

基于振幅空间调制条纹投影的单像素成像

翁嘉文, 欧阳浩艺, 杨初平*

华南农业大学电子工程学院, 广东 广州 510642

摘要 单像素探测技术可实现对物体反射率或透射率的二维成像,但成像结果受照明光入射角度、物体表面形状和探测器面元空间方位等因素的调制影响。研究表明,空间非均匀照度的设计可消除这些因素的调制效应,因此,提出了一种新的单像素成像方法。该方法依靠投射振幅空间调制的二维余弦灰度条纹重构成像物体的频谱,以增强成像对比度并改善成像质量。对物体表面反射率进行成像,实验结果与理论分析完全一致,验证了本方法的有效性和可行性。

关键词 成像系统; 计算成像; 空间调制振幅; 单像素成像; 成像增强

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1511003

Single Pixel Imaging Based on Fringe Projection with Amplitude Spatial Modulation

Weng Jiawen, Ouyang Haoyi, Yang Chuping*

College of Electronic Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China

Abstract Single pixel detection technology can realize two-dimensional imaging of object reflectivity or transmittance, but the imaging results will be affected by the incident angle of the illumination light, the shape of the object surface and the spatial orientation of the detector surface. The research shows that the modulation effect of these factors can be eliminated by the design of spatial non-uniform illumination. Therefore, a new single pixel imaging method is proposed in this paper. In order to enhance the image contrast and improve the image quality, the method reconstructs the spectrum of the imaging object by projecting two-dimensional cosine gray fringes with spatial modulated amplitude. The surface reflectance of the object is imaged, and the experimental results are consistent with the theoretical analysis, which verifies the effectiveness and feasibility of the method.

Key words imaging systems; computational imaging; spatial modulated amplitude; single pixel imaging; imaging enhancement

OCIS codes 110.1758; 100.2960; 100.2980; 100.3010

1 引言

自发现光强度涨落相关鬼成像^[1-2]现象以及提出单像素探测计算鬼成像技术^[3-4]以来,单像素成像技术的潜在应用引起了人们的广泛关注^[5-7],逐渐出现了频谱重构成像^[8-9]、三维成像^[10-13]、实时成像^[14-16]、太赫兹环境成像^[17]、实时快速运动物体追踪^[18-20]、压缩传感成像^[21]及图像加密^[22-23]等技术。

为了实现高分辨率的单像素成像,需要投射一定数量的二维随机灰度条纹或不同空间频率的二维余弦灰度条纹。在空间均匀幅度灰度条纹的照射下,入射光角度、物体表面形状和探测器方位等因素在成像结果中对实际反射率或透射率的调制,掩盖了物体的真实信息,削弱了成像对比度,严重干扰了物体信息的提取。

针对上述问题,本文提出了一种基于振幅空间

收稿日期: 2020-11-02; 修回日期: 2021-01-29; 录用日期: 2021-03-08

基金项目: 岭南现代农业科学与技术广东省实验室资助、华南农业大学质量工程项目(zlgc16032)

通信作者: *yangchp@scau.edu.cn

调制条纹投影的单像素成像方法。研究表明,空间非均匀照度的设计可使物面元面向探测器的辐射通量与空间位置无关。因此,用空间非均匀振幅即振幅空间调制的二维余弦灰度条纹照射物体,以实现频谱重建。理论分析结果表明,该方法不仅能完全消除上述因素对物体成像结果的调制作用,获得真实物体的反射率或透射率分布,还能增强图像对比度,改善成像质量,对物体表面反射率的单像素成像实验结果也验证了该方法的有效性。

2 振幅空间调制条纹投影的单像素成像

2.1 空间均匀照度的表面辐射通量

图 1 为测量坐标系,其中, $o-xy$ 平面上的待测物体表面可以是平面,也可以是曲面。因此,需要研究在空间均匀照度情况下,物面上每个面元面向探测器的辐射通量。

