

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802345

一种改进的 Brenner 清晰度评价函数*

毕天华 杜文华

(中北大学机械与动力工程学院 太原 030051)

摘要:针对传统的 Brenner 清晰度评价函数在对离焦量大、内容复杂的图像评价时效果不理想的情况,提出一种改进的 Brenner 清晰度评价函数。该函数在 Brenner 评价函数的基础上,通过增加一组垂直方向的掩模模板,结合 Brenner 算子本身的水平方向模板共同对图像梯度进行计算。最后通过对不同模糊程度和有噪声的图像进行清晰度评价的对比验证改进方法的有效性。实验结果表明,改进的方法在 Brenner 函数的基础上提高了准确性的同时,计算时间上优于其他常用的灰度类评价函数,有效地改善了传统的 Brenner 清晰度函数的评价效果。

关键词: 机器视觉;自动对焦;图像处理;Brenner 算子

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

Improved Brenner definition evaluation function

Bi Tianhua Du Wenhua

(School of Mechanical and Power Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: For the traditional Brenner definition evaluation function, which is not ideal in the image evaluation with large amount of defocus and complex content, this paper proposes an improved Brenner definition evaluation function. On the basis of the Brenner evaluation function, this function calculates the image gradient by adding a set of vertical mask template and combining the horizontal direction template of Brenner operator itself. Finally, the effectiveness of the improved method is verified by comparing the different fuzzy degrees and the noisy images. Experimental results show that the improved method on the basis of the Brenner function improved the accuracy at the same time, the calculation time is better than other common gray evaluation function, effectively improve the traditional Brenner definition function evaluation effect.

Keywords: machine vision; auto-focus; image processing; Brenner operator

0 引言

基于机器视觉图像清晰度的调焦技术在越来越多的场合被应用,比如工业生产中的产品测量、检验,照相机、摄像机中的自动聚焦,在军事、救援中无人操作方面也运用广泛^[1-3]。

在一般的光学系统中,镜头有固定的最佳成像距离,物体只有在这个最佳成像距离前后的一段空间内才能在镜头中得到信息最完整的图像。在过去,需要把被拍摄物体放到合适距离才能够得到清晰的图像;而基于机器视觉的自动调焦技术不需要测量物体与镜头之间的物距,而是直接通过清晰度评价函数对得到的图像进行评价,根据所得评价调整距离,从而得到物体最清晰的图像。在自动调焦过程中,如何评价清晰度是首要的问题。

在实际应用中,对于一幅清晰图像来说,在空域表现为

相邻像素灰度差大,也即边缘锐利、梯度大;在频域表现为对比度强,有更多的高频分量^[4-6]。离焦时边缘像素灰度扩散,高频分量信息丢失。许多学者依据这些性质设计出了不同的清晰度评价函数,文献[7]为解决细胞识别提出一种4模板的改进 Sobel 评价函数,在原有的 Sobel 算子基础上加入两个45°的卷积模板,提高了 Sobel 算子的评价能力,但是极大增加了计算量;文献[8]提出一种基于 HVS 加权的空域评价函数,该评价函数更适合在嵌入式实时光测平台进行自动调焦控制;文献[9]提出一种基于 Gabor 滤波器的熵评价函数,用不同数据库的图像对函数进行了评价比较;文献[10]提出一种基于最小各向同性小波滤波的清晰度评价方法与拉普拉斯的评价方法比较得出各向同性小波滤波算法有更好的综合性能。

空域类清晰度评价函数因为其直接对图像像素点的灰

收稿日期:2018-11-23

* 基金项目:山西省自然科学基金(201601D102025)、中北大学自然科学基金(XJJ2016007)项目资助

度值进行计算,不需要其他变换,所以计算量相对较少,计算速度快,精确度较高。而其中 Brenner 评价函数是最简单的空域评价函数,计算速度快^[11],但是评价准确性相对较低,对离焦量大,内容复杂的图像评价时效果不理想,因此实际应用较少^[12],本文通过改进 Brenner 算法以满足在处理多副图像大数据量时的快速对焦应用。

1 问题描述

1.1 传统的 Brenner 函数

传统的 Brenner 函数,利用图像像素与水平方向相差两个单位的像素之间灰度差值的平方作为评价标准^[11,13],计算简单且快速,其定义如下:

