

前向调制散斑偏振关联成像技术研究

张家民^{1,2}, 时东锋², 黄见^{1,2}, 吕申龙^{1,2}, 王英俭^{1,2}

(1. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要: 近年来, 关联成像成为光学成像领域的前沿和热点研究之一, 它是一种新型的成像技术, 具有广泛的应用价值和前景。偏振探测技术可以提升系统探测识别能力, 且具有对不同材质物体的分类能力。将关联成像技术与偏振探测技术相结合, 固定探测端偏振配置, 使用 Hadamard 模式照明散斑, 对照明散斑进行分时偏振调制, 搭建了前向调制偏振关联成像系统。利用该系统对含有多材质物体的场景进行了偏振探测成像实验, 利用探测信号与照明散斑计算出了场景的强度和偏振信息。使用演化压缩采样复原技术, 在不同采样率下对场景信息进行了复原, 在 12.5% 的采样率下获取了场景清晰的强度和偏振信息。

关键词: 关联成像; 偏振探测; 前向调制; 压缩采样

中图分类号: O431.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1041001

Polarization correlated imaging based on forward modulated speckles

Zhang Jiamin^{1,2}, Shi Dongfeng², Huang Jian^{1,2}, Lv Shenlong^{1,2}, Wang Yingjian^{1,2}

(1. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Correlated imaging was a new type of imaging technology, with great application value and promising prospect, which has recently become a hotspot and one of the frontiers of optical imaging researches. Polarization detecting method can improve system's ability of object detection and recognition, and categorize detected objects based on its materials. By combining correlated imaging with polarization detection, a correlated imaging system was built based on forward modulated polarization, which utilized fixed probe side polarization configuration and used Hadamard mode speckles modulated by time-shared polarization method to illuminate scenes. The system was used to carry out the polarization detection imaging experiments for the scenes with multi-material objects. The intensity and polarized images of scenes were retrieved using the correlation between the detected intensities and illumination speckles. Using evolutionary compressed sampling restoration techniques, the information of scenes was reconstructed under different sampling ratios. The clear images of the intensity and polarization are obtained under the sampling ratio of 12.5%.

Key words: correlated imaging; polarization detection; forward modulated; compressed sampling

收稿日期: 2018-05-05; 修订日期: 2018-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(11404344, 41505019); 中国科学院创新基金(CXJJ-17S029); 中国科学院光束控制重点实验室基金(2017LBC007)

作者简介: 张家民(1992-), 男, 硕士生, 主要从事激光雷达成像方面的研究。Email: jiamim@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 时东锋(1987-), 男, 副研究员, 主要从事激光雷达成像、偏振探测技术等方面的研究。Email: dfshi@aiofm.ac.cn

0 引言

关联成像方案最早由前苏联学者 Klyshko 提出^[1]。1995 年, Pittman 等^[2]在实验上实现了量子关联成像。2002 年, Bennink 等^[3]使用可模仿纠缠光的位置与角度关联的经典光源实现了关联成像, 这一研究成果大大推动了关联成像由理论研究向实际应用的的发展。关联成像使用非扫描的单像素探测器对物体进行成像, 它可以在传统成像系统无法进行成像或者造价昂贵的波段对目标场景物体进行成像, 在军事、医学、遥感等诸多领域有着广泛的应用前景^[4-11]。而偏振探测成像能够提高系统的探测识别性能, 其在传统面阵成像中的应用价值得到了广泛的认可^[12-17]。将关联成像和偏振探测技术相结合, 把探测目标信息扩展到光强、偏振度等, 可以更加全面的表征目标信息。与传统的关联成像相比, 偏振关联成像^[18-21]能够在弱反射信号下进行高信噪比成像, 有效提高探测成像信噪比和探测距离; 可以利用不同材质之间偏振特性的差异实现对不同材质物体的分类。已有的偏振关联成像系统采用固定前向照明散斑的偏振特性, 而对物体后向反射光进行偏振分光, 然后采用多个单像素探测器分别对多路不同偏振光进行探测, 进而完成对偏振信息的获取。文中对前向照明散斑进行偏振调制, 并固定物体后向反射光偏振探测配置, 来完成对物体偏振信息的获取。

1 原理

1.1 Stokes 参数和 Muller 矩阵

任何一束光的偏振特性都可以由 Stokes 矢量 S 描述:

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: S_0 表示总光强; S_1 表示水平与垂直线偏振量差值; S_2 表示 45° 与 -45° 线偏振量差值; S_3 表示左旋与右旋圆偏振量差值。

当光束与物体相互作用后, 其反射光可以用新的 Stokes 参数 S' 来表示其偏振特性。两者之间的关系表示为:

$$S' = MS \quad (2)$$

式中: M 为表示物体偏振特性的 4×4 Muller 矩阵。

对于水平线偏振光, 其 Stokes 参数可表示为^[22]:

$$S_{//} = I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: I_0 为光的总强度。

对于非双折射物体, 可用对角线非零的矩阵表示其 Mueller 矩阵^[22]:

$$M_O = \begin{bmatrix} m_{00} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: m_{00} 表示总的散射光强信息; m_{11} 和 m_{22} 表示线消偏振信息; m_{33} 表示圆消偏振信息。由于 m_{11} 与 m_{22} 的值十分接近, 所以公式(4)中可以把 m_{22} 用 m_{11} 代替^[22]。当获得了物体 Muller 矩阵参数之后, 根据此矩阵参数就可以获得物体的偏振和强度信息。

对于垂直线偏振片, 其 Muller 矩阵表示为^[23]:

$$M_V = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

对于与水平方向有一定夹角 θ 的二分之一波片, 其 Mueller 矩阵表示为^[23]:

$$M_{(\lambda/2, \theta)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 4\theta & \sin 4\theta & 0 \\ 0 & \sin 4\theta & -\cos 4\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

文中通过调制出射光, 使其具有两种不同偏振态: 水平偏振态和垂直偏振态。利用两种不同偏振光分别对物体进行照射。首先水平偏振光照射物体后, 反射光经过垂直偏振片, 其 Stokes 参数可以表示为:

$$S_{//} = M_V M_O S_{//} = \frac{1}{2} I_0 \begin{bmatrix} m_{00} - m_{11} \\ -m_{00} + m_{11} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

垂直偏振光照射物体后, 反射光经垂直偏振片, 其 Stokes 参数可以表示为:

$$S_{R\perp} = M_V M_O S_{\perp} = M_V M_O M_{\left(\frac{\lambda}{2}, 45^\circ\right)} S_{//} = \frac{1}{2} I_0 \begin{bmatrix} m_{00} + m_{11} \\ -m_{00} - m_{11} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

物体反射光经垂直偏振片后被单像素探测器探测, 由于探测器只能探测反射光的强度值, 其两种情况下的探测值可以表示为:

$$I_{//} = \frac{1}{2} I_0 (m_{00} - m_{11}) \quad (9)$$

$$I_{\perp} = \frac{1}{2} I_0 (m_{00} + m_{11}) \quad (10)$$

由公式(9)、(10)的和可得:

$$I_D = I_{//} + I_{\perp} = I_0 m_{00} \quad (11)$$

由公式(9)、(10)的差可得:

$$I_{//} - I_{\perp} = I_0 m_{11} \quad (12)$$

由以上分析可以看出, 采用水平和垂直两种偏振调制光对物体进行照明, 并探测物体固定偏振态的反射光, 最后利用获取的两种不同偏振照明情况下的探测强度进行相应运算也可获得物体偏振参数信息, 根据此参数可以反演出物体的强度图像、线退偏图像和线偏振度图像。

1.2 关联成像技术

关联成像系统由单像素探测器、时间变化照明源和计算机算法等构成。时间变化照明源用来产生照明散斑^[4-11]。单像素探测器用来测量照明散斑与物体作用后反射光信号。当目标场景中包含多个具有相似反射率信息的不同材质物体时, 仅依靠反射率信息无法对这些物体进行区分。而利用不同材质物体之间偏振特性的差异性, 采用偏振探测则可以在此类情况下有效地实现对不同材质物体的分类。

Hadamard 矩阵是由维度为 2 的方块矩阵生成:

$$H_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

对任意一个以 2 为底 k 次幂的 Hadamard 矩阵, 都可以由以下公式递推获得:

$$H_{2^k} = \begin{pmatrix} H_{2^{k-1}} & H_{2^{k-1}} \\ H_{2^{k-1}} & -H_{2^{k-1}} \end{pmatrix} \quad (14)$$