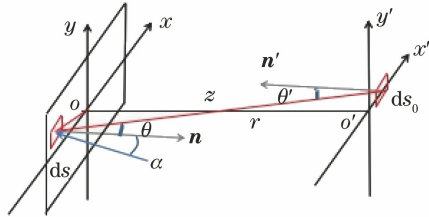


图 1 测量坐标系

Fig. 1 Measurement coordinate system

位于物体表面上坐标为 (x, y, z) 的小面元 ds 的入射照度为 $E_0(x, y, z)$, 入射光方向与表面法向 \mathbf{n} 的夹角为 α 。忽略表面的非余弦响应,若小面元 ds 的光强反射率为 $R(x, y, z)$, 则理想漫射体的面元亮度 $B = \frac{E_0(x, y, z)R(x, y, z)\cos\alpha}{\pi}$ 。表面面元面向探测器面元的辐射通量可表示为

$$d\varphi_0(x, y, z) = \frac{E_0(x, y, z)R(x, y, z)\cos\alpha}{\pi} \left(\frac{ds_0}{r^2} \cos\theta' \right) \cos\theta ds, \quad (1)$$

式中, $\frac{ds_0}{r^2} \cos\theta'$ 为探测器面元 ds_0 相对半径 r (两个面元的距离) 的立体角, $\cos\theta$ 、 $\cos\theta'$ 分别为待测面元 ds 的法向 \mathbf{n} 和探测器面元 ds_0 法向 \mathbf{n}' 与 r 夹角

的余弦。可以发现,在反射率一定的条件下,物面元面向探测器的辐射通量受照度 $E_0(x, y, z)$ 、入射光方向 $\cos\alpha$ 、与表面形状和探测器方位有关的 $\cos\theta$ 、 $\cos\theta'$ 和 r 等因素的调制,导致信号不均匀,从而影响成像质量。

2.2 辐射通量空间无关的照度设计

为了使每个面元面向探测器的辐射通量仅与每个面元的反射率有关,依据上述几个因素的调制作用对物体表面的照度进行设计。由(1)式可知,若物体表面的照度分布为

$$E_0(x, y, z) = A / \left(\cos\alpha \frac{\cos\theta\cos\theta'}{r^2} \right), \quad (2)$$

式中, A 为来自光源的照度系数,则每个面元面向探测器的辐射通量可表示为

$$d\varphi_0(x, y, z) = \frac{E_0(x, y, z)R(x, y, z)\cos\alpha}{\pi} \frac{ds_0}{r^2} \cdot \cos\theta\cos\theta' ds = A \frac{R(x, y, z)}{\pi} ds_0 ds. \quad (3)$$

可以发现,采用非均匀照度设计时,对于反射率非均匀的表面,每个面元面向探测器的辐射通量仅与面元的反射率有关。即对于反射率均匀的物体表面,每个面元面向探测器的辐射通量是均匀的,与面元的空间位置无关。

对于单像素成像,无论是依据强度自相关原理还是频谱重构原理,在空间均匀的照度条件下,入射光方向、物面形状和探测器方位等因素均会在成像结果中引入 $\cos\alpha$ 、 $\cos\theta$ 、 $\cos\theta'$ 、 r 等因素,从而对反射率(透射率)进行调制,导致无法从成像结果中提取物体真实的反射率(透射率)。合理使用非均匀化照度设计,可以消除这些调制作用,使成像结果仅与实际反射率有关。因此,提出了一种使用振幅空间调制条纹投影的单像素成像技术。

2.3 单像素成像的频谱重构

为了实现单像素成像,同时消除入射光入射角度、物体表面形状和探测器空间方位等因素对物体反射率成像的调制效应,提取真实的反射率,将振幅空间调制的二维灰度余弦条纹投射到物体表面,从而进行频谱重构。振幅空间调制的二维灰度余弦条纹可表示为

$$E(x, y, z) = a(x, y) [1 + b \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \varphi)] = \left[A / \left(\cos\alpha \frac{\cos\theta\cos\theta'}{r^2} \right) \right] [1 + b \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \varphi)], \quad (4)$$

