

基于模糊逻辑的植物叶片边缘检测方法^{*}

林开颜¹ 司慧萍¹ 周强² 吴军辉¹ 陈杰¹

(1. 同济大学现代农业科学与工程研究院, 上海 200092; 2. 上海都市绿色工程有限公司, 上海 200245)

摘要: 针对温室环境植物叶片边缘检测中, 植物图像通常含有噪声、背景复杂且图像数据存在模糊性和不完整性问题, 提出了基于模糊逻辑的植物叶片边缘检测方法。首先, 根据邻域像素的统计特性及绿色植物和土壤背景的颜色差异性, 利用线性函数定义噪声和边缘的隶属度函数; 其次, 采用 Sugeno 模糊模型进行模糊推理, 以减少模糊规则数量; 最后, 利用模糊推理结果先进行模糊滤波后再进行模糊边缘检测。实验证明, 提出的方法克服了常规算法未考虑叶片像素和背景像素的颜色差异而导致产生大量伪边缘的问题, 在噪声环境中能有效提取自然背景下植物叶片边缘信息, 可有效用于温室环境的植物叶片图像边缘检测。

关键词: 植物叶片 边缘检测 模糊逻辑 滤波

中图分类号: TP391.41; S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)06-0227-05

Plant Leaf Edge Detection Based on Fuzzy Logic

Lin Kaiyan¹ Si Huiping¹ Zhou Qiang² Wu Junhui¹ Chen Jie¹

(1. Modern Agricultural Science and Engineering Institute, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. Shanghai Urban Green Engineering Co., Ltd., Shanghai 200245, China)

Abstract: It is difficult to detect plant leaf edge in green house environment because of noise and incompleteness. For this problem, an edge detection based on fuzzy logic was proposed. Firstly, according to the statistics characteristic of neighbor pixels and color difference between plant and soil, membership function of noise and edge was defined by using linear function. Secondly, fuzzy rules were deduced by using Sugeno fuzzy model, so as to decrease the rule amounts. Then, with the results of fuzzy reasoning, fuzzy filter and fuzzy edge detection were performed. The experiment results indicated that the proposed method could overcome the problem of large amounts of false edges which caused by color difference between leaves and backgrounds in conventional algorithms. The proposed algorithm could detect edges in noisy environment effectively and could be used for the plant leaf edge detection in greenhouse monitoring.

Key words: Plant leaf Edge detection Fuzzy logic Filtering

引言

温室生产中, 植物处于胁迫状态时, 叶片会缩卷、枯萎、下垂、发黄, 叶片这种结构变化会改变光的反射, 由此引起的颜色或纹理方面的细微变化可用于监测植物的生理变化^[1]。利用计算机视觉系统对植物生长进行非接触测量具有快速无损、及时准

确、全天候等特点, 并且可获取作物的生长参数、整体状态信息并辨识其特殊需求, 为合理灌溉和环境控制提供可靠依据。植物叶片信息为计算机视觉的监控提供了重要数据, 提取植物叶片边缘对于植物叶片图像分割、生长参数测量、形态分析等具有重要意义。

边缘检测是图像分析的经典难题, 常用的边缘检测方法有基于梯度的方法(如 Sobel 算子)、多尺

收稿日期: 2012-11-18 修回日期: 2012-12-20

* 上海市科委社会发展领域科技攻关资助项目(11dz1210802)

作者简介: 林开颜, 讲师, 博士, 主要从事控制理论与控制工程和农业计算机视觉研究, E-mail: ky.lin@163.com

通讯作者: 陈杰, 副教授, 博士, 主要从事作物生理研究, E-mail: chenjie1968@163.com

度方法(如 Canny 算子)、小波变换、数学形态学等。在一些基于数学模型的边缘检测方法中,算法只能检测出特定种类的边缘,如优化的阶跃边缘算子对于斜坡边缘不一定是有效的。此外,一些基于梯度的边缘检测方法对噪声比较敏感,而且在植物叶片检测中,不能对植物叶片和土壤背景进行区分导致伪边缘过多。在图像中一个像素点属于边缘点还是平滑的区域点,具有模糊性,且潜在边缘的结构可以用人的先验知识事先确定。由于模糊逻辑能很好地处理模糊性和模拟人的知识表达,在图像边缘检测中获得广泛应用,目前已有不少方法^[2-8]。

