文章编号　2095-1531(2014)02-0240-05

SUSAN 清晰度评价函数在自动对焦中的应用

张艳超[1,2*],赵　建[1],韩希珍[1],刘博超[1]
(1 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;
2 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:为了满足自动对焦系统的实时性与抗噪性要求,提出了一种基于 SUSAN 算子的清晰度评价函数。该函数利用 SUSAN 边缘提取算子的算法简单、准确度高、抗噪性强的特点,对 SUSAN 算子边缘检测函数进行改进,将边缘点的 USAN 值的平方和作为清晰度评价值,并将其运用到自动对焦算法中。将该函数与几个经典的清晰度评价函数进行性能比较,实验结果表明:对于引入噪声前后的图像序列,基于 SUSAN 算子的清晰度评价函数均具有良好的单峰性、无偏性和较高的灵敏度;对于 256 × 256 的对焦窗口图片,该函数在 TMS320C6416 硬件平台上的运行时间仅为 16 ms。该函数能够满足清晰度评价函数的单峰性、无偏性、高灵敏度等基本特性,同时具有良好的实时性与抗噪性。

关　键　词:SUSAN 算子;自动对焦;清晰度评价函数;实时性;抗噪性
中图分类号:TP391.4　　**文献标识码**:A　　doi:10.3788/CO.20140702.0240

Application of SUSAN definition evaluation function in auto-focusing

ZHANG Yan-chao[1,2*], ZHAO Jian[1], HAN Xi-zhen[1], LIU Bo-chao[1]
(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: zhangyanchaomn@126.com*

Abstract: In order to meet the real-time and anti-noise requirements of auto-focusing system, a definition evaluation function based on SUSAN is proposed. This function is derived from the SUSAN edge detection algorithm, which makes the sum of squared edge point's USAN values as the definition evaluation value, and applies to the auto-focusing system, making use of the high accuracy and strong anti-noise characteristics of SUSAN algorithm. The definition evaluation function performance is compared between SUSAN function and the other classical functions. Experiment results show that the SUSAN definition evaluation function has the characteristics of clear single apex, good unbiased, high sensitivity for the image sequences before and after the introduction of noise. In addition, the running time of the function on the TMS320C6416 hardware platform is 15 ms. It can satisfy the definition evaluation function requirements of single apex, unbiased and sensitivity characteristics, as well as strong real time and anti-noise abilities.

Key words: SUSAN algorithm; auto-focusing; definition evaluation function; real-time; anti-noise ability

收稿日期:2013-11-10;**修订日期**:2014-02-08
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60977001)

1　引　言

随着电子技术、图像处理技术的不断发展,机器人视觉及数字视频系统在日常生活中得到了广泛应用。清晰成像是对视频系统的基本要求,而自动对焦技术是系统获取清晰图像的重要前提和保障。因此自动对焦技术已成为机器人视觉及数字视频系统的关键技术。清晰度评价函数性能的优劣会对视频系统的对焦效果产生直接影响[1],所以应该根据系统的实际性能要求,对清晰度评价函数进行合理的选择[2-3]。性能优良的评价函数应该具有良好的无偏性、单峰性和较高的灵敏度[4]。此外,对于存在噪声干扰的实时视频系统,还应该具有较好的实时性和一定的抗噪性。

目前常用的图像清晰度评价函数主要分为频域和空域两类。频域评价函数虽然具有一定的抗噪性,但是需要进行空域到频域的转换,计算复杂,运算量大,往往很难满足系统的实时性要求[5];而常用的 Tenengrad、空间梯度、方差函数等空域评价函数虽然计算量小,但是抗噪性较差[5-6]。因而有必要研究一种既能满足系统实时性要求,又具备一定抗噪性的整体性能优良的清晰度评价函数。

由英国学者 Smith[8] 等人提出的最小核值相似区(Smallest Univalue Segment Assimilating Nucleus,SUSAN)算子[7]作为一种基于邻域灰度统计的边缘检测算子,在准确性、实时性与抗噪性方面具有突出表现。SUSAN 是一种基于灰度特征点的获取方法,由于采用的模板为圆形模板,对图像边缘方向性要求不高[9-10],同时具有运算简单,抗噪性强等特点,将其运用到自动对焦算法中,可以在很大程度上提高图像边缘识别的准确性与滤除噪声干扰的能力;其计算速度快的特点,使其更适用于实时图像处理系统。本文提出的基于 SUSAN 算子的清晰度评价函数,利用了 SUSAN 算子的上述特点,通过对 SUSAN 边缘检测算法进行改进以作为图像清晰度评价函数应用到自动对焦算法中。实验表明,该评价函数对于有噪声干扰的实时视频系统具有良好的评价特性。

