

基于虚拟光学的视觉显著目标可控放大重建

陈家祯^{①②} 吴为民^③ 郑子华^{①②} 叶锋^{*①②} 连桂仁^① 许力^①

^①(福建师范大学数学与信息学院 福州 350007)

^②(福建师范大学数字福建大数据安全技术研究所 福州 350007)

^③(福建省船政交通职业学院信息工程系 福州 350007)

摘要: 该文提出一种基于虚拟光学的视觉显著目标高分辨率可控放大重建方法。原始图像放置于虚拟光路物平面, 首先通过衍射逆计算获得原始图像在虚拟衍射面的光波信号, 再对虚拟衍射面光波用球面波照射后作正向衍射计算, 通过改变观测平面位置可重建出不同放大率的原始图像。仿真测试结果表明, 与一般的插值放大方法相比, 所获得的放大后的图像特别是在显著性区域表示出良好的视觉感知效果。将包含人脸的低分辨率降质图像作为待重建信号, 所重建人脸的显著性区域如眼睛、鼻子等比一般重建方法更清晰。用水平集方法结合显著图分割出原始图像中的局部显著区域并作放大重建和轮廓提取, 轮廓表现出良好的光滑性。

关键词: 图像分割; 虚拟光学; 显著性目标; 可控放大

中图分类号: TN911.73; TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)05-1209-07

DOI: 10.11999/JEIT190469

Controllable Magnification for Visual Saliency Object Based on Virtual Optics

CHEN Jiazhen^{①②} WU Weimin^③ ZHENG Zihua^{①②} YE Feng^{①②}

LIAN Guiren^① XU Li^①

^①(College of Mathematics and Informatics, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

^②(Digital Fujian Institute of Big Data Security Technology, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

^③(Department of Information Engineering, Fujian Chuanzheng Communications college, Fuzhou 350007, China)

Abstract: A high-resolution controllable magnification method for visual saliency object based on virtual optics is proposed in this paper. The original image is placed on the virtual object plane. Firstly, the diffractive wave of the original image on the virtual diffraction plane is obtained by inverse diffraction calculation, and then the forward diffraction calculation is carried out after the virtual diffraction wave is irradiated by spherical wave. The original images with different magnification can be reconstructed by changing the position of the observation plane. The simulation results show that compared with the general interpolation method, the magnified image shows a good visual perception effect, especially in the saliency region. When the degraded face image is used as the signal to be reconstructed, the significant areas such as eyes and nose are clearer than the general method. The local salient region in the original image is segmented by the level set method combined with salient map, and the magnification and contour extraction are performed. The contours show good smoothness.

Key words: Image segmentation; Virtual optics; Saliency object; Controllable magnification

1 引言

图像放大重建指由低分辨(Low Resolution,

LR)图像通过各种技术手段生成清晰自然高分辨(High Resolution, HR)图像的过程, 在视频监控、医学图像处理、消费电子、影视制作等领域获得广泛应用^[1]。基于插值的放大重建是最经典的技术实现方法,传统插值方法包括最近邻、双线性、双三次、三次样条插值等。但传统方法存在锯齿状边缘, 纹理细节模糊等现象。为了抑制传统方法中的人工痕迹, 方法NEDI(New Edge-Directed Inter-

收稿日期: 2019-06-25; 改回日期: 2019-10-30; 网络出版: 2019-11-04

*通信作者: 叶锋 yef279@sina.com

基金项目: 福建省自然科学基金(2018J01779, 2017J01739)

Foundation Items: The Natural Science Foundation of Fujian Province of China (2018J01779, 2017J01739)

