

基于参数化对数图像处理模型的光照不均匀图像的边缘检测算法

刘建思, 尹丽菊*, 潘金凤, 崔玉敏, 汤祥裕

山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000

摘要 由于低照度以及场景光不均匀的环境下图像的成像特点,普通的边缘检测方法无法有效检测出完整清晰的边缘图像。本文结合参数化对数图像处理(PLIP)模型对低亮度图像敏感、处理效果接近人眼视觉观察的结果等优点提出一种新的边缘检测算法。首先,利用 PLIP 模型理论推导出新的梯度算子,然后分析传统 Canny 算法检测边缘过程的不足并加以改进,并将推导出的新梯度代替了传统 Canny 算法中的梯度,运用 Canny 算子的三个最佳边缘检测标准提取图像的边缘。最后,通过对微光实验平台获取的低照度和场景光不均匀环境下的图像进行边缘检测对比验证。实验结果表明,新算法边缘检测的线型连接程度相较于传统 Canny 算法、Sobel 算法和原对数图像处理模型(LIP)算法分别提升了约 10%、30%和 4%,其检测效果更佳。

关键词 图像处理; 边缘检测; 参数化对数图像处理模型; Canny 算法; 低照度

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2210005

Edge Detection Algorithm for Unevenly Illuminated Images Based on Parameterized Logarithmic Image Processing Model

Liu Jiansi, Yin Liju*, Pan Jinfeng, Cui Yumin, Tang Xiangyu

College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255000, China

Abstract Due to the imaging characteristics of images under low illumination and uneven scene light conditions, ordinary edge detection methods cannot effectively detect complete and clear edge images. This paper proposes a new edge detection algorithm based on the advantages of the parameterized logarithmic image processing (PLIP) model, which is sensitive to low-brightness images and the processing effect is close to the results of human visual observation. First, we use the PLIP model theory to derive a new gradient operator, and then analyze the shortcomings of the traditional Canny algorithm to detect the edge process and improve it, and replace the gradient in the traditional Canny algorithm with the new gradient derived from the Canny algorithm. The best edge detection standard extracts the edge of the image. Finally, the edge detection is compared and verified by the low illuminance image obtained by the low-light experimental platform and the image under the uneven scene light environment. The experimental results show that the linear connection degree of the edge detection of the new algorithm is about 10%, 30%, and 4% higher than that of the traditional Canny algorithm, Sobel algorithm, and original LIP algorithm, respectively, and its detection effect is better.

Key words image processing; edge detection; parameterized logarithmic image processing model; Canny algorithm; low illumination

OCIS codes 100.2000; 100.2650; 140.1135

收稿日期: 2020-11-27 修回日期: 2020-12-21; 录用日期: 2021-01-22

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61801272)、淄博市校城融合项目(2019ZBXC516)、山东自然科学基金(ZR2020MF127)

通信作者: *Ljyin@163.com

1 引言

边缘是指图像的区域属性发生突变的地方,包含着丰富且重要的图像信息,是图像的最基本特征。图像边缘检测技术是图像处理、计算机视觉、模式识别的基础,广泛应用于图像分割、运动检测、目标跟踪等领域^[1]。目前为止,国内外学者研究出很多边缘算法,各有优缺点。但是,多数边缘检测研究的基础都是建立在正常光照的图像上,对于低照度和场景光不均匀环境下图像的边缘检测研究相对较少。

传统边缘检测算法有 Roberts、Sobel、Prewitt、Kirsch、Canny 等^[2],但是这些传统的检测算法在实际应用中容易受到外界因素的影响,比如光照强度、图像色彩差异等^[3-4]。为克服传统边缘检测算法的不足,人们又研究出了其他方法,如基于小波变换的边缘检测算法^[5]、基于形态学的边缘检测算法^[6]、基于深度学习的边缘检测算法^[7-8]等。基于小波变换的边缘检测在一定程度上兼顾了边缘定位精度和抗扰能力,但是算法复杂度高;基于形态学的边缘检测算法容易实现,且能够较好地处理椒盐噪声,但对边缘的准确定位能力较差;基于机器学习的边缘检测算法主要利用深度学习提取图像的深层次特征,检测效果良好,但需大量的样本进行训练,计算复杂度较高,不易实现。总之,这些算法大多数没有传统边缘检测算法精简且容易实现。

为解决在低照度和场景光不均匀的环境下传统边缘检测算法效果差、抗扰能力弱等问题,同时为了兼顾算法运算精简,受参数化对数图像处理模型(PLIP)启发,利用 PLIP 模型提出一种新的边缘检测算法。PLIP 模型是在对数图像处理模型(LIP)的基础上提出的,1988 年 Jourlin 和 Pinoli^[9]提出了 LIP 模型,他们认为在数字图像处理中,如果将图像的灰度值直接相加(或相乘),灰度值有可能超出区间值,产生“超区间值”问题,导致图像大量细节信息丢失,为了解决普通的“+”、“×”运算不能完全适应

数字图像处理的问题,LIP 模型定义了一个有界范围内的对数运算,这种运算在数学上有完备的定义并且在物理上和某些离散的图像环境相一致,能够在指定的区间范围内更精确地处理图像的灰度值^[10],LIP 模型能有效解决低照度和场景光不均匀情况下处理图像时的问题。为克服 LIP 模型存在容易丢失图像细节、在视觉上损害图像的困难,Panetta 等^[11]在此基础上提出 PLIP 模型,该模型可以对图像中感兴趣的部分进行自适应调整,并给出了选择最佳参数的方法,接着又将 PLIP 模型用于边缘检测算法,有效地改善了输出图像的效果^[12]。

