

图像融合在偏振关联成像中的应用

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, 偏振关联成像受到了研究学者的广泛关注, 其在目标探测、特征提取等领域有着一定的应用价值。全 Stokes 偏振关联成像系统可以获得目标的多个偏振态图像, 利用这些图像可分别从不同的角度分析目标的本征偏振信息, 但是这些图像之间具有很强的互补性和冗余性。为此将 HSL-*RGB* 图像融合技术应用于偏振关联成像系统中, 将系统获取的多个偏振图像进行有效地融合, 来全面描述目标结构, 提高目标探测识别效能。实验结果表明该融合技术在提高偏振关联成像系统识别和探测性能上效果显著。

关键词: 偏振关联成像; Stokes 参数; HSL-*RGB*; 图像融合

中图分类号: O431.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1226002

Application of image fusion in 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, polarization correlated imaging has been widely studied by researchers. It has great practical value in the field of target detection and feature extraction. A full Stokes polarization correlated imaging system can obtain multiple polarized images of the target. Using these images, the intrinsic polarization information of the target can be analyzed from different views. However, there is a strong complementarity and redundancy between these images. Therefore, HSL-*RGB* image fusion technology was applied to this system. The number of polarized images acquired by the system was effectively merged to comprehensively describe the target structure and improve the target detection and recognition efficiency. The experimental results confirm that the fusion technique is effective in improving the recognition and detection performance of polarization correlated imaging system.

Key words: polarization correlated imaging; Stokes parameters; HSL-*RGB*; image fusion

收稿日期: 2018-07-05; 修订日期: 2018-08-03

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

通讯作者: 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

当光照射到物体上,经过物体的反射、折射、散射和吸收等作用后,光将改变自身的偏振状态。这种作用的效果取决于物体自身特性,而这种特性为目标的探测识别提供了重要信息。偏振成像探测技术能够提供比传统强度成像系统更丰富的物体信息,这使得偏振探测技术在目标探测识别中具有独特的优势和作用。将新型关联成像^[1-7]和偏振探测技术相结合,实现偏振关联成像系统^[8-16],可以有效提高系统的探测识别效能。

图像融合将所采集的多信道图像数据经过图像处理 and 计算机技术等,最大限度地提取各自信道中的有利信息,最后综合成高质量的图像,以提高图像信息的利用率、改善计算机解译精度和可靠性、提升原始图像的空间分辨率和光谱分辨率^[17-18]。图像融合结果比原始图像有更好的性能,如:提高信噪比和图像的分类能力等。图像融合能够利用不同图像之间的冗余性和互补性,实现对同一场景更准确和更详实的描述。这些优势使图像融合广泛应用于遥感和医疗图像处理、地理信息分析、军事目标跟踪和识别等。物体的偏振特性可以用偏振参量图像来完整描述,其中强度图像反映了物体的反射率信息,它包含了物体丰富的细节信息,而偏振度图像和偏振角图像则可以反映物体表面的粗糙程度及纹理等信息。因此将强度图像、偏振度图像和偏振角图像融合,其融合结果将携带场景更加丰富的信息,有利于对场景中的物体进行识别和跟踪,从而提高目标探测和识别的性能。根据人眼的视觉特性,人眼只能同时区分数十种灰度等级,而对彩色的分辨力可以达到数万种。利用适当的彩色渲染可以提高对目标的识别能力,为此提出一种适用于偏振关联图像的伪彩色融合方法。利用融合结果可以更加直观地识别场景中不同偏振特性的物体,提高偏振关联成像系统的识别性能。

1 原理

1.1 Stokes 参量

任意一光束都可以用 Stokes 向量表示:

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

式中: I 为光的总强度; Q 为 0° 和 90° 方向上的光强差; U 为 45° 和 -45° 方向上的光强差; V 为右旋圆偏振光与左旋圆偏振光的光强差。

基于 Stokes 矢量描述法,偏振度(DoP)和偏振角(AoP)可表示为:

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

$$AoP = \frac{1}{2} \arctan \frac{U}{Q} \quad (3)$$

1.2 偏振关联成像

偏振关联成像系统由时空变化的结构光、偏振检测系统、单像素探测器和计算机构成。在照明矩阵生成的照明散斑作用下,物体反射光经过对应的偏振检测系统后被单像素探测器探测,其测量值可以表示为^[14]:

$$D_j = \sum_{x,y} P_j(x,y) O(x,y) \quad (4)$$

式中: $O(x,y)$ 表示物体信息; $P_j(x,y)$ 表示照明矩阵生成的照明散斑; D_j 表示探测强度值。

根据探测强度值和照明矩阵计算出物体信息:

$$O(x,y) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M H_j(x,y) D_j \quad (5)$$

