

# 自动对焦过程中图像清晰度评价算法研究<sup>\*</sup>

项 魁, 高 健

(广东工业大学 微电子精密制造技术与装备教育部重点实验室, 广州 510006)

**摘要:** 文章详细讨论了现有的几种图像清晰度评价算法, 在综合比较各算法性能的基础上, 提出一种基于图像像素操作的梯度评价算法, 建立该评价方法的数学模型, 并采用 VS2015 与 OpenCV 编程实现其算法流程。对该评价函数进行一组由模糊到清晰再到模糊样本的实验, 并与其它评价函数进行比较分析, 结果表明, 所提出的评价算法具有单峰性强及更高的灵敏度, 可有效实现图像检测过程中自动对焦的图像清晰度判断。

**关键词:** 数字图像处理; 清晰度评价函数; 自动对焦

**中图分类号:** TH162; TG506

**文献标识码:** A

## Research on the Image Definition Evaluation Algorithm in Autofocus Process

XIANG Kui, GAO Jian

(Key Laboratory of Precision Microelectronic Manufacturing Technology & Equipment of Ministry of Education, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** In this paper, several existing image definition evaluation algorithms are discussed in detail. Based on the comprehensive comparison of the performance of each algorithm, this paper proposed an evaluation algorithm which was based on gradient evaluation algorithm and image pixel operations, and established the mathematical model of the evaluation method, and using the tools of VS2015 and OpenCV to realized the process by programming. The experiment of the evaluation function is based on a set of sample images which are from blur to clarity to blur, and comparing with other evaluation function analysis, the results show that the evaluation of the proposed algorithm is unimodal and higher sensitivity, which can effectively realize the image definition of automatic focus in image detection.

**Key words:** digital image processing; definition evaluation function; auto focus

## 0 引言

刀具磨损作为机械加工中一种不可避免的自然现象, 在生产加工中需要经常检测其磨损程度, 具有自动对焦功能的数字图像在线检测方法将有助于提升刀具磨损检测的效率和准确度<sup>[1]</sup>。目前基于数字图像处理自动对焦技术的一个研究热点就是图像清晰度评价算法研究。

图像清晰度评价函数的好坏直接影响对焦的有效性和准确性, 本文在综合比较了几种算法性能的基础上, 提出了一种新的基于“三邻域”的梯度评价函数, 在建立其评价方法数学模型的基础上, 开展其性能的实验研究, 并通过与几种常见评价函数的实验对比, 验证该算法在图像清晰度评价上具有更好的单峰性以及更高的灵敏度特性。

## 1 常用的图像清晰度评价函数

一个好的图像清晰度评价函数应该具备以下几种

基本特征<sup>[2-4]</sup>: ①较好的无偏性, 即评价函数值应与肉眼所观察的图像清晰度具有一致性, 也即评价函数值能确定真实的反应图像清晰度; ②较强的单峰性, 即在图像的正焦位置, 评价函数具有唯一极值; ③较高的灵敏度, 即对不同清晰度的图像, 评价函数值应有一定的差距, 并且在正焦极值位置附近的评价函数值有较明显的函数值变化, 以保证调焦的灵敏度及调焦效率。

目前图像清晰度评价函数主要分为以下4类<sup>[5-6]</sup>:

(1) 空域类灰度变化评价函数。由于聚焦图像比离焦图像包含更多的灰度变化, 图像越清晰, 图像的灰度值变化越大, 所以, 图像灰度值的变化可以作为图像清晰度的评价标准<sup>[7]</sup>。这类函数主要包括 Tenengrad 函数、Brenner 函数、图像灰度方差函数及梯度平方函数<sup>[8]</sup>, 其评价特性为: 调焦范围广、稳定性好但灵敏度不高<sup>[9]</sup>。

(2) 图像灰度熵函数。根据香浓信息理论, 熵最大时信息量最多。如果图像中所有灰度级出现概率越

收稿日期: 2018-02-27; 修回日期: 2018-03-22

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金项目(51175093)

作者简介: 项魁(1992—), 男, 湖北黄冈人, 广东工业大学硕士研究生, 研究方向是数字化制造与在线检测技术, (E-mail) 296669098@qq.com; 通讯作者: 高健(1964—), 女, 山东青岛人, 广东工业大学教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为精密在线检测技术与微电子封装装备方向, (E-mail) jian\_gao2004@163.com。