式中, $a(x, y)$ 为振幅空间分布,如果 $a(x, y)$ 为常数,表明振幅恒定; $0 < b \leq 1$ 为条纹对比度, φ 为初始相位,

f_x, f_y 分别为 x, y 方向的条纹空间频率。将(4)式代入(1)式,得到每个面元面向探测器的辐射通量为

$$\begin{aligned} d\phi(x, y, z) &= \frac{E(x, y, z)R(x, y, z)}{\pi} \left(\cos \alpha \frac{ds_0}{r^2} \cos \theta \cos \theta' \right) ds = \\ &= \frac{a(x, y)R(x, y, z)}{\pi} \left(\cos \alpha \frac{ds_0}{r^2} \cos \theta \cos \theta' \right) [1 + b \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \varphi)] ds = \\ &= A \frac{R(x, y, z)}{\pi} ds_0 [1 + b \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \varphi)] ds, \end{aligned} \quad (5)$$

整个物体表面面向探测器的辐射通量可表示为

$$\phi = \iint_s d\phi(x, y, z) = \iint_s A \frac{R(x, y, z)}{\pi} ds_0 [1 + b \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \varphi)] ds. \quad (6)$$

用初始相位分别为 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 的四步相移法进行频谱重建,探测器相应的线性输出信号可分别表示为

$$D_1 = c_0 + c(\phi + \phi_0) = c_0 + c\phi_0 + c \iint_s A \frac{R(x, y, z)}{\pi} ds_0 [1 + b \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y)] ds, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} D_2 = c_0 + c(\phi + \phi_0) &= c_0 + c\phi_0 + c \iint_s A \frac{R(x, y, z)}{\pi} ds_0 \left[1 + b \cos\left(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \frac{\pi}{2}\right) \right] ds = \\ &= c_0 + c\phi_0 + c \iint_s A \frac{R(x, y, z)}{\pi} ds_0 [1 - b \sin(2\pi f_x x + 2\pi f_y y)] ds, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} D_3 = c_0 + c(\phi + \phi_0) &= c_0 + c\phi_0 + c \iint_s A \frac{R(x, y, z)}{\pi} ds_0 [1 + b \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \pi)] ds = \\ &= c_0 + c\phi_0 + c \iint_s A \frac{R(x, y, z)}{\pi} ds_0 [1 - b \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y)] ds, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} D_4 = c_0 + c(\phi + \phi_0) &= c_0 + c\phi_0 + c \iint_s A \frac{R(x, y, z)}{\pi} ds_0 \left[1 + b \cos\left(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \frac{3\pi}{2}\right) \right] ds = \\ &= c_0 + c\phi_0 + c \iint_s A \frac{R(x, y, z)}{\pi} ds_0 [1 + b \sin(2\pi f_x x + 2\pi f_y y)] ds, \end{aligned} \quad (10)$$

式中, c_0 为探测器的本底输出, c 为线性响应系数, ϕ_0 为来自环境的辐射通量。联立(7)式~(10)式,得到成像物体的频谱为

$$\begin{aligned} G(f_x, f_y) &= \left(\frac{D_1 - D_3}{2} \right) + j \left(\frac{D_2 - D_4}{2} \right) = \\ &= \iint_s A c b \frac{R(x, y, z)}{\pi} ds_0 [\cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y) - j \sin(2\pi f_x x + 2\pi f_y y)] ds = \\ &= \iint_s A c b \frac{R(x, y, z)}{\pi} ds_0 \{ \exp[-j(2\pi f_x x + 2\pi f_y y)] \} dx dy, \end{aligned} \quad (11)$$