本文基于 PLIP 模型推导出新的梯度算子,然后分析传统 Canny 算法检测边缘过程的不足并加以改进,并将推导出的新梯度代替了传统 Canny 算法中的梯度,运用 Canny 算子的三个最佳边缘检测标准提取图像的边缘。为了验证该算法的有效性,通过搭建微光实验平台模拟低照度和场景光不均匀环境,获取实验图像,最后利用不同的边缘检测算法与新算法对实验图像进行边缘检测对比,结果表明,新算法获得的检测效果更佳,抗噪能力更强。

2 相关的对数图像处理模型

2.1 LIP 模型

在 LIP 模型框架中,设图像支撑集为 $D \subset \mathbf{R}^2$, F 为原图像的灰度值, g_L 为在非空区域 D 的灰度色调函数,灰度图像由 g_L 来映射表示,其灰度色调函数可表示为

$$g_L = M - F. \quad (1)$$

由于图像 F 的灰度通常被限制在一个区间内,8 位图像的灰度范围通常为 $[0, 255]$,因此灰度色调函数 g_L 也受到限制,其值域应该在实数区间 $[0, M]$ 内,其中 M 与图像的灰度等级有关,对于 8 位图像, $M=256$ 。LIP 模型的灰度色调函数对传输图像的处理过程如图 1 所示。

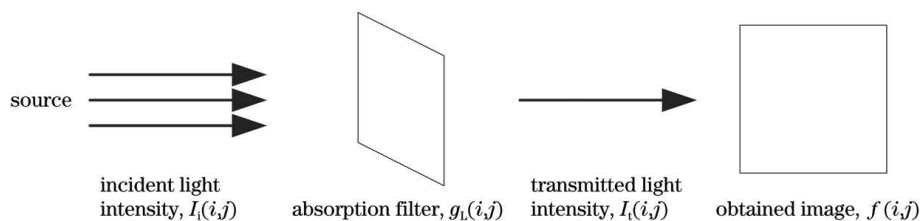


图 1 LIP 模型下对传输图像的处理

Fig. 1 Processing of transmitted images under LIP model

LIP 模型的最初目的是定义一个有界范围内的对数加操作,解决两幅图像线性相加时,灰度值溢出而

导致图像失真严重的问题。图 2 为 LIP 模型对两幅图像进行相加的处理过程。

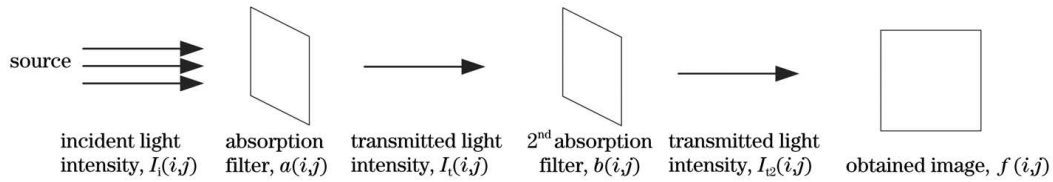


图 2 LIP 模型下对两幅图像进行相加处理

Fig. 2 Under the LIP model, two images are added together

以下给出 LIP 模型的三种运算定义,

$$a \oplus b = a + b - \frac{ab}{M}, \quad (2)$$

$$a \ominus b = M \frac{a-b}{M-b}, \quad (3)$$

$$\alpha \otimes g_L = M - M \left(1 - \frac{g_L}{M}\right)^\alpha, \quad (4)$$

式中: \oplus 、 \ominus 、 \otimes 分别表示 LIP 模型下的加、减、数乘运算; a 、 b 、 g_L 都为(1)式定义的灰度色调函数; α 为一个标量。

由(2)式可得,

$$M - (a \oplus b) = M - a - b + \frac{ab}{M} = \left(\sqrt{M} - \frac{a}{\sqrt{M}}\right) \left(\sqrt{M} - \frac{b}{\sqrt{M}}\right). \quad (5)$$

$\forall a \in [0, M), \forall b \in [0, M)$, 容易得出,

$$0 \leq \left(\sqrt{M} - \frac{a}{\sqrt{M}}\right) \left(\sqrt{M} - \frac{b}{\sqrt{M}}\right) < M. \quad (6)$$

因此,LIP 模型的 \oplus 运算是封闭的,这意味着用 LIP 模型处理图像时不会出现灰度越界,同理也可以证明 LIP 模型中其他运算在 $[0, M)$ 范围内也是封闭的。有效解决了图像经过线性运算后灰度可能会溢出 $[0, M)$ 范围,导致图像信息丢失的问题。

LIP 模型的基本同态函数则表示为

$$\varphi(g_L) = -M \ln\left(\frac{M-g_L}{M}\right), \quad (7)$$

$$\varphi^{-1}(g_L) = M \left[1 - \exp\left(-\frac{g_L}{M}\right)\right]. \quad (8)$$

(7)式为 LIP 模型基本同态函数正变换,(8)式是 LIP 模型基本同态函数逆变换。灰度色调范围可以通过上式的基本同态函数正变换从 $(0, M)$ 延伸到 $(-\infty, M)$ 。图 3 和图 4 分别为两个同态函数 $\varphi(g_L)$ 和 $\varphi^{-1}(g_L)$ 对图像的处理过程。