由 Hadamard 矩阵的每一列和每一行相乘获得照明矩阵, 照明矩阵经光调制系统后得到照明散斑 $P(x, y)$ 。文中采用的 Hadamard 矩阵为 H_{128} , 一共生成 16 384 (128×128) 个照明矩阵, 其大小为 128×128, 且

只含有 1 和 -1 两种数值。由于文中系统中使用数字微镜器件(DMD)来产生照明散斑, 其只能产生 0, 1 模式的照明散斑, 为此将每个照明矩阵生成互补的照明矩阵对 $H^\pm = (E \pm H)/2$, 其中 E 表示所有元素都为 1 的矩阵; H^+ 保留了 H 中为 1 的元素, H 中为 -1 的元素都变为 0; 对于 H^- , H 中为 1 的元素都变为 0, H 中为 -1 的元素都变成 1。三个矩阵满足 $H = H^+ - H^-$ 。使用 H^+ 和 H^- 照明矩阵下获取的探测强度值进行相减来获得 H 的系数^[11]。

假设在第 j 个照明矩阵 H_j^+ 作用下, 物体反射光经过垂直偏振片后被单像素探测器探测获取, 其测量值 D_j^+ 可以表示为^[20]:

$$D_j^+ = \sum_{x,y} P_j^+(x,y) O(x,y) \quad (15)$$

式中: $O(x, y)$ 表示物体信息; $P_j^+(x, y)$ 表示照明矩阵 H_j^+ 生成的照明散斑, 类似可以获得与之相对应的 H_j^- 照明矩阵下的测量值 D_j^- 。之后计算出探测强度值差 D_j :

$$D_j = D_j^+ - D_j^- = \sum_{x,y} (P_j^+(x,y) - P_j^-(x,y)) O(x,y) \quad (16)$$

根据探测强度值和照明矩阵计算出物体信息:

$$O'(x,y) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M H_j(x,y) D_j \quad (17)$$

根据 1.1 节的分析, 利用不同偏振照明散斑下的探测强度和, 即可获取物体的 m_{00} 参数图像:

$$m_{00}(x,y) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M H_j(x,y) (D_j^{//} + D_j^{\perp}) \quad (18)$$

式中: $D_j^{//}$ 和 D_j^{\perp} 分别代表在水平偏振和垂直偏振照明矩阵 $H_j(x, y)$ 作用下的测量值。

同理, 物体的 m_{11} 参数图像可以表示为:

$$m_{11}(x,y) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M H_j(x,y) (D_j^+ - D_j^{//}) \quad (19)$$

当计算出了相应的 Muller 矩阵参数图像, 进一步可以获取物体的线偏振度图像:

$$p_d(x,y) = \frac{m_{11}(x,y)}{m_{00}(x,y) + \varepsilon} \quad (20)$$

式中: ε 为常数(为了避免除零)。

2 实验装置与系统设置

2.1 实验装置

前向调制偏振关联成像实验装置和(Data Acquisition

System, DAS) 数据采集系统如图 1 所示, 532 nm 连续激光器出光, 经扩束镜照射到 DMD 上产生 Hadamard 模式照明散斑, 之后由起偏器对照明散斑进行调制来产生水平线偏振照明散斑, 经过镜头, 再由转轮进行相应偏振调制, 照射到目标场景上, 反射光经垂直线偏振片, 再经过 532 滤光片后, 由光电倍增管(PMT)获取反射信号强度。其中, 转轮含有两个子孔, 一个孔放置水平夹角为 45°的二分之一波片, 另一个孔是空置的。

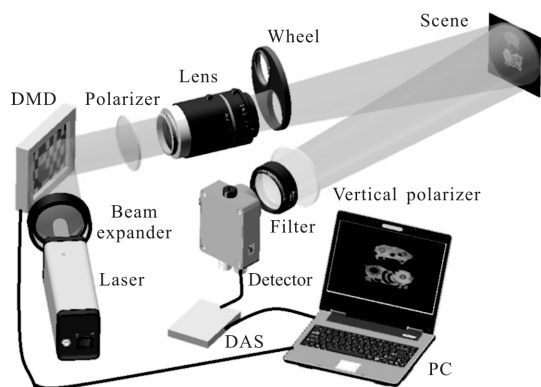


图 1 前向调制偏振关联成像系统, 数据采集系统

Fig.1 Forward modulated polarization correlated imaging system, DAS

2.2 实验场景

实验中所使用的两个场景如图 2 所示, 场景一上方有一只铝材质的小猪, 下方有一只塑料材质的小猪; 场景二中有一只铝材质的小兔子和一只塑料材质的小兔子, 铝材质的小兔子覆盖在塑料材质的小兔子上。