polation)^[2]使用LR图像的局部协方差系数利用维纳滤波估计线性回归模型的系数。文献[3]在NEDI算法的基础上提出改进措施以降低数据不稳定性,提高用于估计协方差系数区域的适应性进而提高重建图像质量(iNEDI方法)。文献[4]提出一种基于分形插值的SR(Super Resolution)图像生成算法(SRRFI方法),较好地保持了图像的纹理和结构信息。近年来,随着大数据、人工智能技术快速发展,大量基于学习的图像放大重建方法被提出,但基于学习的方法存在重建效果与数据集密切相关,训练时间长,以及模型的泛化能力不足等问题^[5]。其他的图像重建方法包括基于水平集,凸集投影法、正则化重构法等^[6,7]。显著性目标指基于人类视觉注意机制所快速定位出的一个场景中的感兴趣区域,而不感兴趣区域被选择性地忽略。高分辨率显著性目标图像在遥感技术、医疗影像、视频监控等领域有着大量的应用需求^[8]。近年来,光学信息处理技术在图像处理方面的应用越来越广泛,用虚拟光学方法处理数字图像,可获得数字处理的灵活性与光学系统多维、多自由度、并行处理等优势融合,在图像加密、数字水印、图像滤波等领域的获得大量应用。在光学信息处理中,根据衍射的角谱理论,应用球面波作为重建波可获得无需插值的可变放大率重建波面^[9]。以该理论为基础,本文提出一种基于虚拟光学的数字图像可控放大重建方法,其基本思想是将数字图像放置在虚拟光路,通过模拟物光波在虚拟光路中传播实现图像的可控放大。另外在水平集方法中结合显著图分割出局部显著目标,放大重建后用Canny算子提取目标轮廓。仿真实验结果表明,与一般方法相比:(1)本文所重建的图像较自然,细节较清晰,图像中各物体的边缘较为平滑,图像的显著性区域表现出良好的视觉感知效果;(2)本文放大重建后的局部显著目标的轮廓光滑性良好,并给出了不同方法下的客观评价指标的比较结果。

2 基于虚拟光学的数字图像可控放大原理

数字图像的可控放大建立在菲涅耳衍射理论基础上。光的衍射指光在传播过程中遇到障碍物或小孔产生偏离直线传播的现象。光波在近场区域的衍射称为菲涅耳衍射。在标量衍射理论框架下可以用式(1)所示的菲涅耳衍射积分计算光波在近场区域物理传播过程。

$$U(x, y) = \frac{\exp(jkd)}{j\lambda d} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x_0, y_0) \cdot \exp \left\{ \frac{jk}{2d} [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2] \right\} dx_0 dy_0 \quad (1)$$

其中, $f(x_0, y_0)$ 表示物平面光波复振幅, $U(x, y)$ 表示观测平面光波复振幅, d 是衍射距离, $j = \sqrt{-1}$, λ 为光波长, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 。

菲涅耳衍射积分可以表示为傅里叶变换及卷积两种形式,存在1次快速傅里叶变换及快速卷积算法^[10]。快速卷积算法重构观测平面物光波可以用式(2)计算,其中 H_F 表示菲涅耳衍射传递函数, F 和 F^{-1} 分别表示傅里叶正变换与逆变换。

$$U(x, y) = F^{-1} \{ F[f(x_0, y_0)] H_F(f_x, f_y) \} \quad (2)$$

$$H_F(f_x, f_y) = \exp \left\{ jkd \left[1 - \frac{\lambda^2}{2} (f_x^2 + f_y^2) \right] \right\} \quad (3)$$

从 $U(x, y)$ 可以通过逆运算获得物平面光波信号 $f(x_0, y_0)$ 。

$$f(x_0, y_0) = F^{-1} \{ F[U(x, y)] H_F^*(f_x, f_y) \} \quad (4)$$

式(2)和式(4)构成菲涅耳衍射变换对,可用于实现光学系统中初始面与观测面光波信号之间的变换。菲涅耳数字全息在CCD(Charge-Coupled Device)平面通过记录物体菲涅耳衍射光波与参考光波的干涉条纹实现物光波的编码。借鉴数字全息中物体光学放大思想^[11,12],将原始图像放置于图1所示的虚拟光路,结合衍射逆运算及球面波照射,实现数字图像可控放大重建。图1是数字图像可控放大虚拟光路图。

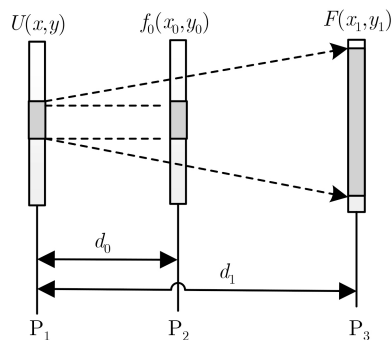


图1 数字图像可控放大虚拟光路图

图1中 P_1 表示虚拟衍射面, P_2 表示原始图像所在初始物平面, P_3 表示重建像平面, P_1 和 P_2 之间的距离为 d_0 , P_1 和 P_3 之间的距离为 d_1 。用 $f_0(x_0, y_0)$ 表示原始图像所在物平面光波信号,符号 FrT_d^+ 表示衍射距离为 d ,光波长为 λ 的菲涅耳正向衍射计算。数字图像可控放大实现思想包括以下步骤:

