

文章编号 2095-1531(2015)01-0060-08

基于数学形态学的数字全息再现像融合方法

潘 锋^{1,2*}, 闫贝贝^{1,2}, 肖 文^{1,2}, 刘 烁^{1,2}, 李 艳^{1,2}
(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;
2. 教育部精密光机电一体化技术重点实验室, 北京 100191)

摘要:针对数字全息中不同再现距离获得的携带不同聚焦信息的再现像,提出了一种基于数学形态学的多聚焦再现像融合方法,以有效扩展成像景深。首先通过小波-Controulet变换获得源图像的高频和低频分量;然后,针对数字全息中含散斑噪声的特点,对高频分量采用基于数学形态学区域能量的方法进行融合,对低频分量采用加权对比度法进行融合;最后,将融合系数反变换得到融合图像。通过对算法的有效性分析和实验验证,将本文提出的方法与不加入数学形态学的融合方法进行了对比研究。结果表明,基于数学形态学的融合方法能充分抑制散斑噪声的影响,保留更多细节信息,有效扩展了成像景深范围达11.5 cm。其中,对于表面粗糙且信息量较少的骰子,基于数学形态学方法的空间梯度算子提高了11.8%,熵值提高了2.7%;对于表面光滑且信息量较多的硬币,其空间梯度算子提高了13.6%,熵值提高了2.8%。
关键词:数字全息;图像融合;景深扩展;数学形态学

中图分类号:TN26;O438.1;TP391 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20150801.0060

Digital holographic reconstruction image fusion based on mathematical morphology

PAN Feng^{1,2*}, YAN Bei-bei^{1,2}, XIAO Wen^{1,2}, LIU Shuo, LI Yan^{1,2}

(1. School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology, Ministry of Education, Beijing 100191, China)

* Corresponding author, E-mail: panfeng@buaa.edu.cn

Abstract: In digital holography, multi-focus holographic images can be reconstructed by applying values for the reconstruction distance during the reconstruction process. And then the hologram can be fused to extend the depth-of-field by images fusion method. Since the speckle noise in the digital holography images, an efficient fusion algorithm based on mathematical morphology is proposed. First, the decomposed high-frequency and low-frequency sub-band coefficients are obtained by the Wavelet-Controulet transform. Then, it fused coefficients with different rules. To suppress the speckle noise, the local energy combined with mathematical morphology is presented for high-frequency coefficients and the contrast method is used to fuse the low-frequency coefficients. Finally, the invers transform is employed to get the fused image. The effectiveness analysis of the algorithm and the experiment results show that for the digital holography images with speckle noise, the fusion method with mathematical morphology can reduce the speckle noise and keep more detail information. At last, the depth-field of the image can be extended up to 11.5 cm. As compared with the conventional

收稿日期:2014-10-17;修订日期:2014-12-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61177006)

method without mathematical morphology, for dices, the proposed method enhances its Tenengrad and Entropy by 11.8% and 2.7%. For coins, the proposed method enhances its Tenengrad and Entropy by 13.6% and 2.8%.

Key words: digital holography; image fusion; extend depth of field; mathematical morphology

1 引 言

数字全息是一种高准确性、高分辨率的新型三维测量技术^[1],广泛用于显微成像^[2]与测量^[3]等方面。数字全息成像是基于干涉图谱的波面反演技术,其再现过程可以重构不同纵深平面的物光场分布。因此,基于单幅全息图改变再现距离可获取不同聚焦点的再现像,并通过图像融合^[4-5],能够有效扩展成像系统的景深,扩大数字全息的应用范围。而数字全息作为一种相干成像方法,物体粗糙表面、光学元件划痕、光路中灰尘等引起的随机散射,使得再现像中存在散斑噪声^[6]。散斑噪声是全息图中的主要噪声,它表现为不均匀的亮点和暗点随机分布在图像中,覆盖了物象的纹理细节,严重影响了再现像的分辨率,因而在多聚焦图像融合计算中,散斑噪声将会严重影响融合结果。