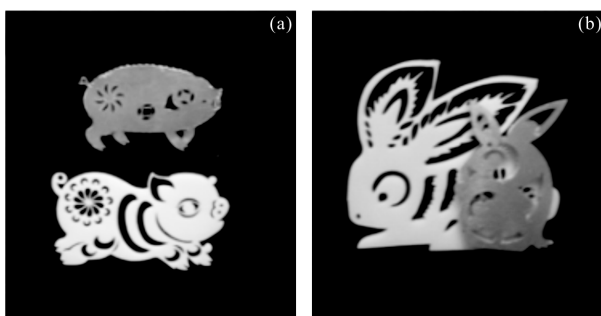


图 2 (a) 实验场景一, (b) 实验场景二

Fig.2 (a) Experimental scene one, (b) experimental scene two

3 实验结果

利用水平和垂直偏振照明散斑下光电倍增管获

取的全采样数据, 计算出场景一和场景二的强度图像(用 I 表示)、线退偏图像(用 LDI 表示)和线偏振度图像(用 DoLPI 表示), 如图 3 所示, 图 3(a)为场景一强度复原图像; 图 3(b)为场景一线退偏复原图像; 图 3(c)为场景一线偏振度复原图像; 图 3(d)为场景二强度复原图像; 图 3(e)为场景二线退偏复原图像; 图 3(f)为场景二线偏振度复原图像。

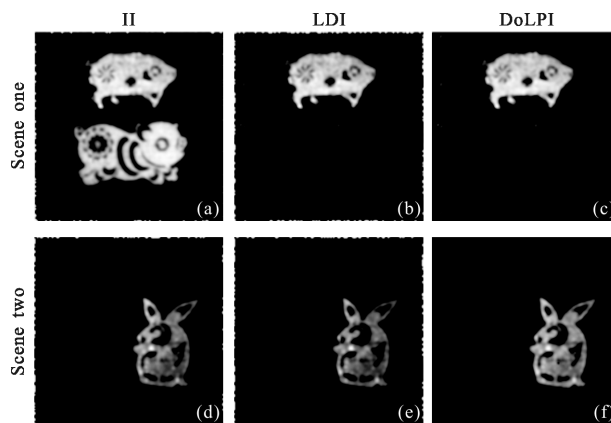


图 3 全采样数据下的复原结果

Fig.3 Full-sampled reconstructed images

从图 3 中可以看出, 在重构出的强度图像中含有铝材质和塑料材质的物体, 而线退偏图像中只含铝材质的物体。同时线偏振度图像也仅仅只含铝材质的物体。这是由于金属材料物体能够很好地保持光束原来的偏振特性, 而塑料材质的物体消偏振效应明显。结果表明通过计算 Muller 参数图像可以对具有不同消偏振特性的不同材质物体进行区分。在对场景二进行成像时, 由于两只兔子在视场内的反射光差异较大, 使得强度复原结果图像中塑料兔子图像较暗。

下面使用演化压缩采样复原技术来对物体信息进行复原, 演化压缩采样复原技术将探测信号按其值大小进行排序, 选取一定比例的大探测信号值及其对应的照明矩阵进行目标图像反演^[6]。假设图像像素数为 N , 进行反演时选取的探测信号值个数为 K , 则其采样率为: $Y=(K/N) \times 100\%$ 。该实验图像像素数为 16 384 (128×128)。当 $Y=100\%$ 时, 称之为全采样。对于场景一, 在不同采样率下复原的强度图像、线退偏图像和线偏振度图像, 如图 4 所示, 图 4(a)为参考强度图像即全采样强度复原图像; 图 4(b)~(f)为压缩采样率 3.125%、12.5%、25%、50% 和 75% 下的强