温室环境光照不均、自然光照变化大、成像条件不理想,实际场景的图像数据经常含有噪声、背景复杂、且存在不完善或具有模糊性。为有效检测叶片边缘,本文提出一种基于模糊逻辑的边缘检测方法。

1 基于模糊逻辑的边缘检测框架

现实世界中,边缘通常表现为:平缓过渡、存在于亮度非均匀性区域之间、存在于具有相似亮度区域之间、噪声,或以上几种情况的任意组合^[9]。一个性能良好的边缘检测器,能够同时去除噪声和检测边缘,但过渡的模糊(去噪)会删除边缘,而过渡锐化(边缘检测)则会生成伪边缘。模糊推理技术可以更好地处理这些问题,根据边缘潜在结构定义模糊规则是一种好的方法,但是较大的邻域模板会导致模糊规则库过于庞大而影响运算速度,本文采用 Sugeno 模糊模型,利用规则后件对前件在模糊区域中进行恰当描述可以克服这个问题。利用此方法,根据邻域像素的统计特性及绿色植物和土壤背景的颜色差异性,同时定义噪声和边缘隶属度函数,根据模糊推理结果,对植物叶片图像去除噪声后再进行边缘检测,可有效检测图像边缘。算法流程图如图1所示,对于彩色图像的每个分量,图像处理方法一样,处理完后再通过一定的方式合成。

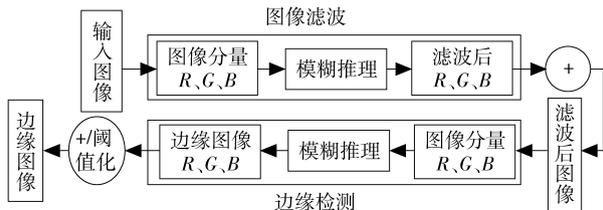


图1 图像处理算法流程图

Fig.1 Flow chart of image processing

2 图像属性域和模糊域之间的变换

对彩色图像的 R, G, B 3 个分量以同样的方法分别进行处理,对于滤波或边缘检测,必须把图像从

属性域变换到模糊域,即模糊化,以获得模糊图像 Ω_f , 然后进行模糊推理。本文通过对邻域像素进行分析,获取滤波和边缘检测的隶属度函数。在图像处理中,通常以像素点 (i, j) 为中心的 $W \times W$ ($W = 3, 5, 7, \dots$) 矩形窗口作为其邻域区域 R , 设集合 $R = \{(m, n) | m = i + s, n = j + t; s, t = -(W - 1)/2, \dots, (W - 1)/2; s, t \neq 0\}$, 令 $N = W^2 - 1$, $g(i, j)$ 为像素点 (i, j) 的属性值, 则均值和方差定义为

$$\bar{g}(i, j) = \frac{1}{N} \sum_{(m, n) \in R} g(m, n) \quad (1)$$

$$\sigma(i, j) = \left[\frac{1}{N} \sum_{(m, n) \in R} (g(m, n) - \bar{g}(i, j))^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

利用邻域像素的均值和方差,可以定义一个像素属于区域像素、噪声或者边界点的程度。隶属度函数的类型有多种,为提高运算速度,本文采用线性函数定义隶属度。

2.1 区域点与噪声点

$$u(i, j) = F(g(i, j)) = \min \left(1, \frac{|g(i, j) - \bar{g}(i, j)|}{\sigma(i, j)} \right) \quad (3)$$

