

基于小波变换的快速自动聚焦算法^{*}

郭丙华¹, 廖启亮², 余志¹

(1 中山大学智能交通研究中心, 广东 广州 510275;

2 华南理工大学计算机科学与工程学院, 广东 广州 510641)

摘 要: 针对图像采集系统存在噪声情况下, 提出了一种基于小波变换的快速聚焦算法。该算法采用 5 点数据拟合方法以及较大步长来降低聚焦搜索时间。算法中的聚焦测量函数在存在较大的噪声情况下仍然具有较好的性能, 与其它的聚焦测量函数如 Laplacian 能量聚焦测量函数、梯度 (Sobel) 能量聚焦测量函数和图像灰度方差测量函数等相比较, 仿真和实验的结果表明该算法在聚焦分辨力、抗噪声等方面具有较好的性能。

关键词: 小波变换; 自动聚焦; 图像噪声

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2007) 02-0012-04

自动聚焦是图像采集系统取得清晰数字图像的关键过程, 其被广泛应用于自动监控和跟踪系统、显微分析系统以及各种数码相机和摄像系统等。

目前, 自动聚焦的研究主要从两个方面来考虑, 一个是聚焦的数字图像与散焦的模糊图像相比具有锐化的边缘, 因而聚焦测量常常用图像灰度的梯度来衡量, 如灰度梯度算子^[1] (如 Roberts 算子、Sobel 算子等)。另一方面, 由于聚焦的图像比模糊图像具有较多的高频分量, 因此可以用高频能量作为聚焦测量的函数, 如 Subbarao et al 的傅里叶能量方法、梯度能量方法以及 Laplacian 能量方法等^[2-3]。

图像采集系统在采集图像的过程中不可避免会引入噪声, 由于噪声的影响, 可能会使得系统的自动聚焦曲线出现局部的最大, 这会使系统出现误聚焦, 从而导致无法得到清晰的图像。文 [4] 利用一种频率选择加权中值滤波器 (FSWM) 方法, 构造了一个聚焦测量函数, 该函数能够有效的抑制冲击噪声的影响。

小波变换是一种时频分析方法, 其能够有效增强图像的边缘特征, 这能够使其分辨出聚焦和轻微散焦情况, 从而提高了聚焦的精度^[5]。本文利用小波变换方法, 建立一个能够有效抑制噪声的聚焦测量函数。

在自动聚焦算法中, 最常用的搜索算法是爬山法 (MCS)^[6], 爬山法的一个最大的缺点是每一步

的搜索步长不能太长, 从而导致增加了系统的搜索时间, 而且当两幅图像的聚焦测量值由递增变为递减, 同时其聚焦测量值在聚焦曲线的同一侧时会出现爬不到山顶现象。为此一些研究人员作了一些改进^[7-8], 但仍然需要较长的搜索时间。在此我们采用变步长和 5 点数据曲线拟合的方法来降低系统聚焦搜索的时间^[9]。

1 聚焦测量

一个比较好的聚焦量测函数应具有单调性、只有一个极大值, 不存在局部极大值、对噪声不敏感以及能够较好的分辨出聚焦和轻微散焦状态, 以保证聚焦精度。假定有一幅数字图像, 为无噪声图像, $W(x, y)$ 为加性噪声, 则有

$$f_n(x, y) = f(x, y) + W(x, y) \tag{1}$$

根据小波变换理论^[10], 对 $f_n(x, y)$ 作小波分解, 由于噪声主要表现为高频信号, 因此噪声信号多包含在具有较高频率的细节中。假设 $f_n(x, y)$ 对作 j 级分解, 其细节分量为

$$\begin{cases} D_j^k f_n(x, y) = D_j^k f(x, y) + D_j^k W(x, y) \\ D_j^k f(x, y) = \langle f(x, y), \varphi^k(x, y) \rangle = \sum_x \sum_y f(x, y) \varphi^k(x, y) \\ D_j^k W(x, y) = \langle W(x, y), \varphi^k(x, y) \rangle = \sum_x \sum_y W(x, y) \varphi^k(x, y) \end{cases} \tag{2}$$

