

自动调焦的过程是:采集一幅图像,计算图像熵,步进电机控制工作台向某一方向移动一个步距,采集第二幅图像,计算图像熵,根据图像的类型,人工判别图像熵是大清晰还是小清晰(属于人机交互过程,对于同种类型的零件,只需做一次),确定离正焦位置的方向。向正确位置移动一个步距,再采集一幅图像判别,如此循环,直至调焦结束。为了使定位准确而且减少定位时间,采取由粗到精的调焦策略,逐步减小步进电机驱动器一次发送的脉冲数,即离焦越近,步进电机一次转动的角度越小。

## 6 编程实现

利用 VC6.0 编程实现几个评焦函数的计算,其中图像信息熵由公式(1)计算,图像灰度熵从公式(2)得来,图像均方差的计算公式为:  $J(x, y) = \left\{ \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [f(x, y) - \mu(x, y)]^2 / (MN) \right\}^{1/2}$ , 图像条件加权均方的计算公式为:  $J(x, y) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \bar{f}(x, y) - \mu(x, y) / (MN)$ ,  $\bar{f}$  为权值,当像素灰度与均值的差大于一定阈值时,取  $\bar{f} = f(x, y) - \mu(x, y)$ , 否则,  $\bar{f} = 0$ 。图像灰度差的公式为:  $\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{M-1} |f(i+1, j) - f(i, j)|$ , 程序对 256 色和真彩色图都适用。运行结果显示界面如图 1 所示:

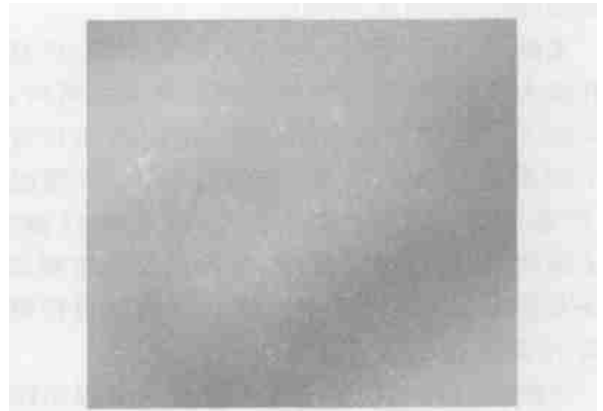
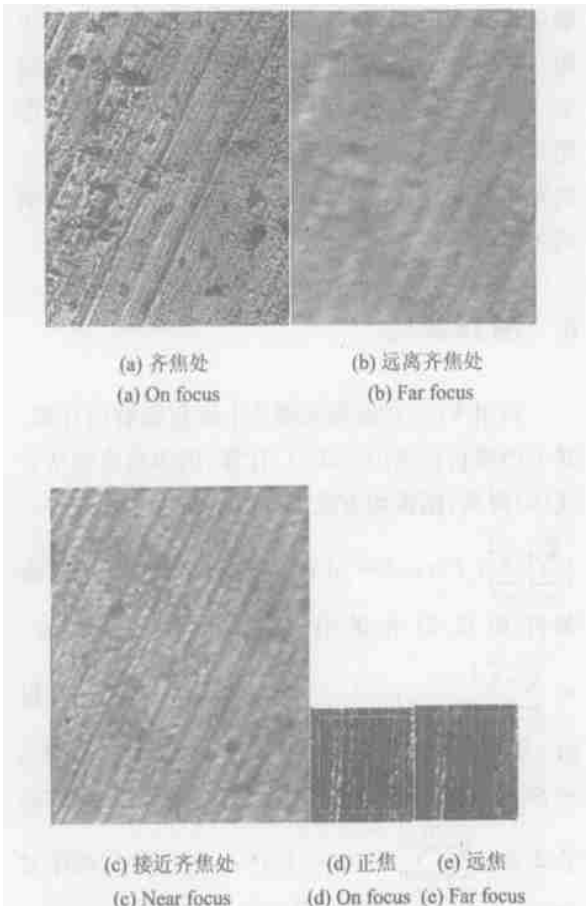