步骤1 引入虚拟衍射面,用菲涅耳衍射光波编码原始图像。图1中,原始图像 $f_0(x_0, y_0)$ 扩幅补零后计算距离为 d_0 ,光波长为 λ 的菲涅耳逆向衍射光波信号,原始图像在虚拟衍射面 P_1 的光波信号可用式(5)表示

$$U(x, y) = \text{FrT}_{-d_0}^\lambda [f_0(x_0, y_0)] \quad (5)$$

步骤2 在虚拟衍射面引入球面波照射，使得可以通过重建距离的改变获得不同放大率的重建像。设单位振幅球面波 $L(x, y) = \exp\left[j\frac{k}{2z_c}(x^2 + y^2)\right]$ ，经球面波照射后的虚拟衍射面光波信号可以表示为

$$P_1(x, y) = U(x, y)L(x, y) \quad (6)$$

步骤3 对虚拟衍射面光波信号 $P_1(x, y)$ 计算距离为 d_1 的非涅耳正向衍射。重建像平面 P_3 光波信号可以用式(7)表示

$$F(x_1, y_1) = \text{FrT}_{d_1}^\lambda [P_1(x, y)] \quad (7)$$

步骤4 根据全息的基本理论^[13,14]，式(7)中当衍射距离满足 $d_1 = \alpha d_0$ ，重建波面半径 z_c 取 $(1/d_0 - 1/d_1)^{-1}$ ， P_3 平面将获得放大率为 α 的重建像。

3 结合显著图的显著目标水平集分割

3.1 基于元胞自动机的显著性检测

元胞自动机指离散的、状态有限的元胞在定义的有一定边界的元胞空间，按照被赋予的状态变化规则，从无序、无规则、不平衡不断演化至有序、有规则、平衡的状态。元胞自动机的传播机制可用于显著图的优化，基于元胞自动机的显著性检测算法^[15]流程如图2所示。

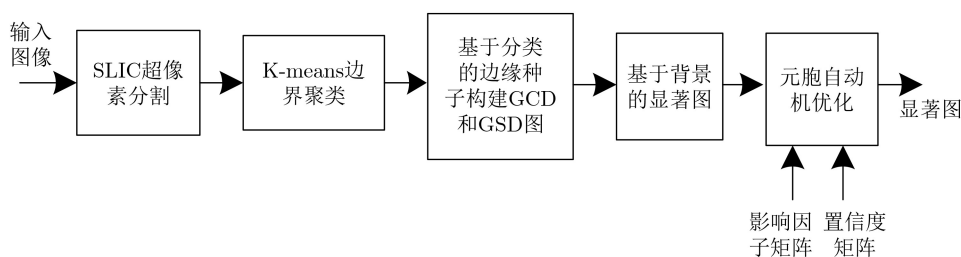


图2 元胞自动机显著性检测算法流程图

对获得的显著图设置阈值可获得二值化显著图。

$$O(S(x, y)) = \begin{cases} 0, & S(x, y) \geq \delta \\ 1, & S(x, y) < \delta \end{cases} \quad (8)$$

其中， $S(x, y)$ 表示显著图， δ 表示阈值。

3.2 以显著图为指导的显著目标水平集分割

水平集方法是一种用于界面追踪和形状建模的数值方法，在图像分割应用中，基于DRLSE模型^[16]的水平集函数(Level Set Function, LSF)定义为能量函数 $E(\phi)$ 。

$$E(\phi) = uR_p(\phi) + \lambda L_g(\phi) + \alpha A_g(\phi) \quad (9)$$

其中 $L_g(\phi)$ 项计算边缘指示函数 g 沿水平集轮廓的线积分； $A_g(\phi)$ 是区域项； $R_p(\phi)$ 是距离项。

能量函数的最小值可以通过求解如式(10)所示的梯度流方程获得。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = u \text{div}(d_p(|\nabla \phi| \nabla \phi) + \lambda \delta_\varepsilon(\phi) \text{div}\left(g \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|}\right) + \alpha g \delta_\varepsilon(\phi) \quad (10)$$