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

式中: $f(x, y)$ 表示图像 f 对应像素点 (x, y) 处的灰度值; $D(f)$ 为表示清晰度的计算结果,值越大图像越清晰。

根据函数的定义,在图像最清晰处时,函数达到最大值,根据相邻两次清晰度评价结果决定图像正焦位置所在方向,控制相机移动。

传统的 Brenner 算子相当于一个带通滤波器^[9],对于高频噪声有良好的过滤效果,针对图像水平方向的梯度进行计算。

1.2 边缘检测原理

图像的边缘对应着图像相邻像素灰度值发生明显的变化,清晰的图像边缘处的灰度值有明显的差别,模糊的图像边缘灰度值往往是渐变的。传统的边缘检测就是利用了这个特点,对图像各个像素点进行微分或求二阶微分来确定边缘像素点;一阶微分图像的峰值处对应着图像的边缘点;二阶微分图像的过零点处对应着图像的边缘点。根据数字图像的特点,处理图像过程中常采用差分来代替导数运算,对于图像的简单一阶导数运算,由于具有固定的方向性,只能检测特定方向的边缘。

边缘的锐利程度由图像梯度幅值决定,边缘方向由梯度方向决定。如图 1 所示, α 为梯度方向与列坐标轴的夹角,表示梯度方向。

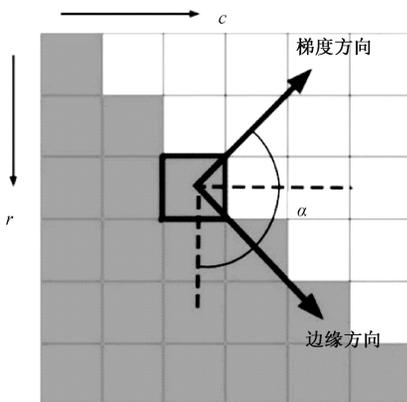


图 1 图像边缘像素与梯度

梯度分为 x 方向与 y 方向,具体计算公式如下:

$$g_x = \frac{\partial f}{\partial x}, g_y = \frac{\partial f}{\partial y} \quad (2)$$

由此可得到梯度的幅值与方向:

$$M(x, y) = \sqrt{g_x^2 + g_y^2} \quad (3)$$

$$\alpha(x, y) = \arctan\left(\frac{g_y}{g_x}\right) \quad (4)$$

式中: M 为梯度幅值 α 为梯度方向。

综上所述,由于传统 Brenner 评价函数只针对水平方向像素进行计算,而通常图像边缘梯度方向并不固定,所以在面对复杂背景轮廓的图像时,评价准确性不高有待改进。

1.3 Brenner 算子改进

目前,人们研究发现人类视觉系统(HVS)的一系列特性,其中针对边缘、亮度、纹理的视觉屏蔽特性是指视觉系统类似于一组带通滤波器,对不同方向、不同亮度、不同频率的刺激有着不同的敏感度,并对水平方向和垂直方向的边缘最敏感^[14-15]。

传统 Brenner 算子可以看作是一个 $B_x = [-1 \ 0 \ 1]$ 的水平滤波器与图像对应像素点作卷积处理,通过掩模模板 B_x 对高低频信号进行滤波保留中频信号。

根据 Brenner 算子的优势与 HVS 的特性,本文采用一个垂直方向的滤波模板 $B_y = [-1 \ 0 \ 1]^T$ 与原有模板 $B_x = [-1 \ 0 \ 1]$ 共同对图像滤波提取边缘信息,改进的评价函数定义如下:

$$D_{\text{NEW}}(f) = \sum_x \sum_y [|f(x+2, y) - f(x, y)| + |f(x, y+2) - f(x, y)|] \quad (5)$$

改进函数在原有算子只评价水平方向边缘的基础上添加了垂直方向边缘的评价,更符合人眼视觉的判断,可以更好的提取边缘并过滤噪声;将原有的平方计算改为了绝对值求和,进一步简化计算,改进的 Brenner 函数在每个像素点处需要进行两次减法一次加法计算,相对于原来的函数需要进行一次减法一次平方来说计算量进行了部分简化。

2 模拟实验与评价

图 2 所示为理想状态下的清晰度评价函数曲线,该曲线有且只有一个极值点,并且在极值点附近函数陡峭,非极值点位置平缓,极值点处尖锐,曲线平滑无局部峰值,这样的函数具有高灵敏度,高鲁棒性,能够符合实际使用需要。

为了验证改进的 Brenner 函数的有效性,测试其敏感性与抗噪性,用改进的 Brenner 函数与常用的灰度梯度类清晰度评价函数分别对轻度离焦图像,重度离焦图像,加入噪声的模糊图像和失真图像进行清晰度评价,模拟实验生成清晰度评价曲线,就曲线的单峰性,峰值附近曲线陡峭程度,是否有局部峰值等情况进行比较。

