

# 散射介质对多波长彩色物体关联成像的影响

周成<sup>1,2,3</sup> 刘兵<sup>1,2</sup> 黄贺艳<sup>1</sup> 宋立军<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>长春大学理学院, 吉林 长春 130022

<sup>2</sup>长春大学材料设计与量子模拟吉林省高校重点实验室, 吉林 长春 130022

<sup>3</sup>长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 利用单路计算式关联成像技术,实现了光路中存在散射介质情况下彩色目标物体的图像恢复,研究了多波长彩色成像与全光谱白光成像随散射介质浓度的变化关系。实验结果表明:在采样次数 3000 次情况下,当散射介质浓度增加至 6%时,多波长彩色成像的图像可见度由 0.21 下降至 0.061,衬噪比由 1.21 降至 0.33,成像质量随散射介质浓度的增加而降低。但散射介质浓度对全光谱白光成像的质量却影响较小,相同条件下,可见度为 0.20,衬噪比为 1.061。讨论了散射介质浓度与彩色物体关联成像质量之间的关系,对促进关联成像技术的实用化具有重要意义。

**关键词** 成像系统; 关联成像; 散射介质; 多波长成像

**中图分类号** O438 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.101102

## Effect of Scattering Medium on Multi-Wavelength Color Object Correlated Imaging

Zhou Cheng<sup>1,2,3</sup> Liu Bing<sup>1,2</sup> Huang Heyan<sup>1</sup> Song Lijun<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Applied Physics, Changchun University, Changchun, Jilin 130022, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Materials Design and Quantum Simulation at Universities of Jilin Province, Changchun University, Changchun, Jilin 130022, China

<sup>3</sup>School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** The relationship of the multi-wavelength color imaging and full spectrum white light imaging versus the scattering medium concentration is studied by utilizing the single-beam correlated imaging technology, and the image restoration of color target objects is realized under the condition of scattering medium in the optical path. Experimental results demonstrate that under the condition of 3000 sampling number the imaging quality decreases with the increase of the scattering medium concentration. When the scattering medium concentration increases to 6%, the visibility of the multi-wavelength color image decreases from 0.21 to 0.061 and the contrast-to-noise ratio decreases accordingly from 1.21 to 0.33. But for the full spectrum white light imaging, the scattering medium concentration has little effect. In the same case, the visibility and CNR are 0.20 and 1.061, respectively. The relationship between the scattering medium concentration and the imaging quality of the color object correlated imaging is discussed in detail, which is crucial to the practicality of the correlated imaging.

**Key words** imaging systems; correlated imaging; scattering medium; multi-wavelength imaging

**OCIS codes** 110.1758; 110.3010; 110.2970

## 1 引言

由于光的散射作用导致图形信息衰减,图像质量降低,使得获取清晰的目标图像变得十分困难。散射介

**收稿日期:** 2016-06-20; **收到修改稿日期:** 2016-07-04; **网络出版日期:** 2016-09-23

**基金项目:** 吉林省科技发展计划项目(20130521016JH, 20140101187JC)、长春市科技发展计划项目(2014217)

**作者简介:** 周成(1991—),男,硕士研究生,主要从事关联成像方面的研究。E-mail: zhoucheng91210@163.com

**导师简介:** 宋立军(1971—),男,教授,硕士生导师,主要从事量子信息,量子通信和量子关联成像等方面的研究。

E-mail: songlj@ccu.edu.cn(通信联系人)

质对成像的限制使其在医学观察、天文探测、地质勘测、雷达扫描跟踪等实际应用中受到不同程度的影响,然而传统的光学成像技术对此却无能为力。因此,在散射介质条件下的成像研究一直以来都是人们关注的问题。关联成像,又称为鬼成像,具有分辨率高、抗噪性好、物像分离等优点,是一种新颖的光学成像技术,不仅适用于电磁波波段,而且已经推广到微波和 X 光波段等。研究表明,关联成像应用于光学领域能降低散射影响<sup>[1-3]</sup>。