DRLSE模型的数字实现可通过式(11)所示的差分方程迭代求解

$$\phi_{i,j}^{k+1} = \phi_{i,j}^k + \Delta t \cdot L(\phi_{i,j}^k), k = 0, 1, \dots \quad (11)$$

其中， $L(\phi_{i,j}^k)$ 是能量函数 $E(\phi)$ 的梯度流。

为了精确分割出图像中显著性目标，将显著检测结果应用于式(12)中初始演化曲线 $\phi_0(x)$ 的设置，通过调整式(8)中阈值及辅助窗口约束使初始演化

曲线所包含的区域 R_0 属显著性区域，且位于感兴趣物体轮廓的外围。

$$\phi_0(x) = \begin{cases} -c_0, & x < R_0 \\ c_0, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

4 轮廓检测

轮廓检测指在包含目标和背景的数字图像中，忽略内部纹理以及噪声干扰的影响，通过一定的方法如增强图像中的边界特征来实现目标轮廓提取。目前轮廓检测方法有两类，一类是利用传统的边缘检测算子检测目标轮廓，另一类是从人类视觉系统中提取可以使用的数学模型完成目标轮廓检测。传统的边缘检测算子包含Roberts检测算子、Prewitt检测算子、Sobel检测算子、Canny检测算子^[17]等。Canny算子是最受欢迎的边缘检测方法，检测过程包括以下步骤：(1)高斯平滑处理；(2)Sobel算子应用；(3)非极大值抑制；(4)滞后阈值处理连接边缘点。

人脸所自带的生物特征使得人脸图像在身份识别中发挥具有重要作用。为了考察可控放大重建对重要视觉信息的放大重建效果，本文从两个方面进行研究：(1)对包括人脸的多个场景应用虚拟光学方法放大重建，并比较本文方法与传统及文献中方法在显著性区域重建效果的不同；(2)用结合显著图的水平集方法分割出局部显著目标，考察局部显著目标经放大重建后信号轮廓的特点。

5 质量评价

不同放大方法获得的图像质量的客观评价可以用均方误差、亮度误差、频谱平坦度、相似度等评价指标^[18], 设行列方向各放大 k 倍, 将放大后的图像按 $k \times k$ 大小划分, 原图像中的一个像素点对应于放大后图像中一个 $k \times k$ 大小的图像块, 原图像设为 $X(m, n)$, 大小为 $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$, 放大后图像为 $Y(m', n')$, $1 \leq m' \leq KM - 1, 1 \leq n' \leq KN - 1$, 定义

$$Y(m, n) = \frac{1}{K^2} \sum_{n'=(n-1) \times K+1}^{nK} \sum_{m'=(m-1) \times K+1}^{mK} Y(m', n') \quad (13)$$

归一化均方误差为

$$\text{NMSE} = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M [X(m, n) - Y(m, n)]^2}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M X(m, n)^2} \quad (14)$$

归一化亮度误差为

$$\text{NLVE} = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M [X(m, n) - Y(m, n)]}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M X(m, n)^2} \quad (15)$$

频谱平坦度为

$$\text{SFM} = \frac{\frac{1}{MN} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |F(m, n)|^2}{\prod_{n=1}^N \prod_{m=1}^M [|F(m, n)|^2]^{\frac{1}{MN}}} \quad (16)$$

其中, $F(m, n)$ 是 $Y(m, n)$ 的数字频谱。

表1为放大重建图像质量指标的计算结果。

6 仿真实验结果与分析

6.1 可控放大重建仿真及性能

6.1.1 未降质原始图像可控放大重建

图3是原始图像(256×256)及经球面波照射放大4倍后的图像(1024×1024), 衍射距离 d_0 取1500 mm, 光波长 λ 为 $0.532 \times 10^{-3} \text{ mm}$ 。