$k = 1, 2, 3, \dots, \varphi^k(x, y)$ 为规范正交基小波^[10]。其均方

* 收稿日期: 2006-07-03
基金项目: 广东省科技计划资助项目 (2005B10101002)
作者简介: 郭丙华 (1966 年生), 男, 博士后, 通讯联系人, 余志; Email: ghhl@21cn.com

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

值为

$$\begin{aligned} E[|D_j^k f_n(\mathbf{x}, y)|^2] &= E[|D_j^k f(\mathbf{x}, y)|^2 + \\ &|D_j^k W(\mathbf{x}, y)|^2 + 2|D_j^k f_n(\mathbf{x}, y)||D_j^k W(\mathbf{x}, y)|] = \\ &|D_j^k f(\mathbf{x}, y)|^2 + E[|D_j^k W(\mathbf{x}, y)|^2] + \\ &2|D_j^k f_n(\mathbf{x}, y)|E[|D_j^k W(\mathbf{x}, y)|] \end{aligned}$$

如果噪声的均值为 0 则有

$$\begin{aligned} E[|D_j^k f_n(\mathbf{x}, y)|^2] &= |D_j^k f(\mathbf{x}, y)|^2 + \\ &E[|D_j^k W(\mathbf{x}, y)|^2] \end{aligned} \tag{3}$$

从上式可以看出，如果以其高频细节的能量作为聚焦的量测函数，则包括两部分，即图像的高频细节能量和噪声能量，噪声使量测函数增大了。当噪声比较大时容易使得聚焦发生错误。

噪声经小波分解后，主要存在于图像高频细节中，而且随着分解层次的增加，其幅度迅速减小^[10]，因此噪声主要存在于第一层高频细节系数中。为了降低噪声对聚焦的影响，我们设计了一个聚焦测量函数

$$M = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^3 C_j^k E_k^j}{E_a} \tag{4}$$

其中 $C_j^k = \begin{cases} \frac{1}{\sigma} & j = 1 \\ \frac{1}{\sigma} (\frac{E_k^j}{E_a}) & j > 1 \end{cases}$ ， E_a 为图像的总能量

量， E_k^j 分别为第 j 层三个高频细节能量 ($k=1, 2, 3$)， E_a^j 为第 j 层高频细节总能量， N 为小波分解层数。 σ 为噪声方差，如果 σ 未知，则可以对第一层的高频系数采用估计方法求得^[11]。

2 快速聚焦算法

图像采集系统在连续调焦的过程中，其聚焦测量值呈抛物线分布，两边均具有单调性，在曲线的最大值位置为最佳聚焦位置，如图 1 所示。在聚焦搜索的过程中，某个位置的聚焦测量值可以通过该位置的图像聚焦量测函数求得，由于曲线两侧的单调性，当聚焦系统沿正确聚焦方向搜索时，其聚焦测量值将逐渐增大，正确聚焦时为最大，继续同方向搜索时，其值将逐渐减少，这对图像来说，表现为由模糊到清晰，再逐渐变为模糊的过程。

聚焦系统在聚焦搜索的过程，例如沿聚焦测量值逐渐增大的方向搜索，当出现聚焦测量值降低时，如果假定聚焦曲线没有局部的极大值，这时最佳聚焦点位置的情况有两种，即最佳聚焦点位于第 M_i 点和第 M_{i+1} 点之间，如图 1 的 a 所示、第 M_{i-1} 点和第 M_{i+1} 点之间，如图 1 的 b 所示。对于第 2 种情况，常用的 MCS 方法会导致找不到正确聚焦点。

由于上述的两种情况下其最佳聚焦点都位于第 M_{i-1} 点和第 M_{i+1} 点之间，为了快速找到最佳的聚焦点，我们采用了如下的方法：

- 1) 聚焦系统沿聚焦测量值逐渐增大的方向以某一恒定的步长搜索，当出现聚焦测量值减小时，记录当前和前两个步长的聚焦测量值及其位置。
- 2) 驱动聚焦系统反方向以 $\Delta s/2$ 和 $1.5\Delta s$ 的步长移动到两个位置，记录其聚焦测量值及其位置。
- 3) 对记录的 5 个聚焦测量值及其位置采用拟合方法求得最大值位置即为正确聚焦位置。