度复原图像;图 4(g)为参考线退偏图像即全采样线退偏复原图像;图 4(h)~(l)为压缩采样率 3.125%、12.5%、25%、50%和 75%下的线退偏复原图像;图 4(m)为参考线偏振度图像即全采样线偏振度复原图像;图 4(n)~(r)为压缩采样率 3.125%、12.5%、25%、50%和 75%下的线偏振度复原图像。对于场景二,在不同采样率下复原的强度图像、线退偏图像和线偏振度图

像,如图 5 所示,图 5(a)为参考强度图像即全采样强度复原图像;图 5(b)~(f)为采样率 3.125%、12.5%、25%、50%和 75%下的强度复原图像;图 5(g)为参考线退偏图像即全采样线退偏复原图像;图 5(h)~(l)为采样率 3.125%、12.5%、25%、50%和 75%下的线退偏复原图像;图 5(m)为参考线偏振度图像即全采样线偏振度复原图像;图 5(n)~(r)为采样率 3.125%、

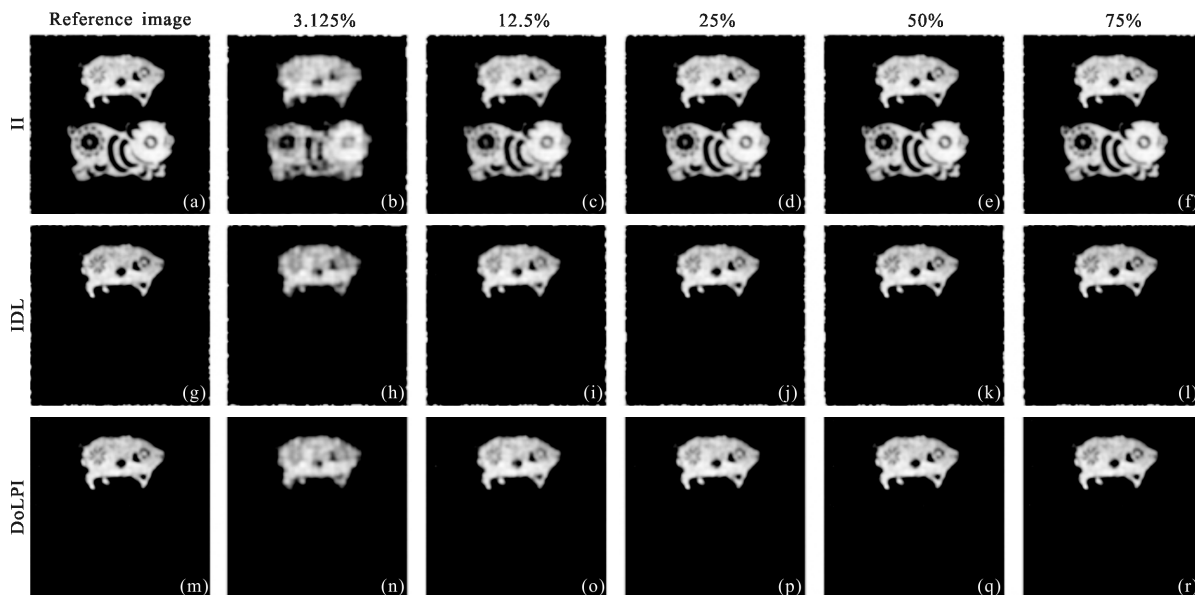


图 4 场景一在不同采样率下的复原结果

Fig.4 Reconstructed images under different sampling ratios of scene one

12.5%、25%、50%和 75%下的线偏振度复原图像。

从图 4 和图 5 可以看出,随着采样率的增大,图

像的复原质量越来越好。当采样率为 3.125%时,复原图像中包含了场景中大部分物体的轮廓和细节,

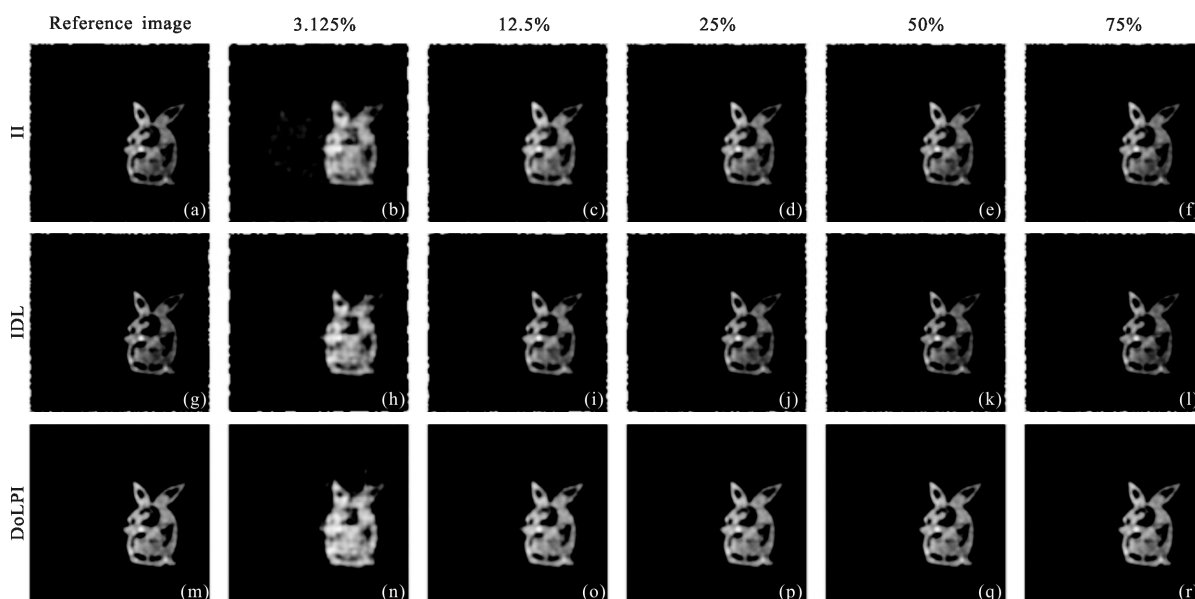


