

基于 Scharr 算子的计算鬼成像边缘提取技术

姚昱, 郑洋, 程子熒, 高超, 王晓茜**, 姚治海*

长春理工大学物理学院, 吉林 长春 130022

摘要 经典的边缘提取算法在实际应用中由于成像质量不高而被限制, 基于鬼成像的边缘提取技术可对待测物实现高信噪比的边缘成像。基于此, 提出一种基于 Scharr 算子的计算鬼成像边缘提取技术。Scharr 算子具有低的计算复杂度和较小的计算量, 可以更有效处理图像, 将 Scharr 算子作用于散斑生成一组全新的散斑函数, 对于 Scharr 算子模板作用于散斑移动中存在的边缘提取结果在某方向信息缺失的问题进行改进, 对算子模板正负进行转换, 生成新的算子模板, 将新生成的算子模板运用于移动散斑使其生成新的照明散斑, 从而实现对边缘提取结果各方向信息的补充。并根据计算鬼成像基本方法在理论上和实验上对未知图像的边缘进行提取, 仿真与实验结果表明, 所提方法可以获得完整清晰的待测物边缘。

关键词 计算鬼成像; 边缘提取; Scharr 算子; 移动散斑

中图分类号 O431.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232250

Edge Detection Technology Based on Computational Ghost Imaging Using Scharr Operator

Yao Yu, Zheng Yang, Cheng Ziyi, Gao Chao, Wang Xiaoqian**, Yao Zhihai*

College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China

Abstract The conventional edge detection encounters limitations in practical applications due to its low imaging quality. By contrast, the edge detection encounters based on ghost imaging can achieve a high signal-to-noise ratio for the edge imaging of object. Accordingly, this paper proposes a computational ghost imaging based on the edge detection using the Scharr operator. The Scharr operator has low computational complexity, enhancing its effectiveness for image processing. Hence, a new set of speckle functions is generated by applying the Scharr operator to speckle. When the Scharr operator template is applied to speckle movement, information will miss along a certain direction in edge extraction results. To address this problem, a new operator template is generated by converting the positive and negative values of the operator template. Thus, a new illumination speckle is created by applying the newly generated operator template to the moving speckle, thereby obtaining complete information along all directions in the edge detection results. Additionally, based on the basic method of computational ghost imaging, edges of unknown images are extracted theoretically and experimentally. The simulation and experimental results show that the proposed method can obtain complete and clear edges of the tested object.

Key words computational ghost imaging; edge detection; Scharr operator; speckle-shifting

1 引言

鬼成像(ghost imaging)又称关联成像(correlated imaging), 其原理为二阶关联函数。Pittman 等^[1]设计的通过纠缠的双光子对实现的纠缠双光子成像的出现标志着鬼成像技术的正式诞生。计算鬼成像最早是由 Shapiro^[2]于 2008 年提出的一种鬼成像方案, 与传统鬼

成像方案的区别在于, 计算鬼成像可以根据人为需求, 功能化地设计各种独特的散斑函数实现对成像质量和成像速度的提升, 在遥感^[3-4]、医学成像^[5]、光学加密^[6-8]、目标追踪^[9]和无透镜成像^[10-11]等领域有着极为重要的研究价值。在过去的十多年中, 为了提升计算鬼成像技术的成像质量和速度, 人们的研究重点主要集中在重构算法设计和照明散斑的创新设计上^[12-14]。

收稿日期: 2023-10-09; 修回日期: 2023-10-30; 录用日期: 2023-11-08; 网络首发日期: 2023-11-17

基金项目: 吉林省自然科学基金(YDZJ202101ZYTS030)

通信作者: *yaozh@cust.edu.com; **xqwang21@163.com

在许多成像应用中,只需获取物体边缘,边缘提取在传统的数字图像处理中具有重要的地位,它基于提取对象的透射率或反射率的急剧变化来检测对象的边缘^[15-16]。对图像进行边缘提取显著减少了成像过程中所需的数据量,保留了待检测图像的边缘信息或者轮廓信息,被广泛应用在机器视觉、安全检查等方面。尽管目前的边缘提取已经有较成熟的计算方法,但在实际应用中由于环境噪声干扰,难以实现高质量成像。并且目前已有的经典边缘提取方法需要先对待测目标成像,在成像的基础上提取边缘,导致边缘提取效率较低。基于计算鬼成像的边缘提取方法^[17-20]可以有效地降低采样次数进而提升整体的成像速度,同时提高检测精度,对于计算鬼成像在生物医学领域(例如细胞形态学成像研究)、机器视觉、安全检查、工业生产相关领域的进一步应用具有十分重要的意义。

基于鬼成像技术发展起来的梯度鬼成像(GGI)边缘提取技术意在只保留图像边缘信息略去非边缘信息,通过得到的图像边缘信息对图像进行识别,设计特殊的移动散斑照射物体,利用计算鬼成像方法恢复得到图像边缘信息,该技术可以在图像未知的情况下得到图像边缘信息,略去了图像非边缘信息能够有效降低成像过程中采样次数,极大提升成像速度。该技术最早是由 Liu 等^[17]首次提出,通过移动随机散斑替代传统边缘提取方法移动图像进行边缘提取。为了进一步提升边缘提取质量, Mao 等^[18]提出基于 Sobel 算子的计算鬼成像边缘提取方案,与其他传统算子的对比表明, Sobel 算子具有较好的边缘提取性能。2018 年, Ren 等^[19]设计了一种可变大小的 Sobel 算子边缘提取方案,但该方案在构建纹理复杂图像时会存在不连续的问题,且负系数散斑在实际系统中难以实现。对此, Chen 等^[20]报道了一种基于 Kirsch 算子的 GGI,该方案适用于具有复杂纹理的图像边缘提取,提高了成像质量,并具有较好的抗噪声特性。然而采用该类方法进行边缘提取时会大幅度增加投影照明图案的次数,使得采集时间过长,时效性差。因此,有必要寻找一种更简易的方案来提高边缘提取效率^[21]。