1995 年 Pittman 等<sup>[4]</sup>实现了纠缠光的关联成像实验,随后赝热光源的双光路关联成像也被证实<sup>[5]</sup>。2009 年 Silberberg 等<sup>[6]</sup>简化了传统双光路关联成像实验,利用空间光调制器实现了 Shapiro<sup>[7]</sup>提出的单光路计算关联成像实验方案,即用一个单像素探测器测量含有物体的信号光路总光强即可得到目标图像。近年来,利用多波长提高恢复图像质量及彩色物体图像恢复方案相继提出,如 Duan 等<sup>[8]</sup>从理论上阐述了多波长关联成像与信噪比之间的关系; Zhang 等<sup>[9]</sup>从理论与实验两个角度证明了波长复用提高关联成像质量的优势<sup>[10]</sup>; Welsh 等<sup>[11]</sup>利用多波长与压缩感知技术实现了快速全彩计算关联成像,并进一步推广到视频领域<sup>[12-13]</sup>。Gong 等<sup>[14]</sup>从理论与实验两方面分析了散射介质对关联成像质量的影响。Yang 等<sup>[3]</sup>研究了无透镜关联成像光路中处于不同位置的强散射介质对成像质量的影响。真实环境下,目标物一般为彩色物体且存在各种散射噪声,利用关联成像技术在有散射噪声情况下的对彩色物体成像具有广阔的应用前景。

本文基于单路计算式关联成像技术,利用投影仪作为预置光源,实现了存在散射介质条件下多波长彩色待测物体的关联成像实验,并分别讨论了散射介质浓度对多波长彩色物体关联成像与全光谱白光关联成像质量的影响,对于进一步提高散射介质中彩色待测物体的分辨与识别和促进关联成像技术的实用化具有重要作用。

## 2 系统设计

多波长彩色物体关联成像实验系统的示意图如图 1 所示,整个系统包括计算机、投影仪、滤波片、待测物体、散射介质和单像素探测器等主要设备。在实验系统中,通过计算机控制投影仪显示随机的二值散斑图,来调制全光谱的随机散斑光场。散斑光场经过轮换的滤波片被调制为红、绿、蓝(R、G、B)3 种不同波段的光,经自由空间传播一段距离后投射到彩色待测物体上,反射的散斑光场被收集透镜会聚后由一个单像素探测器接收。单独测量红、绿、蓝 3 种不同波段光的桶探测值,利用计算关联成像重构算法,可分别获得对应波长彩色物体关联成像的重构图像,然后按照 RGB 模型对 3 个通道的重构图像进行相加混合即可得到多波长彩色物体关联成像。在收集透镜和单像素探测器之间加入散射介质后,可实现有散射介质存在条件下的多波长彩色物体关联成像。

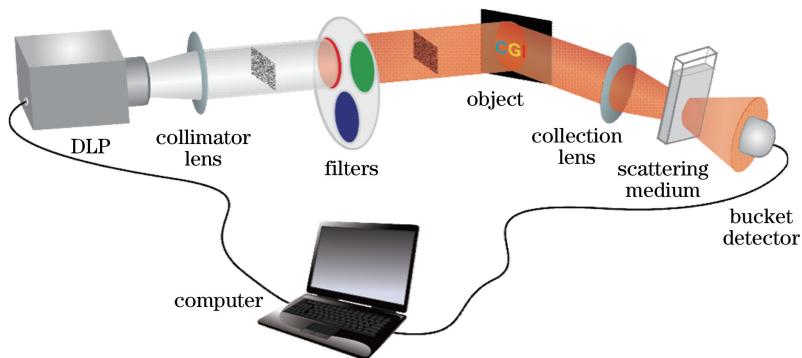


图 1 多波长彩色物体关联成像实验系统示意图

Fig. 1 Schematic for multi-wavelength color object correlated imaging system

## 3 实验过程及结果

实验中采用的光源是 3LCD 工作机制的日立投影仪 HCP-3050X,其分辨率为  $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ ,亮度为  $3000 \text{ lm}$ 。在投影仪光束中选取  $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$  有效区域,将计算机生成的最小单元为