经过逆傅里叶变换,得到物体反射率的像为

$$\begin{aligned} I(x', y') &= \iint G(f_x, f_y) \exp[j(2\pi f_x x' + 2\pi f_y y')] df_x df_y = \\ &= \iint_s \left\{ \iint A c b \frac{R(x, y, z)}{\pi} ds_0 \{ \exp[-j(2\pi f_x x + 2\pi f_y y)] \} dx dy \right\} \times \exp[j(2\pi f_x x' + 2\pi f_y y')] df_x df_y = \\ &= \iint_s A c b \frac{R(x, y, z)}{\pi} ds_0 \left\{ \iint \exp[-j(2\pi f_x x + 2\pi f_y y)] \times \exp[j(2\pi f_x x' + 2\pi f_y y')] df_x df_y \right\} dx dy = \\ &= \iint_s A c b \frac{R(x, y, z)}{\pi} ds_0 \delta(x - x', y - y') dx dy = A c b \frac{R(x', y', z)}{\pi} ds_0. \end{aligned} \quad (12)$$

若采用空间均匀、振幅恒定为 $a(x, y) = A$ 的二维余弦灰度条纹照射物体,得到物体的反射率像

可表示为

$$I(x, y) = \frac{AcbR(x, y, z)}{\pi} \left(\cos \alpha \frac{ds_0}{r^2} \cos \theta \cos \theta' \right). \quad (13)$$

对比(12)式和(13)式发现,采用振幅空间调制的二维余弦灰度条纹照射物体成像时,理论上能在成像结果中消除入射光方向、物体表面形状和探测器空间方位等因素的调制效应,得到实际的反射率分布。

3 获得空间调制振幅的方法

由(13)式可知,在振幅恒定二维余弦灰度条纹的照射下,当物体表面反射率均匀,即 $R(x, y, z) = R_0$ 时,所成像的强度分布可表示为

$$I(x, y) = \frac{AcbR_0 ds_0}{\pi} \left(\frac{\cos \alpha}{r^2} \cos \theta \cos \theta' \right) \infty \left(\frac{\cos \alpha}{r^2} \cos \theta \cos \theta' \right), \quad (14)$$

式中, ∞ 为正比符号。

1) 数值模拟中获得空间调制振幅的方法:首先,采用一幅灰度为 255 的纯白色平面图片作为成像物体,并将其表面强度反射率分布确定为常数 1;然后,设置探测器位置、探测器面元法向等参数,在振幅空间均匀的余弦灰度条纹照射下,获得单像素探测像;最后,使条纹振幅分布正比于该像强度的倒数,可表示为

$$a(x, y) = \frac{A^2 cbR_0 ds_0}{I(x, y)} / \pi = \frac{A^2 cbR_0 ds_0}{\pi} \left[\frac{AcbR_0 ds_0}{\pi} \left(\frac{\cos \alpha}{r^2} \cos \theta \cos \theta' \right) \right] = A / \left(\frac{\cos \alpha}{r^2} \cos \theta \cos \theta' \right). \quad (15)$$

根据(4)式和(15)式可以得到振幅空间调制的余弦灰度条纹。

2) 对于实际物体成像,首先,需要获得与物体

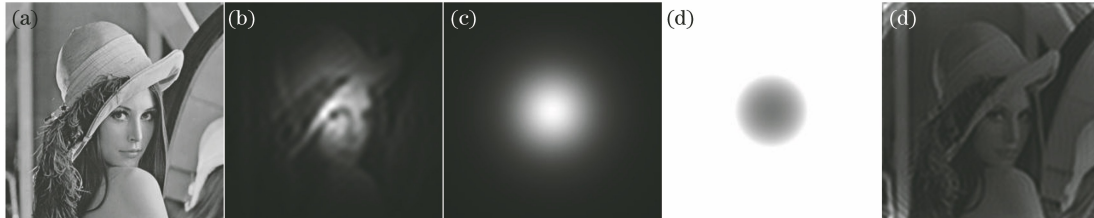


图 2 数值模拟的结果。(a)原始物体;(b)投射振幅均匀条纹得到的像;(c)投射振幅均匀条纹得到纯白色图片的像;(d)空间调制振幅;(e)投射振幅空间调制条纹得到物体的像