Sobel 算子在图像处理中是较为常用的算子模板,在边缘提取中应用广泛。Schar 算子是 Sobel 算子的优化, Schar 算子与其他常用的图像处理算子有很大的不同,它可以更精确地表征图像的局部像素梯度,从而更精确地检测出图像的边缘特征。此外, Schar 算子还具有低的计算复杂度和较小的计算量,可以更有效地处理图像。

基于此,本文提出一种基于 Schar 算子的计算鬼成像边缘提取技术,将散斑按照算子模板的方式分别移动生成新的照明散斑,并且针对单一模板进行检测后存在的某方向信息缺失问题进行改进,将其由 2 个算子模板改进为 4 个算子模板,并将其运用于散斑移动,使用新生成的照明散斑照射待测物,可以有效提高

成像速度以及完整精确提取出图像边缘。

2 理论分析

2.1 计算鬼成像理论模型

计算鬼成像实验装置如图 1 所示,大部分计算鬼成像模型的物理原理都基于统计加权平均的二阶关联测量这样的基本机制,根据两束光的二阶关联函数进行图像恢复:

$$G^{(2)}(x, y) = \langle I_R^n(x, y) B^n \rangle_n - \langle I_R^n(x, y) \rangle_n \langle B^n \rangle_n, \quad (1)$$

式中: $G^{(2)}(x, y)$ 为二阶关联函数; $I_R^n(x, y)$ 为第 n 次采样时的参考光强分布; B^n 为第 n 次采样时桶探测器收集到的光强值; $\langle \rangle_n$ 表示对 n 求统计平均值^[22]。

$$B^n = \sum_{x_i} \sum_{y_j} I^n(x_i, y_j) T(x_i, y_j), \quad (2)$$

式中: $I^n(x_i, y_j)$ 为 n 次采样时的信号光强分布; $T(x_i, y_j)$ 为未知对象的透射函数。

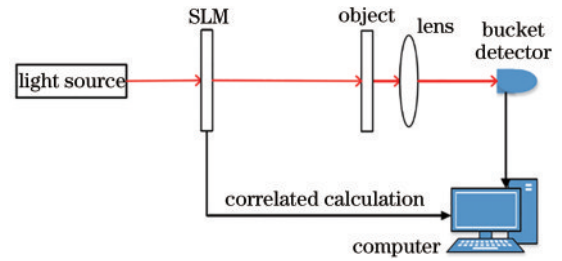


图 1 计算鬼成像实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for computational ghost imaging

2.2 边缘提取理论模型

图像边缘提取过程可以看作是一个边缘检测算符(算子/变换域)作用在图像函数上:

$$\nabla T(x_i, y_j) = \sum_{a, b} H_{ab} \cdot T(x_i, y_j), \quad (3)$$

式中: $\nabla T(x_i, y_j)$ 为图像边缘; H_{ab} 为边缘检测算符,边缘检测算符为算子总称,不同算子有不同表示形式,本文统一采用 H_{ab} 表示, a, b 分别表示算子 x, y 方向的算子模板; $T(x_i, y_j)$ 为图像函数。

图像边缘提取相当于对图像进行移动后求差分,移动后的图像与移动前图像相减得到物体边缘,微分算法是经典边缘检测中较为简单的方法,因此常用微分算法得到物体边缘信息,微分在数字图像处理中等效为差分运算。

2.3 基于传统算子的计算鬼成像边缘提取的原理及公式推导

传统的边缘提取过程需要先得到物体的图像,再使用边缘检测算法得到物体图像的边缘信息,传统图像边缘检测受限于环境噪声(椒盐噪声、高斯噪声等),难以实现高质量成像。基于计算鬼成像技术,提出一种高分辨率和较强抗噪声的新型成像方案,能够有效解决传统成像受噪声影响的问题。

基于计算鬼成像的边缘检测算法与传统算法类似,不同点在于其将边缘检测算子应用到照明图案中,然后对计算鬼成像获取的一维信号进行处理,可直接得到目标图像的梯度图,避免了先重建再边缘检测的繁琐步骤。在计算鬼成像中,采用物体不变对散斑求差分的方法,对散斑求差分相当于对散斑进行移动,最后通过二阶关联函数得到物体边缘。具体推导如下:将边缘检测算符 H_{ab} 作用于计算鬼成像得到的总的边缘信息为 $\nabla G^{(2)}(x, y)$:

$$\begin{aligned}\nabla G^{(2)}(x, y) &= \sum_{a,b} H_{ab} \cdot G^{(2)}(x, y) \\ &= \sum_{a,b} H_{ab} \cdot \langle I^n(x_i, y_j) B^n \rangle_n.\end{aligned}\quad (4)$$

边缘检测算符 H_{ab} 作用在 $G^{(2)}(x, y)$ 上,相当于边缘检测算符 H_{ab} 作用在 $\langle I^n(x, y) B^n \rangle_n$ 上,在计算鬼成像中,由于只有桶探测器得到的结果包含物体信息,因此算子对物体作用相当于对桶探测器作用,将 H_{ab} 作用在 B^n 上的值记为 C^n ,进一步对 C^n 的信息进行分析,如式(5)所示:

$$\begin{aligned}C^n &= \sum_a \sum_b H_{ab} \cdot B_{ab}^n = \\ &= \sum_a \sum_b H_{ab} \cdot \sum_{x_i, y_j} [I^n(x_i, y_j) \cdot T(x_i, y_j)] = \\ &= \sum_{x_i, y_j} I^n(x_i, y_j) \cdot \sum_a \sum_b [H_{a,b} \cdot T(x_{i+a}, y_{j+b})].\end{aligned}\quad (5)$$