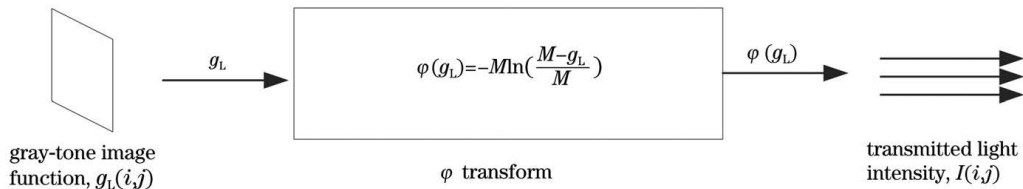


图 3 φ 函数处理过程

Fig. 3 Processing process of φ function

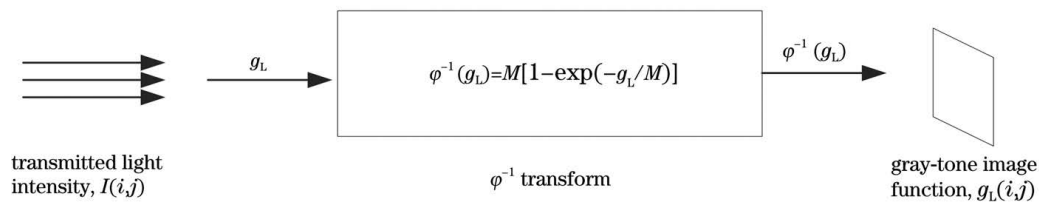


图 4 φ^{-1} 函数处理过程

Fig. 4 Processing process of φ^{-1} function

LIP 模型用非线性图像处理代替了线性图像处理(加、减、乘),更准确地反映了计算机图像处理的非线性特性,满足人类视觉系统的饱和特性。目前

LIP 模型已成功地应用于图像增强、边缘检测和图像恢复等领域。但是,这种非线性算术运算也有一些局限性,LIP 模型在向量空间中的集合是非对称

的,因此在实际应用中,该模型很明显扭曲了图像的负值信息,在视觉上损害图像。

2.2 PLIP 模型的提出

Wharton 等^[13]通过研究证明,改变 LIP 模型中参数 M 可以获得更好的图像处理结果。由此基础提出 PLIP 模型,设 F 为原图像的灰度值,定义一个灰度色调函数 g 为

$$g = \mu(M) - F. \quad (9)$$

PLIP 模型的运算定义为

$$g_1 \oplus g_2 = g_1 + g_2 - \frac{g_1 g_2}{\gamma(M)}, \quad (10)$$

$$g_1 \ominus g_2 = k(M) \frac{g_1 - g_2}{k(M) - g_2}, \quad (11)$$

$$a \otimes g = \gamma(M) - \gamma(M) \left[1 - \frac{g}{\gamma(M)} \right]^a. \quad (12)$$

PLIP 模型的基本同态函数的正变换与逆变换分别为

$$\varphi(g) = -\lambda(M) \ln^\beta \left[1 - \frac{g}{\lambda(M)} \right], \quad (13)$$

$$\varphi^{-1}(g) = \lambda(M) \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-g}{\lambda(M)} \right]^{\frac{1}{\beta}} \right\}, \quad (14)$$

式中: g_1, g_2, g 为(9)式定义的灰度色调函数。(10)~(14)式中的参数 $\mu(M), \gamma(M), k(M) \in [M, \infty)$, 都是等于 $AM+B$ 的线性函数(A, B 为常数), 同时 $\mu(M), \gamma(M), k(M)$ 取值互不干预, 可以是满足区间范围的任意表达式。(13)式与(14)式中的 β 也为一个标量, 可以更大程度地控制用于乘法的对数函数, 该函数可以为像素强度范围的更高或更低端分配权重。

PLIP 模型中的灰度色调函数、各个运算法则和

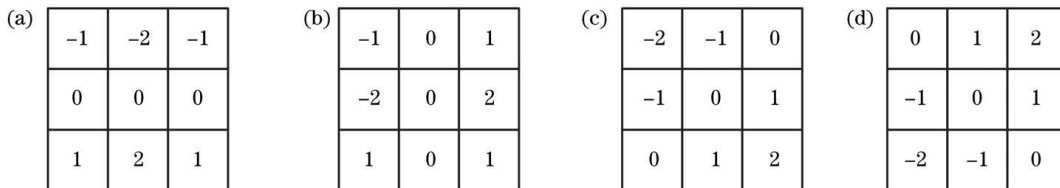


图 5 四个方向的 Sobel 算子模板。(a) x 轴方向模板; (b) y 轴方向模板; (c) 45° 方向模板; (d) 135° 方向模板

Fig. 5 Four-direction Sobel operator templates. (a) x -axis direction template; (b) y -axis direction template;

(c) 45° direction template; (d) 135° direction template

取 3×3 像素区域, 如图 6 所示, 其中 $\hat{g}_i (i = 1, \dots, 9)$ 代表此像素点的灰度值, 根据上面的算子模

基本同态函数对传递图像的处理过程与 LIP 模型的处理过程一致, 只是将 PLIP 模型中新的运算公式代替了原 LIP 模型的运算。PLIP 模型将这些参数 $[\mu(M), \gamma(M), k(M)]$ 代替 LIP 模型中的参数 M , 当 $\mu(M) = \gamma(M) = k(M) = M, \beta = 1$, PLIP 模型等同于 LIP 模型; 当 $\gamma(M), k(M), \beta$ 取无穷大, 则 PLIP 模型就等同于线性操作。因此, 针对不同的图像处理过程, 可以通过调整 $\mu(M), \gamma(M), k(M)$ 的参数值得到理想的处理效果, 参数的自适应使 PLIP 模型既保留了 LIP 模型的优点, 又提高了对不同图像处理过程的广泛适用性, PLIP 模型已被广泛应用于图像融合、图像增强与图像边缘检测等图像处理领域。根据文献[11]研究分析, 参数选取 $\beta = 2, \mu(M) = 1026, \gamma(M) = 1026, k(M) = 1026$ 时为最佳值。

3 基于 PLIP 模型的边缘检测算法

3.1 PLIP 模型下四方向的 Sobel 梯度算子

文献[14]介绍了基于 LIP 模型的 Sobel 算法, 它的运算方式与传统的 Sobel 检测算法相似, 使用 LIP 模型下的运算方式代替经典的线性运算, 利用水平和垂直 Sobel 两个方向的算子模板对图像进行梯度计算, 最后获得边缘图像。然而, 从结果中可以看出, 这会错过对角线方向上的边缘信息, 从而漏检图像边缘。