为了研究不同方法下图像重要视觉信息的放大效果、对原始图像用谱残差方法^[19]确定显著性区域。对包含人物的场景用谱残差方法计算得到的显著图表明, 当场景中包括人脸部分, 通常眼睛所在区域是首先吸引人的地方, 在显著图中表现眼睛区域的高亮度显示, 如图4所示。显著图中亮度大的区域表示感兴趣区域, 蕴含着更多的重要视觉信息。

图4(c)Mola图像的显著性检测结果表明, 眼睛部分属Mola图像中的显著性区域。选取Mola图像的右眼部分作局部放大观察, 并与传统插值及iN-EDI及SSRFI方法作比较, 如图5所示。可以看出, 与其他方法相比, 本文方法中的上下眼睑、巩膜、瞳孔等更明晰, 边界更光滑, 视觉感知效果良好。

用拉普拉斯算子计算图5中右眼区域的过零点, 检测结果如图6所示, 可以看出本文方法下右眼各区域迹线更鲜明。

6.1.2 降质图像的可控放大重建

为了实现多幅图像加密, 在加密阶段对原始图像进行空域降采样或者频谱及空间域裁剪以减小待加密图像大小, 并在解密阶段进行放大处理是一种常用的解决方法^[20]。用图3(a)的Mola图像(256×256)作原始图像, 经频谱及空间域裁剪后的降质图像大小为32×32。分别用双线性插值、双三次插值、iNEDI, SSRFI及本文方法重建出256×256大小

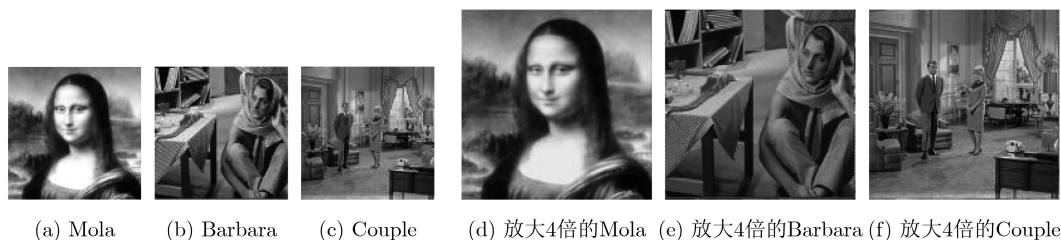


图3 基于虚拟光学的放大重建

表1 放大重建像质量指标

测试图像	NMSE	NLVE	SFM	归一化相关系数
Mola	0.1057	0.0157	0.0042	0.9977
Barbara	0.1106	0.0145	0.0019	0.9963
Couple	0.1045	0.0021	0.0022	0.9956
平均值	0.0769	0.0108	0.0027	0.9965

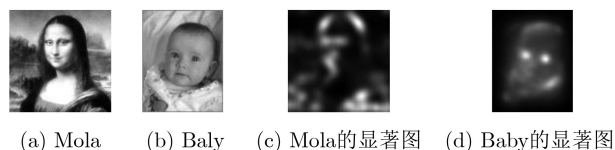


图4 包含人物的场景及谱残差方法计算得到的显著图

图像如图7所示，从视觉效果上本文方法中的人脸显著性区域如眼睛、鼻子、嘴巴相对更清晰。

6.2 局部显著目标放大重建后的轮廓特点

对原始图像用结合显著图的水平集方法分割出局部显著性目标，如图8所示。对局部显著性目标分别用双线性插值、双三次插值、iNEDI, SSRFI及本文方法4倍放大重建后，再用Canny算子提取轮廓，目标轮廓如图9所示。

由图9可知，本文方法中的所获得的目标轮廓表现为更平滑。轮廓斜率反映了轮廓变化的快慢程

度，曲率反映了轮廓曲线弯曲程度。选择图8(e)中白色区域块的重建轮廓(即图9(a)–图9(e)中虚线框内的轮廓)分别计算不同重建方法下获得的轮廓斜率和曲率如图10所示。相比于其他方法，本文方法中轮廓的斜率及离散曲率波动总体表现更为平缓。

6.3 基于虚拟光学的图像可控放大讨论

(1) 相比于经典的图像插值方法如最近邻、双线性及双三次等方法，本文方法涉及菲涅耳衍射积分计算，执行时间相对较长,如一幅256×256大小图像放大4倍，时间约0.13 s(3.3 GHz Intel CPU，内