2 pixel×2 pixel、与有效区域相同尺寸的 0~1 二值分布随机散斑图,经 3 个不同中心波长的滤波片轮换投射到距离投影仪 32 cm 处的待测物体上。待测物体是由普通打印纸打印的彩色大写字母“CGI”,颜色分别为青、黄、红,大小为 14 mm×5 mm。实验中滤波片的中心波长分别为 632、532、478 nm,半带宽为 10 nm。由投影仪投射的随机散斑图经滤波片滤波后变为红、绿、蓝 3 种单色波长散斑图,再经过焦距为 60 mm 的收集透镜会聚后由单像素探测器接收,实现彩色物体关联成像的图像重构。图 2(a1)(b1)(c1)为不存在散射介质时,分别使用红光、绿光和蓝光在 3000 次采样次数条件下彩色物体的成像结果。将上述 3 个通道的图像按照 RGB 模型相加混合处理后,获得多波长彩色物体关联成像结果,如图 2(d1)所示。

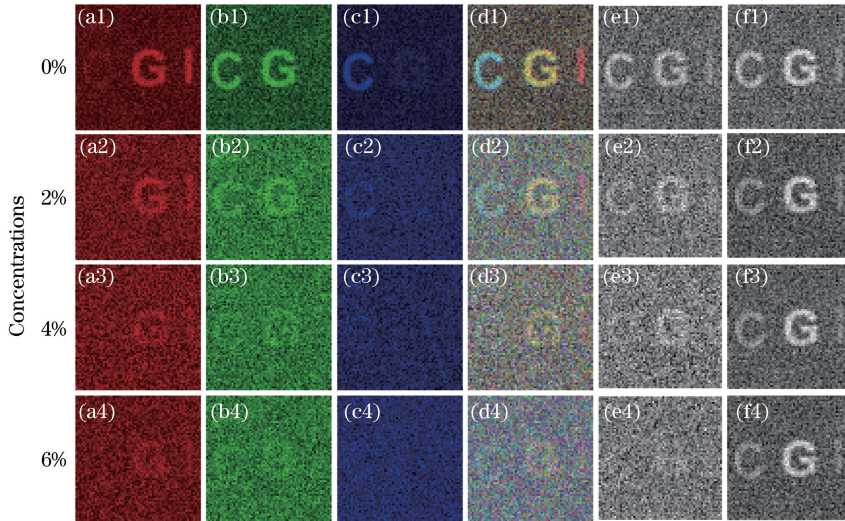


图 2 不同浓度散射介质的多波长彩色关联成像与全光谱白光关联成像实验结果

Fig. 2 Experimental results of multi-wavelength color correlated imaging and full spectrum white light correlated imaging under different scattering mediums concentrations

为考察散射介质存在条件下对彩色物体关联成像质量的影响,实验选取华瑞制药有限公司生产的质量分数为 10% 脂肪乳溶液作为散射介质,使用蒸馏水对其进行不同浓度稀释后,注入 10 mm×45 mm×50 mm 石英比色皿中,然后将比色皿放置在距离单像素桶探测器前 6 mm 的位置进行探测。实验中分别配制了 2%、4% 和 6% 3 种浓度脂肪乳溶液,相应红光、绿光、蓝光和多波长彩色物体在散射介质存在时的成像结果如图 2(a2)~(a4)、(b2)~(b4)、(c2)~(c4)和(d2)~(d4)所示。对比图 2 中不同浓度散射介质的重构图像可以发现,由于待测物体中不同颜色物体对红、绿和蓝 3 种光谱的反射能力不同,导致待测物体的反射光光强减弱。当实验系统光路中加入散射介质后,随着散射介质浓度的增加,反射光进一步受散射介质吸收与散射的影响,经散射介质透射的光信号能量再次锐减,导致成像质量明显下降。

