

全 Stokes 偏振关联成像技术研究

张家民^{1,2}, 时东锋^{1,3}, 黄见¹, 王英俭^{1,2}

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学 环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;
3. 中国科学院光束控制重点实验室, 四川 成都 610209)

摘要: 近年来, 随着关联成像技术的高速发展, 已被广泛应用于诸多领域内, 并引起了高度关注。偏振探测技术能够区分不同材质物体, 可以增强系统的探测识别能力。文中结合偏振探测和关联成像技术的优点, 利用 Walsh-Hadamard 散斑对场景进行照明, 并对场景反射光进行分时偏振探测, 实现了对场景的全 Stokes 偏振关联成像。搭建相应的实验系统对多材质物体进行了成像实验, 利用不同偏振探测信号与照明散斑计算并获得了物体的 Stokes 参数图像, 实现了对同一场景中的不同材质物体和相同材质不同结构物体的区分。通过演化压缩采样复原技术, 在不同采样率下对物体图像进行了复原, 结果表明: 演化压缩采样复原技术能在较低的采样率下, 复原出清晰的场景全偏振信息。

关键词: 关联成像; 偏振探测; Stokes 参数; 压缩采样

中图分类号: O431.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0624001

Full Stokes polarization correlated imaging

Zhang Jiamin^{1,2}, Shi Dongfeng^{1,3}, Huang Jian¹, Wang Yingjian^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
3. Key Laboratory of Optical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

Abstract: In recent years, with the rapid development of associated imaging technology, it has been widely applied in many fields and has attracted great attention. The polarization detection technology can distinguish different material objects and enhance the system ability of detecting and identifying. In this paper, with the advantages of polarization detection techniques and associated imaging techniques, the Walsh-Hadamard speckle was used to illuminate the scene, the scene reflection light was detected by time-sharing polarization, and the full Stokes polarization correlation imaging of the scene was realized. The corresponding experimental system was set up, and the imaging experiments of multi-material objects were carried out. Using the signals of different polarization states and illumination speckles, the Stokes parameters images of objects were obtained by calculating. The distinguish of different material objects and the objects with the same material and different structures in the same scene were realized. Through

收稿日期: 2018-01-05; 修订日期: 2018-02-15

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

通讯作者: 时东锋(1987-), 男, 副研究员, 博士, 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

the evolutionary compression sampling recovery technology, the images were restored at different sampling ratios. The results show that the evolutionary compression sampling recovery technology can restore clear full polarization information at a lower sampling rate.

Key words: correlated imaging; polarization detection; Stokes parameters; compressed sampling

0 引言

关联成像是一种新型的成像技术,近几年来受到学者的广泛关注^[1-8]。其作为一种非定域成像方式,与传统线性光学成像相比,关联成像具有其独特的优点: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,突破传统衍射极限进行超分辨率成像,低于 Nyquist 采样极限成像和极弱光下高信噪比成像等。由于其巨大的应用潜力,对关联成像的研究逐渐从基础机制研究转移到实际应用的探讨,在诸如遥感成像、生物医学成像、军事侦察和光学加密等领域均取得了进展。偏振成像技术^[9-16]与传统的强度探测成像技术相比,可以有效提升探测信息量,提高系统对目标物体的识别能力,同时可以利用不同材质物体之间偏振特性的差异实现对物体的区分。近年来,有学者将偏振成像和关联成像相结合,融合二者优点,实现了偏振关联成像。已有的研究表明,偏振关联成像弥补了传统依靠反射辐射强度进行关联成像的不足,有效提升了关联成像的探测识别能力。现有的偏振关联成像系统^[17-20]只探测并计算了物体部分 Stokes 参数信息,不能全面描述物体偏振特性。文中将偏振成像技术与关联成像相结合,利用分时偏振探测,实现了对物体的全 Stokes 偏振关联成像,从而对物体偏振特性进行全面描述。

1 原理

1.1 Stokes 参量

任意一束光都可以用 Stokes 参量 S 表示:

$$S = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 + I_{90^\circ} \\ I_0 - I_{90^\circ} \\ I_{45^\circ} - I_{-45^\circ} \\ I_R - I_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: I 表示光的总强度; Q 表示 0° 和 90° 偏振方向上的光强差; U 表示 45° 和 -45° 偏振方向上的光强