趋于相等,则包含的信息量就越趋于最大<sup>[10]</sup>。因此,图像的灰度熵的大小也可以作为图像清晰度的评价<sup>[7]</sup>。其评价特性为:计算时间长,灵敏度不高<sup>[9]</sup>。

(3) 频域类函数。其理论依据是:由图像的特征可知,清晰的图像比模糊图像包含有更多的信息,清晰图像拥有更锋利的边缘,而高频部分又主要集中在图像的边缘,因此,利用傅里叶变换提取图像高频部分的方法也可以用来判断图像的清晰度。虽然频域函数能准确地判别图像是否清晰,但由于要进行傅里叶变换,导致程序计算量大,代码运行效率低,不适用于当前情况下所要求的快速、实时的检测<sup>[5,9-10]</sup>。

(4) 统计学评价函数。如果直方图中只有中间某一小段非零值,则这张图像的对比度较低;反之,如果直方图的非零值分布很宽而且比较均匀,则图像的对比度较高<sup>[11]</sup>。这类函数正是利用正焦图像与离焦图像不同的灰度分布直方图作为评价函数,其评价特性为:平滑性较差,不确定度较大<sup>[9]</sup>。

目前基于以上这些评价函数,国内外研究学者提出了许多清晰度评价算法,但它们大多都具有一定的局限性。本文针对一些常见算法的缺陷,提出一种基于“三邻域”的能量梯度法与阈值法相结合的一种改进算法来实现图像的清晰度评价<sup>[5]</sup>。

## 2 改进的图像清晰度评价算法

能量梯度法是一种原理与计算过程都比较简单的一种图像清晰度评价方法。其原理是利用图像中所有像素点与相邻像素点灰度值的差的平方和作为图像清晰度评价函数,即

$$D(f) = \sum_x \sum_y (|f(x+1, y) - f(x, y)|^2 + |f(x, y+1) - f(x, y)|^2)$$

式中,  $D(f)$  —图像清晰度函数评价价值,  $f(x, y)$  —图像在像素坐标点  $(x, y)$  处的灰度值。

通过公式我们可以看出,能量梯度法存在两方面的缺陷:①能量梯度法的应用范围有限,它容易受到灰度级数的影响,对于灰度值变化较大的图像,有很好的效果;而对于灰度值变化不是那么明显的图像,它的评价价值就很接近;②能量梯度法只是对图像空域中的  $X$ 、 $Y$  轴方向进行了梯度计算,而在对图像进行空域分析时,是进行网格划分了,对于  $45^\circ$  角方向就没有进行分析计算,并不全面。例如如图 1 所示的一幅空域图像,像素点  $f(2, 2)$  就没有参与计算。

$f(0, 0)$	$f(0, 1)$	$f(0, 2)$
$f(1, 0)$	$f(1, 1)$	$f(1, 2)$
$f(2, 0)$	$f(2, 1)$	$f(2, 2)$

图 1 空域下进行图像网格划分的部分像素

正是由于能量梯度法存在的这两个缺陷,所以能量梯度法易对图像清晰度进行误判。基于以上两个问题,本文提出了一种基于“三邻域”的能量梯度法与阈值法相结合的一种改进算法,即采用阈值法进行优化,并提出“三邻域”的概念来进行算法改进。采用阈值法是为了选取出有明显灰度值变化的部分,也即图像的边缘,对于清晰图像,它的边缘信息很丰富,它拥有较大的灰度值变化,因此利用阈值可以避免缺陷①的存在。

本文提出的“三邻域”是指以目标像素为“原点”,位于“原点”的右下三邻接的三块区域为计算像素点,以此来对图像进行完整性计算。因此图像中任意像素点的“三邻域”能量梯度值为当前像素点的灰度值分别与其正右方、正下方及正右下方三个像素点的灰度值之差的平方和,即:

$$D(f) = (f(x, y) - f(x+1, y))^2 + (f(x, y) - f(x, y+1))^2 + (f(x, y) - f(x+1, y+1))^2$$

