

改进的 Canny 边缘检测算法

凌凤彩 康 牧 林 晓

(洛阳师范学院信息技术学院 洛阳 471022)

摘 要 Canny 算子是一种含有最优化思想的算子,具有较高的检测精度,所以被广泛地应用;因为它本身对噪声比较敏感,所以需要利用 Gauss 函数进行去噪。分析了原判断非极大值抑制条件存在的问题,提出了新的判断非极大值抑制的条件,设计了新的梯度检测算子,该梯度检测算子可以有效地抑制噪声。数据分析和实验结果说明了所提算法的有效性。

关键词 Canny 算子,非极大值抑制,噪声,单像素边缘

中图分类号 TP317.4 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.8.063

Improved Canny Edge Detection Algorithm

LING Feng-cai KANG Mu LIN Xiao

(Academy of Information Technology, Luoyang Normal University, Luoyang 471022, China)

Abstract Canny operator is an operator with optimum ideas. It has higher detection accuracy and is widely used. Since this operator is easily affected by noise, it is essential to filter out the noise by Gaussian filter. This paper analyzed the defects of original non-maximum suppression judging condition, and proposed a new judging condition, and designed a new gradient detection operator that could effectively suppress noise. The data and experimental results analysis indicate the effectiveness of the improved algorithm.

Keywords Canny operator, Non-maximum suppression, Noise, Single pixel edge

图像边缘是指周围像素灰度值有阶跃变化或屋顶变化的像素点集合,反映了图像灰度的不连续性。边缘检测^[1]的实质是采用某种算法提取图像中目标与背景之间的边界线,通常可以由一阶梯度最大值或者二阶导数过零点检测得到图像边缘。Canny 边缘检测算法对噪声非常敏感,所以在进行边缘检测之前需要对图像进行去噪,然后计算梯度。为了得到单像素边缘,需要进行非极大值抑制;为了去掉伪边缘并使边缘连续,又需要设置高低阈值。原 Canny 边缘检测算法利用 gauss 函数对图像进行去噪,但去噪后又会影响到边缘定位的准确性。国内外学者对原 Canny 算法进行了大量的研究,提出了许多改进的 Canny 边缘检测算法,并取得了相当不错的效果。有针对滤波函数进行改进的:王等^[2]和许等^[3]各自构造了一个自适应平滑滤波器,利用数学形态学设计滤波器有段;刘^[4]、徐等^[5]、瞿等^[6]、郝等^[7]利用四点插值细分的方法对图像进行滤波;尚等^[8]利用四阶偏微分方程的降噪算法对图像去噪;牛等^[9]利用鲁棒主成分分析的方法达到抑制噪声的目的。在自动获取高低阈值方面,董等^[10]利用遗传算法自动获取高低阈值,齐等^[11]基于边缘对比特征和边缘方向来实现高低阈值的功能。有根据最大类间方差法(Otsu)求高低阈值的方法^[2,12],秦等^[13]通过对梯度进行线性变换来求高低阈值。这些改进的算法不同程度地提高了 Canny 算法的性能,对大多数图像都适用,但是对于特殊图像的效果不一定理想。本

文从判断非极大值抑制条件和改进 Canny 算子这 2 个方面,进一步提高了 Canny 算法的效果。

1 传统的 Canny 边缘检测算子

Canny^[1]提出了 3 个边缘检测的准则,并用数学方法系统地推导出确定图像边缘检测函数性能指标的数学表达式:信噪比 SNR、检测精度 L 和伪边界平均距离 M ,具体描述如下。

(1)最优检测:漏检真实边缘的概率和误检非边缘的概率都尽可能小。

(2)最优定位准则:检测到的边缘点的位置距实际边缘点的位置最近,或者是由于噪声引起检测出的边缘偏离物体的真实边缘的程度最小。

(3)检测点与边缘点一一对应:算子检测的边缘点与实际边缘点应该是一一对应的。

Canny 边缘检测算子的基本思想是:首先选择一定的 Gauss 滤波器对图像进行平滑滤波;然后采用非极大值抑制(Non-maxima Suppression)技术对平滑后的图像进行处理,从而得到最后的边缘图像。

Canny 边缘检测算子的检测步骤为:

(1)用高斯滤波器对待处理图像进行平滑处理。

(2)用一阶偏导数的有限差分计算梯度的幅度和方向:

到稿日期:2015-07-08 返修日期:2015-10-30 本文受国家自然科学基金项目(U1304616,61502219)资助。

凌凤彩(1965—),女,硕士,副教授,主要研究方向为智能图像处理与模式识别,E-mail:1840213780@qq.com;康 牧(1968—),男,博士,教授,主要研究方向为智能图像处理与模式识别,E-mail:kmuwd@sina.com;林 晓(1978—),女,博士,副教授,主要研究方向为图像处理。

$$E_x(i,j)=\frac{S[i,j+1]-S[i,j]+S[i+1,j+1]-S[i+1,j]}{2} \quad (1)$$

$$E_y(i,j)=\frac{S[i+1,j]-S[i,j]+S[i+1,j+1]-S[i,j+1]}{2} \quad (2)$$

边缘强度为:

$$A(i,j)=\sqrt{E_x^2(i,j)+E_y^2(i,j)} \quad (3)$$

法向矢量为:

$$\alpha(i,j)=\arctan\left[\frac{E_y(i,j)}{E_x(i,j)}\right] \quad (4)$$

其中, $A(i,j)$ 反映了图像上 (i,j) 点的边缘强度(也称为梯度幅值或梯度值), $\alpha(i,j)$ 是图像上 (i,j) 点的法向矢量(正交于边缘方向的法向)。

(3)对梯度幅值进行非极大值抑制,以细化幅值图像中的屋脊带,保留幅值局部变化最大的点。它的基本思想是:如果图像 $f(x,y)$ 上 (i,j) 点的边缘强度 $A(i,j)$ 小于沿着梯度线方向上的两个相邻像素点的边缘强度,则认为该像素点为非边缘点,将其 $A(i,j)$ 置为 0。

(4)用双阈值算法检测和连接边缘,梯度幅值图像经过非极大值抑制后,仍然存在许多由噪声和细纹理引起的假边缘,故需要用双阈值算法来进一步检测边缘并进行边缘连接。

2 传统的 Canny 边缘检测算子存在的问题

(1)Canny 边缘检测算子对噪声敏感,需要进行高斯滤

$$A_0(i,j)=\left|\frac{S[i+1,j+1]-S[i+1,j-1]+S[i,j+1]-S[i,j-1]+S[i-1,j+1]-S[i-1,j-1]}{3}\right| \quad (5)$$

$$A_{45}(i,j)=\left|\frac{S[i+1,j]-S[i,j-1]+S[i+1,j+1]-S[i-1,j-1]+S[i,j+1]-S[i-1,j]}{3}\right| \quad (6)$$

$$A_{90}(i,j)=\left|\frac{S[i+1,j-1]-S[i-1,j-1]+S[i+1,j]-S[i-1,j]+S[i+1,j+1]-S[i-1,j+1]}{3}\right| \quad (7)$$

$$A_{135}(i,j)=\left|\frac{S[i+1,j-1]-S[i-1,j+1]+S[i,j-1]-S[i-1,j]+S[i+1,j+1]-S[i,j+1]}{3}\right| \quad (8)$$

式(5)~式(8)分别代表待检测点 (i,j) 在水平方向的梯度、45度方向的梯度、垂直方向的梯度和 135度方向的梯度。从它们中选择一个最大者,然后在它的梯度方向上找到两个相邻的像素点,分别计算其梯度值,接着进行非极大值抑制,由于待检测点不直接参与运算,可以提高抑制噪声的能力。

(2)改变非极大值抑制的条件。

文献[1]中的思想可以从两个方面来理解:1)如果 (i,j) 点的边缘强度 $A(i,j)$ 全都小于沿着梯度线方向上的两个相邻像素点的边缘强度,则认为该像素点为非边缘点,将其 $A(i,j)$ 置为 0,否则,即为候选边缘点;2)如果 (i,j) 点的边缘强度 $A(i,j)$ 小于沿着梯度线方向上的两个相邻像素点的边缘强度中的任一个,则认为该像素点为非边缘点,将其 $A(i,j)$ 置为 0,否则,即为候选边缘点。不管是以上两种情况的哪一种,都会把像素值呈“斜坡状”的所有像素点当作候选边缘点,因为这些像素点的梯度值都相等,不满足抑制的条件,把这些像素点当作候选边缘点,与物体的实际边缘不相符,肯定会检出相当多的伪边缘。