从式(3)可看出,如果 $g(i, j)$ 等于其邻域区域的平均属性值 $\bar{g}(i, j)$, 则有 $u(i, j) = 0$, 即像素 (i, j) 拥有与其邻域完全相同的属性,则可认为其完全属于该邻域,该点是一个好的区域点。反之,当 $g(i, j)$ 与 $\bar{g}(i, j)$ 有很大差异时, $u(i, j) \rightarrow 1$, 则认为该点属于该邻域的可能性很小,极有可能是一个噪声点。因此, $u(i, j)$ 反映出像素点是区域点或噪声点的可能性,其值越大,是噪声点的可能性越大。所有的隶属度 $u(i, j)$ 构成了模糊图像 Ω_f 。将获得的模糊图像 Ω_f 输入模糊推理系统后可以获得处理后的模糊图像 $\Omega_f^{(p)}$, 利用反变换函数 $F^{-1}(x)$ 将其变换到属性域可获得滤波后的图像。设 $u^{(p)}(i, j)$ 为模糊推理系统的输出, $g^{(p)}(i, j)$ 为模糊滤波后的像素点属性值,则模糊域到图像属性域的变换定义为

$$g^{(p)}(i, j) = F^{-1}(u^{(p)}(i, j)) = \begin{cases} \bar{g}(i, j) + u^{(p)}(i, j)\sigma(i, j)/k_1 & (g(i, j) \geq \bar{g}(i, j)) \\ \bar{g}(i, j) - u^{(p)}(i, j)\sigma(i, j)/k_1 & (g(i, j) < \bar{g}(i, j)) \end{cases} \quad (k_1 = 2, 3, 4, 5) \quad (4)$$

2.2 区域点与边缘点

$$u_1(i, j) = F(g(i, j)) = \min \left(1, \frac{\sigma(i, j)}{k_2} \right) \quad (5)$$

k_2 是常数,取 30 ~ 50 可适应大部分图像。从式(5)可以看出,如果像素点的邻域方差比较小,那么该像素点属于边缘点的可能性不大;反之,如果方差比较大,则该点属于边界点的可能性比较大,故

式(5)可作为一个像素点属于边缘点的隶属度函数。植物叶片背景比较复杂,为了有效检测植物叶片边缘,边缘隶属度函数要求能有效区分植物叶片和土壤背景。针对目标是绿色植物、背景是土壤的特点,本文采用超绿指标^[10](Excess green, ExG)来定义区分绿色植物和土壤背景的隶属度。ExG 定义为

$$R_{\text{ExG}} = 2G - R - B \quad (6)$$

ExG 指标突出了所感兴趣的绿色植物,其结果接近二值化的灰度图像,即绿色植物对应比较亮区域,而土壤等非绿色区域则接近黑色。据此定义像素点的绿色植被隶属度函数为

$$u_2(i, j) = \frac{R_{\text{ExG}}(i, j)}{\max(R_{\text{ExG}}(i, j))} \quad (7)$$

由式(7)可见,其值越大,像素点属于叶片的可能性越大。结合式(5),把叶片边缘点隶属度定义为

$$u(i, j) = \min(u_1(i, j), u_2(i, j)) \quad (8)$$

由式(8)可见,一个叶片边缘点定义为既属于绿色植物且邻域方差比较大的像素点。该隶属度函数考虑了绿色植物和土壤背景的灰度差异,因此可有效去除背景。

由于推理后的隶属度反映一个像素属于边界点的程度,取值范围为 $[0, 1]$,故将其数值乘以 255 就可得到边缘图像,其清晰化表示为

$$g^{(p)}(i, j) = F^{-1}(u^{(p)}(i, j)) = 255u^{(p)}(i, j) \quad (9)$$

3 模糊推理

式(3)可以判断出一个点属于区域点或噪声点的程度,由模糊推理根据 $u(i, j)$ 的不同情况给出一个合适的输出 $u^{(p)}(i, j)$,再利用式(4)就可以获得滤波后的图像;同理,任意像素点根据式(8)获取隶属度后,经过模糊推理后的输出代入式(9)可获得边缘图像。