图 5 场景二在不同采样率下的复原结果

Fig.5 Reconstructed images under different sampling ratios of scene two

能较清晰地识别出图像中的物体。当采样率大于 25% 时,复原图像和参考图像的区别很小。结果表明演化压缩采样复原技术,可以降低系统采样率,提高图像重构效率。

采用相关系数对图像复原质量进行定量分析。相关系数 r 计算公式:

$$r = \frac{\sum_m (A_m - \bar{A}) \cdot (B_m - \bar{B})}{\sqrt{\sum_m (A_m - \bar{A})^2 \cdot \sum_m (B_m - \bar{B})^2}} \quad (21)$$

式中: A 和 B 是以 m 为索引的图像矩阵; \bar{A} 和 \bar{B} 分别代表 A 和 B 的平均值。相关系数越小,图像复原质量越差,反之,图像复原质量越好。

分别计算出不同采样率下的复原图像与全采样复原图像的相关系数,相关系数变化曲线如图 6 所示。从图 6 中可以看出,采样率为 3.125% 时,相关系数已经超过 0.9。当采样率大于 12.5% 时,复原图像的相关系数接近 0.99,且采样率在 3.125% 和 12.5% 之间的相关系数变化率较大,而随着采样率的逐渐增大,相关系数变化率逐渐减小。结果同样表明采用演化压缩采样复原技术在较小的采样率下就可以获取高质量的复原图像,该技术可以减小系统采样率,提高系统成像效率。