差; V 表示右旋与左旋圆偏振光的光强差。

基于 Stokes 参量描述法,其偏振度为光束中偏振部分的光强和整个光强之比值,其表达式为:

$$Dop = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I} \quad (2)$$

1.2 关联成像

关联成像系统由时空变化的结构光、单像素探测器和计算机等单元构成。其中时空变化的结构光由激光器和数字微镜阵列 (Digital Micromirror Devices, DMD) 组成。DMD 对激光进行时空结构化调制产生时空变化的结构光; 单像素探测器件主要有光电倍增管 (Photomultiplier Tube, PMT) 和雪崩光电二极管 (Avalanche Photodiode, APD) 等。单像素探测器用来测量调制结构光与物体作用后的反射光信号; 计算机主要功能是获取单像素探测器的探测信号, 控制 DMD 对激光进行时空变化结构化调制, 以及重构出目标场景图像。已有的关联成像系统对激光进行随机结构调制, 而文中使用 Walsh-Hadamard 模式调制结构光^[8]。

Walsh-Hadamard 矩阵由 2×2 的矩阵递归生成:

$$H_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

对任意一个 $2^k \times 2^k$ 的 Walsh-Hadamard 矩阵, 可以由以下递推公式获得:

$$H_{2^k} = \begin{pmatrix} H_{2^{k-1}} & H_{2^{k-1}} \\ H_{2^{k-1}} & -H_{2^{k-1}} \end{pmatrix} \quad (4)$$

由 Walsh-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 Walsh-Hadamard 矩阵为 H_{128} , 一共生成 $16\ 384 (128^2)$ 个 128×128 照明矩阵, 每个矩阵元素的值为 1 或者 -1。由于文中系统中使用 DMD 来产生照明散斑, 其只能调制成包含 0 或者 1 的照明散斑。因此需要将每个照明矩阵拆分成互补的照明矩阵对 $H^\pm = (E \pm H)/2$, 其中 E 表示全部元素都为 1 的方块矩阵; H^+ 保留了 H 中为 1 的元素, H 中

为-1 的元素变为 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^[8]。

在第 j 个照明矩阵 H_j^+ 作用下, 物体反射光经过对应的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^[10]:

$$D_j^+ = \sum_{x,y} P_j^+(x,y) O(x,y) \quad (5)$$

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 :

$$D_j = D_j^+ - D_j^- = \sum_{x,y} (P_j^+(x,y) - P_j^-(x,y)) O(x,y) \quad (6)$$

根据探测强度值和照明矩阵可以计算出物体信息:

$$O(x,y) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M H_j(x,y) D_j \quad (7)$$

式中: M 为采样个数; H_j 为第 j 个照明矩阵。

根据 1.1 节的分析, 利用 0° 和 90° 偏振探测强度和可以获得场景的强度图像 $I(x,y)$:

$$I(x,y) = O_{0^\circ}(x,y) + O_{90^\circ}(x,y) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M H_j(x,y) (D_j^{0^\circ} - D_j^{90^\circ}) \quad (8)$$

式中: $O_{0^\circ}(x,y)$ 和 $O_{90^\circ}(x,y)$ 分别表示在水平和垂直线偏振探测下的复原图像; $D_j^{0^\circ}$ 和 $D_j^{90^\circ}$ 分别是在 $H_j(x,y)$ 作用下 0° 和 90° 偏振探测测量值。

利用获取的 0° 和 90° 的线偏振探测强度差获得场景的线偏振图像 $Q(x,y)$:

$$Q(x,y) = O_{0^\circ}(x,y) - O_{90^\circ}(x,y) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M H_j(x,y) (D_j^{0^\circ} - D_j^{90^\circ}) \quad (9)$$

利用获取的 45° 和 -45° 的线偏振探测强度获得场景的线偏振图像 $U(x,y)$:

$$U(x,y) = O_{45^\circ}(x,y) - O_{-45^\circ}(x,y) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M H_j(x,y) (D_j^{45^\circ} - D_j^{-45^\circ}) \quad (10)$$

式中: $O_{45^\circ}(x,y)$ 和 $O_{-45^\circ}(x,y)$ 分别表示线偏振 45° 和 -45° 下的复原图像; $D_j^{45^\circ}$ 和 $D_j^{-45^\circ}$ 分别是在 $H_j(x,y)$ 作用下 45° 和 -45° 偏振探测测量值。