针对含噪声图像,研究学者做了相关研究,郑林等人^[7]提出一种基于方向可调滤波器的图像消噪算法(先去除噪声再融合的方法);吕超峰^[8]等人通过模极大值对小波变换后的图像去噪,然后进行图像融合。以上两人均采用先去噪再融合的方法,但去噪的同时也丢失了部分有用信息。王昕^[9]和 V. Aslantas^[10]等人基于空域选用能抑制噪声的清晰度评价函数进行融合,得到较好的融合效果。本文将基于变换域对全息再现像进行融合。

数学形态学^[11]作为一种以形态结构元素为基础的非线性处理方法,可解决平滑抑噪^[12]、图像融合^[13]、边缘检测^[14]等问题,去噪时可最大程度保留图像边缘信息。在数字全息成像中,散斑噪声能量大多集中在图像的高频部分^[15],抑制散斑噪声也就是在保留有用高频信息和去除噪声之间保持平衡。形态学方法还未在数字全息再现像融合中应用,因此,本文针对含散斑噪声的数字全

息再现像,提出了一种基于数学形态学的多聚焦图像融合方法。

首先采用小波-Controulet 变换得到图像的高频和低频分量,然后对反应细节信息的高频分量选用基于数学形态学的区域能量取大的准则进行融合,对表示图像轮廓信息的低频分量选用对比度法进行融合,最后对融合后分量反变换得到融合图像。

2 原理分析

2.1 数字全息记录和再现

数字全息包括全息记录和波前再现两个过程。设物体所在的物平面为 x_0, y_0 , CCD 所在的记录面为 xy , 两平面之间的距离为 d 。当记录条件满足菲涅尔近似条件时, CCD 记录面上的物光波分布表示为 $O(x, y)$, 设参考光波的复振幅分布 $R(x, y)$, 参物光发生干涉, 则 CCD 记录的全息图光强分布为:

$$I(x, y) = |O(x, y) + R(x, y)|^2 = |O(x, y)|^2 + |R(x, y)|^2 + O(x, y) \cdot R^*(x, y) + O^*(x, y)R(x, y). \quad (1)$$

设全息图离散为 $N_x \times N_y$ 个点, 记录全息图的 CCD 光敏面尺寸为 $L_x \times L_y$, 则通过空间离散采样后的数字全息图表示为:

$$I(u, v) = I(x, y) \text{rect}\left[\frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y}\right] \times \sum_u^{N_x} \sum_v^{N_y} \delta(x - u\Delta x, y - v\Delta y), \quad (2)$$

式中, u 和 v 为整数 ($-N_x/2 \leq u \leq N_x/2, -N_y/2 \leq v \leq N_y/2$), Δx 和 Δy 分别是 x 和 y 方向的采样间隔, δ 表示二维脉冲函数, 矩形函数 $\text{rect}\left[\frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y}\right]$ 表示 CCD 靶面的有效面积。

设再现像平面 $x_1 - y_1$ 方向上取样点数为 $M \times N$, 取样间隔为 $\Delta x_1 \times \Delta y_1$ 。根据菲涅尔衍射公式得到重建物光波的复振幅:

$$U(r,s) = \frac{\exp(jkd)}{j\lambda d} \exp\left[\frac{j\rho}{\lambda d}(r^2\Delta x_1^2 + s^2\Delta y_1^2)\right] \times \sum_{n=-N/2}^{N/2} \sum_{m=-M/2}^{M/2} \varphi(m,n) \exp\left\{\frac{j\rho}{\lambda d}\left[(r^2\Delta x_1^2 + s^2\Delta y_1^2) - (m\Delta x_1 r + n\Delta y_1 s)\right]\right\}. \quad (3)$$

进而,物体像的强度和相位分布分别为:

$$I(r,s) = |U(r,s)|^2, \quad (4)$$

$$\phi(m,n) = \arctan\left(\frac{\text{Im}[U(r,s)]}{\text{Re}[U(r,s)]}\right). \quad (5)$$