桶探测器包含待测物体 $T(x_i, y_j)$ 与散斑 $I^n(x_i, y_j)$,在计算鬼成像中,我们既不知道物体图像,也无法对物体进行差分,为得到桶探测器作用后的效果,需要对散斑进行差分。因此,式(5)又可写成:

$$\begin{aligned}C^n &= \sum_a \sum_b H_{ab} \cdot B_{ab}^n = \sum_{x_i, y_j} T(x_i, y_j) \cdot \\ &= \sum_a \sum_b [H_{ab} \cdot I^n(x_{i-a}, y_{j-b})],\end{aligned}\quad (6)$$

式中, $\sum_a \sum_b [H_{ab} \cdot I^n(x_{i-a}, y_{j-b})]$ 表示根据算子 H_{ab} 设计的移动散斑函数,将待测物体右移相当于对散斑左移,以待测物右下移为例: H_{ab} 作用于待测物体后 $T(x_i, y_j)$ 变为 $T(x_{i+a}, y_{j+b})$, H_{ab} 作用于散斑后 $I^n(x_i, y_j)$ 变为 $I^n(x_{i-a}, y_{j-b})$, a, b 表示在 x, y 方向分别移动 a, b 。

$$\nabla G^{(2)}(x, y) = \langle I^n(x, y) C^n \rangle_n - \langle I^n(x, y) \rangle_n \langle C^n \rangle_n.\quad (7)$$

式(7)为重构得到的待测物边缘信息。由式(7)可知,移动图像与移动散斑效果相同,在计算鬼成像系统中,我们不移动图像,因此通过移动散斑的方法实现基于边缘检测算符的计算鬼成像边缘提取。

2.4 散斑移动方法

2.4.1 散斑移动方法简介

以模板大小为 3×3 ($m=3$) 的算子为例,需要将散斑函数移动 8 次,将未移动的散斑命名为 K_0 ,右移为

K_1 ,左移为 K_2 ,上移为 K_3 ,下移为 K_4 ,右上移为 K_5 ,左下移为 K_6 ,左上移为 K_7 ,右下移为 K_8 。

$$\begin{aligned}I(x_i, y_j) &= I^1(x_i, y_{j+1}) = I^2(x_i, y_{j-1}) = I^3(x_{i-1}, y_j) = \\ &= I^4(x_{i+1}, y_j) = I^5(x_{i-1}, y_{j+1}) = I^6(x_{i+1}, y_{j-1}) = \\ &= I^7(x_{i-1}, y_{j-1}) = I^8(x_{i+1}, y_{j+1}).\end{aligned}\quad (8)$$

散斑移动结果如图 2(a) 所示, $I(x_i, y_j)$ 为在 K_0 位置处的散斑,从 $I^1(x_i, y_{j+1})$ 到 $I^8(x_{i+1}, y_{j+1})$ 分别与图 2(a) 中的 $K_1 \sim K_8$ 相对应。选取离散余弦(DCT)散斑为主要研究散斑[图 2(b)],因此用该移动方法对离散余弦散斑进行移动,由于采样过程中散斑较大,用于观察散斑移动的方法较复杂,因此采用 10×10 的离散余弦散斑进行移动演示:随机抽取离散余弦散斑中第 40 张散斑图进行观察。离散余弦第 40 张散斑图移动过程如图 2(c)~(j) 所示。图 2(c) 中离散余弦第 40 张散斑图向右移动,对应图 2(a) 中的 K_1 ;图 2(d) 中离散余弦第 40 张散斑图向左移动,对应图中的 K_2 ;图 2(e) 中离散余弦第 40 张散斑图向上移动,对应图中的 K_3 ;图 2(f) 中离散余弦第 40 张散斑图向下移动,对应图中的 K_4 ;图 2(g) 中离散余弦第 40 张散斑图向右上移动,对应图中的 K_5 ;图 2(h) 中离散余弦第 40 张散斑图向左下移动,对应图中的 K_6 ;图 2(i) 中离散余弦第 40 张散斑图向左上移动,对应图中的 K_7 ;图 2(j) 中离散余弦第 40 张散斑图向右下移动,对应图中的 K_8 。

基于图 2 可以观察到散斑的移动方法,将该移动散斑和算子矩阵进行卷积,再将得到的散斑用于计算鬼成像边缘提取,并根据式(7)得到图像的边缘提取结果。

2.4.2 散斑按照算子模板移动

Scharr 算子^[23]的矩阵形式为

$$\mathbf{C}_x^s = \begin{bmatrix} -3 & 0 & 3 \\ -10 & 0 & 10 \\ -3 & 0 & 3 \end{bmatrix}, \mathbf{C}_y^s = \begin{bmatrix} -3 & -10 & -3 \\ 0 & 0 & 0 \\ 3 & 10 & 3 \end{bmatrix}.\quad (9)$$

将散斑按照 Scharr 算子方法移动后,有

$$\begin{aligned}I^x &= -3I^7(x_{i-1}, y_{j-1}) - 10I^3(x_{i-1}, y_j) - \\ &= 3I^5(x_{i-1}, y_{j+1}) + 3I^6(x_{i+1}, y_{j-1}) + \\ &= 10I^4(x_{i+1}, y_j) + 3I^8(x_{i+1}, y_{j+1}),\end{aligned}\quad (10)$$

$$\begin{aligned}I^y &= -3I^7(x_{i-1}, y_{j-1}) - 10I^2(x_i, y_{j-1}) - \\ &= 3I^6(x_{i+1}, y_{j-1}) + 3I^5(x_{i-1}, y_{j+1}) + \\ &= 10I^1(x_i, y_{j+1}) + 3I^8(x_{i+1}, y_{j+1}).\end{aligned}\quad (11)$$