文献[12]的思想也可以从两个方面来理解:1)如果 (i,j) 点处的边缘强度 $A(i,j)$ 全都大于沿着梯度线方向上的两个相邻像素点的边缘强度,则将点 (i,j) 标记为候选边缘点,否则标记为非边缘点;2)如果 (i,j) 点处的边缘强度 $A(i,j)$ 大于

波,从而会增加运算量,也会偏离物体的真实边缘,故可以选择抑制噪声能力强的算子。

(2)需要进行非极大值抑制,以获得单像素边缘,但是非极大值抑制的思想存在一定的问题,即容易产生虚假边缘或丢失真正的边缘。文献[1]提出“如果图像 $f(x,y)$ 上 (i,j) 点的边缘强度 $A(i,j)$ 小于沿着梯度线方向上的两个相邻像素点的边缘强度,则认为该像素点为非边缘点,将其 $A(i,j)$ 置为 0”,这种方法可能会检测出许多伪边缘;文献[12]提出“如果 (i,j) 点处的边缘强度 $A(i,j)$ 大于沿着梯度线方向上的两个相邻像素点的边缘强度,则将点 (i,j) 标记为候选边缘点,否则标记为非边缘点”,这种方法肯定会细化“屋脊”带边缘,但会丢掉“阶梯”状边缘。

(3)对于同样性质的边缘,得到的结果不一样,有的是双单像素边缘,有的不是。

(4)需要计算高低阈值,进行边缘连接。

3 改进的 Canny 边缘检测算子

已有多位学者对高低阈值的计算进行了研究,本文主要讨论解决前 3 个问题。

(1)传统的 Canny 边缘检测算子在用式(1)和式(2)计算偏导数时,待检测点 (i,j) 直接参与运算,故对噪声比较敏感。本文改变了计算边缘强度的计算方法,用式(5)~式(8)来计算:

沿着梯度线方向上的两个相邻像素点的边缘强度中的任一个,则将点 (i,j) 标记为候选边缘点,否则标记为非边缘点。对于第一种情况,假设 (i,j) 点的边缘强度 $A(i,j)$ 大于梯度方向上前一个点的边缘强度而等于后一个点的边缘强度,此处是一个“阶梯状”边缘,应该保留,但是却没有被当作候选边缘点,这也与物体的实际边缘不相符。对于第二种情况,假设 (i,j) 点的边缘强度 $A(i,j)$ 大于梯度方向上前一个点的边缘强度而小于后一个点的边缘强度,此处显然不应该是边缘点,却被当作候选边缘点,容易检测出伪边缘。

本文提出的非极大值抑制条件:设 (i,j) 点的边缘强度为 $A(i,j)$,沿着梯度线方向上的两个相邻像素点的边缘强度一个为 $A_0(i,j)$,另一个为 $A_1(i,j)$,如果 $A(i,j)$ 大于等于 $A_0(i,j)$ 且大于 $A_1(i,j)$,或者 $A(i,j)$ 大于 $A_0(i,j)$ 且大于等于 $A_1(i,j)$,则将点 (i,j) 标记为候选边缘点,否则标记为非边缘点。

这样既可以细化屋脊状边缘,也可以保留阶梯状边缘,且不会产生多余的伪边缘,效果比较理想。

(3)对同一性质的边缘得到的结果一样。

对于 45°和 135°边缘,原 Canny 算法(使用文献[1]非极大值抑制条件)、原 Canny 算法(使用本文非极大值抑制条件)和本文算法得到的结果都是双单像素边缘(从后面的实验结果部分可以看出),但是对于水平边缘和垂直边缘,前两种