利用获取的右旋和左旋圆偏振探测强度获得场景的圆偏振图像 $V(x,y)$:

$$V(x,y) = O_R(x,y) - O_L(x,y) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M H_j(x,y) (D_j^R - D_j^L) \quad (11)$$

式中: $O_R(x,y)$ 和 $O_L(x,y)$ 分别表示右旋和左旋圆偏振

探测下的复原图像; D_j^R 和 D_j^L 分别是在 $H_j(x,y)$ 作用下的右旋和左旋圆偏振探测测量值。

由场景强度图像、线偏振图像 1、2 和圆偏振图像计算出场景偏振度图像 $DoP(x,y)$:

$$DoP(x,y) = \frac{\sqrt{Q^2(x,y) + U^2(x,y) + V^2(x,y)}}{I(x,y) + \alpha} \quad (12)$$

式中: α 为常数, 避免除零。

2 实验装置与系统设置

2.1 实验装置

全 Stokes 偏振关联成像实验装置如图 1 所示。532 nm 连续激光器出光, 照射到 DMD 上, 使用计算机控制 DMD 对激光进行调制, 产生 Walsh-Hadamard 模式照明散斑, 照射到目标场景上, 反射光经过含有偏振片的转轮, 再经过汇聚透镜和 532 nm 滤光片后, 由 PMT 获取反射信号强度。其中转轮含有 6 个子孔, 分别放置有水平偏振片、垂直偏振片、与水平夹角 45° 偏振片、与水平夹角 -45° 、右旋圆偏振片和左旋圆偏振片。调节转轮, 每次对物体反射光进行一种偏振探测和采集, 一共探测和采集 6 组数据, 最后利用照明散斑调制信息和偏振探测强度值根据公式(6)~(12)反演获取物体偏振图像。

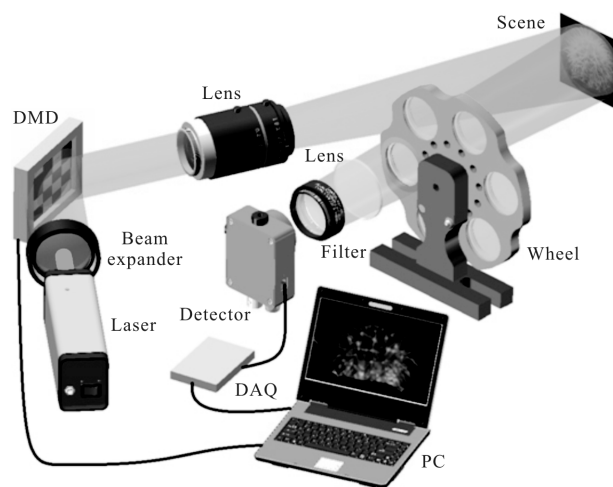


图 1 全 Stokes 偏振关联成像系统, (DAQ) 数据采集系统
Fig.1 Full Stokes polarization correlated imaging system, (DAQ) data acquisition system

2.2 实验场景

实验中所使用的两个场景如图 2 所示, 场景一右上侧有一个铝材质的公鸡, 左侧有一个塑料材质

的公鸡,右下方有一个长方形铜薄片;场景二中有一个仙人球植物。

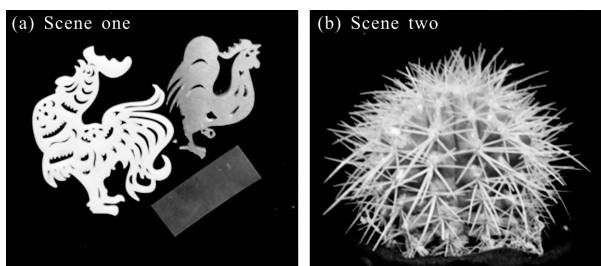


图 2 (a) 实验场景一和(b) 实验场景二

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

3 实验结果

利用水平、垂直、线偏振 -45° 和 45° 、右旋和左旋圆偏振全部测量数据,复原出场景一和场景二的水平偏振图像(用 I_0 表示)、垂直偏振图像(用 I_{90} 表示)、线偏振 -45° 图像(用 I_{-45} 表示)、线偏振 45° 图像(用 I_{45} 表示)、左旋圆偏振图像(用 IL 表示)和右旋圆偏振图像(用 IR 表示)。结果如图 3 所示。