式中: $H_j(x,y)$ 表示照明矩阵。

利用 0° 和 90° 线偏振探测强度可以计算出场景的强度图像 $I(x,y)$:

$$I(x,y) = I_{0^\circ}(x,y) + I_{90^\circ}(x,y) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M H_j(x,y) (D_j^{0^\circ} + D_j^{90^\circ}) \quad (6)$$

式中: $D_j^{0^\circ}$ 和 $D_j^{90^\circ}$ 分别是水平和垂直偏振探测测量值。

利用 0° 和 90° 线偏振探测强度差计算出场景的线偏振图像 1 $Q(x,y)$:

$$Q(x,y) = I_{0^\circ}(x,y) - I_{90^\circ}(x,y) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M H_j(x,y) (D_j^{0^\circ} - D_j^{90^\circ}) \quad (7)$$

利用线偏振 45° 和 -45° 线偏振探测强度差计算出场景的线偏振图像 2 $U(x,y)$:

$$U(x,y) = I_{45^\circ}(x,y) - I_{-45^\circ}(x,y) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M H_j(x,y) (D_j^{45^\circ} - D_j^{-45^\circ}) \quad (8)$$

式中: $D_j^{45^\circ}$ 和 $D_j^{-45^\circ}$ 分别是 45° 和 -45° 线偏振探测测量值。

利用右圆偏振和左圆偏振探测强度差计算出场景的圆偏振图像 $V(x, y)$:

$$V(x, y) = I_R(x, y) - I_L(x, y) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M H_j(x, y) (D_j^R - D_j^L) \quad (9)$$

式中: D_j^R 和 D_j^L 分别为右旋和左旋圆偏振探测测量值。

由场景 $I(x, y)$ 、 $Q(x, y)$ 、 $U(x, y)$ 和 $V(x, y)$, 根据公式(2)计算出场景偏振度图像 $\text{DoP}(x, y)$:

$$\text{DoP}(x, y) = \frac{\sqrt{Q^2(x, y) + U^2(x, y) + V^2(x, y)}}{I(x, y) + \alpha} \quad (10)$$

式中: α 为常数, 为了避免除零。

由场景 $Q(x, y)$ 和 $U(x, y)$, 根据公式(3)计算出场景偏振角图像 $\text{AoP}(x, y)$:

$$\text{AoP}(x, y) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{U(x, y)}{Q(x, y) + \varepsilon} \quad (11)$$

式中: ε 为常数, 为了避免除零。

1.3 图像融合算法

HSL 色彩模式是工业界的一种颜色标准, 是通过对色相(H)、饱和度(S)、明度(L)三个颜色通道变化以及他们相互叠加来得到各式各样的颜色, 这个标准几乎包括了人类视力所感知的所有颜色, 是目前运用最广的颜色系统之一。HSL 的 H 分量, 代表人眼所能感知的颜色范围, 这些颜色分布在一个平面的色相环上, 取值范围是 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的圆心角, 每个角度代表一种颜色。HSL 的 S 分量, 指的是色彩的饱和度, 它用 0% 到 100% 的值描述了相同的色相和明度下色彩纯度的变化, 数值越大, 颜色重的灰度越少, 颜色越鲜艳。HSL 的 L 分量, 指的是色彩的明度, 作用是控制色彩的明暗的变化。它同样使用了 0% 到 100% 的取值范围。数值越小, 色彩越暗, 越接近于黑色, 反之, 越接近于白色。

在 HSL 色彩模式下, H、S 和 L 分别对应成偏振度、偏振角和强度。根据计算出来的偏振度、偏振角和强度图像信息, 然后再根据 HSL 图像转换成 RGB 图像算法, 对融合图像进行处理, 得到彩色融合图像。HSL 图像转换 RGB 图像算法公式如下。

$$h' = \lfloor \frac{H}{60} \rfloor \%$$

$$f = \frac{H}{60} - h'$$

$$p = L(1 - S)$$

$$q = L(1 - fS)$$

$$t = L(1 - (1 - f)S)$$

$$(R, G, B) = \begin{cases} (L, t, p) & \text{if } h' = 0 \\ (q, L, p) & \text{if } h' = 1 \\ (p, L, t) & \text{if } h' = 2 \\ (p, q, L) & \text{if } h' = 3 \\ (t, p, L) & \text{if } h' = 4 \\ (L, p, q) & \text{if } h' = 5 \end{cases} \quad (12)$$