2.1 轻度离焦图像清晰度评价

依次用 $r = 0.6 \sim 2.9$ 间隔 0.1 的模糊半径对 butter_

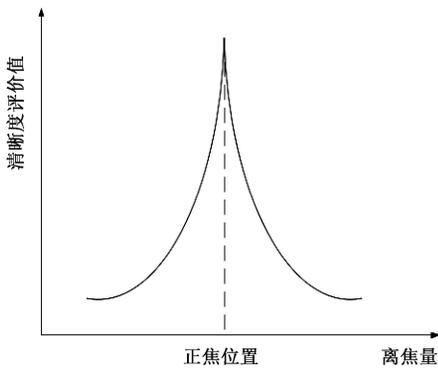


图 2 评价函数曲线

flower 图像进行圆盘模糊,得到编号从 1:24 的 24 张图像,与原图像组成从轻微离焦到清晰的 25 张图像序列,以此模拟聚焦搜索过程中图像轻微离焦区域,序列图像如图 3 所示。

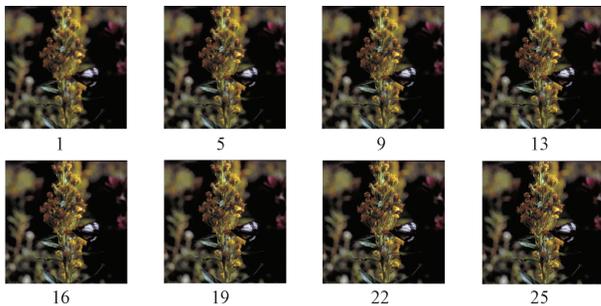


图 3 轻度离焦图像序列

用改进的 Brenner 函数与常用的灰度梯度评价函数 Laplacian、Roberts、Tanangrad、SMD 和 Brenner 对轻度离焦图像序列进行清晰度评价,并将评价结果进行归一化处理,结果如图 4 所示。

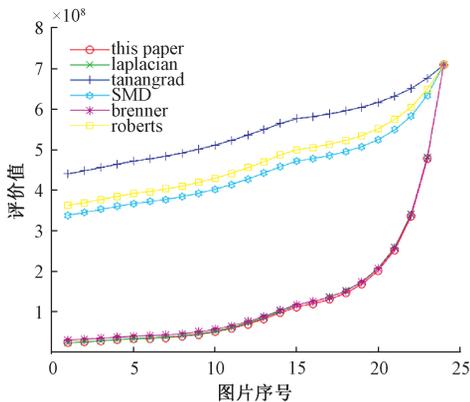


图 4 轻度离焦图像评价结果

通过实验比较分析,在轻度离焦时,Laplacian、Brenner 函数与改进的 Brenner 评价函数曲线几乎相同,在越靠近

峰值处,曲线斜率越大,表明它们都有较高的灵敏度且曲线有良好的单峰性,在峰值处陡峭程度更大;而 Roberts、Tanangrad 和 SMD 函数尽管在峰值处没有明显的斜率变化,但是也能清楚的判断出峰值所在,但是这会在某些根据曲线斜率改变搜索步长的峰值搜索算法中不适用。

2.2 深度离焦图像清晰度评价

依次用 $r = 3.0 \sim 49.0$ 间隔为 2.0 的模糊半径对 butter_flower 图像进行圆盘模糊,得到编号从 1:24 的 24 张图像序列,以此模拟聚焦搜索过程中图像深度离焦区域,序列图像如图 5 所示。

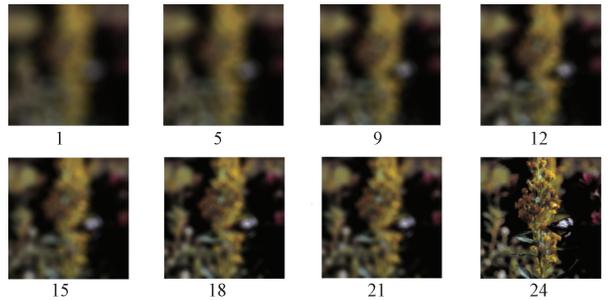


图 5 深度离焦图像序列

用改进的 Brenner 函数与 Laplacian、Roberts、Tanangrad、SMD 和 Brenner 评价函数对深度离焦图像序列进行清晰度评价,并将评价结果进行归一化处理,结果如图 6 所示。