2　SUSAN 边缘检测算子原理

SUSAN 算子使用的模板与常规卷积算法的正方形模板不同,它是一种近似圆形的模板,由 37 个像素组成,模板示意图如图 1 所示。用圆形模板在图像上移动,模板内每个图像像素点的灰度值 $I(r)$ 都与模板中心像素的灰度值 $I(r_0)$ 作比较,若模板内某个像素的灰度与模板中心像素(核)灰度差小于设定阈值 t(一般在 6 ~ 16 间选择[11]),则认为该点与核具有相同或相近的灰度,可由式(1)描述:

$$c(r,r_0) = \begin{cases} 1, & |I(r) - I(r_0)| \leqslant t \\ 0, & |I(r) - I(r_0)\} > t \end{cases} . \quad (1)$$

		1	2	3		
	4	5	6	7	8	
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
	30	31	32	33	34	
		35	36	37		

图 1　SUSAN 算子圆形模板

Fig. 1　Circular template of SUSAN algorithm

所有满足这一条件的像素组成的区域称为核值相似区(Univalue Segment Assimilating Nucleus,USAN),计算式如式(2)所示:

$$n(r_0) = \sum_r c(r,r_0) . \quad (2)$$

图 2 为模板圆在不同位置时 USAN 值的变化示意图,可以看出,当模板在角点 A 处时 USAN 面积最小,位于边缘 B 处时次之,其他位置时 USAN 面积较大。由此看出,当圆模板越接近边缘和角点时 USAN 的值越小,反之越大。当 USAN 小于设定阈值 g 时,即认定此点为边缘点,这就是 SUSAN 边缘检测原理。边缘判定公式如式(3)所示:

$$R(r_0) = \begin{cases} g - n(r_0), & n(r_0) \leqslant g \\ 0, & n(r_0) > g \end{cases} . \quad (3)$$

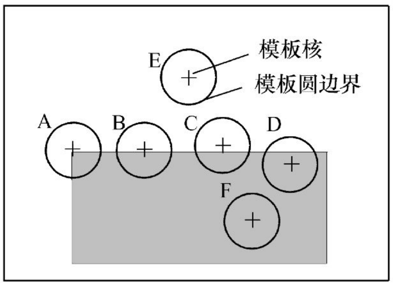

图 2　模板圆在不同位置 USAN 值的变化

Fig. 2　Variation of USAN values with different locations of template circle

3　基于 SUSAN 算子的图像清晰度评价函数

SUSAN 算子检测原理表明：在数字成像自动对焦过程中，图像越清晰，包含的边缘信息越丰富，含有大于零的 $R(r_0)$ 分量越多；反之，图像越模糊，图像所含的大于零的 $R(r_0)$ 分量越少。

因此，这里对 SUSAN 边缘检测算子进行功能延伸，将对焦窗口内各点 $R(r_0)$ 值的平方和作为图像的清晰度评价函数 F（以下简称为 SUSAN 函数），则在图像对焦窗口的 Rect 区域内，计算式为：

$$F = \sum_{r_0 \in \mathrm{Rect}} R(r_0)^2. \tag{4}$$

为了减小计算量、降低计算复杂度，实现视频系统的快速对焦，可将 F 简化为式(5)：

$$F = \sum_{r_0 \in \mathrm{Rect}} | R(r_0) | . \tag{5}$$

由于 SUSAN 算子本质上是一个积分过程，选取 SUSAN 算子作为清晰度评价函数，具备较强的抗局部噪声能力[7]。此外，由于 SUSAN 算子本身计算简单，运算量小，又能够在很大程度上满足系统自动对焦的实时性。

4　评价函数验证及分析

4.1　算法基本特性分析

评价一个图像清晰度函数的好坏，通常须判断该函数是否满足以下几个特性：单峰性、无偏性、尖锐性。本文选用了图 3 对应的 27 幅图像进行清晰度计算。分别将经典的 Tenengrad 函数、Brenner 函数。平方梯度函数[12]的清晰度评价曲线归一化处理后与 SUSAN 评价函数（阈值 $t = 15$，$g = 30$）进行比较分析，如图 4 所示。