式中: R 、 G 和 B 代表 RGB 图像模式下三个颜色分量: 红色、绿色和蓝色。

2 系统装置与实验结果

系统装置如图 1 所示。实验中所使用的两个场景如图 2 所示, 场景一右侧有一个铝材质的公鸡, 左侧有一个塑料公鸡, 右下方有一个长方形铜薄片; 场景二中有一个仙人球植物。图中的“DAS”指数数据彩集系统。

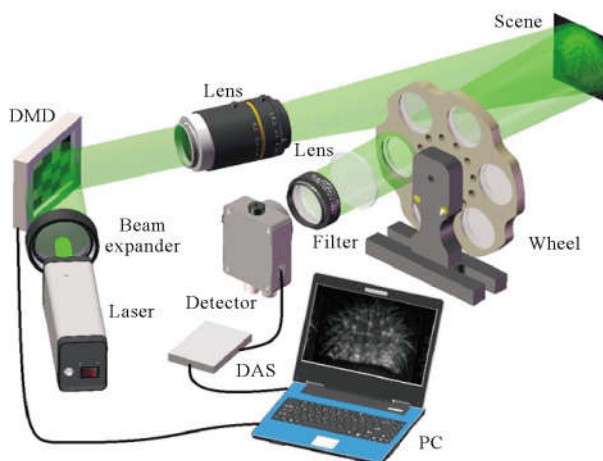


图 1 全 Stokes 偏振关联成像系统

Fig.1 Full Stokes polarization correlated imaging system

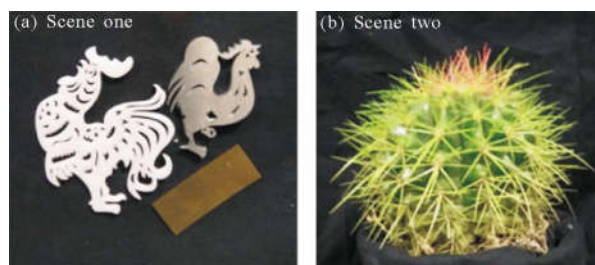


图 2 实验场景一(a)和实验场景二(b)

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

利用水平和垂直偏振探测全采样数据, 计算出场景一和场景二的强度图像(I)、线偏振图像 $1(QI)$; 利用 45° 和 -45° 线偏振探测全采样数据, 计算出线偏

振图像 2(UI)、利用右旋和左旋圆偏振测量探测全采样数据,计算出圆偏振图像(VI),由 II、QI、UI 和 VI,根据公式(10)计算出偏振度图像(DoPI),由 QI 和 UI,根据公式(11)计算出偏振角图像(AoPI),由 DoPI、AoPI 和 II,根据图像融合算法和 HSL 转 RGB 算法

计算出融合图像(用 CI 表示),如图 3 所示。图 3(a)~(g)分别表示场景一的强度、偏振度图像 1、偏振度图像 2、圆偏振图像、偏振角和融合图像;图 3(h)~(n)分别表示场景二的强度、偏振度图像 1、偏振度图像 2、圆偏振图像、偏振角和融合图像。