从而得到,本文无阈值算法的评价价值之和为:

$$TotalSum = TotalSum + D1(f)$$

式中,  $D1(f)$  —全部区域内各像素点的评价价值。

本文有阈值算法的评价价值之和为:

$$PartSum = PartSum + D2(f)$$

式中,  $D2(f)$  —有效区域内各像素点的评价价值。

根据上述改进的算法描述可知,采用基于“三邻域”的能量梯度法进行各像素点的计算,再利用阈值法进行有效区域的选取,就可以对图像的清晰程度进行有效的判断。基于这一点,本文对无阈值与有阈值的两种情况均做了实验,最终选取了有效区域点的“三邻域”能量梯度之和  $PartSum$  的值作为图像清晰度的评判依据。所谓的有效区域是指采用阈值进行判断满足边缘特性的部分图像区域。

如上所述,本文所提出的图像清晰度的评价函数为  $PartSum$ 。当  $PartSum$  的值越大时,说明图像的有效信息量越大,图片的清晰程度越高。

## 3 自动对焦中的图像清晰度评价算法实现

基于数字图像处理的自动对焦流程可简述为:首先计算图像的清晰度评价价值,评价价值越大即认为越接近正焦位置,然后驱动调焦组镜头向正焦方向运动,直到清晰度达到最大值为止。事实上,基于数字图像处理的自动对焦过程是对图像清晰度不断进行优化的过程,不可能从一幅图像中确定出理想的正焦位置,自动对焦过程必须是经过多次的图像采集、处理,与已有样本对照并判断的过程。如图 2 所示为利用本文改进的清晰度评价算法实现基于数字图像处理的自动对焦基本流程图。

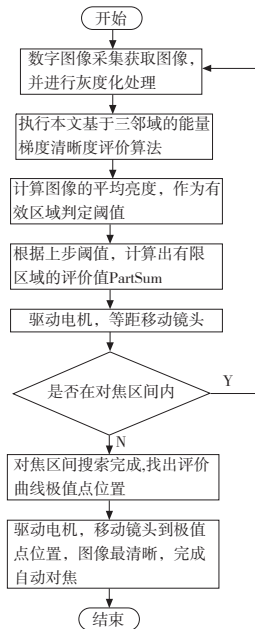


图 2 基于数字图像处理的自动对焦的基本流程

基于数字图像处理的自动对焦具体实现步骤为:

步骤 1: 通过搭建的数字图像采集系统获得被检测物体的数字图像, 进行数字图像灰度化处理, 获得灰度图像。

步骤 2: 计算出当前图像的平均亮度(灰度平均值), 作为有效区域的判断阈值, 大于该阈值的则判断为有效区域。如若没有进行阈值判断, 即为无阈值算法。

步骤 3: 根据上述阈值选择出图像的有效区域, 按照本文所述的基于“三邻域”的能量梯度法计算出有效区域像素的评价值之和 PartSum(有阈值)。

步骤 4: 在一个自动对焦搜索区间内发送等距运动指令, 重复执行步骤 1、2、3, 获得一系列不同对焦程度的图像清晰度评价。

步骤 5: 找出步骤 4 中获取的一系列评价值的最大值位置, 并驱动步进电机将镜头移到该位置, 完成自动对焦。

#### 4 评价算法的实验验证与分析

为了验证本文所提算法的有效性, 本文利用 VS2015 与 OpenCV 的联合编程, 实现了各算法清晰度评价函数值的自动计算, 在此基础上选取了一系列的不同清晰度的图片进行实验, 并与一些常见的评价算法进行了评价特性的对比分析。

首先为了得到改进后的评价函数和其他常用的清晰度评价函数的算法效果。在相同的检测环境下, 本文从数字图像采集系统获得了一系列格式相同但聚焦程度不同的图片, 如图 3 所示。

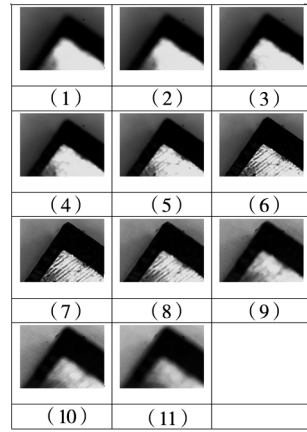


图 3 按照调焦顺序采集到的一组不同清晰度图片

这些图片的排序为由模糊到清晰再到模糊, 也就是一组由离焦到正焦再到离焦的区间搜索序列图像。利用不同的评价算法分别计算出每一张图片的评价函数值, 如表 1 所示。将其归一化后如表 2 所示。对应各评价算法的评价曲线如图 4 所示, 可以进行各种算法评价效果的比较。