利用水平偏振和垂直偏振的全部测量数据,计算出场景一和场景二的强度图像(用 II 表示)、线偏

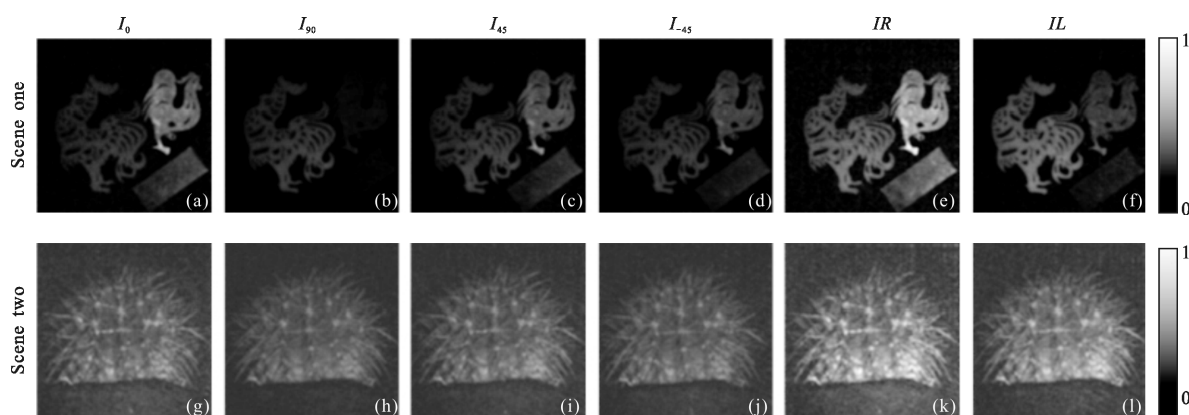


图 3 全采样数据下的复原图像;(a)~(f) 分别表示场景一的水平、垂直、线偏振 45° 和 -45° 、左旋和右旋圆偏振图像的复原结果;(g)~(l) 分别表示场景二的水平、垂直、线偏振 45° 和 -45° 、左旋和右旋圆偏振图像的复原结果

Fig.3 Full-sampled reconstructed images; (a)~(f) are reconstructed images of horizontal, vertical, linear depolarization of 45° and -45° , left and right circular polarization images of scene one, respectively; (g)~(l) are reconstructed images of horizontal, vertical, linear depolarization of 45° and -45° , left and right circular polarization images of scene two, respectively

振图像 1(用 QI 表示);利用 45° 和 -45° 线偏振的全部测量数据,计算出线偏振图像 2(用 UI 表示);利用右旋和左旋圆偏振的全部测量数据,计算出圆偏振图像(用 VI 表示);由 II 、 QI 、 UI 和 VI ,根据公式(12)计算出偏振度图像(用 $DoPI$ 表示),结果如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,在场景一的复原结果中,重构出的强度图像中含有铝材质公鸡、塑料材质公鸡和长方形铜薄片,而线偏振图像 1 和圆偏振图像中含铝材质公鸡和长方形铜薄片;线偏振图像 2 中有铝材质的公鸡和一半长方形铜薄片以及部分塑料材质的公鸡;偏振度图像中包含了铝材质的公鸡和完整的长方形铜薄片。在场景二的复原结果中,重构出的强度图像是一个完整的仙人球图像,而线偏振图像 1 中包含了少部分仙人球毛刺,线偏振图像 2 则包含了仙人球的大部分毛刺,而圆偏振图像中包含

了较少的仙人球毛刺部分,同时偏振度图像中包含了仙人球大部分毛刺信息。由于不同材质物体或者同一材质物体不同结构具有不同的偏振特性,相较于只对物体部分偏振信息进行探测,对物体进行全偏振探测可以较全面地对物体性质进行描述。结果表明通过计算 Stokes 参数图像可以对具有不同偏振特性的物体或同一材质不同结构的物体进行区分。假设图像像素数为 M ,进行反演时选取的探测信号值个数为 L ,则其采样率为: $X=(L/M)\times 100\%$ 。在以上反演过程中,使用了全采样探测数据进行偏振信息反演。下面将使用演化压缩采样复原技术来对物体信息进行复原,该技术可以采用少量的探测值反演出物体信息。演化压缩采样复原技术将探测信号按其值大小进行排序,然后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^[3]。