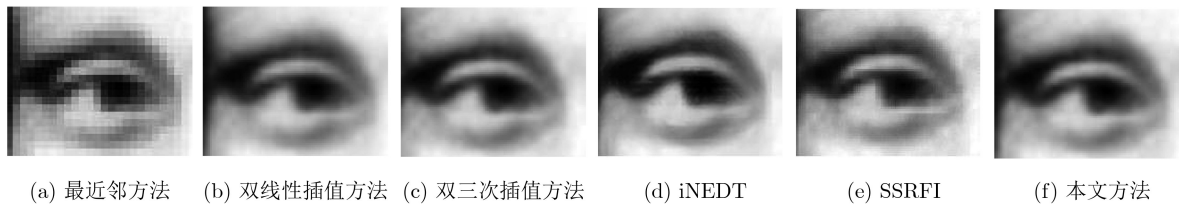


图5 不同放大方法下眼睛部分的放大重建效果

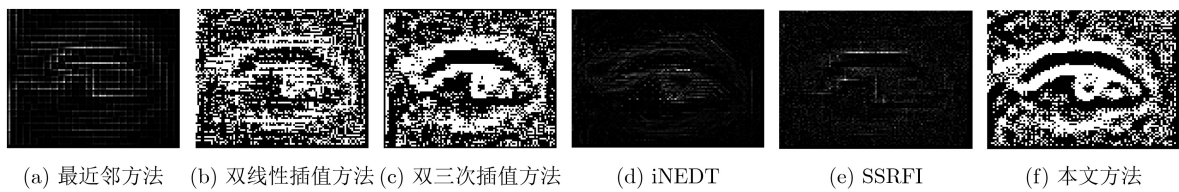


图6 眼睛区域的过零点检测结果

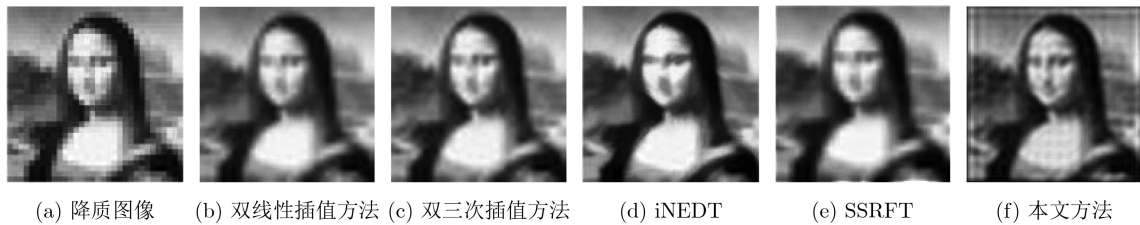


图7 降质图像及8倍放大重建



图8 结合显著图与水平集方法的局部显著目标分割

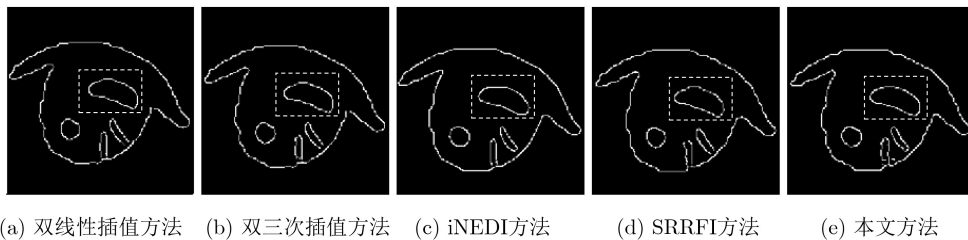


图9 局部显著目标放大4倍后的轮廓

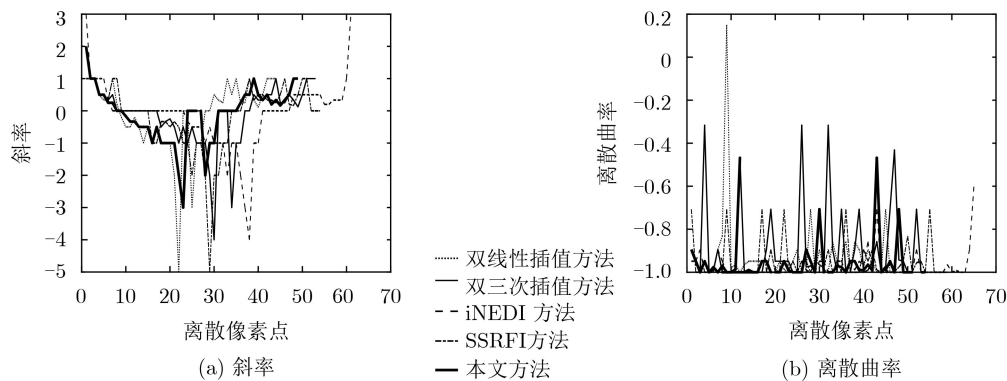


图10 部分目标轮廓斜率及离散曲率比较

存4 GB), 但时间复杂度与iNEDI和SSRFI方法相比具有明显优势。

(2) 数字图像的菲涅耳衍射光波编码借助离散形式的菲涅耳衍射变换公式实现, 由于菲涅耳衍射传递函数的非带限性及抽样定理的近似满足, 导致重建像中高频分量的丢失, 表现为重建像中尖锐转角处的尖锐性受到一定程度损失, 但对光滑边缘的物体重建效果良好。

(3) 放大重建像的形成基于离散衍射光波信号 sinc 函数插值形成, 大放大倍数时重建像面插值点间隔较大, 重建像衍射条纹变明显, 影响视觉感知效果。

7 结束语

将虚拟光学方法应用于图像放大处理, 对降质与非降质图像的测试结果表明本文所提出的方法相比于一般方法特别是在显著性区域, 表现出良好的视觉感知效果; 局部显著区域放大后的轮廓表现更为光滑, 本文所提方法可同样适用于立体图像。但相比于插值放大方法, 由于菲涅耳衍射需要计算傅里叶变换, 计算复杂度比传统插值放大方法高。另外低分辨率图像大放大倍数重建时, 衍射条纹变明显从而影响视觉感知效果。下一步的工作将针对这两方面问题探索改进方案并结合应用于更多的场景如3维场景中显著目标的放大重建等。

参考文献

- [1] PARK S C, PARK M K, and KANG M G. Super-resolution image reconstruction: A technical overview[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2003, 20(3): 21–36. doi: [10.1109/msp.2003.1203207](https://doi.org/10.1109/msp.2003.1203207).
- [2] LI Xin and ORCHARD M T. New edge-directed interpolation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, 10(10): 1521–1527. doi: [10.1109/83.951537](https://doi.org/10.1109/83.951537).
- [3] ASUNI N and GIACHETTI A. Accuracy improvements and artifacts removal in edge based image interpolation[C]. The 3rd International Conference on Computer Vision Theory and Applications, Funchal, Portugal, 2008: 58–65.
- [4] ZHANG Yunfeng, FAN Qinglan, BAO Fangxun, *et al*. Single-image super-resolution based on rational fractal interpolation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2018, 27(8): 3782–3797. doi: [10.1109/TIP.2018.2826139](https://doi.org/10.1109/TIP.2018.2826139).