表 1 不同算法得到的清晰度评价

图片序号	灰度方差函数	能量梯度函数	本文无阈值算法	本文有阈值算法
1	211529	2965004	2348570	821442
2	213650	3219919	2533958	867827
3	225572	3641922	3109476	1088742
4	248586	4260409	4109812	1456113
5	312454	5948419	6662905	2698078
6	655497	20893881	34083438	18937196
7	794187	27089707	50185417	29045920
8	447404	9032733	12614871	6411373
9	344075	5985728	5779988	2423217
10	317942	5464886	3997257	1848186
11	274716	5179365	2861696	1167977

表 2 不同评价算法得到的归一化值

图片序号	灰度方差函数	能量梯度函数	本文无阈值算法	本文有阈值算法
1	0.266	0.109	0.047	0.028
2	0.269	0.119	0.050	0.030
3	0.284	0.134	0.062	0.037
4	0.313	0.157	0.082	0.050
5	0.393	0.220	0.133	0.093
6	0.825	0.771	0.679	0.652
7	1.000	1.000	1.000	1.000
8	0.563	0.333	0.251	0.221
9	0.433	0.221	0.115	0.083
10	0.400	0.201	0.080	0.064
11	0.346	0.191	0.057	0.040

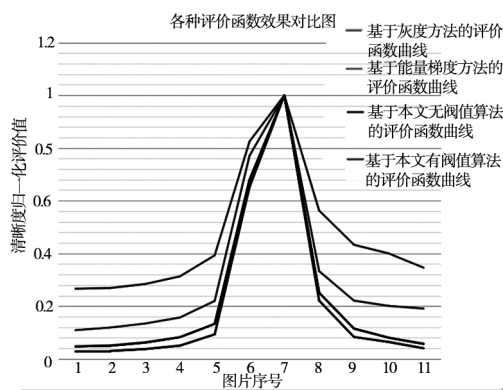


图 4 不同评价函数的性能曲线示意图

由图 3 图像清晰度与图 4 的性能曲线比较可知, 这些评价算法均在图 4 中序号 7 时取得最大评价价值和最佳图片实际清晰度, 均具有较好的无偏性及单峰性。但图 5 的性能曲线图表明, 灰度方差函数在对焦点图 4 中序号 7 附近时评价函数值相差较小, 而且当取相同评价价值时, 具有最宽的对焦邻域, 其灵敏度最低; 而对比能量梯度函数和本文的评价算法, 可以看到, 当函数评价价值相同时, 本文的评价曲线具有最窄的对焦邻域, 且在离焦时, 函数评价价值最小, 故本文的评价算法在对焦灵敏度、单峰性、单调性等方面的性能都要优于其他评价函数。

## 5 结束语

本文针对自动对焦技术中的图像清晰度评价算法, 在综合比较了几种常见的评价算法的基础上, 提出了一种新的基于“三邻域”梯度的图像清晰度评价算

法。实验结果表明, 本文所提算法具有更好的评价特性, 适用于快速、高精度自动对焦系统的图像清晰度评价。

### 【参考文献】

- [1] 秦国华, 易鑫, 李怡冉, 等. 刀具磨损的自动检测及检测系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3332-3341.
- [2] 于之靖, 马凯, 王志军, 等. 采用加权最小二乘准则的影像仪自动对焦方法[J]. 半导体光电, 2017, 38(4): 592-597.
- [3] 张艳超, 孙强, 赵建. 对数功率谱离焦深度法在多光谱成像仪的应用[J]. 光学精密工程, 2013, 21(3): 767-773.
- [4] 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(1): 141-144.
- [5] 徐贵力, 刘小霞, 田裕鹏, 等. 一种图像清晰度评价方法[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1): 180-184.
- [6] 王聪. 一种基于监控系统的图像清晰度检测算法[J]. 电视技术, 2012, 36(21): 162-164, 175.
- [7] 吴利明, 陶晓杰. 一种新的图像清晰度评价方法[J]. 仪器仪表用户, 2008(6): 84-86.
- [8] 曹茂永, 孙亮, 郁道银. 基于灰度梯度的数字图像评价函数[J]. 光电工程, 2003(4): 69-72.
- [9] 王欣, 安志勇, 杨瑞宁. 基于图像清晰度评价函数的 CCD 摄像机自动调焦技术研究[J]. 长春理工大学学报, 2008, 31(1): 11-14.
- [10] 王勇, 谭毅华, 田金文. 一种新的图像清晰度评价函数[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 34(4): 124-126.
- [11] 张铮, 王艳平, 薛桂香. 数字图像处理与机器视觉—Visual C++ 与 Matlab 实现[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.