由式(3)可以看出,对单幅全息图再现时,可通过取不同的再现距离 d 得到不同位置物体的再现像,从而得到聚焦点不同的多幅全息再现像。

2.2 再现像融合方案

数字全息再现像的融合就是多聚焦图像的融合过程,即将来自不同图像的清晰区域或像素合并产生一幅所有景物都清晰的融合图像。当物体表面粗糙时,相干光在物体表面上每一点都要发生散射,使得全息记录过程中产生随机散斑噪声。散斑噪声是非线性的乘性噪声^[15],主要在图像的高频分量中作为干扰信息与有用信息同时存在。因此,在融合规则的选取中不能用单一平均法或取极值、阈值的线性方法处理。

数学形态学是一种非线性的处理工具,对于掺杂噪声的图像,能在有效抑制噪声的同时最大程度的保留图像细节信息。数学形态学的基础操作是膨胀和腐蚀^[11]。 B 对 A 的开操作为 $A \circ B$, 闭操作为 $A \bullet B$, 表示如下所示:

$$\begin{aligned} A \circ B &= (A \square B) \oplus B \\ A \bullet B &= (A \oplus B) \square B \end{aligned} \quad (6)$$

式中, \oplus 为膨胀操作, \square 为腐蚀操作, B 是 3×3 的结构元素。开操作去除了峰值噪声,消除图像中的孤立点;闭操作去除了低谷噪声,填补图像中的漏洞和裂缝。

基于以上分析,本文对数字全息再现像融合中采用数学形态学的方法抑制散斑噪声的影响,其具体实现过程如下:

第一步,频域变换:用小波-Contourlet 变换^[16-18]对多幅源图像 $P_1, P_2 \dots P_n$ 进行处理,得到分解后的高频和低频分量。

第二步,基于数学形态学的融合准则:为了抑制散斑噪声的影响,对高频分量选用区域能量结合数学形态学的方法;为了突出图像的轮廓信息,对低频分量选用对比度法进行融合。

第三步,频域反变换:将融合后的高频和低频分量反变换得到融合结果。

其中,高频分量和低频分量的具体融合准则如下:

(1) 高频分量融合准则

将源图像 P_n 变换得到的高频子带分解系数 $U_{i,\varepsilon}$, 通过计算区域能量 $V_{i,\varepsilon}(P_n, p)$ 构造判断式矩阵,如下式:

$$L_{i,\varepsilon}(p) = \begin{cases} 1 & V_{i,\varepsilon}(P_n, p) \geq V_{i,\varepsilon}(P_{n+1}, p) \\ 0 & V_{i,\varepsilon}(P_n, p) < V_{i,\varepsilon}(P_{n+1}, p) \end{cases}, \quad (7)$$

式中, ε 表示方向数, i 表示小波系数的层数, $i = 3, Q$ 表示以点 p 为中心的一个 3×3 的窗口。同理,对于图像 P_n 用同样的公式计算区域能量。

同时,为了增强图像像素的相关性和算法抑制散斑噪声的能力,通过筛选判断式矩阵和数学形态学操作来修正决策图,如下式:

$$H(p) = \begin{cases} 1 & S_{i,\varepsilon}(p) \geq 5 \\ 0 & S_{i,\varepsilon}(p) < 5 \end{cases}, \quad (8)$$

$$\hat{H}(p) = (H(p) \circ B) \bullet B, \quad (9)$$

式中, $S_{i,\varepsilon}(p) = \text{Sum}_{q \in Q}(L_{i,\varepsilon}(q))$ 。

最后根据修正后的决策图得到图像 P_n 和 P_{n+1} 的高频系数矩阵 $U_{i,\varepsilon}(F, p)$ 。

$$U_{i,\varepsilon}(F, p) = \begin{cases} U_{i,\varepsilon}(P_n, p) & \hat{H}(p) = 1 \\ U_{i,\varepsilon}(P_{n+1}, p) & \hat{H}(p) = 0 \end{cases}. \quad (10)$$