图 1 不同评价函数的结果显示界面

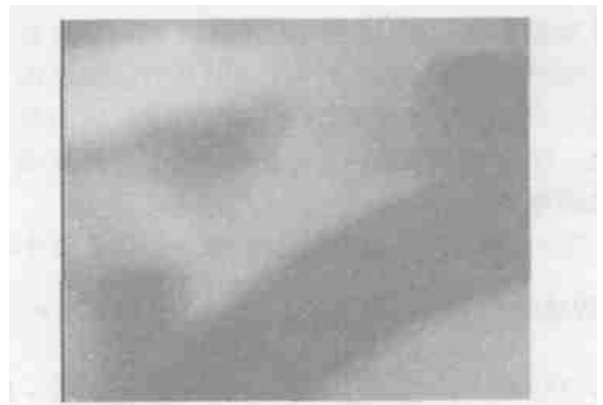
Fig. 1 Interface of showing results for the different evaluating function

### 7 实验研究

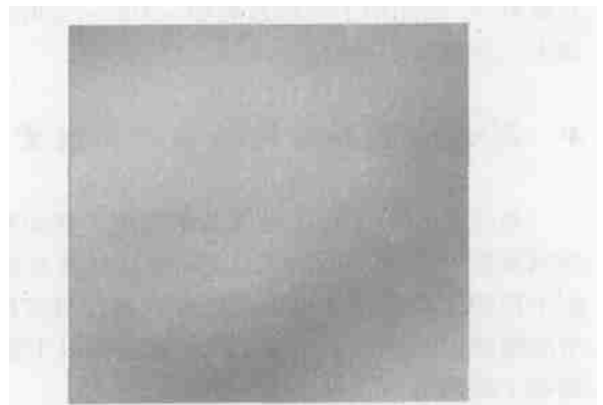
对多种类型的图像进行了计算分析,图 2 是分析的一组图像,结果数据见表 1。



(f) 近焦  
(f) Near focus



(g) 正焦  
(g) On focus



(h) 远焦  
(h) Far focus

图 2 实验用分析图 (a-e 为 24 位真彩图, f-h 为 256 色图)

Fig. 2 Image for experiment analysis (a-e for 24 bit real color, f-h for 256 color)

表1 几种聚焦函数计算结果

Tab. 1 The results of focusing function

图像编号	信息熵	灰度熵	均方差	加权均方	灰度差
A(正焦)	7.4 694 166	16.660 722	45.955 297	1 978.453 3	4 730 223
B(远焦)	6.9 706 876	16.705 671	31.887 969	823.99 458	4 918 267
C(近焦)	7.0 393 360	16.718 772	32.956 354	895.88 447	4 506 056
D(正焦)	6.2 739 834	13.422 850	29.484 283	619.80 330	195 995
E(远焦)	6.0 540 579	13.481 377	21.862 612	292.88 829	101 009
F(近焦)	5.7 908 815	17.97 114	29.0 606	552.34 245	877 031
G(正焦)	5.7 559 224	17.968 457	30.362 625	631.75 424	883 288
H(远焦)	5.8 212 949	17.972 243	28.060 013	514.82 025	893 648

由实验数据可以看出,利用公式(1)得出的信息熵,用做自动聚焦评价判别函数与图像的色彩、图像本身的纹理结构有关。对于彩色图像,聚焦越好,信息熵越大,而对于灰度图像,聚焦越好,信息熵越小。而由式(2)得出的灰度熵,作为自动聚焦判别函数并不理想,数据相差非常小。对于被测工件的工况变化不大的情况,人工交互之后,可以用信息熵作为自动聚焦函数。否则,可考虑采用条件加权均方判决函数,与普通的均方差相比,条件加权均方可以减少乘方次数,免除开方运算,同时可以突出图像中细节成分,图像聚焦愈好,高频成分(细节)愈多,聚焦函数的峰值愈大,这样可以解决某些场合均方差变化不大的问题(具体方法将另文介绍)。对于本文所讨论的几类图像,灰

度差的效果不理想。

## 8 结 论

机器视觉测量技术是近年来非接触测量中应用非常广泛的一种技术,对于精密乃至超精密测量,必须使被测物体位于准确的成像位置,获得清晰的图像。我们认为,利用图像熵作为自动聚焦评价函数,其评价准则与图像本身的特性有关,需要针对具体问题进行分析,不能简单地把图像熵大或小图像就清晰作为评焦判据,在对某类被测物体进行人工判别后,再开始自动检测,或者改用准则一致性的均方差或者条件加权均方判别函数作为聚焦评价函数。