为了解决上述问题, 在此基础上, 本文增加 45° 方向和 135° 方向梯度计算模板, 再结合 PLIP 模型代替传统的线性运算来计算图像的梯度, 四个方向的 Sobel 算子模板如图 5 所示。

板利用传统的线性运算可得到四个方向的梯度: $u_x, u_y, u_{45}, u_{135}$ 。计算方法如下,

$$u_x = (\hat{g}_7 + 2 \times \hat{g}_8 + \hat{g}_9) - (\hat{g}_1 + 2 \times \hat{g}_2 + \hat{g}_3), \quad (15)$$

$$u_y = (\hat{g}_3 + 2 \times \hat{g}_6 + \hat{g}_9) - (\hat{g}_1 + 2 \times \hat{g}_4 + \hat{g}_7), \quad (16)$$

$$u_{45} = (\hat{g}_6 + 2 \times \hat{g}_9 + \hat{g}_8) - (\hat{g}_2 + 2 \times \hat{g}_1 + \hat{g}_4), \quad (17)$$

$$u_{135} = (\hat{g}_2 + 2 \times \hat{g}_3 + \hat{g}_6) - (\hat{g}_4 + 2 \times \hat{g}_7 + \hat{g}_8)。 \quad (18)$$

利用 PLIP 模型定义的灰色调函数 g 替代(15)~(18)式中的 \hat{g} , 将 PLIP 模型定义的 \oplus 、 \ominus 、 \otimes 运算替换(15)~(18)式中 +、-、 \times 运算, 得到 PLIP 模型下的 Sobel 算子的计算方式如下,

$$u_x = (g_7 \oplus 2 \otimes g_8 \oplus g_9) \ominus (g_1 \oplus 2 \otimes g_2 \oplus g_3), \quad (19)$$

$$u_y = (g_3 \oplus 2 \otimes g_6 \oplus g_9) \ominus (g_1 \oplus 2 \otimes g_4 \oplus g_7), \quad (20)$$

$$u_{45} = (g_6 \oplus 2 \otimes g_9 \oplus g_8) \ominus (g_2 \oplus 2 \otimes g_1 \oplus g_4), \quad (21)$$

$$u_{135} = (g_2 \oplus 2 \otimes g_3 \oplus g_6) \ominus (g_4 \oplus 2 \otimes g_7 \oplus g_8)。 \quad (22)$$

\hat{g}_1	\hat{g}_2	\hat{g}_3
\hat{g}_4	\hat{g}_5	\hat{g}_6
\hat{g}_7	\hat{g}_8	\hat{g}_9

图 6 3 pixel \times 3 pixel 区域

Fig. 6 3 pixel \times 3 pixel area

由上述计算的四个方向的梯度可以得到该像素点在水平和垂直方向上总的梯度分别为

$$U_x = u_x \oplus \frac{1}{2} \otimes u_{45} \ominus \frac{1}{2} \otimes u_{135}, \quad (23)$$

$$U_y = u_y \oplus \frac{1}{2} \otimes u_{45} \oplus \frac{1}{2} \otimes u_{135}。 \quad (24)$$

因此, 最终的梯度和梯度方向角分别为

$$U = U_x \oplus U_y, \quad (25)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{U_x}{U_y}\right)。 \quad (26)$$

为了检验本文梯度算子的性能, 首先将本文的梯度算子、文献[14]中 LIP 模型下的 Sobel 梯度算子和传统的 Sobel 梯度算子对测试图像进行处理得到对应的梯度图像, 然后利用文献[15]中的品质衡量指标 F 对梯度图像进行评价, 其中衡量指标 F 的定义为

$$F = \frac{1}{\max\{N_1, N_A\}} \sum_{k=1}^{N_A} \frac{1}{1 + \omega + d^2(k)}, \quad (27)$$

式中: N_1 为实际边缘的个数; N_A 为检测到的边缘个数; $d(k)$ 为第 k 条实际边缘到被检测到的边缘的距离; ω 为比例常数通常设定为 1/9。 F 越大代表性越好, 由于该方法只能对已知实际边缘的图像进行评价, 因此, 本文选取了一组已知实际边缘的人工合成图像进行分析, 图 7 即为利用三种梯度算子得出的梯度图像对比结果。

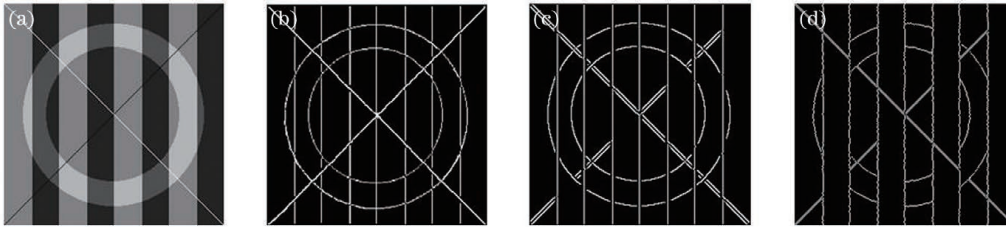


图 7 梯度图像对比结果。(a)测试图像;(b)本文算法梯度图;(c)文献[14]算法梯度图;(d)传统 Sobel 算法梯度图

Fig. 7 Gradient image comparison results. (a) Test image; (b) gradient image of proposed algorithm; (c) gradient image of Ref. [14] algorithm; (d) traditional Sobel algorithm gradient image

图 7(b)~(d)经上述衡量指标 F 测得的值分别为 0.9457、0.8196、0.7458。从获得的直观梯度图像和品质衡量指标值上看, 经本文基于 PLIP 模型的四方向 Sobel 梯度算子所得到的梯度更为精准, 对边缘的定位更加准确。

3.2 结合 Canny 算子进行边缘提取

Canny 边缘检测算子是边缘检测中最常用的一种, 也是公认的性能优越边缘检测算子。Canny^[16]提出了边缘检测算子优劣评判的三条标准:

- 1) 较高的检测率, 检测算子只对边缘进行响应, 不漏检任何边缘, 也不应将非边缘标记为边缘。
- 2) 精准的定位, 检测到的边缘与实际边缘之间的距离要尽可能小。
- 3) 明确的响应, 保证对每一条边缘只有一次响应, 最大化地抑制虚假边缘响应。

利用 Canny 算子进行边缘提取主要分 4 步进行:

- 1) 去噪声。传统的 Canny 算子是利用高斯函

数对图像进行平滑滤波,但是控制平滑程度的高斯滤波分布参数 σ 需要人工设定, σ 设定较大时,能有效地抑制噪声,但是会影响边缘的准确定位;当 σ 设定较小时,边缘的定位精度会提高,但抑制噪声能力降低。因此在实际情况中很难找到准确的 σ 值,同时利用高斯滤波很难去除椒盐噪声。因此,为了有效去除噪声,同时不对图像边缘产生较大影响,本文采用文献[2]的自适应中值滤波器对图像进行去噪。

2) 梯度值与方向角的计算。利用上述基于 PLIP 模型下四个方向的 Sobel 算子推导出的新梯度代替传统 Canny 算子的梯度对图像进行边缘检测。

3) 非极大值抑制。根据 Canny 关于边缘算子性能的评价标准,边缘只允许有一像元的宽度,但经过梯度算子滤波后,图像的边缘粗细是不一致的。非极大值抑制就是将那些在梯度方向具有最大梯度值的像元作为边缘像元保留,将其他像元删除。

4) 双阈值检测边缘。传统的 Canny 双阈值算法是在经过非极大值抑制的图像中寻找最终的边缘点,双阈值选择需要根据图像梯度分布的具体情况人工设定高阈值和低阈值,对于边缘强度不同的图像,用同一组高、低阈值分割,效果相差很大,因此,对边缘强度分布不同的图像,适应性较差^[17]。本文利用大津法(OTSU)^[18]自适应地计算出非极大值抑制后梯度图像的最佳分割阈值,将该阈值作为算法的高阈值 T_h ,低阈值 T_l 设定为高阈值的一半,解决了传统 Canny 算法需人工设定双阈值,适应性差的问题。

4 实验仿真与分析

4.1 实验平台介绍

本文利用微光实验平台获取实验图像,该实验平台的实物图如图 8 所示,内部结构如图 9 所示。其中多像素光子计数器(MPPC)在光照极低的环境下具有良好的光子计数能力,可以实现在 10^{-4} lx 及更低的光照环境下对实物物体的扫描探测;光学成像结构中主要包括镜头和遮光罩,目标物体可以通过该光学结构在镜头后方形形成一个可以被 MPPC 扫描的像面;二维导轨可以进行水平和垂直方向的运动,将 MPPC 探测器固定在二维导轨上进行扫描探测;步进电机是用来带动二维导轨运行的,可以通过计算机对其进行参数设定改变步进电机的运行方式进而改进二维导轨上的 MPPC 的扫描轨迹;宽量程照度计是用来测量整个实验平台内部环境的光照

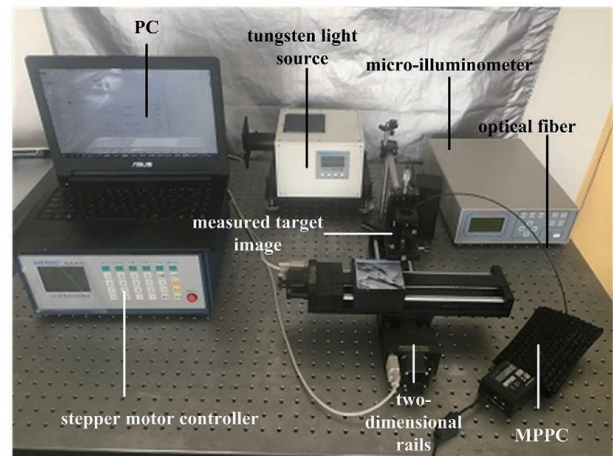


图 8 实验平台实物图

Fig. 8 Image of real experimental platform

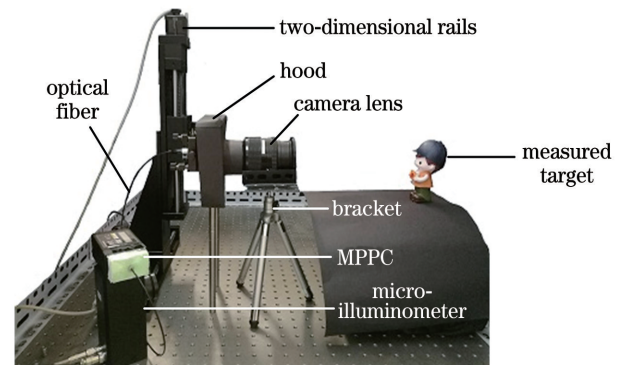


图 9 实验平台内部结构

Fig. 9 Internal structure of the experimental platform

大小情况;钨灯光源可以给实验环境提供不同的光照方向和大小,用来模拟预设环境;光纤的作用是把 MPPC 扫描得到的信息数据传输给计算机,通过计算机对数据进行处理最终生成被测物体的二维图像。实验平台的具体原理如图 10 所示。

基于该实验平台通过调整钨灯光源的光照强度和对目标物体的照射方向来实现低照度和场景光不均匀的光照环境,然后探测获得如图 11 所示的三组被测目标图像。

由于 MPPC 探测器本质上是一个固态半导体光探测器件,主要由多个工作在盖革模式的雪崩型光电二极管(Geiger-model APD)组成,当 APD 处于盖革模式时会产生各种噪声影响所探测物体的成像效果^[19]。因此,通过该平台获取到的被测目标图像中会含有复杂的噪声。

从图 11 中也可以看出,所得的三组被测目标比较模糊,夹杂着大量噪声,有部分目标信息与噪声信息难以区分。从中也可以观察到图像整体较暗,图像中有部分区域相对较亮,部分区域相对较暗,这也