(2) 低频分量融合准则

选用对比度加权平均的方法求出融合图像的低频子带系数 $L_n(x, y)$:

$$L_n(x, y) = \omega_1 L_1(x, y) + \omega_2 L_2(x, y) + \dots + \omega_n L_n(x, y)$$

$$\omega_n = \frac{C_n(x, y)}{C_1(x, y) + C_2(x, y) + \dots + C_n(x, y)}, \quad (11)$$

式中, $C_n(x, y)$ 代表了以像素 (x, y) 为中心、子块为 3×3 大小窗口像素的对比度^[19]。

3 算法的有效性分析

数字全息再现像的融合是对不同再现距离获得的多焦点图像的融合,因此为了验证算法的有效性与适用性,对同一场景加入不同强度噪声、不同聚焦位置的平面图像进行分析。采用单反相机分别对距镜头 0.480、0.550 和 0.620 m 的骰子以及距镜头 0.505、0.550 和 0.620 m 的硬币对焦成像,采用大光圈(光圈数 5.6)使只有焦点处的物体清晰可分辨,如图 1(a)~1(c)和图 1(e)~1(g)所示。图 1(d)和图 1(h)分别表示加入方差为 0.01 的高斯噪声的图像。

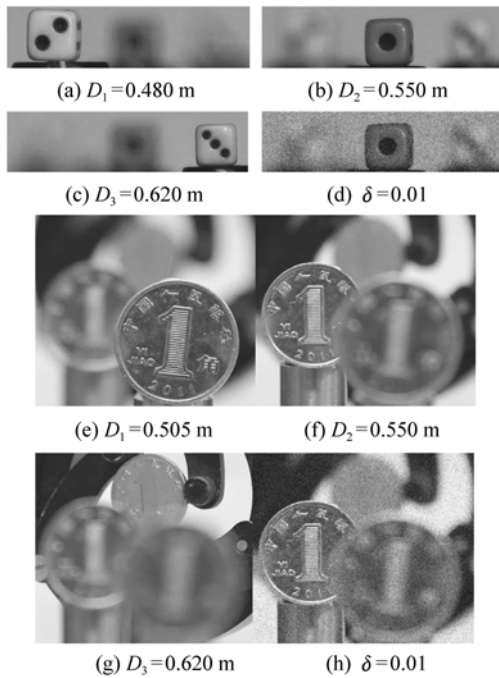


图 1 骰子和硬币的原始图像和加噪后图像
Fig. 1 Original and noisy images of dices and coins

同时为了验证算法的优越性,用不加入数学形态学的融合方法作为对比方法进行分析,该方法在图像高频分量 $U_{i,\varepsilon}(F,p)$ 的选取时直接用区域能量 $V_{i,\varepsilon}(P_n,p)$ 取大的原则,即:

$$U_{i,\varepsilon}(F,p) = \begin{cases} U_{i,\varepsilon}(P_n,p) V_{i,\varepsilon}(P_n,p) & \geq V_{i,\varepsilon}(P_{n+1},p) \\ U_{i,\varepsilon}(P_{n+1},p) V_{i,\varepsilon}(P_n,p) & < V_{i,\varepsilon}(P_{n+1},p) \end{cases} \quad (12)$$

现分别用两种方法融合,图 2 表示噪声方差为 0.01 时用以上两种方法对骰子和硬币的融合结果。

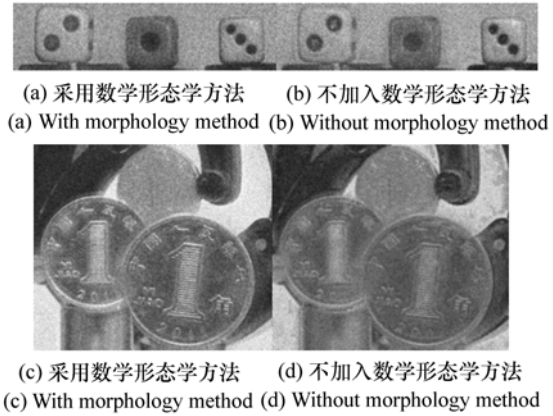
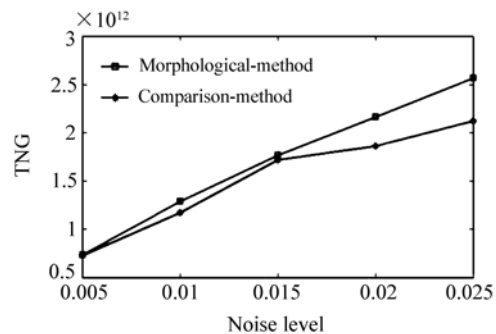