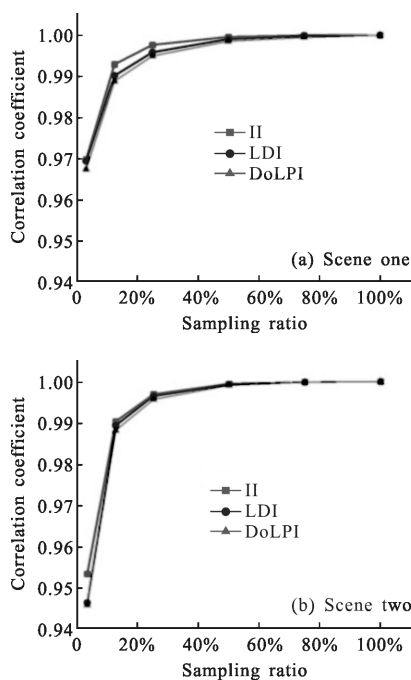


图 6 不同采样率下的相关系数变化曲线

Fig.6 Curves of the correlation coefficient under different sampling ratios

4 结 论

偏振关联成像结合了偏振探测技术和关联成像技术的优点,可以提高对目标物体的探测识别能力,并可实现对不同材质物体的区分,在军事、医学等多个领域具有广泛的应用价值。文中采用前向调制技术,对照明散斑进行前向偏振调制,构建了前向调制偏振关联成像系统,利用该系统获取了多材质物体的强度和线偏振信息,并且使用演化压缩采样复原技术,在低采样率下,很好的复原出了目标物体的轮廓和细节信息。文中方法计算出了物体 Muller 参数矩阵的强度信息和线退偏信息,没有对其他参数进行考虑,在接下来的工作中开展进一步的研究,拓展系统及方法获取更多的偏振信息。

参考文献:

- [1] Klyshko D N, Klyshko D N. Effect of focusing on photon correlation in parametric light scattering [J]. *Zh Eksp Teor Fiz*, 1988, 94: 82-90.
- [2] 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.
- [3] Bennink R S, Bentley S J, Boyd R W. "Two-photon" coincidence imaging with a classical source [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(11): 113601.
- [4] Radwell N, Mitchell K J, Gibson G M, et al. Single-pixel infrared and visible microscope[J]. *Optica*, 2014, 1(5): 285-289.
- [5] Welsh S S, Edgar M P, Bowman R, et al. Fast full-color computational imaging with single-pixel detectors [J]. *Optics Express*, 2013, 21(20): 23068-23074.
- [6] Soldevila F, Clemente P, Tajahuerce E, et al. Computational imaging with a balanced detector [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 29181.
- [7] 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.
- [8] Khamoushi S M M, Nosrati Y, Tavassoli S H. Sinusoidal ghost imaging[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(15): 3452-3455.
- [9] Zhang Z, Ma X, Zhong J. Single-pixel imaging by means of Fourier spectrum acquisition [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6225.
- [10] Guo Shuxu, Zhang Chi, Cao Junsheng, et al. Object

- reconstruction by compressive sensing based on normalized ghost imaging [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(1): 288–294. (in Chinese)
- [11] Li Mingfei, Mo Xiaofan, Zhao Lianjie. Single-pixel remote imaging based on Walsh-Hadamard transform [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(6): 064201. (in Chinese)
- [12] Breugnot S, Clemenceau P. Modeling and performance of a polarization active imager at $\lambda=806$ nm [C]//AeroSense'99. International Society for Optics and Photonics, 1999: 449–460.
- [13] Chun C S L, Sadjadi F A. Polarimetric laser radar target classification[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(14): 1806–1808.
- [14] Yu Wenkai, Yao Xuri, Liu Xuefeng, et al. Compressed sensing for ultra-weak light counting imaging[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(10): 2283–2292. (in Chinese)
- [15] Li Yubo, Zhang Peng, Zeng Yuxiao, et al. Remote sensing measurement by full-Stokes-vector based on opto-electronic modulator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 335–339. (in Chinese)
- [16] Liu Biliu, Shi Jiaming, Zhao Dapeng, et al. Mechanism of infrared polarization detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 777–781. (in Chinese)
- [17] Li Shujun, Jiang Huilin, Zhu Jingping, et al. Development status and key technologies of polarization imaging detection [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 803–809. (in Chinese)
- [18] Liu Y X, Shi J H, Zeng G H, Single-photon-counting polarization ghost imaging [J]. *Appl Optics*, 2016, 55: 10347–10351.
- [19] Su Zhiqiang, Yan Changxiang, Zhang Junqiang, et al. Inversion of quartz glass and green paint based on polarization characters[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(5): 547–553. (in Chinese)
- [20] Welsh S S, Edgar M P, Bowman R, et al. Near video-rate linear Stokes imaging with single-pixel detectors[J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(2): 025705.
- [21] Shi D, Hu S, Wang Y. Polarimetric ghost imaging[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(5): 1231–1234.
- [22] Shi D F, Wang F, Jian H, et al. Compressed polarimetric ghost imaging of different material's reflective objects [J]. *Optical Review*, 2015, 22(6): 882–887.
- [23] Goldstein D H. Polarized Light [M]. US: CRC Press, 2016: 83–104.