将 4 种不同浓度散射介质的红、绿、蓝 3 种颜色光信号分别相加,得到包含 3 种波段光信号的 4 组不同浓度的桶探测信号序列,然后利用这 4 组新的桶探测信号序列分别与预置散斑图进行关联计算,得到如图 2(e1)~(e4)所示的重构图像。对比图 2(e1)~(e4),可以发现随着散射介质浓度的增加,重构图像的质量也逐渐下降,散射介质浓度对系统探测信号与图像重构质量影响较大。随后,在系统光路中去掉滤波片,由投影仪投射的全光谱随机散斑图直接照射到彩色待测物体上,经探测系统探测后,实现全光谱白光关联成像的图像重构,实验结果如图 2(f1)~(f4)所示。可以发现,使用全光谱白光进行彩色物体图像重构时,由于白光中含有多种不同波长光谱的色光,而且没有通过滤波片消耗其光场能量,待测物体在选择性吸收一部分波长光谱的色光后,反射光中还包含有大量剩余波长光谱的色光,虽然经过一定浓度散射介质的吸收与散射,但透过散射介质的反射光信号能量仍然较大,散射介质浓度对全光谱关联成像的质量影响较小。

对上述实验结果进行定量分析,假设实验中单像素探测器记录的桶探测值为

$$O_{\mu}^n = \int I^n(x, y) T_{\mu}(x, y) dx dy, \quad (1)$$

式中  $I(x, y)$  为全光谱的随机散斑场,  $T_{\mu}(x, y)$  为物体在不同波段  $\mu$  ( $\mu=R, G, B$ ) 的反射率系数,  $n=1, 2, 3$ ,

...,  $N$ ,  $N$  为总的采样次数。物体区域和散斑场的重叠区域决定了单像素探测器的桶探测值, 即  $O_\mu$  为权重因子<sup>[15]</sup>。根据已知的随机散斑图和探测到的反射信号, 通过二阶关联公式即可恢复出待测物体图像, 表示为

$$G_\mu(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I^n(x, y) O_\mu^n - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I^n(x, y) \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N O_\mu^n, \quad (2)$$

式中  $G_\mu(x, y)$  为探测待测物体得到的 3 个 RGB 分量, 即红光、绿光和蓝光的成像结果。

在理想的关联成像实验系统中, 桶探测器能通过收集透镜精确地记录经待测物体反射后的总光强。实验在桶探测器前直接加入不同浓度的散射介质, 来影响桶探测器记录的光信号, 如图 1 所示。在加入散射介质后, 桶探测器记录的桶探测值为  $O'_\mu$ , 这时桶探测器依然可以记录到部分光场的强度值, 满足<sup>[16]</sup>

$$O'_\mu \propto O_\mu^h, \quad (3)$$

由(2)式可得到加入散射介质后的重构图像,

$$G'_\mu(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I^n(x, y) O'_\mu^n - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I^n(x, y) \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N O'_\mu^n, \quad (4)$$

即

$$G'_\mu(x, y) \propto G_\mu(x, y), \quad (5)$$

(5)式表明, 在加入散射介质的情况下, 桶探测器只要记录到含有物体信息的光强值, 即可重构目标物体的图像。

关联成像中一般使用衬噪比(CNR)和可见度来评价成像质量, 分别定义为<sup>[17-18]</sup>

$$R_{\text{CN}} = \frac{\langle G_{\text{in}} \rangle - \langle G_{\text{out}} \rangle}{\sqrt{\sigma_{\text{in}}^2 + \sigma_{\text{out}}^2}}, \quad (6)$$

$$V = \frac{\langle G_{\text{in}} \rangle - \langle G_{\text{out}} \rangle}{\langle G_{\text{in}} \rangle + \langle G_{\text{out}} \rangle}, \quad (7)$$

式中  $G$  为  $G'_R$ 、 $G'_G$ 、 $G'_B$  的相加混合,  $\langle G_{\text{in}} \rangle$  和  $\langle G_{\text{out}} \rangle$  分别是彩色图像中物体反光区域和背景区域的关联函数值。 $\sigma_{\text{in}}$  和  $\sigma_{\text{out}}$  分别是相应位置关联函数值的方差。