(编辑 李秀敏)

(上接第 51 页)

## 4 结论

本文基于五轴数控加工渐开线蜗轮的方式, 根据微分几何与齿轮啮合理论研究了一种新的蜗轮修形建模方法, 得到了如下的结论:

(1) 基于蜗轮齿面方程计算出的齿面点云, 通过对其进行法向偏移处理实现齿面修形, 因而传动精度相当高;

(2) 蜗轮齿面点云的法向偏移量可以根据相关标准改变, 从而可以很方便灵活地调整蜗轮副接触区域位置与大小;

(3) 渐开线蜗轮副实例的齿面接触区图以及传动误差分析结果表明, 本文提出的蜗轮修形建模方法符合实际使用要求。

### 【参考文献】

- [1] 杨兰春. 蜗杆传动手册[M]. 上海: 华东化工学院出版社, 1990.
- [2] Fang Hong-Sheng, Chung-Biau Tsay. Mathematical Model and Bearing Contacts of the ZK-Type Worm Gear Set Cut by Oversize Hob Cutters[J]. Mechanism & Machine Theory, 2000, 31(12): 1689-1708.
- [3] 李艳玲, 李巧玲, 宁振武. 数控加工技术在机械制造业中的重要性[J]. 中国科技信息, 2005(18): 76.
- [4] 黄卫. 数控机床及故障诊断技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [5] 刘鹤然, 赵东福, 宋德玉. 现代啮合理论[M]. 杭州: 浙江

大学出版社, 2008.

- [6] F Klocke, E Brinksmeier, K Weinert. Capability Profile of Hard Cutting and Grinding Processes[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2005, 54(2): 22-45.
- [7] 周济, 周艳红. 数控加工技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [8] 江磊, 王玉兰. 基于 Solidworks 的阿基米德蜗杆蜗轮建模方法探讨[J]. 机械与电子, 2007(3): 67-70.
- [9] 李书平. 基于 UG 的渐开线蜗轮参数化设计[J]. 机械设计与制造, 2009(5): 222-223.
- [10] 李俊源. 基于 Solidworks 的蜗轮蜗杆三维参数化设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2006, 29(1): 98-100.
- [11] 蔡磊, 罗良清, 李志明. 阿基米德蜗杆零件实体建模研究[J]. 湖北工业大学学报, 2006, 21(3): 152-153.
- [12] 阮锦, 刘强, 阮锋. 蜗轮蜗杆的三维参数化设计及其运动仿真分析[J]. 机械设计与制造, 2007(11): 74-76.
- [13] 曾峰, 牛鸣岐, 赵先锋, 等. 蜗轮齿面的三维仿真造型[J]. 水利电力机械, 2007, 29(6): 12-15.
- [14] 刘广武, 侯洪生, 唐扬扬. ZA 蜗轮蜗杆的主动参数化精确 3D 数模设计[J]. 机械传动, 2015(3): 56-61.
- [15] 杨富卿, 李寅森. 点接触阿基米德蜗杆传动啮合分析[J]. 焦作矿业学院学报, 1994, 13(6): 71-75.
- [16] 沈谦. 点接触圆柱蜗杆传动的设计原理[J]. 南京航空学院学报, 1991, 23(2): 48-54.
- [17] 万飞, 王勇勤, 张光辉. 大型轧机压下装置 ZC1 蜗轮齿面可控啮合修形的研究与应用[J]. 钢铁, 2007, 42(3): 76-78.

(编辑 李秀敏)