需要指出的是:基于式(9)所得到的边缘图像的信息存在部分缺失,原因在于移动后的散斑具有负值,而仿真和实验中,负值会被自动识别为 0,因此带来了信息的丢失。为解决这一问题,将 Scharr 算子矩阵中正负位置转换,使其生成更完整的算子模板。式(9)中的 \mathbf{C}_x^s 在式(12)中写为 \mathbf{C}_{x1}^s , \mathbf{C}_y^s 在式(12)中写为 \mathbf{C}_{y1}^s ,新生成的两个 Scharr 算子模板记为 $\mathbf{C}_{x2}^s, \mathbf{C}_{y2}^s$:

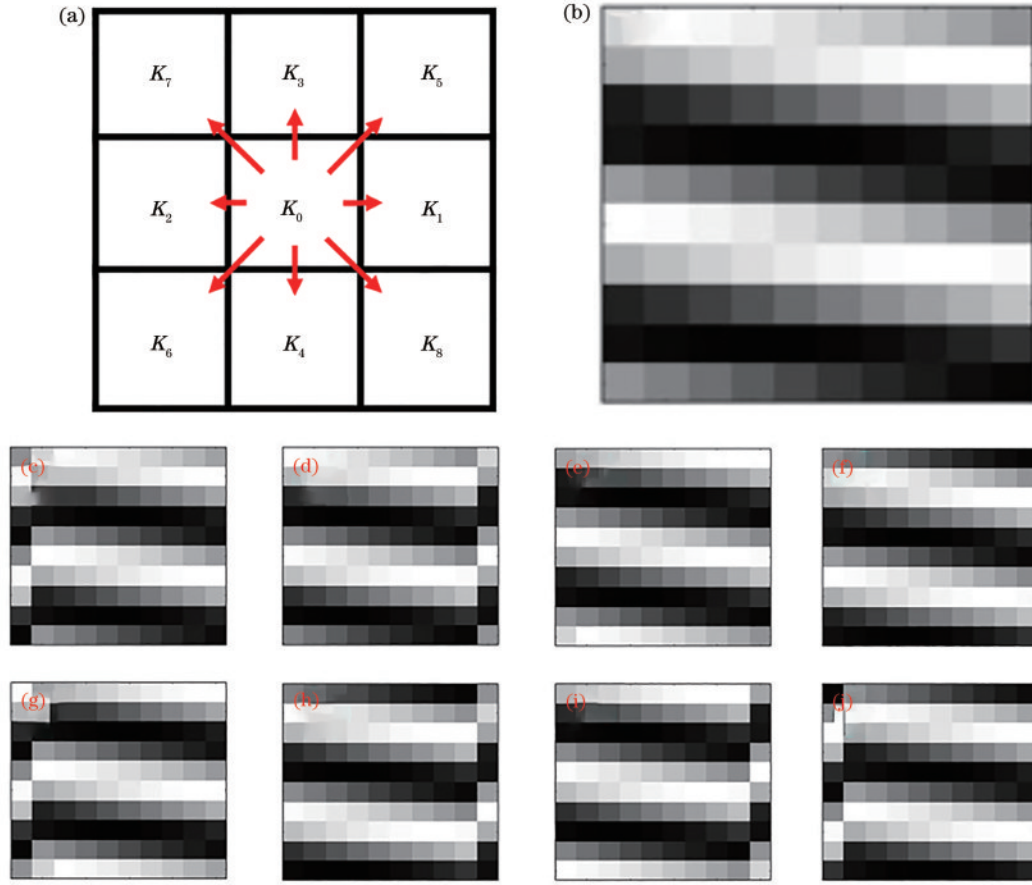


图 2 散斑移动。(a)散斑移动方式;(b)第 40 张散斑图原图,对应图中的 K_0 ;(c)~(j)第 40 张散斑图移动后的图像
Fig. 2 Speckle movement. (a) Speckle movement method; (b) original image of the 40th speckle image, corresponding to K_0 ; (c)~(j) the 40th speckle images after movement

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{C}_{x1}^S = \begin{bmatrix} -3 & 0 & 3 \\ -10 & 0 & 10 \\ -3 & 0 & 3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_{y1}^S = \begin{bmatrix} -3 & -10 & -3 \\ 0 & 0 & 0 \\ 3 & 10 & 3 \end{bmatrix} \\ \mathbf{C}_{x2}^S = \begin{bmatrix} 3 & 0 & -3 \\ 10 & 0 & -10 \\ 3 & 0 & -3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_{y2}^S = \begin{bmatrix} 3 & 10 & 3 \\ 0 & 0 & 0 \\ -3 & -10 & -3 \end{bmatrix}^\circ \end{array} \right. \quad (12)$$

将新生成的两个 Scharr 算子模板 $\mathbf{C}_{x2}^S, \mathbf{C}_{y2}^S$ 也运用于移动散斑:

$$I^{X2} = 3I^7(x_{i-1}, y_{j-1}) + 10I^3(x_{i-1}, y_j) + 3I^5(x_{i-1}, y_{j+1}) - 3I^6(x_{i+1}, y_{j-1}) - 10I^4(x_{i+1}, y_j) - 3I^8(x_{i+1}, y_{j+1}), \quad (13)$$

$$I^{Y2} = 3I^7(x_{i-1}, y_{j-1}) + 10I^2(x_i, y_{j-1}) + 3I^6(x_{i+1}, y_{j-1}) - 3I^5(x_{i-1}, y_{j+1}) - 10I^1(x_i, y_{j+1}) - 3I^8(x_{i+1}, y_{j+1}). \quad (14)$$