利用(6)式和(7)式计算不同散射介质浓度时多波长彩色关联成像实验的可见度和 CNR 与采样次数之间的变化关系, 如图 3 所示。从图 3 可以发现, 可见度和 CNR 值均随散射介质浓度的增加而下降, 当采样次数为 3000 次、散射介质浓度为 6% 时, 可见度值由 0.21 降至 0.061, CNR 值由 1.21 降至 0.33。当系统中不存在散射介质的情况下, 其成像质量明显高于存在散射介质的情况, 并且随着散射介质的浓度越大, 光信号损耗越大, 恢复的图像质量越差。由此可见, 散射介质浓度对光信号能量相对较小的红、绿、蓝波长情况下的多波长彩色物体关联成像结果影响较大。

为进一步说明散射介质对彩色物体关联成像结果的影响, 图 4 给出全光谱白光关联成像实验中不同散射介质浓度下的可见度和 CNR 与采样次数之间的变化曲线。对比图 3 中的可见度和 CNR 曲线可以发现, 在取相同采样次数的条件下, 不同散射介质浓度的全光谱白光关联成像的可见度和 CNR 值均非常接近, 说

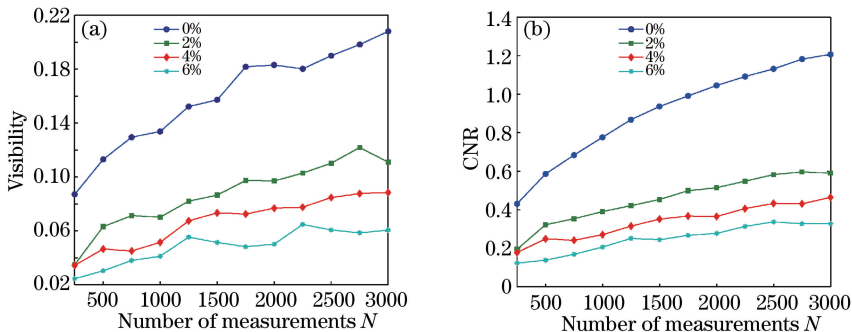


图 3 多波长彩色关联成像实验中不同散射介质浓度下的(a)可见度和(b)衬噪比曲线对比图  
Fig. 3 (a) Visibility and (b) CNR curves along with different scattering medium concentrations in multi-wavelength color correlated imaging experiment

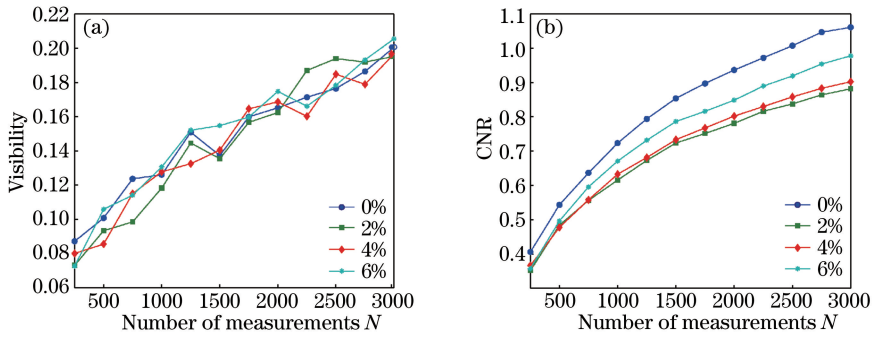


图 4 全光谱白光关联成像实验中不同散射介质浓度下的(a)可见度和(b)衬噪比曲线对比图

Fig. 4 (a) Visibility and (b) CNR curves along with different scattering medium concentrations in full spectrum white light correlated imaging experiment