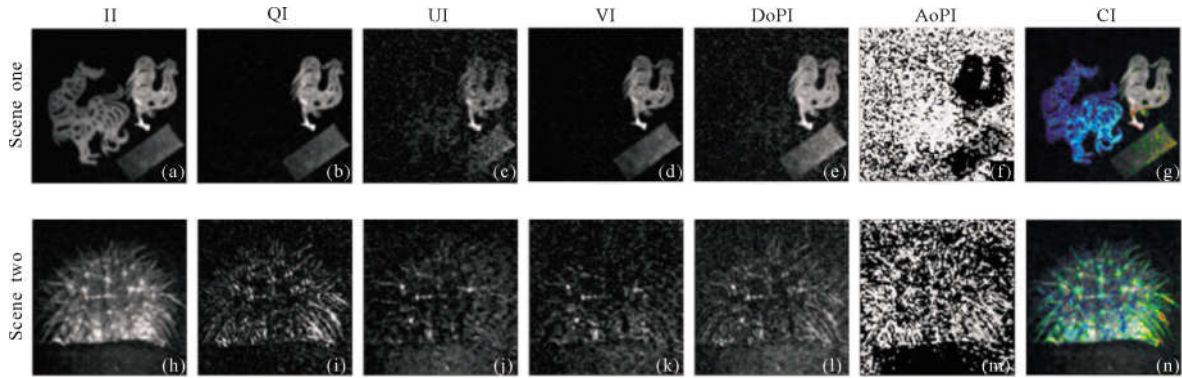


图 3 全采样数据下的复原结果

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,偏振角图像中铝材质的公鸡和长方形铜薄片值较小,而背景和塑料材质的公鸡值较大,系统获取的每个信息都能描述场景中的某些特征,但由于这些图像都是独立的存在,不能快速地对场景进行判别。而融合图像中包含了场景一中所有的物体,而且每个材质物体都是不同的颜色,能够很直观地辨别出场景中的不同材质的物体;在场景二的复原结果中,重构出的强度图像包含一个完整的仙人球图像,偏振度图像中包含了仙人球大部分毛刺信息,偏振角图像中仙人球大部分毛刺部分值较大,同样地融合图像中包含了整个仙人球,而且不同结构的部分有不同的颜色。

在融合图像中,不同颜色表征物体不同的偏振特性,可以直接在一幅图中直观地分辨不同材质的物体或者同一材质不同结构的物体。结果表明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。将获得的强度图像、偏振度图像和偏振角图像三者根据 HSL-RGB 图像融合算法融合在一起,获得的融合图像可以更加直观地辨识出场景中具有不同偏振特性的物体或同一材质不同结构的物体,提高图像质量和人眼分辨率,进而提升系统的探测识别能力。

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 M ,进行反演时选取的探测信号值个数为 L ,则其采样率为: $X=(L/M) \times 100\%$ 。

在场景一下,不同采样率下的复原图像分别进行归一化处理,获得融合图像、偏振角图像、强度图像和偏振度图像,如图 4 所示。图 4 中,图 4(a)~(e)为压缩采样率 3.125%、12.5%、25%、50%和 75%下的融合复原图像;图 4(f)为参考融合图像即全采样融合复原图像;图 4(g)~(k)为压缩采样率 3.125%、12.5%、25%、50%和 75%下的偏振角复原图像;图 4(l)参考偏振角图像即全采样偏振角复原图像;图 4(m)~(q)为压缩采样率 3.125%、12.5%、25%、50%和 75%下的强度原图像 2;图 4(r)为参考强度图像即全采样强度原图像;图 4(s)~(w)为压缩采样率 3.125%、12.5%、25%、50%和 75%下的偏振度图像;图 4(x)为参考偏振度图像即全采样偏振度图像。

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,获得融合图像、偏振角图像、强度图像和偏振度图像,如图 5 所示。图 5(a)~(e)为压缩采样率 3.125%、12.5%、25%、50%和 75%下的融合复原图像;图 5(f)为参考融合图像即全采样融合复原图