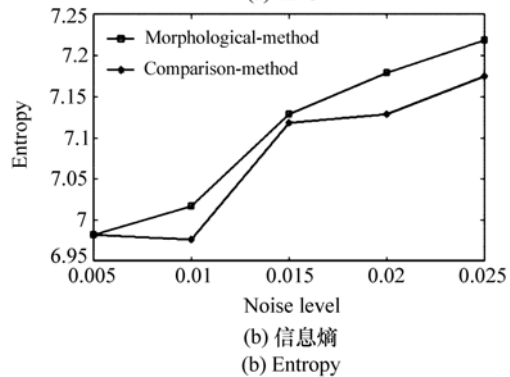
图 2 骰子和硬币融合结果

Fig. 2 Fused images of dices and coins

由结果图看出,本文方法得到的融合图像更清晰,细节信息更丰富,边缘更锐利。为了进一步证明不同噪声强度下的融合效果,通过量化的评



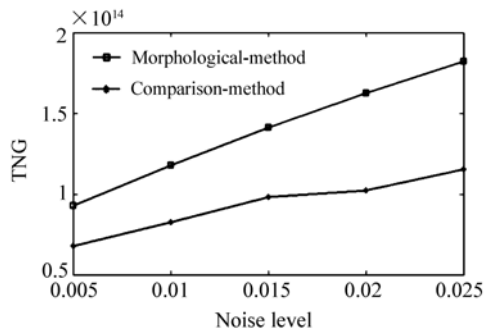
(a) 空间梯度算子
(a) TNG



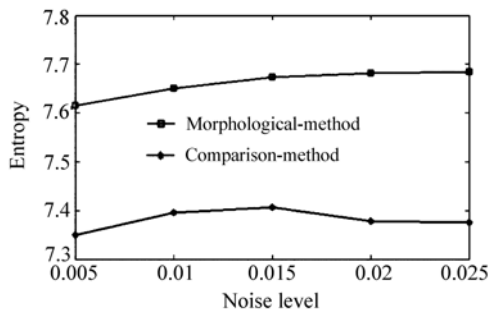
(b) 信息熵
(b) Entropy

图 3 骰子融合图像评价结果
Fig. 3 Evaluation results for dices

价函数,即空间梯度算子(TNG)^[16]和信息熵(Entropy)^[8]对加入不同方差的高斯噪声(噪声方差 δ 分别为0.005,0.01,0.015,0.02,0.025)时的融合结果评价分析。TNG能很好地描述图像的边缘信息,其值越大则边缘信息越丰富,得到的全息图质量越好;而熵值越大融合图像的信息越丰富,则全息图的细节信息越丰富。由图3看出,对于细节信息较少的骰子,随着噪声强度的增大采用数学形态学的方法使图像的信息量越来越丰富。由图4看出,对于细节信息较多的硬币,数学形态学方法融合的图像边缘更锐利,在对高频分量的融合上有效抑制了噪声的影响,保留了图像的有效信息。



(a) 空间梯度算子
(a) TNG



(b) 信息熵
(b) Entropy

图4 硬币融合图像评价结果

Fig.4 Evaluation results for coins

4 实验结果分析

4.1 实验光路的搭建

实验光路采用离轴数字全息,其结构如图5所示。波长为532 nm的固体激光器发出的激光束经衰减片A1和半波片HWP1后进入偏振分光

棱镜(PBS)分为两束。通过调整半波片HWP1实现分光比的调节,同时调整半波片HWP2保证两束光偏振方向一致。两束光分别经空间滤波器BE1和BE2扩束并经透镜准直,其中一束光经被测物反射后携带物面信息,即作为物光与另一束参考光沿入射方向被合光棱镜(BS)接收,并被CCD记录下来,传送到计算机进行全息图处理。