Fig. 2 Results of the numerical simulation. (a) Original object; (b) image obtained by projecting the uniform amplitude fringe; (c) pure white image obtained by projecting the uniform amplitude fringe; (d) spatial modulation amplitude; (e) image of the object obtained by projecting the amplitude spatial modulation fringe

表面形貌一致且反射率均匀的表面,可以将表面漫射均匀的白色薄稿纸紧贴在测量物体表面,以实现反射率均匀的表面;然后,在振幅空间均匀的余弦灰度条纹照射下,获得单像素探测像;最后,根据(15)式使空间调制振幅正比于该像强度的倒数。由于实际中投影仪的亮度范围有限,为 $[0, 255]$,且探测器对辐射通量的线性响应范围也是有限的,直接用(15)式计算空间调制振幅时,会导致部分空间点的振幅过大,超出投影仪的最大亮度。因此,实际中可在线性响应范围内尽量降低 A 的取值,同时将一些大于上限点的照度振幅保持在 255。

4 数值模拟

在获取振幅空间调制分布的基础上,采用数值模拟方法验证上述理论的有效性。实验测试的物体是一幅灰度图片,测试结果如图 2 所示。图 2(a)是大小为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 的二维物体;图 2(b)是用振幅空间均匀的余弦灰度条纹照射物体所成的像(模拟实验中设置探测器面元与物体平面平行且有一定距离,探测器面元中心点位于垂直图片的中轴线上),由于物体表面反射率成像受入射光方向、物面面元位置、探测器位置等因素的调制,因此,所成像的灰度分布呈中心亮、沿半径方向变暗的调制现象;图 2(c)为根据(14)式在振幅空间均匀的余弦灰度条纹照射下对纯白色图片所成的像,与图 2(b)类似,该图像的灰度也呈中心亮、沿半径方向逐渐变暗的现象;图 2(d)为根据(15)式得到的振幅空间调制分布结果;图 2(e)为使用振幅空间调制余弦灰度条纹照射物体得到的像,可以发现,该图像中已经消除了入射光方向、物面面元位置、探测器位置等因素的调制作用,改善了图像的对比度和质量。相比图 2(a),图 2(b)的峰值信噪比为 7.3329 dB,而图 2(e)的峰值信噪比为 10.3756 dB。

振幅空间调制的余弦条纹可表示为

$$E(x, y, z) = a(x, y)[1 + b \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \varphi)], \quad 0 < b \leq 1. \quad (16)$$

为了分析方便,但不失去一般性,假设(2)式中 $\cos \alpha = \cos \theta = \cos \theta' = 1$, 则图 2(d) 中的振幅空间

分布可近似表示为

$$a(x, y) = A[1 - g(x - x_0, y - y_0)], \quad (17)$$

式中, $g(x - x_0, y - y_0)$ 为探测器中心在物体平面投影位置为 (x_0, y_0) 的归一化高斯函数。

由(14)式可知,在振幅空间调制条纹照射下,重建的频谱可表示为

$$G(f_x, f_y) = \iint_s a(x, y) b \frac{R(x, y, z)}{\pi} \left(\cos \alpha \frac{ds_0}{r^2} \cos \theta \cos \theta' \right) \{ \exp[-j(2\pi f_x x + 2\pi f_y y)] \} dx dy \propto \mathcal{F}[a(x, y)] \otimes \mathcal{F}\left[R(x, y, z) \left(\cos \alpha \frac{ds_0}{r^2} \cos \theta \cos \theta' \right)\right] \approx \mathcal{F}\left[R(x, y, z) \left(\cos \alpha \frac{ds_0}{r^2} \cos \theta \cos \theta' \right)\right] - \mathcal{F}[g(x - x_0, y - y_0)] \otimes \mathcal{F}\left[R(x, y, z) \left(\cos \alpha \frac{ds_0}{r^2} \cos \theta \cos \theta' \right)\right], \quad (18)$$