(a) 非对焦状态　(b) 对焦状态

(a) Non-focused state　(b) Focused state

图 3　对焦窗口图

Fig. 3　Images of focus window

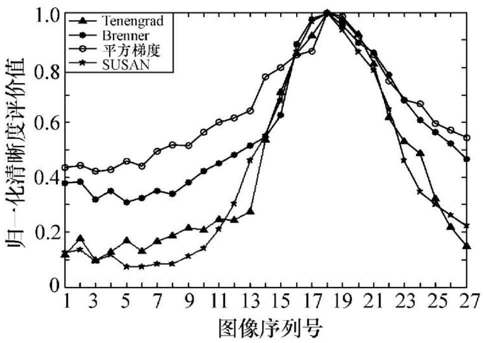

图 4　无外加噪声情况下评价函数曲线对比图

Fig. 4　Comparison of evaluation functions without noise

从图 4 中可以看出，在无噪声引入的情况下，本文的 SUSAN 函数与经典的 Tenengrad 函数、Brenner 函数、平方梯度函数具有同样的单峰性及尖锐性，而且都在第 18 幅对焦位置处具有最大值，即具有良好的无偏性。因此，SUSAN 函数充分符合图像清晰度评价函数单峰性、尖锐性及无偏性方面的特性要求。

4.2　抗噪性能比较与分析

为了验证 SUSAN 函数的抗噪性能，对每幅图像都加入了椒盐噪声，用以分析上述几种清晰度评价函数对噪声的敏感性。为了比较方便，也对所有曲线进行归一化处理。图 5 为加入椒盐噪声后的对焦窗口效果图，图 6 为加入椒盐噪声后的清晰度评价曲线图。

从图 4 及图 6 的对比曲线中可以看出，对同

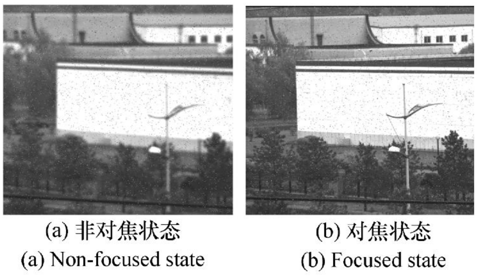

图 5　加入椒盐噪声后的对焦窗口图

Fig. 5　Images of focus window with salt and pepper noise

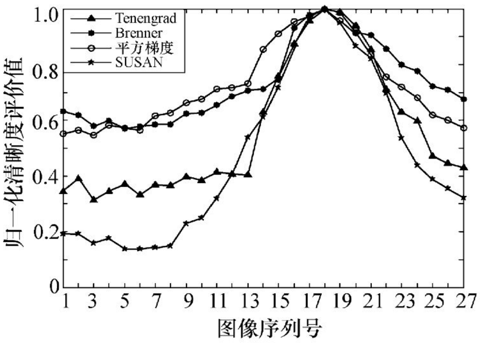

图 6　加入椒盐噪声的清晰度评价函数曲线性能比较图

Fig. 6　Comparison of evaluation functions with salt and pepper noise

样的一组图像引入噪声后，Tenengrad 函数、Brenner函数、平方梯度函数曲线发生了明显变化，在最大值两侧均出现了多个明显的局部极值点，而且在最大值两侧曲线与引入噪声前相比明显变缓，尖锐性减弱，曲线整体出现“上浮”。而 SUSAN 函数虽然也受到了噪声的影响，但表现出了比传统算法更强的抗噪性。

4.3　实时性分析

由 SUSAN 清晰度评价函数的表达式可知，其运算过程多为加减运算而没有运算量较大的乘法、平方及开方等复杂运算。因此，SUSAN 清晰度评价函数虽然较 Tenengrad 函数、Brenner 函数、平方梯度函数等经典的灰度梯度函数运算量有所增加，但相较于频域变换在实时性方面仍有很大的优越性。

将该算法移植到以 TMS320C6416 为硬件平台的便携式视频系统中，以 256 × 256 大小的自动对焦窗口图片参与清晰度运算，经过 – o3 优化后，运行时间为 16 ms，该算法完全可以满足帧频小于 62 frame/s 的视频系统的实时性要求，具有较好的实时性。

5　结　论

与现有的经典对焦评价方法相比，本文提出的基于 SUSAN 算子的清晰度评价函数不仅具有同等良好的单峰性，无偏性及尖锐性，还具有其他经典清晰度评价函数所无法比拟的良好的抗噪性能。同时，由于 SUSAN 算子只需加减运算，无需乘法、平方及开方等复杂运算，因此该函数还具有算法简单、运算速度快等特点。在 TMS320C6416 硬件平台上，以 256 × 256 大小的自动对焦窗口图片参与清晰度运算，运算时间仅为 16 ms。因此，对于噪声影响较大又要满足实时性要求的自动对焦系统，基于 SUSAN 算子的清晰度评价函数具有一定的实用性。