典型的模糊规则为

$$\text{IF(条件)THEN(行为 } q \text{ 或 } F_q)$$

假设集合 $F = \{F_q | q = 1, 2, \dots, n\}$ 的每个元素 F_q 是一个基本的滤波或边缘检测操作,如果集合 F 足够大,可适应所有图像处理的需要,则只需设置合适的条件使得模糊规则在该条件下有合适的输出,即可完成图像处理任务。但在实际应用中,几乎不可能找到这样一个模糊集合 F ,且确定与每个滤波器相对应的精确条件也是很困难的,而模糊集合理论是处理这类问题的一个有效方法。

在图像处理中,从实际图像数据中难以获得输入一输出对。在图像滤波或边缘检测的时候,可以定义出一些条件用以描述一个噪声或边缘像素,这

些条件构成模糊规则的前件,而规则后件的期望输出,不但取决于像素的属性值本身,而且取决于其邻域属性值的模式,这意味着对于邻域属性的每个模式需要一个规则跟它对应,这会导致规则库过于庞大。采用 Sugeno 模糊模型^[11]利用后件对前件在模糊区中进行恰当描述可以克服这个问题,这是因为本文需要的是确定 $u(i, j)$ 和 $u_k^{(p)}(i, j)$ (第 q 条规则输出, $q = 1, 2, \dots$) 之间的合适关系,而 Sugeno 模糊模型的后件是一个精确函数,通常是前件的多项式,只要给出多项式的合适参数即可。Sugeno 模糊模型中典型的模糊规则形式为

$$\text{IF}(x \text{ is } A \text{ and } y \text{ is } B) \text{ THEN } z = f(x, y)$$

其中 A 和 B 是前件中的模糊集合,而 $z = f(x, y)$ 是后件中的精确函数,通常是输入变量 x 和 y 的多项式。但是,只要它能在规则前件指定的模糊区中恰当描述模型的输出,则它可以是任意函数,本文采用函数形式为

$$y = x^n \quad (10)$$

图 2 所示为一个 2 条规则、2 个规则前件变量的 Sugeno 模糊模型的推理过程,每条规则的权重 W 为规则前件(A, B)隶属度的乘积或最小值,即 $W_1 = \mu_1 u_2$ 或 $W_1 = \min(u_1, u_2)$, $W_2 = u_1 u_2$ 或 $W_2 = \min(u_1, u_2)$ 。由于每条规则都有一个精确输出 Z_1, Z_2 ,通过加权平均可以得出整体输出,即 $Z = \frac{W_1 Z_1 + W_2 Z_2}{W_1 + W_2}$, Z 是规则后件,从而避免了耗时的去模糊化过程。

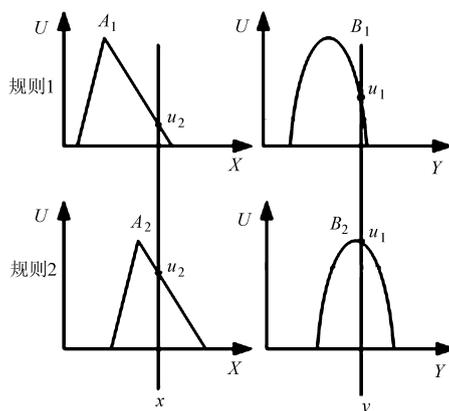


图 2 Sugeno 模糊模型

Fig. 2 Sugeno fuzzy model

4 实验

图像滤波时,当 $u(i, j) \rightarrow 0$ 时,像素 (i, j) 被认为是一个区域点;反之,当 $u(i, j) \rightarrow 1$ 时,则认为是一个噪声点;边缘检测时,当 $u(i, j) \rightarrow 1$ 时,像素 (i, j) 被认为是一个边缘点;反之,当 $u(i, j) \rightarrow 0$ 时,则认为是一个区域点。滤波时,本文把模糊区域 $[0, 1]$ 分为噪声点、中间值、区域点 3 个模糊集合;边缘检