式中, \mathcal{F} 为傅里叶变换, \otimes 为卷积。可以发现,采用振幅空间调制条纹投影时,重建的每一个频谱等于两部分频谱相减,且减掉的低频频谱成分比高频频谱成分多。因此,消除探测器的调制效应实际上是一个高通滤波过程,从而导致成像结果整体亮度下降,这与数值仿真的结果一致。

5 实验结果及分析

在数值模拟基础上进行实验测试,实验系统包括计算机、PLUS 数字投影仪、滨松 Hamamatsu S1227-1010BR 光电二极管、电流电压转换器、National Instruments NI USB-6002(16 位)的模数(AD)转换数据采集器。计算机产生振幅空间调制的二维余弦灰度条纹并由数字投影仪照射出去,被测试物体表面的漫射光由光电二极管收集,光电转换器产生的光电流由电流电压转换器放大,经数据采集器后由计算机采集处理,系统结构如图 3 所示。实验对象为分辨率板和石膏像物体的面部区域,首

先,需要研究物体表面照度与光电信号的关系。对于被测试的表面,光源以均匀照度从 0 逐渐增加到 255,从而获得照度-光电信号的关系曲线和线性响应范围。因此,测量过程中需将光源的照度调整在线性范围内。

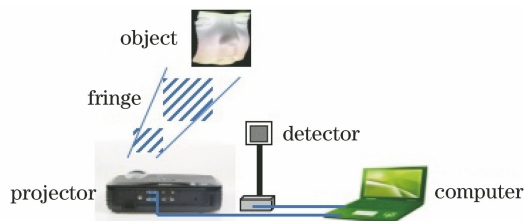


图 3 实验系统的原理

Fig. 3 Principle of the experimental system

5.1 分辨率板的成像

以白纸上打印的分辨率板为测试物体,如图 4(a)所示。设置好探测器的位置,在振幅空间均匀的余弦灰度条纹照射下成像,图 4(b)为入射光方向、物体表面形状和探测器的空间方位对成像结果的调

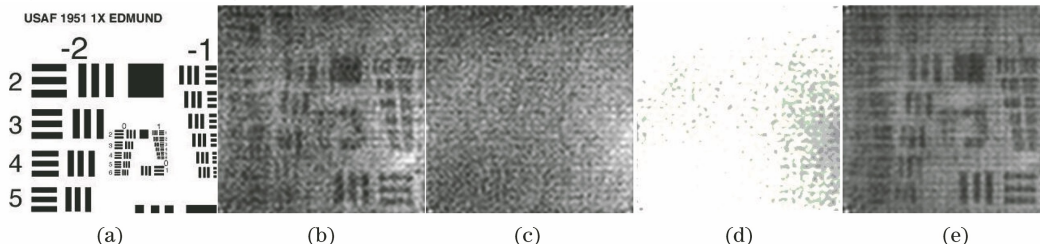


图 4 不同条纹的成像结果。(a)物体;(b)投射振幅均匀条纹得到的像;(c)投射振幅均匀条纹得到的空白纸像;(d)空间调制振幅;(e)投射振幅空间调制条纹得到的像

Fig. 4 Imaging results of different fringes. (a) Object; (b) image obtained by projecting the uniform amplitude fringe; (c) blank paper image obtained by projecting the uniform amplitude fringe; (d) spatial modulation amplitude; (e) image obtained by projecting the amplitude spatial modulation fringe