因此,完整的照明散斑为 $I^X I^{X2} I^Y I^{Y2}$ 。

3 仿真与实验

3.1 数据仿真结果

通过数值仿真验证所提移动方法的有效性,数值模拟由 MATLAB 软件计算。采用 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$

二进制字符“cust”和 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ 的图像“lena”作为检测对象,如图 3 所示。

图 3 为使用 Sobel 算子与 Scharr 算子对相同对象的仿真结果,选取 64×64 的离散余弦散斑为原始照射散斑,由于 Scharr 算子为 Sobel 算子的优化,将离散余弦散斑分别用未改进模板的 Sobel 算子与 Scharr 算子移动散斑的方法进行移动,形成新的照明散斑,照射待测的两幅图像,其仿真结果分别如图 3(b)、(g)、(d)、(i) 所示,从图中可以看出,以上 4 幅仿真图像在斜向上都存在信息缺失(虚线方框方向)。图 3(c)、(h)、(e)、(j) 为改进模板后的图像边缘,可以看出,改进后的模板测量得出的边缘清晰完整,恢复出大部分图像信息。

为了定量地评价边缘提取的结果,引入信噪比 (R_{SNR})^[17] 作为评价指标,其表达式为

$$R_{\text{SNR}} = \frac{\text{mean}(I_{\text{edge}}) - \text{mean}(I_{\text{background}})}{\sqrt{\text{var}(I_{\text{background}})}}, \quad (15)$$

式中: I_{edge} 与 $I_{\text{background}}$ 分别是物体边缘和背景区域中边缘检测结果的强度; $\text{var}(\cdot)$ 代表方差。

图 3 中给出了每个测量结果相应的信噪比,结果表明, Sobel 算子运用于移动散斑进行边缘提取的信噪比低于 Scharr 算子移动散斑进行边缘提取的信噪比。

除此之外,多方面对比 Sobel 算子与 Scharr 算子运用移动方法后的边缘提取结果,针对 64 pixel×64 pixel 的

图像“lena”的完整边缘提取结果选取第 5 行的归一化光强分布进行检测,结果如图 4 所示。

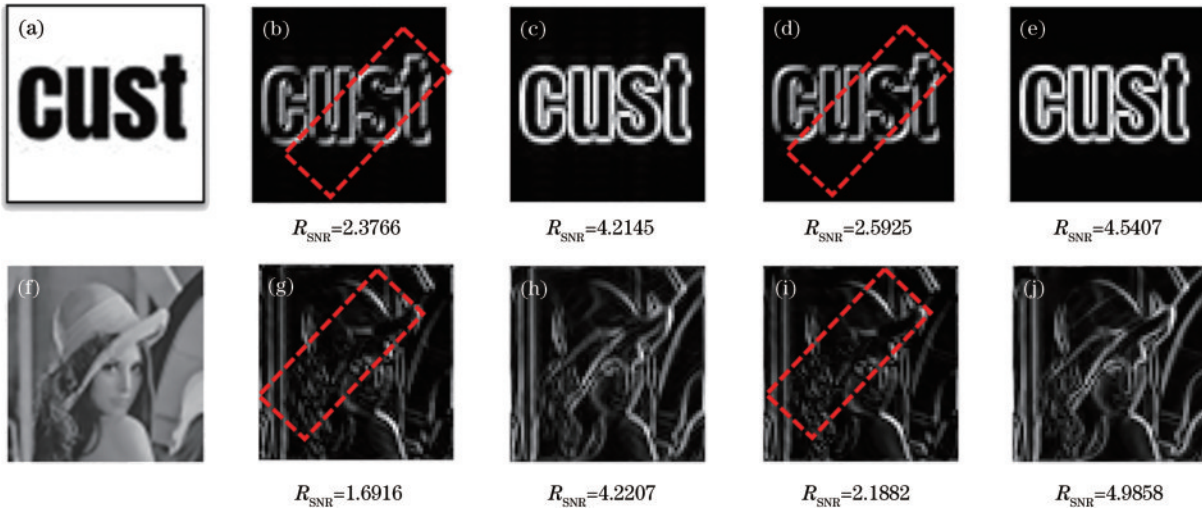


图 3 二进制字符“cust”和图像“lena”的处理结果。(a)二进制字符“cust”;(b)“cust”离散余弦散斑 Sobel 算子边缘提取仿真图;(c)改进模板后的“cust”离散余弦散斑 Sobel 算子边缘提取仿真图;(d)“cust”离散余弦散斑 Scharr 算子边缘提取仿真图;(e)改进模板后的“cust”离散余弦散斑 Scharr 算子边缘提取仿真图;(f)“lena”图像;(g)“lena”离散余弦散斑 Sobel 算子边缘提取仿真图;(h)改进模板后的“lena”离散余弦散斑 Sobel 算子边缘提取仿真图;(i)“lena”离散余弦散斑 Scharr 算子边缘提取仿真图;(j)改进模板后的“lena”离散余弦散斑 Scharr 算子边缘提取仿真图

Fig. 3 The processing results of binary character “cust” and image “lena”. (a) Binary character “cust” image; (b) “cust” simulation image based on DCT speckle and Sobel operator; (c) “cust” simulation image based on DCT speckle and improved template Sobel operator; (d) “cust” simulation image based on DCT speckle and Scharr operator; (e) “cust” simulation image based on DCT speckle and improved template Scharr operator; (f) “lena” image; (g) “lena” simulation image based on DCT speckle and Sobel operator; (h) “lena” simulation image based on DCT speckle and improved template Sobel operator; (i) “lena” simulation image based on DCT speckle and Scharr operator; (j) “lena” simulation image based on DCT peckle and improved template Scharr operator