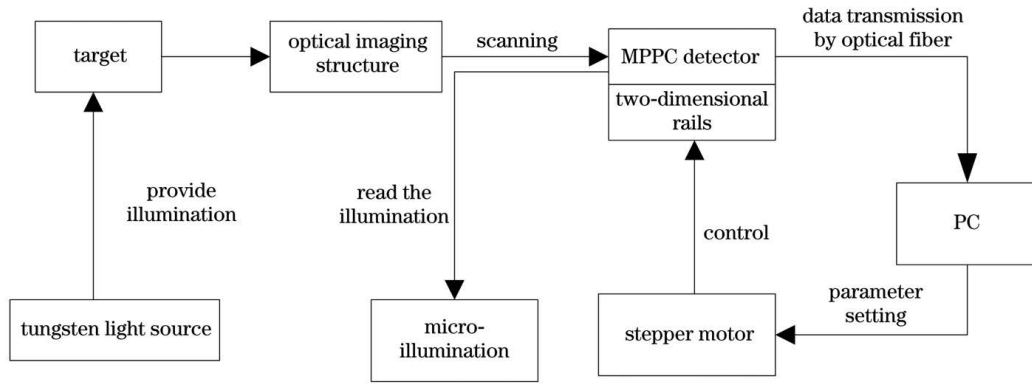


图 10 实验平台原理框图

Fig. 10 Principle block diagram of experimental platform

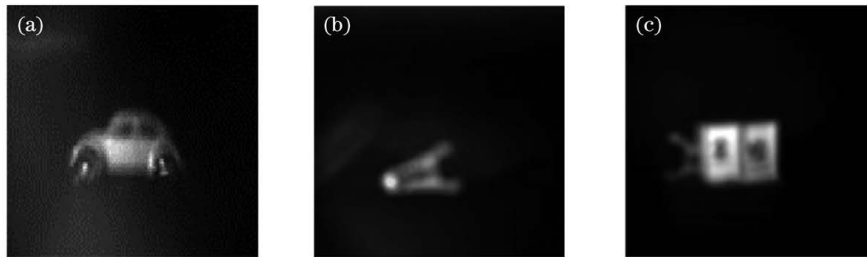


图 11 被测目标图像。(a)小车图像;(b)三角底座图像;(c)三角底座与号牌组合图像

Fig. 11 Image of measured target. (a) Car image; (b) triangle base image; (c) triangle base and number plate combination image

说明该实验平台成功模拟了低照度和场景光不均匀的环境条件。上述的这些问题都大大增加了对这三组图像的边缘进行精准定位和检测的难度。

4.2 算法处理结果和对比分析

选取图 11 中的小车图像对本文算法的处理过程进行分析,处理结果如图 12 所示,图 12(a)为原图,图 12(b)为经过自适应滤波处理后的结果,有

效地减少了原图中的大量噪声,同时又保留了图像的大部分细节信息。经过本文梯度算子处理过后获得的梯度图像如图 12(c)所示,图中含有非边缘的背景噪声,部分边缘粗细不一致。再通过梯度图像进行非极大值抑制和阈值分割,去除梯度图像中的无关边缘,最终得到的边缘检测图像如图 12(d)所示。

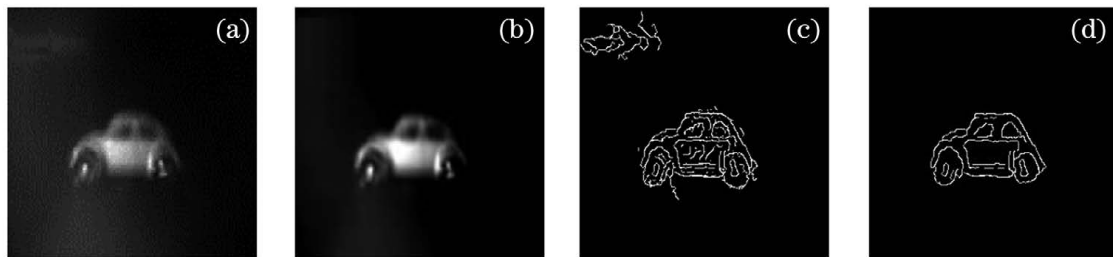


图 12 算法流程结果。(a)原图;(b)滤波后的图像;(c)梯度图像;(d)最终结果图像

Fig. 12 Results of algorithm flow. (a) Original image; (b) filtered image; (c) gradient image; (d) final result image

为验证本文算法的有效性,对所得实验图像分别进行边缘检测,并与传统的 Canny 算子检测算法、Sobel 算法和文献[14]算法的边缘检测结果进行对比。其中在对传统 Canny 算法与 Sobel 算法选取阈值时,当选取的阈值过大时,会造成漏检太多真实边缘、降低边缘的连接性,当选取的阈值

过小时,会错检过多的非边缘噪声,通过对本文实验图像进行仿真分析比较可知,当 Canny 算法的阈值选为 0.5, Sobel 算法的阈值选为 0.8 时,会获得边缘连接性较好,错检率较低,同时非边缘噪声相对较少的边缘图像。边缘检测的结果对比如图 13 所示。