测时,分为区域点、中间值、边缘点 3 个模糊集合,隶属度函数采用线性函数(图 3)。

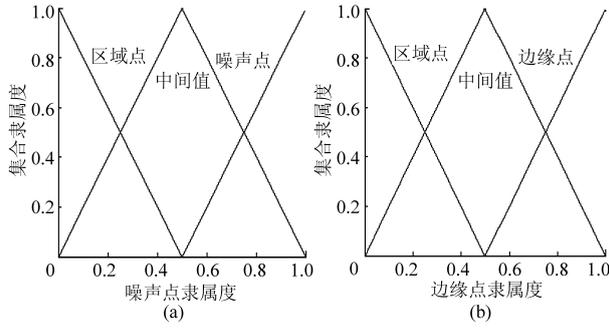


图 3 模糊集合隶属函数

Fig.3 Membership functions of fuzzy sets

(a) 滤波 (b) 边缘检测

规则后件用 Sugeno 模糊模型,即用一个精确函数描述 $u(i,j)$ 和 $u_k^{(p)}(i,j)$ 之间关系。采用式(10)进行实验分析,式中 x 为 $u(i,j)$, y 为 $u_k^{(p)}(i,j)$,参数 n 在不同的规则中取不同的值。考察式(4),把式(4)右边后半部分称为偏差部分,当 x 是噪声时,希望像素点的属性值由其邻域均值替代,故可令偏差部取较小数值;反之, x 属于区域点时,为了使区域分明,偏差部分取较大数值。同理,根据式(9),当 x 是边缘像素时,为了锐化边缘,模糊推理输出应取较大数值;反之,当 x 是区域点时,模糊推理输出应去较小数值,以模糊化区域点。据此原则,确定 n 取值后,模糊规则如表 1、2 所示。

表 1 模糊滤波的模糊规则

Tab.1 Fuzzy rules for fuzzy filtering

规则前件	规则后件
x 是噪声点	$y = x^1$
x 是中间值	$y = x^{0.5}$
x 是区域点	$y = x^{0.3}$

表 2 边缘检测的模糊规则

Tab.2 Fuzzy rules for edge detection

规则前件	规则后件
x 是区域点	$y = x^1$
x 是中间值	$y = x^{0.5}$
x 是边缘点	$y = x^{0.3}$

为验证本文算法的有效性,选取自然场景下的作物叶片进行实验。图 4a 为原始植物叶片图像,添加 30% 脉冲噪声后结果如图 4b 所示,式(4)中 $k_1 = 3$,式(5)中 $k_2 = 40$,边缘检测二值化阈值为 50,邻域窗口为 5×5 。利用本文算法对图 4b 模糊滤波后的结果如图 4c 所示,模糊边缘检测结果如图 4d 所示。为了验证算法效果,将本文提出的算法和 Pal&King 算法及 Canny 算子进行比较(图 5)。此 2 个算法