算法得到的边缘与本文算法得到的边缘不同,在此,只对水平边缘进行分析,如图1所示。

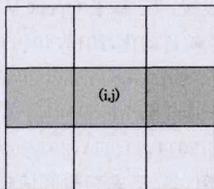


图1 水平边缘图

设此处“黑色块”的像素值为“0”,“白色块”的像素值为“255”,显然 (i,j) 点是水平边缘上的点。原Canny算法将相应的像素值代入式(1)和式(2),则 $E_x(i,j)=E_y(i,j)=255$,用式(3)求出它的边缘强度 $A(i,j)=255$ 。用同样的方法可以计算 $(i+1,j)$ 点的边缘强度 $A(i+1,j)=255$ 和 $(i-1,j)$ 点的边缘强度 $A(i-1,j)=0$ 。如果使用文献[1]非极大值抑制条件,因为 $A(i+1,j)$ 的值不小于 $A(i,j)$ 的值(它们相等),所以 $A(i,j)$ 的值保留,同理对于点 $(i+1,j)$,因为 $A(i,j)$ 的值不小于 $A(i+1,j)$,也可以保留,也就是说第 i 行的所有像素点被全部保留,第 $i+1$ 行的所有像素点也被全部保留,得到的边缘是两条相邻的水平直线;如果使用本文的非极大值抑制条件,因为 $A(i+2,j)=0, A(i+1,j)$ 大于 $A(i+2,j)$ 且等于 $A(i,j)$ (满足大于等于条件),所以第 $i+1$ 行的所有像素点被全部保留,同理 $A(i,j)$ 大于 $A(i-1,j)$ 且等于 $A(i+1,j)$,第 i 行的所有像素点也被全部保留,得到的边缘也是两条相邻的水平直线。对于本文算法, $(i+1,j)$ 点与 $(i-1,j)$ 点的边缘强度,用式(7)计算得到的最大值为255, (i,j) 点、 $(i-2,j)$ 点和 $(i+2,j)$ 点的边缘强度为0,因为 $A(i+1,j)$ 大于 $A(i+2,j)$ 和 $A(i,j)$ (不满足抑制条件),所以第 $i+1$ 行的所有像素点被全部保留,同理 $A(i-1,j)$ 大于 $A(i,j)$ 和 $A(i-2,j)$ (不满足抑制条件),第 $i-1$ 行的所有像素点也被全部保留,得到的是两条水平直线中间夹一条黑色直线的边缘,也就是前面所说的双单像素边缘。用同样的方法可以分析垂直边缘、 45° 边缘和 135° 边缘的情况。

4 算法效率分析

传统的Canny边缘检测算子在检测一个点时,根据式(1)、式(2)计算水平梯度值和垂直梯度值,分别需要3次加法(注:减法也当作加法,它们的计算时间相同)和1次除法;利用式(3)计算边缘强度,需要2次平方(平方可以用乘法实现)、1次加法和1次开平方;利用式(4)计算法向矢量,需要1次除法和1次求反正切函数,乘法和除法的计算时间基本相同,都按乘法计算,把反正切函数和开平方也当作乘法,故总共需要7次加法和7次乘法。改进的Canny边缘检测算子在检测一个点时,分别根据式(5)一式(8)计算水平梯度、 45° 梯度、垂直梯度和 135° 梯度,每式需要5次加法(也把减法当作加法)、1次除法。另外,求它们4个中的最大值需要作3次比较运算,把比较运算也当作加法运算(注:因为做比较运算时需要先做一次减法运算),故总共需要23次加法和4次除法。众所周知,一次乘法所需要的运算时间远远高于一次加法的运算时间,故改进的算法与传统的算法相比效率稍低,但以效率的稍微降低换取边缘检测性能的提高是值得的。

5 实验结果及分析

本文用一幅只含水平、垂直、 45° 和 135° 直线的特殊图像作为实验对象(因为它包含了非极大值抑制的4个方向,可以更清楚地说明问题),然后用传统的Canny边缘检测算法(使用文献[1]的非极大值抑制条件,称为算法1)、传统的Canny边缘检测算法(使用本文的非极大值抑制条件,称为算法2)和本文改进的Canny边缘检测算法进行实验,以便进行比较。

从实验结果1(见图2)来看,3种算法对 45° 和 135° 边缘检测的结果相同,都是双单像素边缘,但是对于水平和垂直边缘,算法1和算法2不是双单像素边缘,而本文算法仍然是双单像素边缘,这与第3小节的第(3)部分的分析结果一致。算法1和算法2的结果非常相似,只是在中心交叉点处稍有区别。这说明传统的Canny边缘检测算法对于相同性质的边缘得到的结果不一致,而本文算法结果是一致的。