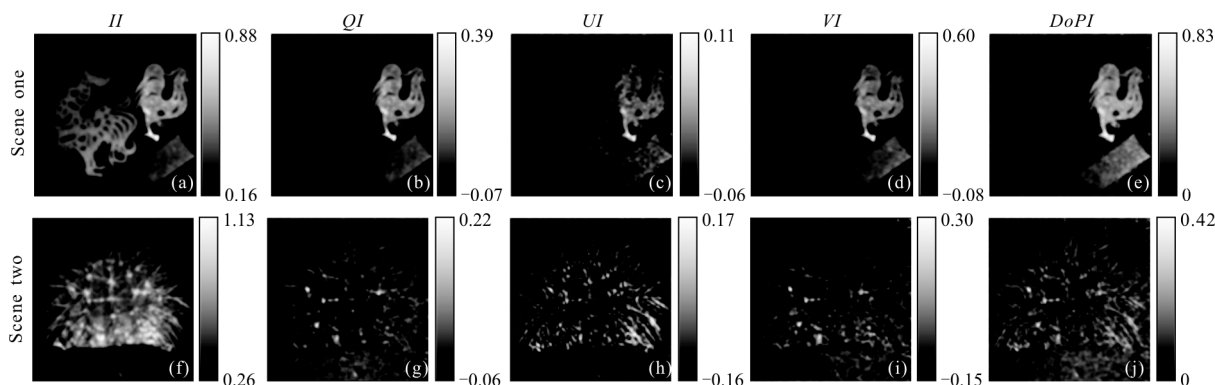


图 4 全采样数据下的复原图像;(a)~(e) 分别表示场景一的强度、线偏振度 1、线偏振度 2、圆偏振和偏振度的复原结果;
(f)~(j) 分别表示场景二的强度、线偏振度 1、线偏振度 2、圆偏振和偏振度的复原结果

Fig.4 Full-sampled reconstructed images; (a)~(e) are reconstructed images of intensity, linear depolarization one, linear depolarization two, circular polarization and degree of polarization of scene one, respectively; (f)~(j) are reconstructed images of intensity, linear depolarization one, linear depolarization two, circular polarization and degree of polarization of scene two, respectively