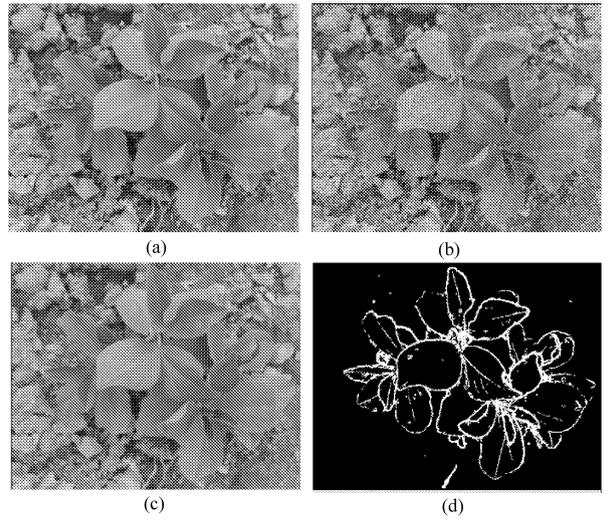


图 4 基于本文算法的图像处理

Fig.4 Image processing based on the proposed algorithm

(a) 原图 (b) 添加 30% 脉冲噪声
(c) 模糊滤波 (d) 模糊边缘检测

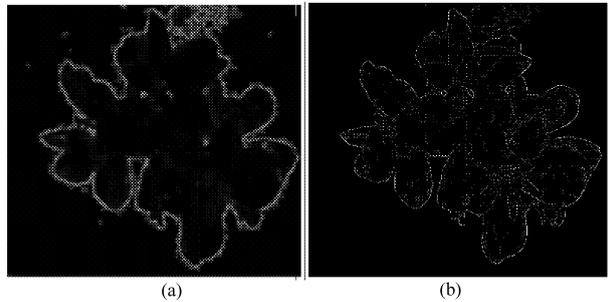


图 5 Pal&King 方法及 Canny 算子边缘检测

Fig.5 Edge detection with Pal&King algorithm and

Canny operator

(a) Pal&King 方法 (b) Canny 算子

中,先计算 ExG 指标用于去除背景,然后对运算结果进行边缘检测,Pal&King 算法定义的隶属函数中 F_d 为倒数型模糊因子,取值 250, F_e 为指数型模糊因子,取值 1,对图 4a 进行边缘检测结果如图 5a 所示;Canny 算子由 AForge. Net 提供算法,高斯滤波参数 σ 取值 4,高低阈值分别设为 5、30,用 C# 语言编程实验结果如图 5b 所示。另一组实验,图 6a 为原图,图 6b 为本文方法检测的叶片边缘,图 6c、6d 分别为 Pal&King 算法和 Canny 算子的检测结果。通过比较可见,实验所用的图像均为自然场景下的叶片图像,背景比较复杂(如图 4a 中植物背景有土壤、布片、砖头等),利用本文方法可以有效检测出叶片边缘以及叶脉,同时去掉了背景图像,有效抑制了伪边缘,这是因为算法定义边缘隶属度时,不仅考虑了邻域边缘像素的统计特性,而且也考虑了绿色植物和自然背景的颜色差异,即结合 ExG 指标来定义绿色植物隶属度函数,算法结果中含有少数孤立点,利用 BLOB 分析可以快速去除。对于 Pal&King 算法和

Canny 算子,需要先计算 ExG 指标以去除背景;否则,结果中背景会含有大量伪边缘,难以进一步处理。当叶脉对比度比较高时,这两个算子才能检测出来,如图 5 中伪边缘比较多而叶脉不清,而图 6c、6d 叶脉则相对清楚。另外,Pal&King 算法对噪声敏

感;Canny 算子由于先进行高斯滤波再进行边缘检测,对噪声不敏感,但所用阈值的选取是个难题。而本文提出的算法将滤波和边缘检测同时利用模糊推理实现,对噪声不敏感,在去除噪声、土壤背景的同时能有效检测叶片边缘。

5 结束语

针对温室环境中植物图像信息常有噪声、背景复杂且具有模糊性和不完整性,利用模糊逻辑同时处理图像滤波和边缘检测,提出了一种基于模糊逻辑的植物叶片图像边缘检测方法,在图像域和模糊域之间的变换中,利用像元属性值与邻域属性值的统计特性来定义噪声点和边缘点隶属度;在定义边缘隶属度时,同时考虑了绿色植物和自然背景的颜色差异;采用线性函数作为模糊化函数以提高运算速度;利用基于 Sugeno 模糊模型的模糊推理,可有效减少规则数量。与 Pal&King 方法及 Canny 算子对比实验表明,本文提出的方法由于结合 ExG 指标来定义隶属度函数,克服了常规算法未考虑叶片像素和背景像素的颜色差异导致产生大量伪边缘的问题,而且在噪声环境下能有效提取自然背景下植物叶片边缘信息,可有效用于温室生产环境下的植物叶片边缘检测。