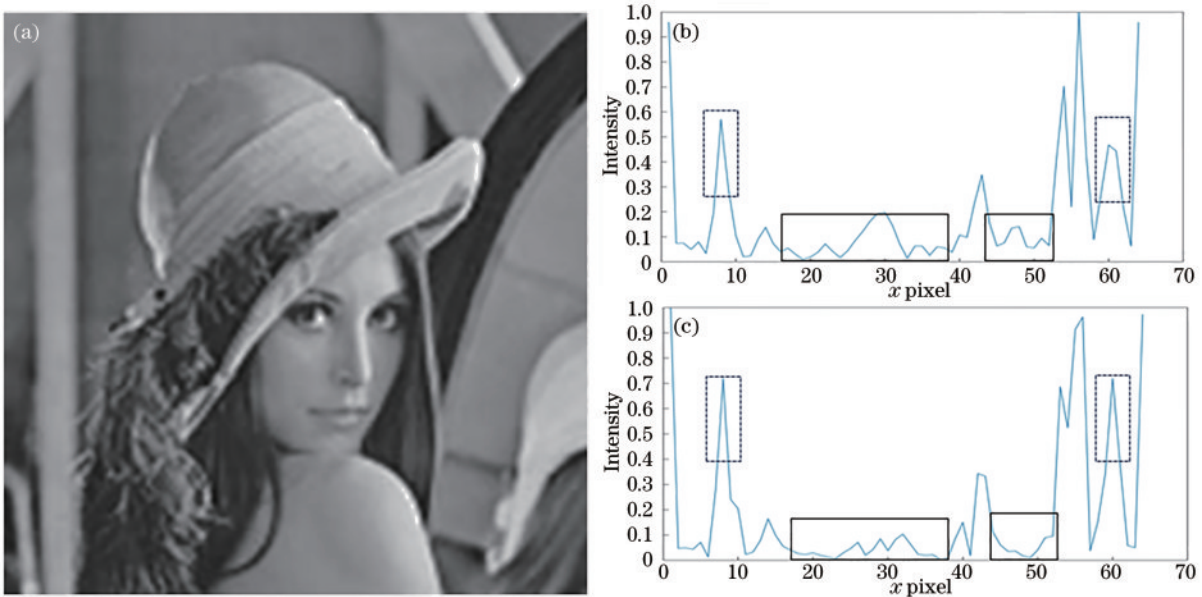


图 4 “lena”图像利用 Sobel 算子与 Scharr 算子的归一化强度分布结果图。(a)“lena”图像;(b)改进模板后的 Sobel 算子边缘提取“lena”的第 5 行归一化强度分布图;(c)改进模板后的 Scharr 算子边缘提取“lena”的第 5 行归一化强度分布图

Fig. 4 Normalized intensity distribution results of the “lena” image using Sobel and Scharr operators. (a) “lena” image; (b) “lena” image normalized using the improved template Sobel operators for intensity distribution results of edge detection line 5; (c) “lena” image normalized using the improved template Scharr operators for intensity distribution results of edge detection line 5

基于 Sobel 与 Scharr 算子运用散斑移动方法与模板改进方法后进行边缘提取,其结果中第 5 行的归一化强度分布分别如图 4(b)、(c) 所示,可以看出, Scharr 算子进行边缘提取时对光强反映更明显,如虚线框所示,同时可以有效平滑噪声,如实线框所示。

为观察所提 Scharr 算子运用于散斑移动方法随着投影次数增加时的边缘提取效果的变化情况,选取信噪比作为评价指标。采用 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ 二进制字符“cust”和 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ 二进制字符“GI”作为检测对象,采样数依次为 1024、2048、3072,以及 4096(完全采样),结果如图 5 所示。

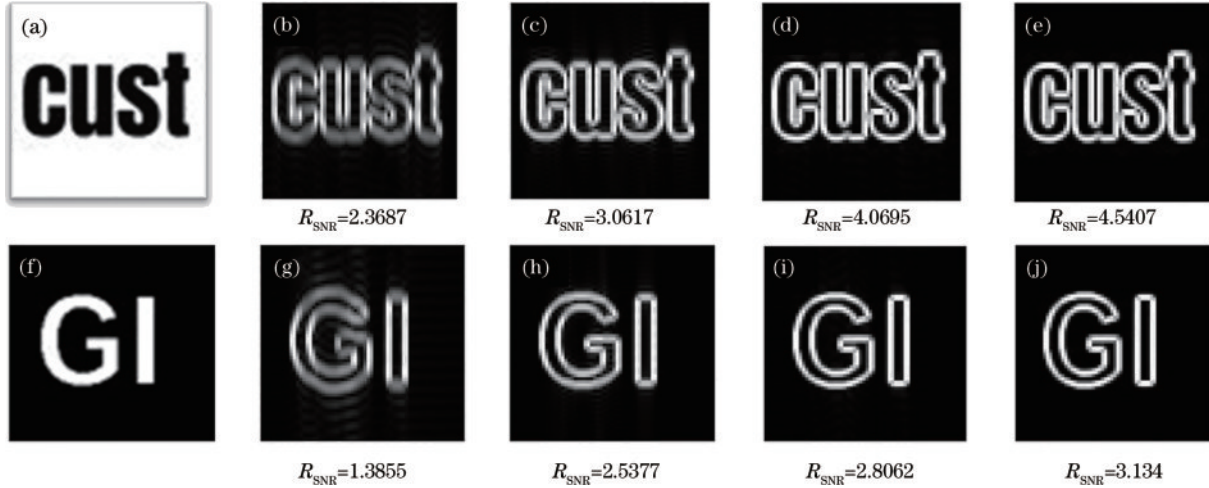


图 5 “cust”和“GI”在不同采样数时的处理结果。(a) “cust”原图;(b) “cust”欠采样 1024 次边缘提取结果仿真图;(c) “cust”欠采样 2048 次边缘提取结果仿真图;(d) “cust”欠采样 3072 次边缘提取结果仿真图;(e) “cust”全采样 4096 次边缘提取结果仿真图;(f) “GI”原图。(g) “GI”欠采样 1024 次边缘提取结果仿真图;(h) “GI”欠采样 2048 次边缘提取结果仿真图;(i) “GI”欠采样 3072 次边缘提取结果仿真图;(j) “GI”全采样 4096 次边缘提取结果仿真图