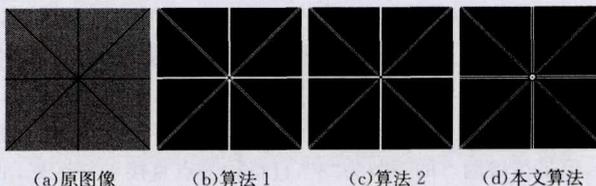


图2 实验结果1

由于传统的Canny边缘检测算法要求在进行边缘检测前对图像进行高斯去噪,因此对原图像进行高斯去噪后重复上述实验,结果如图3所示。

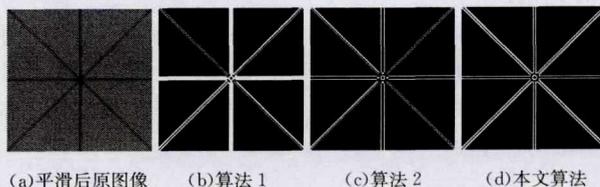


图3 实验结果2

从实验结果2来看,算法1的水平 and 垂直边缘已经明显不是单像素边缘,说明检测到了相当多的伪边缘,这与第3小节第(2)部分的分析结果一致。而算法2和本文算法的所有边缘都是双单像素边缘,说明本文提出的非极大值抑制条件是合理的。对于算法2,图像经过平滑和不经过平滑有如此差别,说明传统的Canny边缘检测算子具有一定的缺陷。对于本文算法,图像经过平滑和不经过平滑差别非常小,只是在中心交叉点处稍有区别,主要边缘的特性并没有改变,说明了本文设计的算子更具合理性。

为了检查本文设计的算子对噪声的抑制能力,对原图像加入均值为0、方差为10的高斯白噪声,利用高斯函数平滑后,用算法2和本文算法再进行对比实验,结果如图4所示。

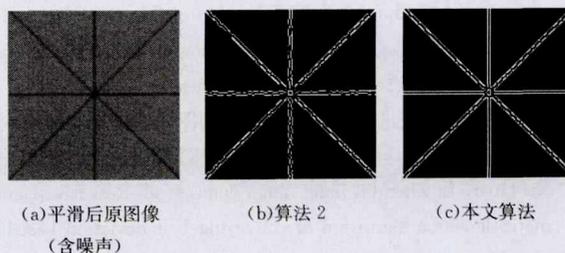


图4 实验结果3

从实验结果 3 来看,算法 2 的水平 and 垂直边缘非常“粗糙”,两条斜线边缘效果稍好;而本文算法该部分的边缘非常“光滑”,两条斜线边缘也比算法 2 好得多。这进一步说明了本文设计的算子对噪声具有一定的抑制作用,更具合理性。

为了进一步说明本文算法的实用性,对现实生活中的一幅关于房子的图像先进行高斯去噪,然后用算法 2、文献[2]算法和本文算法进行边缘检测,结果如图 5 所示。

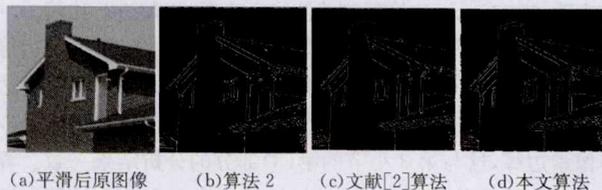


图 5 实验结果 4

从实验结果 4 来看,3 种算法检测到的边缘差别不大,但是在某些细节方面,本文算法效果更好。从图像右边中间“房檐”部分的边缘(用椭圆圈住的部分)可以看出算法 2 的噪声点最多,文献[2]算法的噪声点次之,本文算法的噪声点最少。文献[2]算法改变了算子的结构,故抑制噪声的性能有所提高,但是待检测点的系数为“3”,且待检测点直接参与运算,故抑制噪声的能力不如本文算法,这说明本文算法的性能更好。从右边“门框”部分的边缘(用椭圆圈住的部分)可以看出,本文算法检测出的边缘最光滑,算法 2 和文献[2]算法检测出的边缘相当,进一步说明了本文算法的优越性,也说明了本文算法的实用性。

结束语 本文在分析传统的 Canny 边缘检测算法在非极大值抑制条件和对噪声敏感问题的基础上,提出了新的非极大值抑制条件和检测算子。数据分析和实验结果说明了本文算法的合理性。

参考文献

[1] 李弼程,彭天强,彭波,等. 智能图像处理技术[M]. 北京:电子工业出版社,2004:153-155

[2] Wang Neng, Zhao Hong-li, Ju Sheng-gen, et al. An improved adaptive Canny edge detection algorithm[J]. Journal of Sichuan University(Natural Science Edition), 2014, 51(3): 479-482(in Chinese)