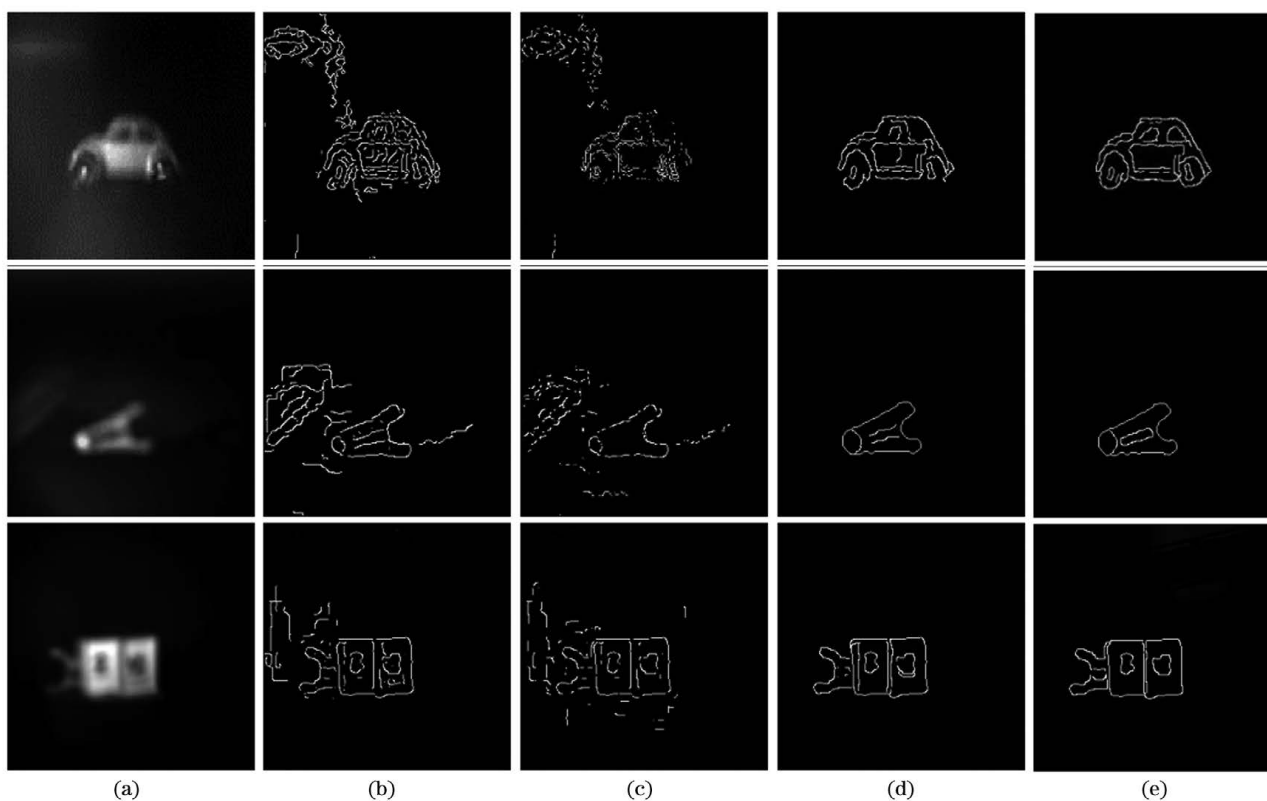


图 13 边缘检测结果对比。(a)原图;(b)传统 Canny 算法;(c)Sobel 算法;(d)文献[14]算法;(e)本文算法

Fig. 13 Comparison of edge detection results. (a) Original image; (b) traditional Canny algorithm; (c) Sobel algorithm; (d) Ref. [14] algorithm; (e) proposed algorithm

由于场景光不均匀和平台器件的原因,获取的图像中有许多光斑和噪声,从图 13(b)和(c)中可以看出,经过传统 Canny 算法和 Sobel 算子检测出的边缘中引入了大量的非边缘噪声,无法完整提取图像背景与目标物体对比度低的区域的边缘,丢失了部分边缘细节信息,检测出的边缘连续性较差且有明显间断。图 13(d)为文献[14]算法对三组被测目标图像的边缘检测结果,减少了无关的背景噪声,提高了边缘的连接性,但对小车轮胎部分和三角底座中心空洞部分的边缘也未能完

整检测出来,而图 13(e)中由本文算法所提取的边缘轮廓更加完整且连续性更好,对噪声的抑制能力更强。

用 Matlab 8.3 在 CPU 为 2.3 GHz 的计算机上进行仿真,得到的算法运行时间如表 1 所示。从表 1 可以看出 Sobel 算法的运行时间最短,本文算法和文献[14]算法的运行时间相差不多,但较长于 Canny 算法的运行时间,这是由于本文算法的基本运算是基于指数和对数的运算,导致了运行时间有所增加。

表 1 计算时间对比

Table 1 Comparison of calculation time

unit: s

Picture name	Algorithm			
	Traditional Canny	Sobel	Ref. [14]	Proposed algorithm
Car	1.148	0.438	1.834	2.683
Triangle base	0.876	0.334	1.423	2.376
Base and number plate	0.852	0.339	1.372	2.215

为了进一步客观地比较新算法的性能,本文选取文献[20]所提出的边缘评价方法对算法进行对比,该方法不需要提供标准边缘图就可以进行评价,

分别从线型连接程度、错检率和漏检率 3 个方面对边缘检测结果图像进行边缘评价^[20]。设线型连接程度参数^[20]为 L_c ,错检率^[20]为 N ,漏检率^[20]为 F ,

定义综合评价度量 M_e 为

$$M_e = \alpha L_e + \beta(1 - N) + \gamma(1 - F), \quad (28)$$

式中: α 、 β 和 γ 是评价加权系数且 $\alpha + \beta + \gamma = 1$, 加权系数表示不同评价指标对评价度量的影响程度。 M_e 越接近 1, 表示算法的性能越好。该方法不需要提供标准边缘图就可以进行评价。

选取图 11 中的小车图像作为评价图像, 分别对传统 Canny 算法、Sobel 算法、文献[14]算法和本文算法的边缘检测结果进行边缘评价, 评价系数的取值分别为 $\alpha = 0.3$ 、 $\beta = 0.4$ 、 $\gamma = 0.3$, 4 种算法的性能评价如表 2 所示。