对于场景一，不同采样率下的复原图像分别进行归一化处理，获得的强度图像、线偏振图像 1、线

偏振图像 2、圆偏振图像和偏振度图像，如图 5 所示。

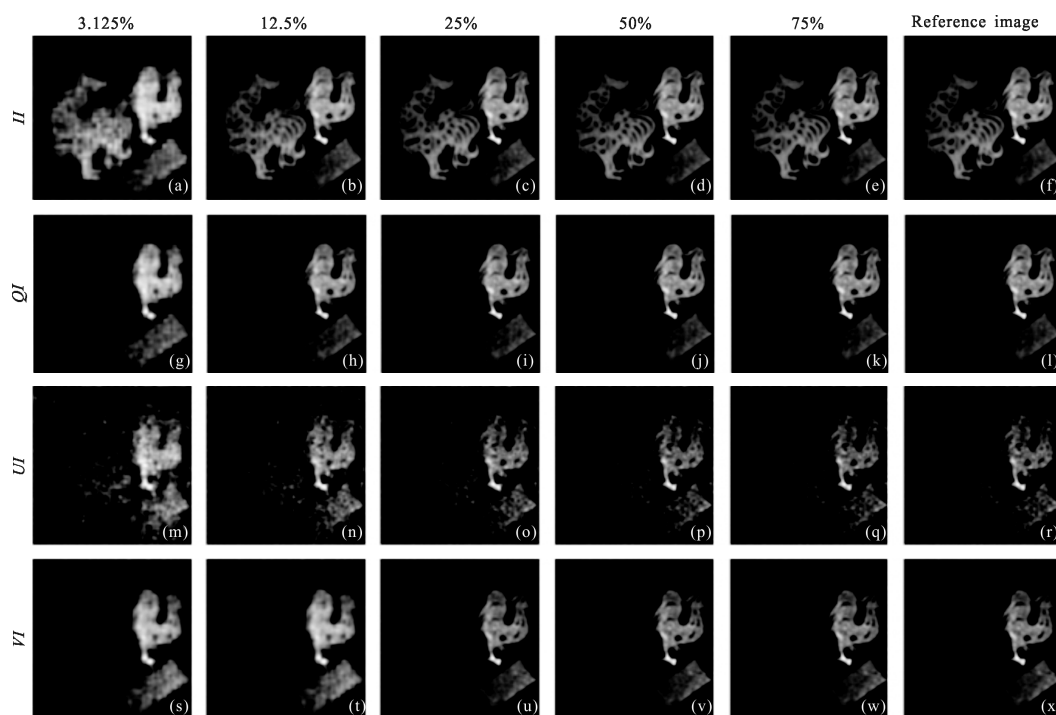


图 5 场景一在不同采样率下的复原图像;(a)~(e)为压缩采样率 3.125%、12.5%、25%、50%、75%下的强度复原图像;(f)为参考强度图像即全采样强度复原图像;(g)~(k)为压缩采样率 3.125%、12.5%、25%、50%、75%下的线偏振复原图像 1;(l)为参考线偏振图像 1即全采样线偏振复原图像 1;(m)~(q)为压缩采样率 3.125%、12.5%、25%、50%、75%下的线偏振复原图像 2;(r)为参考线偏振图像 2即全采样线偏振复原图像 2;(s)~(w)为压缩采样率 3.125%、12.5%、25%、50%、75%下的圆偏振图像;(x)为参考圆偏振图像

Fig.5 Reconstructed images under different sampling ratios of scene one; (a)~(e) are reconstructed images of intensity under 3.125%,12.5%, 25%,50% and 75% sampling ratios, respectively; (f) reference image of intensity, full-sampled reconstructed image of intensity; (g)~(k) are reconstructed images of linear depolarization one under 3.125%,12.5%,25%,50% and 75% sampling ratios, respectively; (l) reference image of linear depolarization one of full-sampled reconstructed image of linear depolarization; (m)~(q) are reconstructed images of degree of linear polarization images two under 3.125%、12.5%、25%、50% and 75% sampling ratios, respectively; (r) reference image of degree of linear polarization images two of full-sampled reconstructed image of degree of linear polarization; (s)~(w) are reconstructed images of circular polarization under 3.125%、12.5%、25%、50% and 75% sampling ratios, respectively; (x)reference image of circular polarization of full-sampled reconstructed image