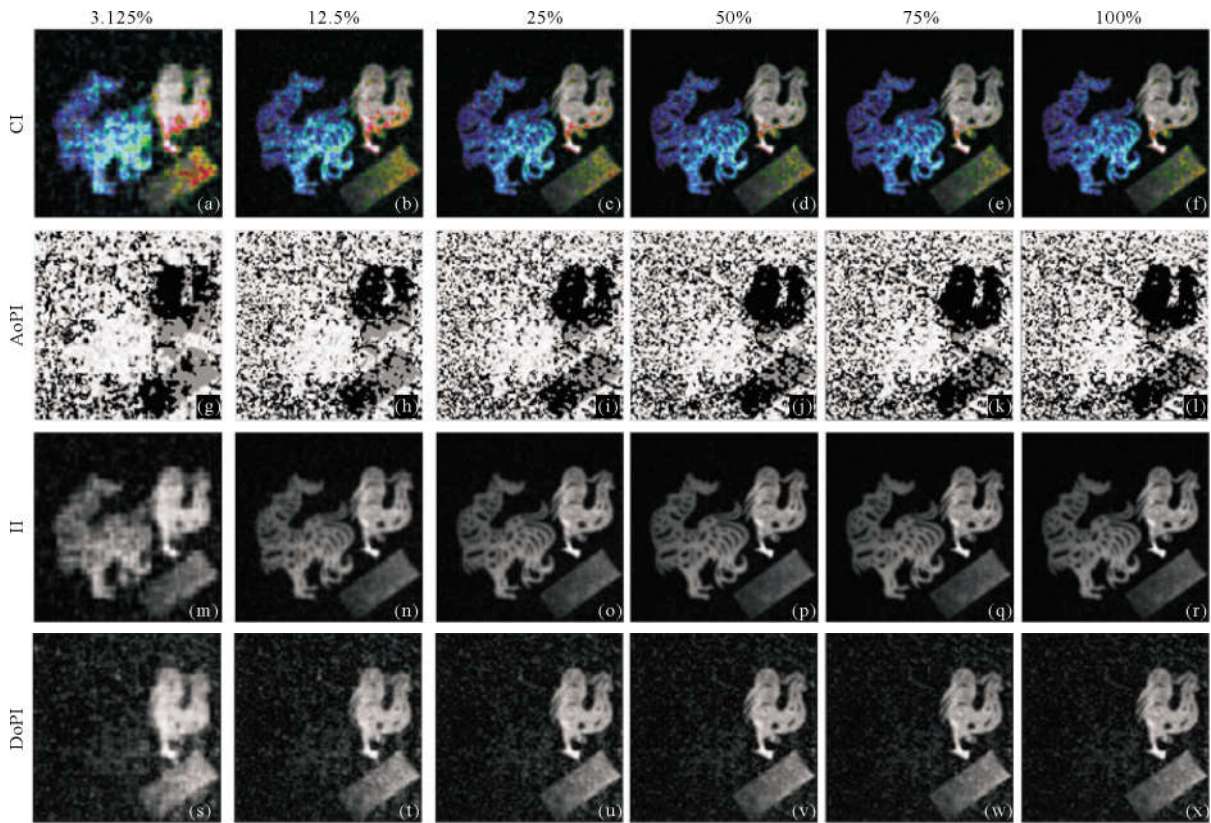


图 4 场景一在不同采样率下的复原结果

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

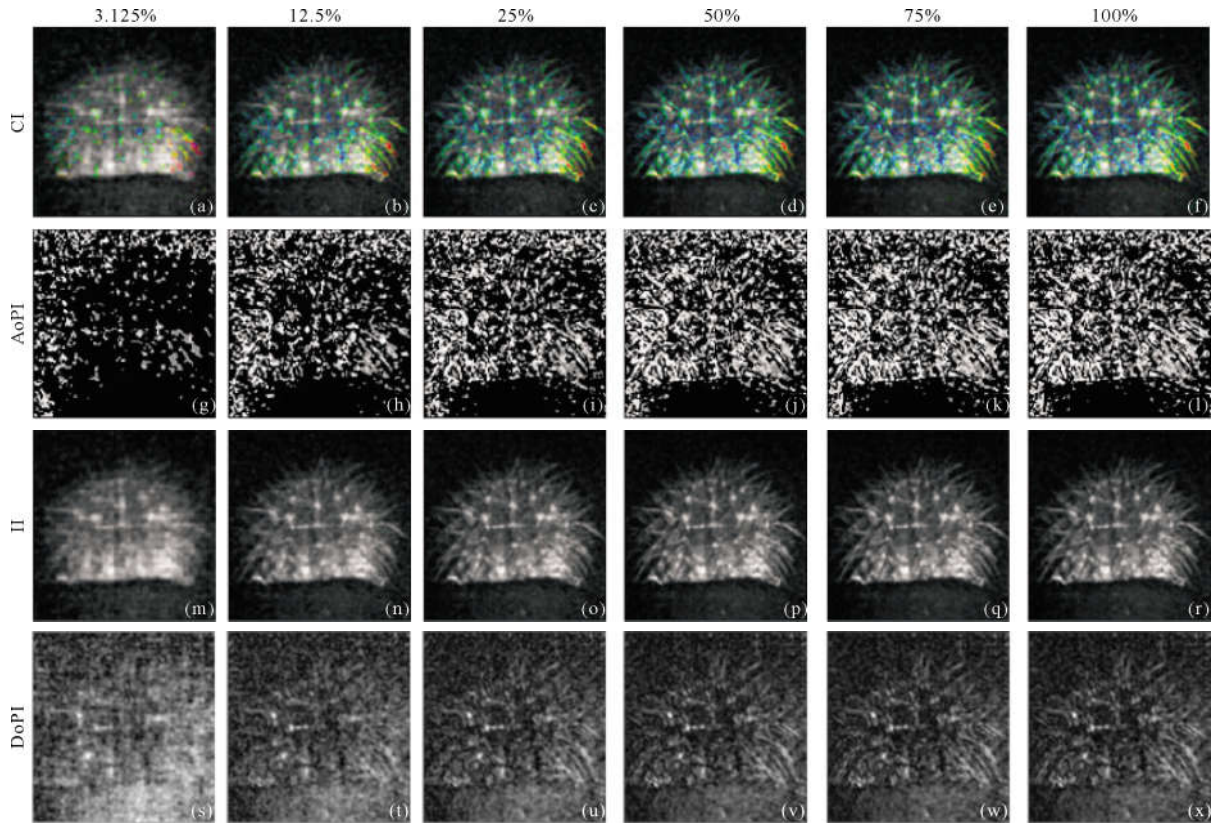


图 5 场景二在不同采样率下的复原结果

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

像;图 5(g)~(k)为压缩采样率 3.125%、12.5%、25%、50%和 75%下的偏振角复原图像;图 5(l)为参考偏振角图像即全采样偏振角复原图像;图 5(m)~(q)为压缩采样率 3.125%、12.5%、25%、50%和 75%下的强度原图像 2;图 5(r)为参考强度图像即全采样强度原图像;图 5(s)~(w)为压缩采样率 3.125%、12.5%、25%、50%和 75%下的偏振度图像;图 5(x)为参考偏振度图像即全采样偏振度图像。

从图 4 和图 5 可以看出,当采样率为 3.125%时,DoPI、II、AoPI 和 CI 中包含了全采样图像中基本的轮廓信息和结构信息,能较清晰地识别出图像中的物体和结构。当采样率为 25%时,复原图像包含了全采样图像中大部分的轮廓、细节和结构信息。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。并且随着采样率的增大,复原图像包含场景的信息越来越多,而且背景噪声对图像的影响越来越小,即复原图像的质量越来越好,越来越接近参考图像。从场景一融合图像结果可以看出,当采样率为 3.125%时,场景一中不同材质的物体已经可以完整清晰地区分出来,而从场景二的融合图像结果可以看出,在采样率为 25%时,场景中不同的结构信息才可以完整清晰地区分出来。这是因为场景一中的物体比较单一,而场景二中结构比较复杂,需要在较高地采样率下才能够将基本结构信息复原出来。

3 结论

将图像融合与偏振关联成像技术相结合,通过 HSL-*RGB* 图像融合技术对偏振关联成像获取的多个偏振图像进行融合,提高偏振关联成像对不同材质物体和相同材质不同结构物体的识别和区分能力,而且融合图像与各个原图像相比有更好的图像质量。与灰度图相比,彩色融合图像符合人眼对彩色更加敏感的特性,而且通过对场景中的物体用彩色标记以区分其材质和结构的差异,可以有效提高目标探测和识别的性能,为实现精确识别奠定基础。在较低的采样率下,场景中物体的不同偏振特性就已经可以完整清晰区分出来。因此,采用演化压缩采样复原技术,可以降低系统采样率,进而提高融合结果的成像效率。

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] 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)
- [8] 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.
- [9] Chun C S L, Sadjadi F A. Polarimetric laser radar target classification[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(14): 1806–1808.
- [10] Li Jie, Zhu Jingping, Qi Chun. Static Fourier-transform hyperspectral imaging full polarimetry [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(4): 177–182. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] Guan Jing, Zhu Jingping, Tian Heng. Real-time polarization difference underwater imaging based on Stokes vector [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(22): 224203. (in Chinese)
- [13] Liu Y, Shi J, Zeng G. Single-photon-counting polarization ghost imaging[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(36): 10347.
- [14] 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.
- [15] Shi D, Hu S, Wang Y. Polarimetric ghost imaging[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(5): 1231–1234.

-
- [16] 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.
- [17] Wang Jinling, He Xiaojun, Song Kefei. Image fusion algorithm of multi-spectral and panchromatic images adopting region mutual information [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2757–2764. (in Chinese)
- [18] Yang Guan, Tong Tao, Lu Songyan, et al. Fusion of infrared and visible images based on multi-features [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(2): 489–496. (in Chinese)