表 2 算法性能评价

Table 2 Evaluation of algorithm's performance

Algorithm	L_e	$1 - N$	$1 - F$	M_e
Traditional Canny	0.845	0.694	0.834	0.781
Sobel	0.716	0.741	0.723	0.728
Ref. [14] algorithm	0.894	0.872	0.886	0.883
Proposed algorithm	0.932	0.905	0.912	0.915

由表 2 可以看出, 运用本文算法提取的边缘线型连接程度较好, Sobel 算法的线型连接程度却很差, 正如图 11(c) 所示边缘线不连续现象严重, 本文算法在错检率和漏检率上相较于其他 3 种算法有明显降低, 最后根据综合评价度量来看, 本文算法的效果是最佳的。

5 结 论

针对低照度和场景光不均匀条件下图像的边缘检测过程中存在无法有效抑制目标物体与图像背景中的非边缘噪声, 不能实现较高边缘检测率等问题, 提出了一种基于 PLIP 模型的边缘检测算法。实验结果表明, 该算法相较于传统的边缘检测算法和基于 LIP 模型的 Sobel 算法对低照度和场景光不均匀条件下的图像能检测到较多的真实边缘, 对非边缘的噪声抑制程度高, 最显著的是该算法极大地减少了无关的背景边缘, 能有效地检测出目标物体与图像背景对比度低的区域的边缘, 提取更多的边缘信息, 获得更完整更连续的边缘图像轮廓。

参 考 文 献

[1] Li Q Z, Liu Y. Image weak edge detection algorithm based on improved Canny operator[J]. Application Research of Computers, 2020, 37(S1): 361-363.
李庆忠, 刘洋. 基于改进 Canny 算子的图像弱边缘

检测算法[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(S1): 361-363.

- [2] Duan S L, Yin C C, Li D W. Improved adaptive Canny edge detection algorithm[J]. Computer Engineering and Design, 2018, 39(6): 1645-1652.
段锁林, 殷聪聪, 李大伟. 改进的自适应 Canny 边缘检测算法[J]. 计算机工程与设计, 2018, 39(6): 1645-1652.
- [3] Xu Z J, Yang L, Gan B. Color image edge detection based on adaptive vector total variation and color difference[J]. Computer Engineering and Design, 2018, 39(6): 1691-1696.
徐兆佳, 杨莉, 甘斌. 向量总变分耦合色彩差异的图像边缘提取算法[J]. 计算机工程与设计, 2018, 39(6): 1691-1696.
- [4] Hua C J, Xiong X M, Chen Y. Feature extraction of workpiece circular arc contour based on Sobel operator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 021011.
化春键, 熊雪梅, 陈莹. 基于 Sobel 算子的工作圆弧轮廓特征提取[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 021011.
- [5] Fu Z H, Song S Y, Wang X J, et al. Imaging the topology of grounding grids based on wavelet edge detection[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(4): 1-8.
- [6] Zhang Z J, Yang F B. Road extraction algorithm for remote sensing images based on improved expectation-maximization clustering[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(6): 061005.
张宗军, 杨风暴. 基于改进最大期望聚类的遥感影像道路提取算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(6): 061005.
- [7] Zhang S, Li Y P. Retinal vascular image segmentation based on improved HED network[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(6): 0610002.
张赛, 李艳萍. 基于改进 HED 网络的视网膜血管图像分割[J]. 光学学报, 2020, 40(6): 0610002.
- [8] Qu Z, Wang S Y, Liu L, et al. Visual cross-image fusion using deep neural networks for image edge detection[J]. IEEE Access, 2019, 7: 57604-57615.
- [9] Jourlin M, Pinoli J C. A model for logarithmic image processing[J]. Journal of Microscopy, 1988, 149(1): 21-35.
- [10] Deng G, Cahill L W. The logarithmic image processing model and its applications[C]// Proceedings of 27th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, November 1-3, 1993, Pacific Grove, CA, USA. New York: IEEE Press, 1993: 1047-1051.
- [11] Zhu R F, Jia H G, Wang C, et al. Enhancement of

- image detail and contrast by parameterized logarithmic framework[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(4): 1064-1070.
- 朱瑞飞, 贾宏光, 王超, 等. 应用参数化对数模型增强图像细节及对比度[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(4): 1064-1070.
- [12] Panetta K A, Wharton E J, Agaian S S. Logarithmic edge detection with applications[J]. *Journal of Computers*, 2008, 3(9): 11-19.
- [13] Wharton E, Agaian S, Panetta K. A logarithmic measure of image enhancement[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6250: 62500P.
- [14] Deng G, Pinoli J C. Differentiation-based edge detection using the logarithmic image processing model[J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 1998, 8(2): 161-180.
- [15] Bao P, Zhang L, Wu X L. Canny edge detection enhancement by scale multiplication[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(9): 1485-1490.
- [16] Canny J. A computational approach to edge detection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(6): 679-698.
- [17] Li C Y, Chen G X, Ding Y J. Improved edge detection algorithm for canny operator[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2020, 41(8): 1758-1762.
- 李长有, 陈国玺, 丁云晋. 改进 Canny 算子的边缘检测算法 [J]. *小型微型计算机系统*, 2020, 41(8): 1758-1762.
- [18] Hua C J, Guo J H, Chen Y. Image segmentation for mobile phone film defects under low contrast [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(20): 201013.
- 化春键, 郭金花, 陈莹. 低对比度下手机膜缺陷图像的分割研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(20): 201013.
- [19] Wang X, Yin L J, Gao M L, et al. De-noising method of photon counting image based on new symbol function and blind source separation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(10): 101103.
- 王炫, 尹丽菊, 高明亮, 等. 基于新符号函数与盲源分离的光子计数图像去噪方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(10): 101103.
- [20] Yang X, Liang D Q. A new edge evaluation using region homogeneous measure [J]. *Journal of Image and Graphics*, 1999, 4(3): 234-238.
- 杨烜, 梁德群. 一种基于区域一致性测度的边缘评价方法 [J]. *中国图象图形学报*, 1999, 4(3): 234-238.