Fig. 5 The processing results of “cust” and “GI” at different sampling numbers. (a) Original image of “cust”; (b) simulation diagram of 1024 undersampling edge extraction results for “cust”; (c) simulation diagram of 2048 undersampling edge extraction results for “cust”; (d) simulation diagram of 3072 undersampling edge extraction results for “cust”; (e) simulation diagram of 4096 full sampling edge extraction results for “cust”; (f) original image of “GI”; (g) simulation diagram of 1024 undersampling edge extraction results for “GI”; (h) simulation diagram of 2048 undersampling edge extraction results for “GI”; (i) simulation diagram of 3072 undersampling edge extraction results for “GI”; (j) simulation diagram of 4096 full sampling edge extraction results for “GI”

从图 5 可以看出, Scharr 算子的计算鬼成像边缘提取技术的采样次数低于全采样的一半时边缘提取的效果不佳,采样数为全采样的 $3/4$ 时,欠采样的边缘提取效果与全采样的边缘提取效果相近,但欠采样的信噪比低于全采样,因此应用过程中若无信噪比需求只需达到边缘提取的目的,则可用 $3/4$ 欠采样代替全采样以缩短采样时间。

3.2 实验结果

对该方案进行实验验证,图 1 为计算鬼成像实验装置图,将新生成的散斑用于照射待测物,由桶探测器收集透射光,最后由计算机进行二阶关联运算得出物体边缘。对镂空待测物“C”进行基于 Scharr 算子的计算鬼成像边缘提取实验,首先将按照 Scharr 算子模板移动后的离散余弦散斑导入实验系统,使用 64×64 的离散余弦散斑,采用数字投影仪将新生成的散斑投射到待测物体上,使用会聚透镜(焦距为 50 mm)收集光束,通过桶探测器收集投射光强值。测量次数为 $64 \times 64 \times 4$,最后采用二阶关联运算重建待测物边缘。

首先使用未改进模板的 Scharr 算子模板进行散斑

移动,将移动后的散斑照射待测物,结果如图 6(c) 所示,可以看出,原始的 Scharr 散斑照射后的重构结果存在较多斜向上的信息缺失,且重构边缘不连续,验证了未改进的 Scharr 算子模板运用于移动散斑后,信息存在缺失,其原因是算子模板存在负值,运用于移动散斑后,该散斑也存在负值,散斑对应于光强变化,但在实际中光强无负值,因此在仿真与实验过程中,散斑的负值被自动识别为 0,照射散斑存在光强信息缺失,因此散斑照射后重构的待测物边缘信息也存在信息缺失。使用改进模板后的 Scharr 算子进行散斑移动,并将移动后的散斑照射待测物,结果如图 6(d) 所示。该图很好地展示了使用改进模板后的 Scharr 算子进行散斑移动的计算鬼成像边缘提取实验结果,可以看出,所提方法相较于未改进的 Scharr 算子模板的实验结果,可以有效提取待测物边缘信息,且边缘完整清晰且连续。图 6(e) 为使用所提出方法改进后的 Sobel 算子边缘提取实验结果,比较图 6(d)、(e) 可明显看出, Scharr 算子的边缘提取结果比 Sobel 算子的边缘提取结果噪声更小,且边缘更清晰。

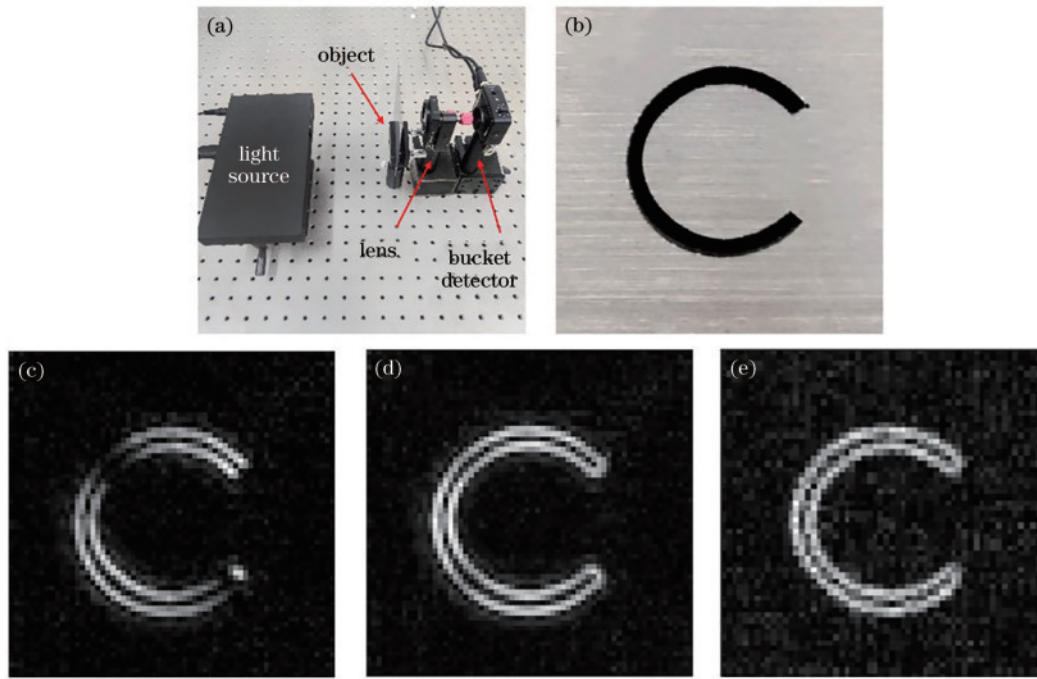


图6 计算鬼成像实验。(a)实验部分装置图;(b)实验所用的待测物金属铝板,居中雕刻镂空“C”;(c)使用未改进模板的Scharr算子进行散斑移动的结果图;(d)使用改进模板后的Scharr算子进行散斑移动的结果图;(e)使用改进模板后的Sobel算子进行散斑移动的结果图