### 参考文献:

- [1] 余英林. 数字图象处理与模式识别[M]. 广东:华南理工大学出版社,1990:91-94.  
YU Y L. *Digital image processing and pattern recognition* [M]. Publishing House of South China Univ. of Tech., 1999:91-94. (in Chinese)
- [2] 吴振锋. 显微镜一种新的自动聚焦算法[J]. 数据采集与处理, 2000, 15(3):351-354.  
WU ZH F. New autofocus algorithm of microscope[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2000, 15(3):351-354. (in Chinese)
- [3] 阎富强. 光纤近场测量中自动聚焦系统的研究[J]. 光子学报, 1997, 26(2):169-172.  
YAN F Q. Study of autofocussing system in automatic measuring of optical fibre geometrical parameters[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, 26(2):169-172. (in Chinese)
- [4] 王任华. 自动对焦算法研究[J]. 光电工程, 2000, 27(4):11-13.  
WANG R H. An Algorithm study for automatic focusing[J]. *Optoelectronic Engineering*, 2000, 27(4):11-13. (in Chinese)
- [5] 徐洁. 靶丸定位系统中的图像处理[J]. 光学精密工程, 2001, 9(6):568-571.  
XU J. Image processing for the automatic positioning system of pellet target [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(6):568-571. (in Chinese)
- [6] 李清军. 一种新型视频调焦方法的研究[J]. 光学精密工程, 1998, 6(3):105-109.  
LI Q J. Studying on a new method of video focusing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, 6(3):105-109. (in Chinese)

Chinese)

- [7] 周曲. 显微组织数字图像处理及自动测试[D]. 广东工业大学, 2003.  
ZHOU Q. *Digital image processing and automatically analyzing the micrograph of the metal tissues*[D]. GuangDong University of Technology, 2003. (in Chinese)
- [8] 郭军, 曾文涵, 谢铁邦. 弹头发射痕迹计算机图像比对系统研究[J]. 兵工学报, 2003, 25(4): 504-508.  
GUO J, ZENG W H, XIE T B. A bullet mark computer image comparison system[J]. *Acta Armamentarii*, 2003, 25(4): 504-508. (in Chinese)
- [9] 李文思, 陈海清, 李俊, 等. 红外导引头成像光斑图像处理及自动聚焦[J]. 量子电子学报, 2003, 20(3): 364-370.  
LI W S, CHEN H Q, LI J, *et al.* Image manipulation and auto-focus of the infrared seeker[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2003, 20(3): 364-370. (in Chinese)
- [10] GROEN F C A, YOUNG I T, LIGTHART G A. Comparison of different focus functions for use in autofocus algorithms[J]. *Cytometry*, 1985, 6: 81-91.
- [11] YEO T T E, JA YASOORIAH O S H, SINIAH R. Autofocusing for tissue microscopy[J]. *Image and Vision Computing*, 1993, 11(10): 629-639.
- [12] BODDEKE F, VAN V L, NETTEN H, *et al.* Autofocusing in microscopy based on the OTF and sampling[J]. *Bioimaging*, 1994, 2: 193-203.
- [13] CHERN N K, NATHANIEL P A N, MARCELO H A J. Practical issues in pixel based autofocusing for machine vision [C]. *Proceeding of the 2001 IEEE international Conference on robotics and automation, Seoul, Korea*, 2001: 21-26.
- [14] 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): 552-555.  
KANG Z M, ZHANG L, XIE P. Implementation of an automation focusing algorithm based on spatial high frequency energy and entropy[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(4): 552-555. (in Chinese)
- [15] 郭彦珍, 邱宗明, 李信. 图像测量技术中一种调焦的判别方法[J]. 西安理工大学学报, 2001, 17(1): 40-42.  
GUO Y ZH, QIU Z M, LI X. A Method Of tuning for measurement technology[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2001, 17(1): 40-42. (in Chinese)

作者简介: 朱铮涛(1977 - ), 男, 江苏启东人, 华南理工大学博士研究生, 广东工业大学信息工程学院副教授, 主要研究方向为计算机视觉测量等方面的研究。