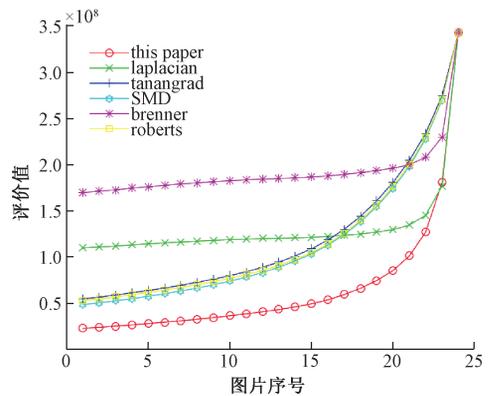


图 6 深度离焦图像序列评价结果

实验结果显示,在对深度离焦图像进行评价时,各函数仍然能够准确找出最清晰图像的位置,但是 Laplacian 与 Brenner 函数在离焦量大时,虽然在峰值附近曲线斜率明显增加,但是在远离峰值处曲线平坦,这意味着相邻两幅图像所得评价价值差异小,无法为峰值搜索算法提供搜索方向,表明它们对于重度离焦的图像清晰度不敏感;而 Roberts、SMD、Tanangrad 和改进的 Brenner 评价函数所绘制出的曲线在不同位置上有明显的斜率变化,表明它们对于重度离焦的图像清晰度显然拥有更高的敏感度,并且能够清楚

地判断出最清晰的图像位置。

综合比较轻度离焦与深度离焦的评价结果，Laplacian 与 Brenner 函数在轻度离焦时评价效果较好而对重度离焦的图像敏感度不够；Roberts、SMD、Tanangrad 函数对重度离焦的图像清晰度更加敏感；改进的 Brenner 清晰度评价函数相对于传统灰度类清晰度评价函数在峰值处有更好的陡峭度，对图轻度离焦和重度离焦都有不错的敏感度，从而可评价范围更大，即使在图像离焦量很大时也能对不同图像的清晰度进行准确评价。

2.3 函数抗噪能力分析

对深度离焦图像序列添加均值为 0，方差为 0.01 和 0.001 的高斯白噪声，以模拟聚焦时图像传输过程中所混入的噪声，图像序列如图 7 所示。

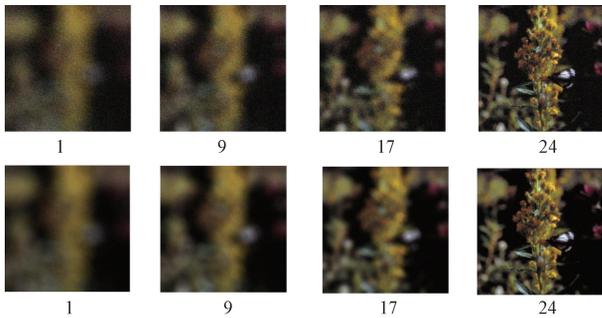


图 7 深度离焦图像序列添加 $\mu=0, \sigma=0.01$ (上) $\sigma=0.001$ (下)的高斯噪声

用上述清晰度评价函数分别对添加了均值为 0，方差为 0.01 和 0.001 的高斯白噪声的深度离焦图像序列进行评价，将所得评价价值进行归一化处理，得到图 8 和 9 所示的评价结果。

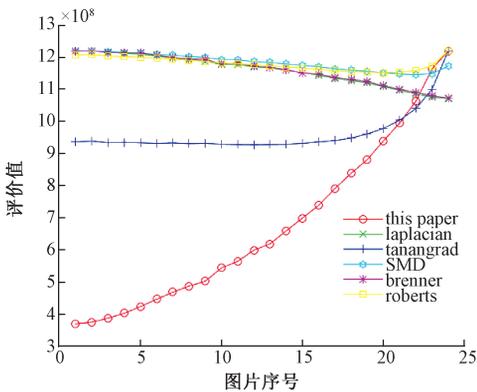


图 8 深度离焦添加 $\sigma=0.01$ 高斯噪声图像评价结果

通过对混入噪声的重度离焦图像进行评价可知，改进的 Brenner 清晰度评价函数相较于传统的灰度梯度评价函数来说，抗噪性能更好。传统的灰度梯度函数对重度噪声图像已经无法确定各相邻图像之间的清晰度了，这会使后续的峰值搜索无法找到准确的清晰图像完成对焦；而改进