制作用。由于探测器靠近物体右侧中部,因此像面呈右边偏亮、左边偏暗的不均匀灰度分布。首先,在相同照明条件下,将分辨率板更换成相同大小且反射率比较均匀的空白纸,成像结果如图 4(c)所示。可以发现,该像的强度分布符合(14)式的描述,像面整体亮暗轮廓呈左边暗右边亮的分布。根据(15)式,以空白纸像的灰度分布为倒数,可获得照度振幅的空间调制分布,如图 4(d)所示。然后,采用振幅空间调制灰度条纹对物体照射成像,结果如图 4(e)所示。可以发现,该方法能有效消除(减弱)入射光方向、物面形状和探测器位置等因素的调制作用,改善了成像结果的亮度均匀性,增强了图像的对对比度。相比图 4(a),图 4(b)的峰值信噪比为 6.2874 dB,而图 4(e)的峰值信噪比为 7.6246 dB。

5.2 三维物体表面的成像

设置好探测器的位置,在振幅空间均匀的余弦

灰度条纹照射下,对图 5(a)中的物体进行成像。图 5(b)为入射光方向、物体表面形状和探测器的空间方位对成像结果的调制作用,可以发现,像面形成不均匀的灰度分布。在相同照明条件下对紧贴覆盖物体表面的纯白薄面罩进行成像,结果如图 5(c)所示。首先,根据(15)式,以白面罩像的灰度分布为倒数,获得照度振幅的空间调制分布,结果如图 5(d)所示。然后,采用振幅空间调制的灰度条纹对物体照射成像,结果如图 5(e)所示。其中,虚线框区域为鼻梁左侧区域和鼻孔区域。采用振幅空间调制的条纹照射成像能有效消除或降低上述因素的调制效果,像面呈现较好的灰度均匀性(在理想情况下完全消除调制效应后,纯白色三维物面的像是一片均匀灰度,失去了立体形象)。相比图 5(a),图 5(b)的峰值信噪比为 9.9081 dB,而图 5(e)的峰值信噪比为 15.1906 dB。

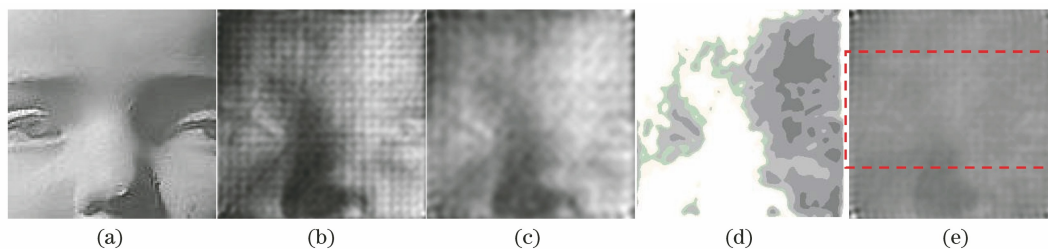


图 5 不同条纹的成像结果。(a)物体;(b)投射振幅均匀条纹得到的像;(c)投射振幅均匀条纹时得到的薄白面罩像;(d)空间调制振幅;(e)投射振幅空间调制条纹得到的像

Fig. 5 Imaging results of different fringes. (a) Object; (b) image obtained by projecting the uniform amplitude fringe; (c) thin white mask image obtained by projecting the uniform amplitude fringe; (d) spatial modulation amplitude; (e) image obtained by projecting the amplitude spatial modulation fringe

6 结 论

针对在振幅空间均匀余弦灰度条纹照射下,单像素成像中入射光方向、物体表面形状和探测器空间方位等因素对物体反射率成像产生的调制作用,提出了一种基于振幅空间调制的余弦灰度条纹投影的频谱重构单像素成像方法。该方法可消除上述因素对物体反射率成像的调制作用,提取真实的物体表面反射率,改善成像对比度,增强成像质量。由于实际测试中投影仪的照度范围和探测器的线性响应范围有限,实验结果与理论分析的结论有所差异,即振幅空间调制可能无法完全消除实际中探测器等因素对成像结果的调制作用。但由于单像素探测成像的共同特点,本方法有望推广到强度自相关鬼成像技术中。

参 考 文 献

- [1] Valencia A, Scarcelli G, D'Angelo M, et al. Two-

photon "ghost" imaging with thermal light[C]//2005 Quantum Electronics and Laser Science Conference, May 22-27, 2005, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE Press, 2005: 557-559.