- [5] YANG Wenhan, FENG Jiashi, YANG Jianchao, *et al*. Deep edge guided recurrent residual learning for image super-resolution[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2017, 26(12): 5895–5907. doi: [10.1109/TIP.2017.2750403](https://doi.org/10.1109/TIP.2017.2750403).
- [6] MORSE B S and SCHWARTZWALD D. Image magnification using level-set reconstruction[C]. 2011 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Kauai, USA, 2001: 333–340. doi: [10.1109/CVPR.2001.990494](https://doi.org/10.1109/CVPR.2001.990494).
- [7] RATAKONDA K and AHUJA N. POCS based adaptive image magnification[C]. 1998 IEEE International Conference on Image Processing, Chicago, USA, 1998: 203–207. doi: [10.1109/ICIP.1998.727167](https://doi.org/10.1109/ICIP.1998.727167).
- [8] CAI Qing, LIU Huiying, QIAN Yiming, *et al*. Saliency-guided level set model for automatic object segmentation[J]. *Pattern Recognition*, 2019, 93: 147–163. doi: [10.1016/j.patcog.2019.04.019](https://doi.org/10.1016/j.patcog.2019.04.019).
- [9] 李俊昌, 樊则宾. 彩色数字全息的非插值波面重建算法研究[J]. *物理学报*, 2010, 59(4): 2457–2461. doi: [10.7498/aps.59.2457](https://doi.org/10.7498/aps.59.2457).
- [10] LI Junchang and FAN Zebin. Algorithm of the non-interpolation wave-front reconstruction of the color digital holography[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(4): 2457–2461. doi: [10.7498/aps.59.2457](https://doi.org/10.7498/aps.59.2457).
- [11] 李俊昌, 熊秉衡. 信息光学教程[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 45–57.
- [12] LI Junchang and XIONG Bingheng. *Information Optics*[M]. Beijing: Science Press, 2011: 45–57.
- [13] LI Junchang, PENG Zujie, TANKAM P, *et al*. Digital holographic reconstruction of a local object field using an adjustable magnification[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2011, 28(6): 1291–1296. doi: [10.1364/JOSAA.28.001291](https://doi.org/10.1364/JOSAA.28.001291).