对于场景二,不同采样率下的复原图像分别进行归一化处理,获得的强度图像、线偏振图像 1、线偏振图像 2 和偏振度图像,如图 6 所示。

从图 5 和图 6 可以看出,当采样率为 3.125% 时,复原图像中包含了基本的场景轮廓信息,能较清晰地识别出图像中的物体。当采样率为 25% 时,复原

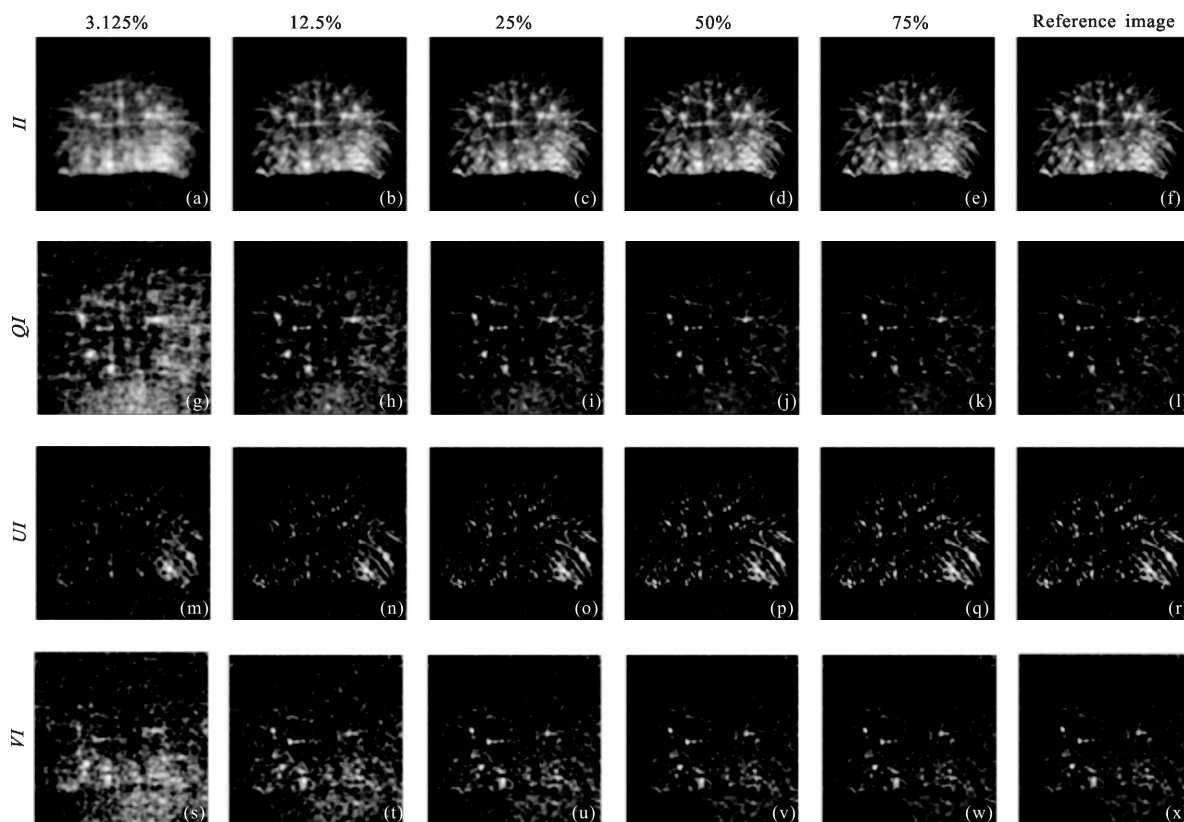


图 6 场景二在不同采样率下的复原图像;(a)~(e)为压缩采样率 3.125%、12.5%、25%、50% 和 75% 下的强度复原图像;(f)参考强度图像即全采样强度复原图像;(g)~(k)为压缩采样率 3.125%、12.5%、25%、50% 和 75% 下的线偏振复原图像 1;(l)参考线偏振图像 1 即全采样线偏振复原图像 1;(m)~(q)为压缩采样率 3.125%、12.5%、25%、50% 和 75% 下的线偏振复原图像 2;(r)参考线偏振图像 2 即全采样线偏振复原图像 2;(s)~(w)为压缩采样率 3.125%、12.5%、25%、50% 和 75% 下的圆偏振图像;(x)参考圆偏振图像

Fig.6 Reconstructed images under different sampling ratios of scene two; (a)~(e) are reconstructed images of intensity under 3.125%,12.5%, 25%、50% and 75% sampling ratios, respectively; (f) reference image of intensity, full-sampled reconstructed image of intensity; (g)~(k) are reconstructed images of linear depolarization one under 3.125%,12.5%,25%,50% and 75% sampling ratios, respectively; (l) reference image of linear depolarization one, full-sampled reconstructed image of linear depolarization; (m)~(q) are reconstructed images of degree of linear polarization two under 3.125%,12.5%,25%,50% and 75% sampling ratios, respectively; (r) reference image of degree of linear polarization two, full-sampled reconstructed image of degree of linear polarization; (s)~(w) are reconstructed images of circular polarization under 3.125%,12.5%,25%,50% and 75% sampling ratios, respectively; (x) reference image of circular polarization

图像包含了场景中较大部分轮廓和细节信息。当采样率大于 50% 时,压缩采样复原图像已经和参考图像(全采样图像)基本没有差别。而且随着采样率的增大,复原图像越来越清晰,即图像的复原质量越来越好,越来越接近参考图像。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 cof 计算公式:

$$cof = \frac{\sum_k (X_k - \bar{X}) \cdot (Y_k - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_k (X_k - \bar{X})^2 \cdot \sum_k (Y_k - \bar{Y})^2}} \quad (13)$$

式中: X 和 Y 是以 k 为索引的图像矩阵,其分别表示参考图像和不同采样率下的复原图像, \bar{X} 和 \bar{Y} 分别代

表 X 和 Y 的平均值。相关系数越大,图像复原质量越好,反之,则越差。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 7 所示。

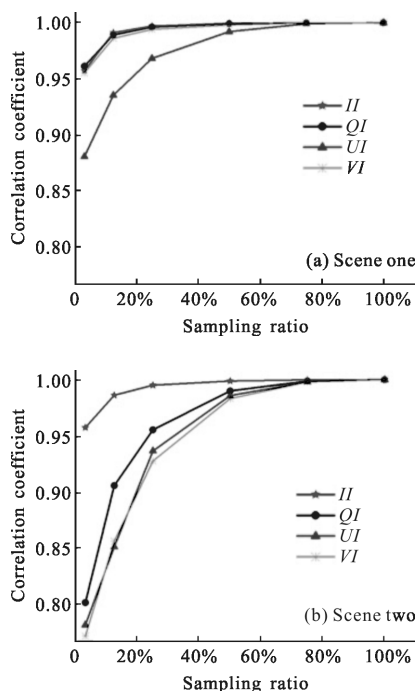


图 7 不同采样率下的相关系数变化曲线

Fig.7 Variation curves of the correlation coefficient under different sampling ratios