整个算法的流程如图 2 所示。

为了减少搜索时间，可以采用较大的步长 Δs ，由于 5 个聚焦测量值及其位置比较均匀的分布在正确聚焦点的两边（见图 1 的 a、b 所示），通过曲线拟合，可以快速求出正确聚焦点的位置。

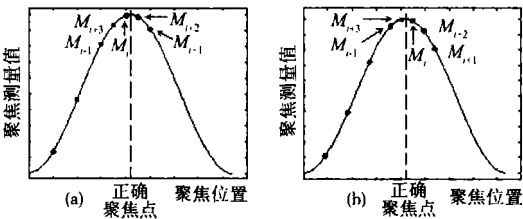


图 1 聚焦搜索曲线及正确聚焦位置
Fig. 1 Focus curve and correct focus position

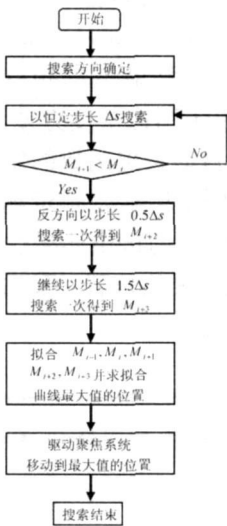


图 2 聚焦搜索流程
Fig. 2 Focus detection flow

3 仿真与实验

为了测试所提出的聚焦测量函数（式 4）和聚焦算法的性能，我们进行了仿真和实验验证，并且同其它常用的聚焦测量函数进行了比较。仿真采用

的图像为 Lena 图 3为 Lena逐渐人工模糊的图像,其中第一个为无噪声的原始图像, 其它为包含噪声 (STD=20) 的图像。



图 3 Lena图像, 噪声的标准偏差 STD=20
Fig 3 Lena image STD= 20

为了测试所提出的小波变换聚焦测量函数性能, 我们将其与其他的聚焦测量函数进行比较, 如 Laplacian能量聚焦测量函数、梯度 (Sobel) 能量聚焦测量函数和图像灰度方差测量函数等, 其表达式参见文献 [2]。比较结果如图 4所示 (纵坐标已归一化)。

图 5为实验的系统框图, 由于 Laplacian能量聚焦测量函数和梯度 (Sobel) 能量聚焦测量函数对噪声比较敏感, 效果不理想 (从图 4可以看出), 这里只给出了图像灰度方差测量函数和我们提出的基于小波自动聚焦函数的实验结果, 如图 6所示。图中纵坐标为聚焦测量函数值 (已归一化), 横坐标为马达的进给步数, 在实验开始时, 图像被调整到最佳聚焦位置, 随着步进马达驱动, 图像被逐步模糊化。

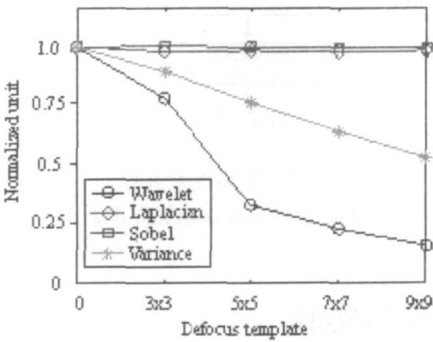


图 4 各种聚焦测量函数计算结果 (噪声 STD=15)
Fig 4 Results of different focus function (STD=15)

从图 4和图 6可以看到, 基于小波变换的聚焦测量要优于其它 3种, 图像灰度方差测量函数要优于其它 2种, Laplacian能量聚焦测量函数和梯度 (Sobel) 能量聚焦测量函数对噪声比较敏感。在聚焦分辨能力上, 基于小波变换的聚焦测量函数也要优于其它几种。