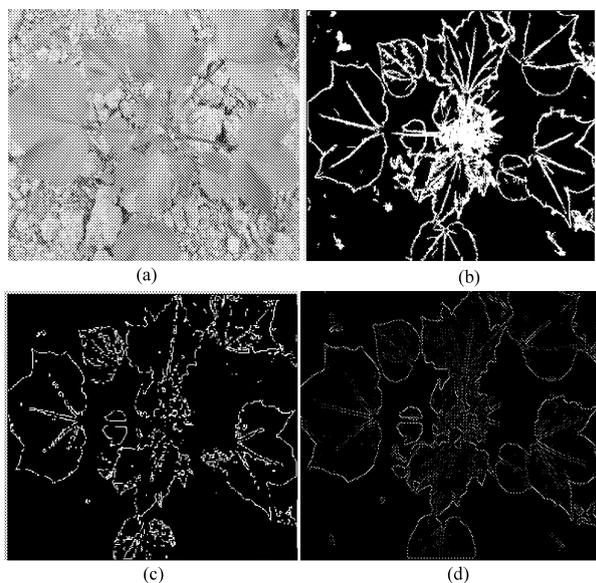


图 6 边缘检测结果比较

Fig. 6 Comparison of edge detection results

(a) 原图 (b) 模糊边缘检测
(c) Pal&King 方法 (d) Canny 算子

参 考 文 献

- Ondimu S N, Murase H. Comparison of plant water stress detection ability of color and gray level texture in sunagoko moss [J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(3): 1 111 ~ 1 120.
- Pal S K, King R A. On edge detection of X-ray images using fuzzy sets [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1983, 5(1): 69 ~ 77.
- 杨勇,黄淑英. 一种改进的 Pal 和 King 模糊边缘检测算法 [J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(9): 1 918 ~ 1 922.
Yang Yong, Huang Shuying. Modified Pal and King algorithm for fuzzy edge detection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(9): 1 918 ~ 1 922. (in Chinese)
- Kim D S, Lee W H, Kweon I S. Automatic edge detection using 3×3 ideal binary pixel patterns and fuzzy-based edge thresholding [J]. Pattern Recognition Letters, 2004, 25(1): 101 ~ 106.
- Hu L M, Cheng H D, Zhang M. A high performance edge detector based on fuzzy inference rules [J]. Information Sciences, 2007, 177(21): 4 768 ~ 4 784.
- Patricia M, Olivia M, Oscar C. An improved method for edge detection based on interval type-2 fuzzy logic [J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(12): 8 527 ~ 8 535.
- Lopez-Molina C, De Baets B, Bustince H. Generating fuzzy edge images from gradient magnitudes [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2011, 115(11): 1 571 ~ 1 580.
- Ranita B, Jaya S. An improved Canny edge detection algorithm based on type-2 fuzzy sets [J]. Procedia Technology, 2012, 4: 820 ~ 824.
- Todd L, Hidenori I, Hirohisa S. Image filtering, edge detection and edge tracing using fuzzy reasoning [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, 18(5): 481 ~ 491.
- Zheng L Y, Zhang J T, Wang Q Y. Mean-shift-based color segmentation of images containing green vegetation [J]. Computer and Electronics in Agriculture, 2009, 65(1): 93 ~ 98.
- 张智星,孙春在,水谷英二. 神经—模糊和软计算 [M]. 西安:西安交通大学出版社, 2000: 57 ~ 63.