- [2] Meyers R, Deacon K S, Shih Y. Ghost-imaging experiment by measuring reflected photons [J]. *Physical Review A*, 2008, 77(4): 041801.
- [3] Shapiro J H. Computational ghost imaging [J]. *Physical Review A*, 2008, 78(6): 061802.
- [4] Bromberg Y, Katz O, Silberberg Y. Ghost imaging with a single detector[J]. *Physical Review A*, 2009, 79(5): 053840.
- [5] Edgar M P, Gibson G M, Padgett M J. Principles and prospects for single-pixel imaging [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(1): 13-20.
- [6] Sun M J, Zhang J M. Single-pixel imaging and its application in three-dimensional reconstruction: a brief review[J]. *Sensors*, 2019, 19(3): 732.
- [7] Zhang Z B, Wang X Y, Zheng G A, et al. Hadamard

- single-pixel imaging versus Fourier single-pixel imaging[J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 19619-19639.
- [8] Zhang Z B, Ma X, Zhong J G. Single-pixel imaging by means of Fourier spectrum acquisition[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6225.
- [9] Yao W Q, Huang W H, Yang C P. Theoretical analysis of spectrum reconstruction imaging using single-pixel detection[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(3): 034201.
姚伟强, 黄文浩, 杨初平. 单像素探测频谱重构成像理论分析[J]. *物理学报*, 2017, 66(3): 034201.
- [10] Sun B, Edgar M P, Bowman R, et al. 3D computational imaging with single-pixel detectors[J]. *Science*, 2013, 340(6134): 844-847.
- [11] Zhang Z B, Zhong J G. Three-dimensional single-pixel imaging with far fewer measurements than effective image pixels[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(11): 2497-2500.
- [12] Zhang Z B, Liu S J, Peng J Z, et al. Simultaneous spatial, spectral, and 3D compressive imaging via efficient Fourier single-pixel measurements [J]. *Optica*, 2018, 5(3): 315-319.
- [13] Salvador-Balaguer E, Latorre-Carmona P, Chabert C, et al. Low-cost single-pixel 3D imaging by using an LED array[J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 15623-15631.
- [14] Edgar M P, Gibson G M, Bowman R W, et al. Simultaneous real-time visible and infrared video with single-pixel detectors [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10669.
- [15] Zhang Z, Wang X, Zheng G, et al. Fast Fourier single-pixel imaging via binary illumination [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 12029.
- [16] Xu Z H, Chen W, Penueles J, et al. 1000 fps computational ghost imaging using LED-based structured illumination[J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 2427-2434.
- [17] She R B, Liu W Q, Lu Y F, et al. Fourier single-pixel imaging in the terahertz regime [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(2): 021101.
- [18] Zhang Z B, Ye J Q, Deng Q W, et al. Image-free real-time detection and tracking of fast moving object using a single-pixel detector [J]. *Optics Express*, 2019, 27(24): 35394-35401.
- [19] Deng Q W, Zhang Z B, Zhong J G. Image-free real-time 3-D tracking of a fast-moving object using dual-pixel detection [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(17): 4734-4737.
- [20] Jiao S M, Sun M J, Gao Y, et al. Motion estimation and quality enhancement for a single image in dynamic single-pixel imaging [J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 12841-12854.
- [21] Zhao K X, Li T X, Hou X, et al. Single-pixel spatial frequency domain imaging system based on lock-in photon-counting detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(4): 0412002.
赵宽心, 李同心, 侯茜, 等. 基于锁相光子计数测量的单像素空间频率域成像系统[J]. *光学学报*, 2019, 39(4): 0412002.
- [22] Zhang C G, He W Q, Han B N, et al. Compressive optical steganography via single-pixel imaging [J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 13469-13478.
- [23] Jiao S M, Feng J, Gao Y, et al. Visual cryptography in single-pixel imaging [J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 7301-7313.