观察物体选用3个边长为4 mm的骰子和3个1角钱的硬币。骰子和硬币具有不同表面特征的样本,即骰子表面粗糙但是细节信息量较少,硬币表面光滑但细节信息量多。观测骰子时,记录距离 d 分别为42.0、45.0和48.0 cm;观测硬币时,记录距离 d 分别为55.5、60.0和67.0 cm。

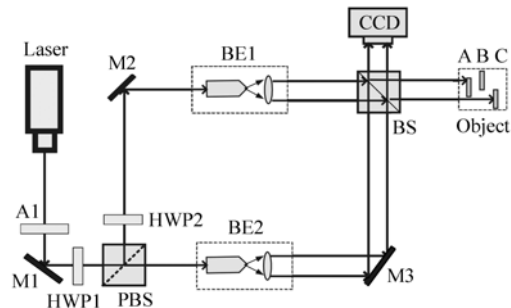


图5 实验光路结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of experimental setup

4.2 大景深数字全息图及融合结果

(1) 骰子

骰子表面较粗糙,物光照射到骰子在表面产生较多散射光,如图6所示。图6(a)~6(c)分别

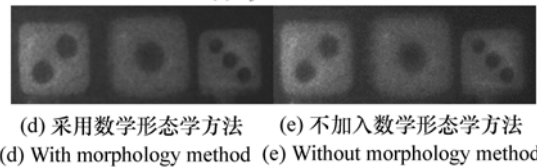
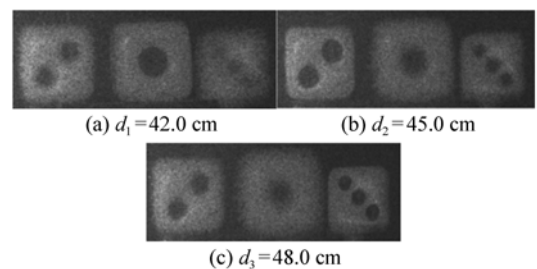


图6 骰子的再现像及融合结果

Fig.6 Hologram and fusion image of dices

为记录距离 42.0、45.0 和 48.0 cm 时的再现像,图 6(d)和 6(e)为两种方法的融合结果。

对两种方法的融合结果进行评价分析,采用数学形态学方法和不加入数学形态学方法的 TNG 值分别为 4.06×10^{13} 和 3.63×10^{13} ;熵值分别为 6.62 和 6.44。结果显示,本文方法对于表面粗糙的骰子,融合图像信息量更丰富,边缘更清晰,对散斑噪声的抑制有较好的效果。

(二) 硬币

硬币表面反射率高,但表面信息量较高,有较

多细小的纹路,如图 7 所示。图 7(a)~7(c)分别为记录距离 55.5、60.0 和 67.0 cm 时的再现像,图 7(d)和 7(e)为两种方法的融合结果。

同样对比两种方法,采用数学形态学方法和不加入数学形态学方法的 TNG 值分别为 4.67×10^{13} 和 4.11×10^{13} ;熵值分别为 6.99 和 6.79。由评价结果分析得出,对于硬币这类含细节分量多的物体,融合后图像细节信息均有损失,但加入数学形态学的融合方法比不加入数学形态学的方法可保留更多的细节信息,能在抑制散斑噪声的同时使图像边缘更清晰。

5 结 论

本文提出了一种基于数学形态学的再现像融合算法,实现了数字全息系统景深扩展达 11.5 cm。针对数字全息再现像中存在散斑噪声的问题,在进行基于变换域的融合时,首先通过小波-Controulet 变换得到高频和低频分量,然后结合数学形态学方法对高频分量进行融合,选用对比度加权平均法对低频信息进行融合,最后对融合后的高频和低频分量反变换得到融合图像。对算法的有效性分析与实验结果表明,基于形态学的融合方法可抑制噪声,突出和保留图像细节信息,有更好的融合效果。对于表面粗糙的骰子,本文所提方法与不加入形态学的方法相比,其空间梯度值提高了 11.8%,熵值提高了 2.7%;对于表面较光滑的硬币,空间梯度值提高了 13.6%,熵值提高了 2.8%。本文的研究能够实现数字全息再现像的准确融合,有效扩展了数字全息景深,扩展了数字全息的应用范围。