从图 7 可以看出,采样率为 3.125%时,相关系数已经超过 0.7。当采样率为 25%时,相关系数超过 0.9。当采样率超过 75%时,相关系数基本接近于 1。并且相关系数随着采样率的增大,而逐渐增大,但相关系数变化率逐渐减小。即压缩采样复原图像与全采样复原图像的差别随着采样率的增大,而逐渐减小。结果表明采用演化压缩采样复原技术能够在较低的采样率下复原出高质量的复原图像,该技术可以减小系统采样率,提高系统成像效率。

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,可以实现对不同材质物体和相同材质不同结构物体的区分,可应用于遥感、军事和医学等诸多领域,其具有广泛的应用价值和前景。文中利用全 Stokes 偏振关联成像系统获取了物体的全 Stokes 参数图像。使用演化压缩采样复原技术,在较低采样率下,

复原出了清晰的物体轮廓和细节信息。该技术可以减少成像系统的采样率,进而提高系统的成像效率。

参考文献:

- [1] Radwell N, Mitchell K J, Gibson G M, et al. Single-pixel infrared and visible microscope[J]. *Optica*, 2014, 1(5): 285–289.
- [2] 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.
- [3] Soldevila F, Clemente P, Tajahuerce E, et al. Computational imaging with a balanced detector [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 29181.
- [4] 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.
- [5] Khamoushi S M M, Nosrati Y, Tavassoli S H. Sinusoidal ghost imaging[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(15): 3452–3455.
- [6] Zhang Z, Ma X, Zhong J. Single-pixel imaging by means of Fourier spectrum acquisition [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6225.
- [7] Lu Minghai, Shen Xia, Han Shensheng. Ghost imaging via compressive sampling based on digital micromirror device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 0711002. (in Chinese)
陆明海, 沈夏, 韩申生. 基于数字微镜器件的压缩感知关联成像研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(7): 0711002.
- [8] Li Mingfei, Mo Xiaofan, Zhao Lianjie, et al. Single-pixel remote imaging based on walsh-hadamard transform[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(6): 064201. (in Chinese)
李明飞, 莫小范, 赵连洁, 等. 基于 Walsh-Hadamard 变换的单像素遥感成像[J]. *物理学报*, 2016, 65(6): 064201.
- [9] 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: 1286140.
- [10] Chun C S L, Sadjadi F A. Polarimetric laser radar target classification[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(14): 1806–1808.
- [11] Yu Hui, Zhang Rui, Li Kewu, et al. Principles and simulation of spectropolarimetric imaging technique based on static dual intensity-modulated Fourier transform [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(5): 054201. (in Chinese)
于慧, 张瑞, 李克武, 等. 双强度调制静态傅里叶变换偏振成像光谱系统测量原理及仿真[J]. *物理学报*, 2017, 66(5): 054201.

- [12] Li Jie, Zhu Jingping, Qi Chun, et al. Static Fourier-transform hyperspectral imaging full polarimetry [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(4): 044206. (in Chinese)
李杰, 朱京平, 齐春, 等. 静态傅里叶变换超光谱全偏振成像技术[J]. 物理学报, 2013, 62(4): 044206.
- [13] 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)
刘必璠, 时家明, 赵大鹏, 等. 红外偏振探测的机理[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(5): 777-781.
- [14] 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)
李淑军, 姜会林, 朱京平, 等. 偏振成像探测技术发展现状及关键技术[J]. 中国光学, 2013, 6(6): 803-809.
- [15] 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)
郭树旭, 张驰, 曹军胜, 等. 基于压缩感知归一化关联成像实现目标重构[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 288-294.
- [16] 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)
李宇波, 张鹏, 曾宇骁, 等. 基于电光调制器的全 Stokes 矢量的遥感测量[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(2): 335-339.
- [17] Liu Y X, Shi J H, Zeng G H, Single-photon-counting polarization ghost imaging [J]. *Appl Optics*, 2016, 55: 10347-10351.
- [18] 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.
- [19] Shi D, Hu S, Wang Y. Polarimetric ghost imaging[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(5): 1231-1234.
- [20] 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.