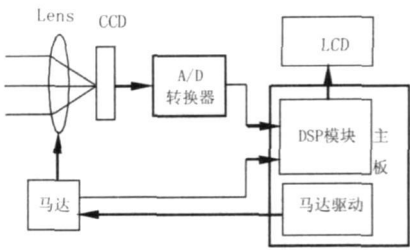


图 5 实验的系统框图
Fig 5 Experimental system figure

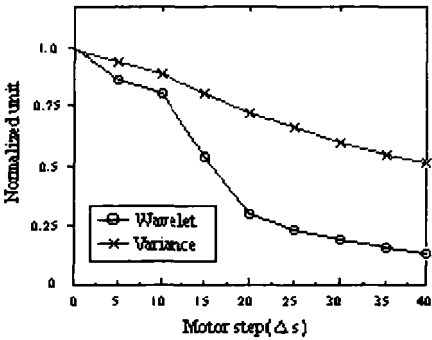


图 6 聚焦测量函数实验结果
Fig 6 Experimental results of focus function

表 1为对一幅图像聚焦时采用不同步长得到的实验聚焦位置与实际最佳聚焦位置误差, 实际最佳聚焦位置是通过手动调整得到的 (表中单位为马达步), 从表中数据可以看到, 两者比较接近, 表现出算法采用大步长时仍然具有较好的性能。

表 1 图像的聚焦误差表			
Tab. 1 Error of correct focus position			
步长 Δs	图像实验 聚焦位置	图像最佳 聚焦位置	误差值
3	44		1
5	42		-1
8	43		0
10	45	43	2
12	45		2
15	46		3

4 结 论

在图像的采集系统中, 针对存在噪声的情况下, 我们提出了一种基于小波变换的聚焦测量函数和快速聚焦搜索算法。为了测试聚焦测量函数的性能, 对其进行了仿真, 仿真和实验的结果显示该测量函数在存在较大的噪声情况下仍然具有较好的性能, 我们将其与其它的聚焦测量函数如 Laplacian 能量聚焦测量函数、梯度 (Sobel) 能量聚焦测量函数和图像灰度方差测量函数等进行了比较, 比较的结果表明其在聚焦分辨力和抗噪声方面具有较好的性能。在聚焦搜索算法中, 采用 5 点拟方法和较大搜索步长, 大大降低了聚焦搜索的时间, 实验的结果证明该算法具有较好的性能。

参考文献:

- [1] LEE JH, KIM K S. Implementation of passive automatic focusing algorithm for digital still camera[J]. IEEE Transaction on Consumer Electronics, 1995, 41(3): 449 - 453.
- [2] SUBBARAO M, CHOIT, NIKZAD A. Focusing techniques[J]. J. Opt. Eng, 1993, 32(11): 2824 - 2836.
- [3] SUBBARAO M, TYAN J K. Selecting the optimal focus measure for autofocus and depth - from - focus[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intel-

- ligence, 1998, 20(8): 864 - 870.
- [4] CHOIK S, KO S J. New Autofocusing technique using the frequency selective weighted median filter for video camera[J]. IEEE Transaction on Consumer Electronics, 1999, 45(3): 820 - 826.
- [5] WIDJAJA J. Wavelet transform for autofocus detection system[J]. Science Asia, 2000, 26(2): 111 - 114.
- [6] OOI K, ZUMIK, NOZAKIM, TAKEDA I. An advanced autofocus system for video camera using quasi condition reasoning[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1990, 36(3): 526 - 530.
- [7] CHOIK S, LEE JS, KO S J. New autofocus technique using the frequency selective weighted median filter for video cameras[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1999, 45(3): 820 - 827.
- [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): 552 - 555.
- [9] MARQUARDT D. An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters[J]. SIAM J. Appl. Math, 1963, 11(1): 431 - 441.
- [10] MALLAT S. A Wavelet Tour of signal processing[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [11] DONOHO D L, JOHNSTONE IM. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage[J]. Biometrika, 1994, 81(3): 425 - 455.

An Algorithm of Fast Auto focusing Based on Wavelet Transform

GUO Bing-hua¹, LIAO Qi-liang², YU Zhi¹

(1. IIS Research Center, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

2. School of Computer Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract An algorithm of fast auto-focusing measurement is presented for the image noise based on wavelet transform. The method of curve fitting using 5 points and a larger step are adopted to reduce the time of auto-focusing. The function of focusing measurement still operates very well with the heavier noise. The results of simulation and experiment illustrate the algorithm has good performance in focusing discrimination power and noise resistance compared with the other focusing measurement functions such as energy of gradient and energy of Laplacian and gray-level variance.

Key words wavelet transform; auto focusing; image noise