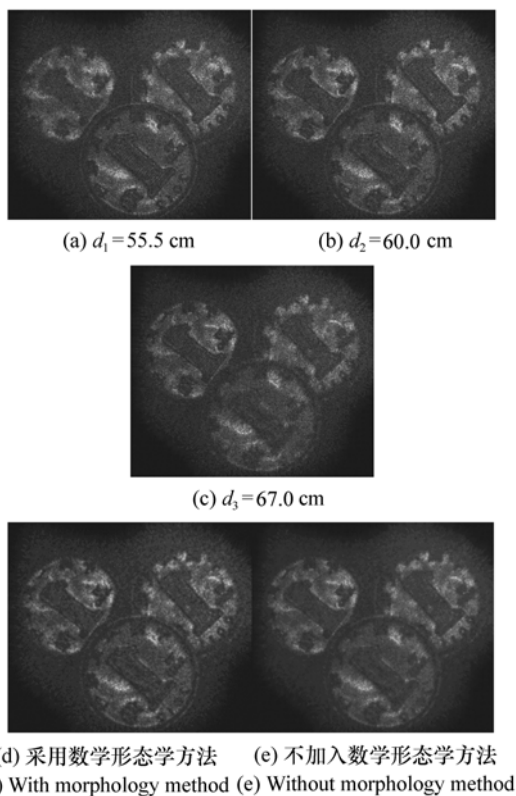


图 7 硬币的再现像及融合结果

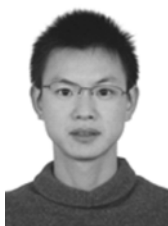
Fig. 7 Hologram and fusion image of coins

参考文献:

- [1] JAVIDI B,TAJAHUERCE E. Three-dimensional object recognition by use of digital holography[J]. *Optics Letters*,2000, 25(9):610-612.
- [2] 于瀛洁,倪萍,周文静. 基于全息图放大的数字全息显微结构测量[J]. *光学精密工程*,2008,16(5):827-831.
YU Y J,NI P,ZHOU W J. Micro-structure measurement of phase object by digital microholography based on magnified hologram[J]. *Opt. Precision Eng.*,2008,16(5):827-831. (in Chinese)
- [3] WANG F J,XIAO W,FENG P,et al. . Curvature measurement of optical surface using digital holography[J]. *Optics and Lasers in Engineering*,2011,49(7):903-906.
- [4] DO C M,JAVIDI B. Multifocus holographic 3-D image fusion using independent component analysis[J]. *J. Display Tech-*