参考文献：

[1]　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.
XU G L，LIU X X，TIAN Y P，*et al.*. Image clarity-evaluation-function method[J]. *Infrared and Laser Eng.*，2009，38(1)：180-184. (in Chinese)

[2]　张俊杰，操晶晶，贡力，等. 微型零件图像测量清晰度算法的选择与综合评价[J]. 光学 精密工程，2008，16(3)：543-550.
ZHANG J J，CAO J J，GONG L，*et al.*. Selection and synthesis evaluation of image measurement definition algorithm for miniature parts[J]. *Opt. Precision Eng.*，2008，16(3)：543-550. (in Chinese)

[3]　翟永平，周东翔，刘云辉，等. 聚焦函数性能评价指标设计及最优函数选取[J]. 光学学报，2011，31(4)：1-11.
ZHAI Y P，ZHOU D X，LIU Y H，*et al.*. Design of evaluation index for auto-focusing function and optimal function selection[J]. *Acta Optica Sinica*，2011，31(4)：1-11. (in Chinese)

[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,2006,33(1):141-144.
YUAN K,XU W H. Assistant camera focusing system based on image definition evaluation[J]. *Opto-Electronic Eng.*, 2006,33(1):141-144.(in Chinese)

[5] 邱胜根,周杰,刘旭,等.阵列像素器件投影显示系统中自动对焦评价函数研究[J].光学学报,2004,24(4):460-464.
QIU SH G,ZHOU J,LIU X,*et al.*. Research of sharpness evaluation function in array pixel device projection display's auto focusing system[J]. *Acta Optica Sinica*,2004,24(4):460-464.(in Chinese)

[6] 黄向东,谭久彬.阵列式共焦显微系统超分辨特性的研究[J].光电子·激光,2006,17(1):28-31.
HUANG X D,TAN J B. Research on the superresolution character of array confocal systems[J]. *J. Optoelectronics · Laser*,2006,17(1):28-31.(in Chinese)

[7] 王永明,王贵锦.图像局部不变性特征与描述[M].北京:国防工业出版社,2008.
WANG Y M,WANG G J. *Image Local Invariant Features and Descriptors*[M]. Beijing:National Defense Industrial Press, 2008.(in Chinese)

[8] SMITH S M,BRADY M. SUSAN-a new approach to low level image processing[J]. *International J. Computer Vision*, 1997,23(1):126.

[9] 梁敏华,吴志勇,陈涛.采用最大灰度梯度法实现经纬仪自动调焦控制[J].光学 精密工程,2009,17(12):3016-3021.
LIANG M H,WU ZH Y,CHEN T. Auto-focusing adjustment of theodolites by largest the gradient method[J]. *Opt. Precision Eng.*,2009,17(12):3016-3021.(in Chinese)

[10] 段瑞玲,段惠波,李庆祥,等.基于图像处理的微装配自动调焦系统[J].光学 精密工程,2006,14(3):468-472.
DUAN R L,DUAN H B,LI Q X,*et al.*. Micro-assembly auto-focusing system based on image processing[J]. *Opt. Precision Eng.*,2006,14(3):468-472.(in Chinese)

[11] 王育民,李青,苗官霞,等.基于SUSAN算子的红外目标检测[J].弹箭与制导学报,2007,27(4):323-325.
WANG Y M,LI Q,MIAO G X,*et al.*. Detection of infrared object based on SUSAN algorithm[J]. *J. Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*,2007,27(4):323-325.(in Chinese)

[12] 冯精武,喻擎苍,芦宁,等.调焦系统中数字图像清晰度评价函数的研究[J].机电工程,2011,28(3):354-368.
FENG J W,YU Q C,LU N,*et al.*. Detection of infrared object based on SUSAN algorithm[J]. *J. Mechanical Electrical Eng.*,2011,28(3):354-368.(in Chinese)

作者简介:

张艳超(1985—),女,吉林长春人,博士研究生,助理研究员,2007年、2009年分别于天津大学获得学士、硕士学位,主要从事数字图像处理及调焦控制方面的研究。E-mail:zhangyanchaomn@126.com

韩希珍(1984—),女,山东德州人,硕士,研究实习员,2007年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2011年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事数字图像处理方面的研究。E-mail:xizhen_han@163.com

赵 建(1967-),女,吉林长春人,硕士,博士生导师,研究员,1991年于吉林工业大学获学士学位,2002年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事数字图像处理,目标识别与跟踪,视频编解码等方面的研究。E-mail:zhaojian6789@126.com

刘博超(1985—),男,吉林长春人,硕士,研究实习员,2008年、2011年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,主要从事数字图像处理方面的研究。E-mail:liubochao@ciomp.ac.cn