- [12] RESTREPO J F and GARCIA-SUCERQUIA J. Magnified reconstruction of digitally recorded holograms by Fresnel-Bluestein transform[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(33): 6430–6435. doi: [10.1364/AO.49.006430](https://doi.org/10.1364/AO.49.006430).
- [13] GOODMAN J W. Introduction to Fourier Optics[M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Editions, 1996: 88–110.
- [14] SCHNARS U and JÜPTNER W P O. Digital recording and numerical reconstruction of holograms[J]. *Measurement Science and Technology*, 2002, 13(9): R85–R101. doi: [10.1088/0957-0233/13/9/201](https://doi.org/10.1088/0957-0233/13/9/201).
- [15] QIN Yao, LU Huchuan, XU Yiqun, *et al.* Saliency detection via cellular automata[C]. 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Boston, USA, 2015: 110–119. doi: [10.1109/CVPR.2015.7298606](https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298606).
- [16] LI Chunming, XU Chenyang, GUI Changfeng, *et al.* Distance regularized level set evolution and its application to image segmentation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(12): 3243–3254. doi: [10.1109/TIP.2010.2069690](https://doi.org/10.1109/TIP.2010.2069690).
- [17] CANNY J. A computational approach to edge detection[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, PAMI-8(6): 679–698. doi: [10.1109/TPAMI.1986.4767851](https://doi.org/10.1109/TPAMI.1986.4767851).
- [18] 吴援明, 梁恩志. 一种基于熵的放大后图像质量的评价方法[J]. 信号处理, 2004, 20(2): 201–203. doi: [10.3969/j.issn.1003-0530.2004.02.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0530.2004.02.022).
- WU Yuanming and LIANG Enzhi. A new method of zoomed images evaluation[J]. *Signal Processing*, 2004, 20(2): 201–203. doi: [10.3969/j.issn.1003-0530.2004.02.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0530.2004.02.022).
- [19] HOU Xiaodi and ZHANG Liqing. Saliency detection: A spectral residual approach[C]. 2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Minneapolis, USA, 2007: 1–8. doi: [10.1109/CVPR.2007.383267](https://doi.org/10.1109/CVPR.2007.383267).
- [20] QIN Yi, GONG Qiong, WANG Zhipeng, *et al.* Optical multiple-image encryption in diffractive-imaging-based scheme using spectral fusion and nonlinear operation[J]. *Optics Express*, 2016, 24(23): 26877–26886. doi: [10.1364/OE.24.026877](https://doi.org/10.1364/OE.24.026877).
- 陈家祯: 女, 1971年生, 副教授, 研究方向为信号与信息处理、信息安全.
- 吴为民: 男, 1970年生, 副教授, 研究方向为计算机视觉、人工智能.
- 郑子华: 女, 1976年生, 副教授, 研究方向为数字图像处理.
- 叶 锋: 男, 1978年生, 副教授, 研究方向为视频图像处理.
- 连桂仁: 男, 1963年生, 副教授, 研究方向为数字图像处理、电路与系统.
- 许 力: 男, 1970年生, 教授, 研究方向为网络与信息安全、智能信息处理.