Fig. 6 Computational ghost imaging experiment. (a) Experimental setup diagram; (b) the metal aluminum plate used in the experiment, with a hollow “C” carved in the center; (c) the result graph of speckle movement using the Scharr operator without improved template; (d) the result graph of speckle movement using the improved template Scharr operator; (e) the result graph of speckle movement using Sobel operator with improved template

4 结 论

设计了一种基于Scharr算子的多方向移动计算鬼成像边缘提取方案,将照明散斑按照Scharr算子模板的形式进行多方向的移动,移动散斑相当于对散斑求差分,该方案可以获取待测物边缘,但由于模板值有正负,因此所提取的待测物边缘存在部分信息缺失。对Scharr算子模板进行改进,将其运用于所提散斑移动方法中,可以直接获取边缘信息,且获得信息完整清晰,与传统的梯度鬼成像方案相比,该方案弥补了重构后的信息缺失,适合处理复杂纹理的图像。所提算子模板改进方法也可以运用于其他一阶边缘提取算子,如Sobel算子、Robert算子、Prewitt算子等。且仿真和实验结果表明,所提方案可以提高边缘提取质量,在测量时间不变的情况下弥补边缘信息缺失,使边缘信息连续且清晰,在医学影像、智能驾驶和目标检测等图像处理领域具有实用价值。

参 考 文 献

- [1] Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, et al. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement [J]. *Physical Review A*, 1995, 52(5): R3429-R3432.
- [2] Shapiro J H. Computational ghost imaging[J]. *Physical Review A*, 2008, 78(6): 061802.
- [3] Sun M J, Edgar M P, Gibson G M, et al. Single-pixel three-dimensional imaging with time-based depth resolution[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12010.
- [4] Erkmen B I. Computational ghost imaging for remote sensing[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2012, 29(5): 782-789.
- [5] Pelliccia D, Rack A, Scheel M, et al. Experimental X-ray ghost imaging[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(11): 113902-113902.
- [6] Clemente P, Durán V, Torres-Company V, et al. Optical encryption based on computational ghost imaging [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(14): 2391-2393.
- [7] Jiao S M, Feng J, Gao Y, et al. Visual cryptography in single-pixel imaging[J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 7301-7313.
- [8] Zheng P X, Li J X, Li Z L, et al. Compressive imaging encryption with secret sharing metasurfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(15): 2200257.
- [9] Wang X P, Lin Z H. Microwave surveillance based on ghost imaging and distributed antennas[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15: 1831-1834.
- [10] Cao D Z, Xiong J, Wang K G. Geometrical optics in correlated imaging systems[J]. *Physical Review A*, 2005, 71(1): 013801.
- [11] Scarcelli G, Berardi V, Shih Y. Phase-conjugate mirror via two-photon thermal light imaging[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(6): 061106.

- [12] Ferri F, Magatti D, Lugiato L A, et al. Differential ghost imaging[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(25): 253603.
- [13] 邓超, 高超, 王晓茜, 等. 基于图像融合的优化重构计算鬼成像[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(20): 2011001. Deng C, Gao C, Wang X Q, et al. Optimized reconstruction of computational ghost imaging based on image fusion[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(20): 2011001.
- [14] 郑佳慧, 俞晓迪, 赵生妹, 等. 基于均值滤波的关联成像去噪[J]. *光学学报*, 2022, 42(22): 2211002. Zheng J H, Yu X D, Zhao S M, et al. Ghost imaging denoising based on mean filtering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(22): 2211002.
- [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] Yi S, Labate D, Easley G R, et al. A shearlet approach to edge analysis and detection[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, 18(5): 929-941.
- [17] Liu X F, Yao X R, Lan R M, et al. Edge detection based on gradient ghost imaging[J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33802-33811.
- [18] Mao T Y, Chen Q, He W J, et al. Speckle-shifting ghost imaging[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(4): 6900810.
- [19] Ren H D, Wang L, Zhao S M. Efficient edge detection based on ghost imaging[J]. *OSA Continuum*, 2018, 2(1): 64-73.
- [20] Chen Y, Li X X, Cheng Z D, et al. Multidirectional edge detection based on gradient ghost imaging[J]. *Optik*, 2020, 207: 163768.
- [21] 黄威, 焦述铭, 肖昌炎. 单像素成像相关图像处理算法综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(10): 1011021. Huang W, Jiao S M, Xiao C Y. Image processing algorithms related to single-pixel imaging: a review[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(10): 1011021.
- [22] 孟晨, 王晓茜, 高超, 等. 利用鬼成像技术恢复被遮挡物体信息[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(10): 1011030. Meng C, Wang X Q, Gao C, et al. Using ghost imaging technique to retrieve information of occluded object[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(10): 1011030.
- [23] Liu D L, Xu Y, Quan Y H, et al. Reduced reference image quality assessment using regularity of phase congruency[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2014, 29(8): 844-855.