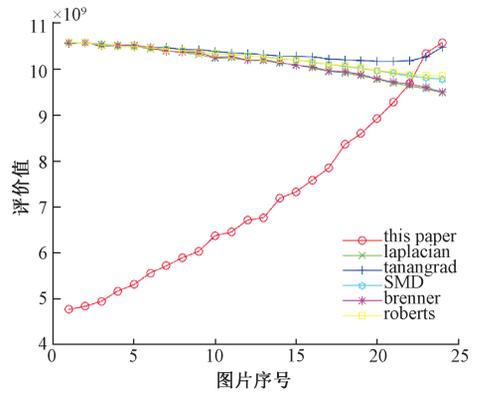


图 9 深度离焦添加 $\sigma=0.001$ 高斯噪声图像评价结果

的 Brenner 函数对噪声不敏感，仍然能准确找到最清晰图像位置并保持良好的陡峭度。

2.4 函数运行时间比较

用本次实验所使用的改进的 Brenner 评价函数与 Laplacian、Roberts、Tanangrad、SMD 和传统 Brenner 评价函数对 49 幅图像进行计算，比较各个评价函数计算所消耗的时间。

实验图像大小为 $2\ 592 \times 1\ 944$ pixel，实验软件为 MATLAB，实验用电脑处理器为 Intel i5-6300，CPU 2.30 GHz，内存 4 GB。评价结果如表 1 所示。

表 1 各评价函数耗时对比

评价函数	函数运行耗时/s
改进的 Brenner	6.630
Laplacian	15.033
Tanangrad	14.895
SMD	14.526
传统 Brenner	8.529
Roberts	14.699

根据实验可知，在图像尺寸较大、数量较多时，各评价函数在进行清晰度评价时耗时有明显差距，改进的 Brenner 评价函数是各评价函数中最快的，相对于原 Brenner 函数速度提升 22.27%，比其他灰度评价函数快 1 倍以上。

3 结 论

本文提出的改进的 Brenner 清晰度评价函数，通过在原本 Brenner 函数上增加了竖直方向的梯度计算，提高了 Brenner 函数评价的准确性，相较于传统的灰度梯度类清晰度评价函数的可调焦范围大，在图像深度离焦与轻度离焦时都有很高的灵敏度，并且在有高斯噪声的情况下保持评价曲线的单峰性和有效性，保证了评价结果的可靠与稳定；同时继承了传统 Brenner 函数计算量小的特点，在需要快速对焦的场合中尤为适用。下一步计划将本方法应用到

实际场合,测试不同工况和复杂噪声环境下函数的鲁棒性和实时性。

参考文献

- [1] 郑媛媛. 自动聚焦算法研究[D]. 济南:山东大学, 2012.
- [2] 陈芳, 张存继, 韩延祥, 等. 简单图像的快速聚焦[J]. 光学精密工程, 2014, 22(1):220-227.
- [3] 孙红利, 冯旗, 董峰. 图像清晰度评价算法研究[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(2):67-70.
- [4] 王家川. 基于图像处理的自动聚焦理论研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.
- [5] 余炎. 高灵敏度自动对焦系统的研究与实现[D]. 武汉:武汉理工大学, 2014.
- [6] 赵辉, 鲍歌堂, 陶卫. 图像测量中自动调焦函数的实验研究与分析[J]. 光学精密工程, 2004, 12(5):531-536.
- [7] 张丰收, 李斯文, 胡志刚, 等. 一种改进的 Sobel 梯度函数自动对焦评价算法[J]. 光学技术, 2017, 43(3):234-238.
- [8] 李洪宇, 杨帆, 谭文斌, 等. 基于 HVS 算子的自适应清晰度自动调焦评价函数[J]. 红外技术, 2017, 39(7):632-637.
- [9] VAZQUEZ-FERNANDEZ E, DACAL-NIETO A,

MARTIN F, et al. Entropy of Gabor filtering for image quality assessment[C]. International Conference on Image Analysis and Recognition. Springer-Verlag, 2010:52-61.

- [10] 陈国金, 朱妙芬, 施许立, 等. 基于最小各向同性小波滤波的图像清晰度识别[J]. 光子学报, 2008, 37(2):395-399.
- [11] 王健, 陈洪斌, 周国忠, 等. 改进的 Brenner 图像清晰度评价函数[J]. 光子学报, 2012, 41(7):855-858.
- [12] 李奇, 戴瑞春. 数字图像清晰度评价函数研究[J]. 光子学报, 2002, 31(6):736-738.
- [13] 王冠军. 基于图像处理的光电测量设备自动调焦方法研究[D]. 长春:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2016.
- [14] 肖文. 空域无参考的图像质量评价[D]. 南昌:江西财经大学, 2006.
- [15] 潘春华, 朱同林, 刘浩. 图像质量的 HVS 评价方法[J]. 计算机工程与应用, 2010(4):149-151.

作者简介

毕天华, 硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉, 图像处理。

E-mail: 463064464@qq.com