- nology, 2007, 3(3): 326-332.
- [5] ZHOU H, GU J H, CHEN D Q. Multi-Plane 3-D holographic image fusion in DCT Domain[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 760-762: 572-576.
- [6] GARCIA-SUCERQUIA J, RAM REZ J A H, PRIETO D V. Reduction of speckle noise in digital holography by using digital image processing[J]. *Optics-International J. Light and Electron Optics*, 2005, 116(1): 44-48.
- [7] 郑林, 韩崇昭, 左东广, 等. 基于方向可调滤波器的含噪图像融合算法[J]. *西安交通大学学报*, 2002, 12: 1236-1239. ZHENG L, HAN C ZH, ZUO D G, *et al.*. Fusion algorithm of noised images based on streerable filters[J]. *J. Xi'an Jiaotong University*, 2002, 12: 1236-1239. (in Chinese)
- [8] 吕超峰, 程咏梅, 赵永强, 等. 基于模板大值和相关性的图像噪声抑制融合算法[J]. *计算机应用研究*, 2008, 01: 271-273 + 276. LV CH F, CHENG Y M, ZHAO Y Q, *et al.*. Noise-suppressing image fusion based on module maximum and correlation [J]. *Application Research of Computers*, 2008, 01: 271-273. (in Chinese)
- [9] 王昕. 含噪声图像的多聚焦融合算法[J]. *光学 精密工程*, 2011, 12: 2977-2984. WANG X. Multi-focus fusion algorithm for noisy images[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 12: 2977-2984. (in Chinese)
- [10] ALANTAS V, KURBAN R. A comparison of criterion functions for fusion of multi-focus noisy images[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(16): 3231-3242.
- [11] 冈萨雷斯, 阮秋奇, 阮宇智. 数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 423-430. GONZALEZ R C, RUAN Q Q, RUAN Y ZH. *Digital Image Processing*[M]. Publishing House of Electronics Industry, 2005: 423-430. (in Chinese)
- [12] YU C, CHEN X. Remote sensing image denoising application by generalized morphological component analysis[J]. *International J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 33: 83-97.
- [13] DE I, CHANDA B. Multi-focus image fusion using a morphology-based focus measure in a quad-tree structure[J]. *Information Fusion*, 2013, 14(2): 136-146.
- [14] ZHANG Y, JIANG X, WANG Z, *et al.*. *Multimedia and Signal Processing*[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2012: 112-119.
- [15] 吴一全, 叶志龙, 万红. 双树复小波和各向异性扩散再现像散斑噪声抑制[J]. *中国激光*, 2013, 04: 226-233. WU Y Q, YE ZH L, WAN H. Speckle noise suppression of reconstructed image based on dual-tree complex wavelet and anisotropic diffusion[J]. *Chinese J. Lasers*, 2013, 04: 226-233. (in Chinese)
- [16] LIANG D, LI Y, SHEN M, *et al.* An algorithm for multi-focus image fusion using wavelet based contourlet transform[J]. *Dianzi Xuebao(Acta Electronica Sinica)*, 2007, 35(2): 320-322.
- [17] RAVICHANDRAN C G, SELVAKUMAR R R, GOUTHAM S. Analysis and comparison of medical image fusion techniques: wavelet based transform and contourlet based transform[J]. *International J. Computer Science and Information Security*, 2011, 9(3): 70-75.
- [18] ZHANG P, TANG Y X, LIANG Y H, *et al.*. Multi-focus image fusion based on wavelet transformation[J]. *J. Harbin Institute of Technology*, 2013, 02: 124-128.
- [19] 王丽, 卢迪, 吕剑飞. 一种基于小波方向对比度的多聚焦图像融合方法[J]. *中国图象图形学报*, 2008, 01: 145-150. WANG L, LU D, LV J F. Multi-focus image Fusion Scheme based on wavelet contrast[J]. *J. Image and Graphics*, 2008, 01: 145-150. (in Chinese)

作者简介:



潘 锋(1979—),男,广西桂林人,副教授,硕士生导师,2001年于哈尔滨理工大学获学士学位,2003、2007年于哈尔滨工业大学分别获硕士、博士学位,主要从事数字全息显微及干涉测量方面的研究。E-mail: panfeng@buaa.edu.cn



刘 烁(1985—),男,河北廊坊人,博士研究生,2008年于北京航空航天大学获得学士学位,主要从事数字全息显微方面的研究。E-mail: liushuo@aspe.buaa.edu.cn



闫贝贝(1990—),女,河北保定人,硕士研究生,2012年于西南交通大学获得学士学位,主要从事数字全息方面的研究。E-mail:bbyan90@163.com



李 艳(1984—),女,山西吕梁人,博士研究生,2010年于北京工业大学获得硕士学位,主要从事数字全息方面的研究。E-mail:Lyx0514@aspe.buaa.edu.cn



肖 文(1962—),男,陕西西安人,教授,博士生导师,1984年于西北大学获学士学位,1995年于中国科学院获得博士学位,主要从事光纤传感器、光学元件抗辐照加固以及数字全息等方面的研究。E-mail:xiaow@buaa.edu.cn