王能,赵红立,嵇生根,等. 一种改进的 Canny 边缘检测自适应算法[J]. 四川大学学报(自然科学版),2014,51(3):479-482

[3] Xu Hong-ke, Qin Yan-yan, Chen Hui-ru. An Improved Algorithm for Edge Detection Based on Canny[J]. Infrared Technology, 2014, 36(3): 210-214(in Chinese)

许宏科,秦严严,陈会茹. 一种基于改进 Canny 的边缘检测算法[J]. 红外技术,2014,36(3):210-214

[4] Duan Jun, Liu Chun-xiang. Application of improved Canny Detector to Cell Image Detection[J]. Computer Applications and Software, 2014, 31(5): 237-239(in Chinese)

段军,刘春祥. 改进 Canny 算子在细胞图像边缘检测中的应用[J]. 计算机应用与软件,2014,31(5):237-239

[5] Xu Huan, Li Zhen-bi, Jiang Yuan-yuan, et al. Research of automatic detection algorithm of conveying belt deviation based on

Open CV[J]. Industry and Mine Automation, 2014, 40(9): 48-52(in Chinese)

徐欢,李振璧,姜媛媛,等. 基于 OpenCV 的输送带跑偏自动检测算法研究[J]. 工矿自动化,2014,40(9):48-52

[6] Qu Zhong, Lin Li-dan, Guo Yang, et al. Algorithm of Image Crack Detection Based on Morphology and Region Extends[J]. Computer Science, 2014, 41(11): 297-300(in Chinese)

瞿中,林丽丹,郭阳,等. 形态学与区域延伸相结合的图像裂缝检测算法研究[J]. 计算机科学,2014,41(11):297-300

[7] Hao Qiang, Zhou Min, Zheng Hong-chan. Image denoising based on edge detection and four interpolation subdivision[J]. Computer Engineering and Applications, 2014, 50(11): 184-187(in Chinese)

郝强,周敏,郑红婵. 基于边缘检测和四点插值细分的 SAR 图像去噪[J]. 计算机工程与应用,2014,50(11):184-187

[8] Shang Chang-chun, Ma Hong-wei, An Jing-yu, et al. Image edge detection method of underground objects based on improved Canny operator[J]. Computer Engineering and Science, 2014, 36(3): 491-496(in Chinese)

尚长春,马宏伟,安静宇,等. 基于改进 Canny 算子的煤矿井下物体图像边缘检测方法研究[J]. 计算机工程与科学,2014,36(3):491-496

[9] Niu Fa-fa, Chen Li, Zhang Yong-xin, et al. Canny edge detection algorithm based on robust principal component analysis[J]. Journal of Computer Applications, 2014, 34(6): 1727-1730(in Chinese)

牛发发,陈莉,张永新,等. 基于鲁棒主成分分析的 Canny 边缘检测算法[J]. 计算机应用,2014,34(6):1727-1730

[10] Dong Yu, Gao Yun-bo, Liu Xiang, et al. Application of the Improved Genetic Algorithm in Threshold Selection of Canny Operator[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2014, 33(6): 1-5(in Chinese)

董昱,高云波,刘翔,等. 改进的遗传算法在 Canny 算子阈值选取中的应用[J]. 兰州交通大学学报,2014,33(6):1-5

[11] Qi Dan-yang, Jiang Zheng, Chen Yi, et al. An improved edge linking algorithm for Canny edge detection[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2014, 37(4): 310-315(in Chinese)

齐丹阳,蒋峥,陈毅,等. 一种改进边缘连接的 Canny 边缘检测算法[J]. 武汉科技大学学报,2014,37(4):310-315

[12] Zhang Zhi-qiang, Song Hai-sheng. Application of Otsu to Improved Edge Detection Method in Canny Algorithm[J]. Computer and Digital Engineering, 2014, 42(1): 122-129(in Chinese)

张志强,宋海生. 应用 Otsu 改进 Canny 算子的图像边缘检测方法[J]. 计算机与数字工程,2014,42(1):122-129

[13] Qin Xu-jia, Zhao Hai, Zhang Qin-feng, et al. A Method of Structured Light Coding and Detection Based on the Boundary Information[J]. Journal of Computer Aided Design and Computer Graphics, 2014, 26(6): 879-888(in Chinese)

秦绪佳,赵海,张勤锋,等. 基于边界信息的结构光编解码方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2014,26(6):879-888