明在全光谱光信号能量相对较大的情况下,散射介质的存在对成像质量的影响很小。

## 4 结 论

基于计算关联成像理论,利用投影仪作为预置光源产生随机散斑光场,通过在系统光路中轮换滤波片,实现了单像素多波长彩色关联成像。比较不同散射介质浓度条件下,多波长彩色关联成像与全光谱白光关联成像的可见度和衬噪比,可以发现散射介质的存在对光信号能量较小的多波长彩色关联成像的图像质量影响较大,而对于光信号能量较大的全光谱白光关联成像结果影响较小,说明在保证探测器灵敏度的前提下,进一步增大系统光路的光信号能量可以适当提高散射介质条件下的彩色物体图像重构质量。研究结果验证了散射介质浓度对彩色待测物体关联成像结果的影响,具有重要的实用价值。

## 参 考 文 献

- Liu X F, Yao X R, Chen X H, *et al.* Thermal light optical coherence tomography for transmissive objects[J]. *J Opt Soc Am A*, 2012, 29(9): 1922-1926.
- Jin Haoqiang, Shi Jianhong, Peng Jinye, *et al.* Looking around corners and through turbid media with projector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0511006.  
金浩强, 石剑虹, 彭进业, 等. 基于投影仪的“街角成像”和穿透散射介质成像[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0511006.
- Yang Z, Zhao L J, Zhao X L, *et al.* Lensless ghost imaging through the strongly scattering medium[J]. *Chin Phys B*, 2015, 25(2): 024202.
- Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, *et al.* Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement[J]. *Phys Rev A*, 1995, 52(5): R3429.
- Valencia A, Scarcelli G, Angelo M D, *et al.* Two-photon imaging with thermal light[J]. *Phys Rev Lett*, 2005, 94(6): 063601.
- Bromberg Y, Katz O, Silberberg Y. Ghost imaging with a single detector[J]. *Phys Rev A*, 2009, 79(5): 053840.
- Shapiro J H. Computational ghost imaging[J]. *Phys Rev A*, 2008, 78(6): 061802.
- Duan D Y, Du S J, Xia Y J. Multiwavelength ghost imaging[J]. *Phys Rev A*, 2013, 88(5): 053842.
- Zhang D J, Li H G, Zhao Q L, *et al.* Wavelength-multiplexing ghost imaging[J]. *Phys Rev A*, 2015, 92(1): 013823.
- Yang Xu, Zhang Yong, Yang Chenghua, *et al.* Improve quality of ghost imaging with multi-wavelength source[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(3): 0314002.  
杨旭, 张勇, 杨成华, 等. 多波长光源提高关联成像的成像质量[J]. *中国激光*, 2016, 43(3): 0314002.
- Welsh S S, Edgar M P, Bowman R, *et al.* Fast full-color computational imaging with single-pixel detectors[J]. *Opt Express*, 2013, 21(20): 23068-23074.
- Welsh S S, Edgar M P, Bowman R, *et al.* Near video-rate linear Stokes imaging with single-pixel detectors[J]. *J Opt*, 2015, 17(2): 025705.
- Edgar M P, Gibson G M, Bowman R W, *et al.* Simultaneous real-time visible and infrared video with single-pixel

- detectors[J]. *Sci Rep*, 2015, 5: e10669.
- 14 Gong W L, Han S S. Correlated imaging in scattering media[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(3): 394-396.
- 15 Welsh S S, Edgar M P, Jonathanb P, *et al.* Multi-wavelength compressive computational ghost imaging[C]. *SPIE*. 2013, 8618: 86180I.
- 16 Tang Wenzhe, Cao Zhengwen, Shi Jianhong, *et al.* Back-side correlation imaging with digital micro mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0511004.  
唐文哲, 曹正文, 石剑虹, 等. 基于数字微镜器件的“后视”关联成像[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0511004.
- 17 Chan K W C, O'Sullivan M N, Boyd R W. High-order thermal ghost imaging[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(21): 3343-3345.
- 18 Zerom P, Shi Z, O'Sullivan M N, *et al.* Thermal ghost imaging with averaged speckle patterns[J]. *Phys Rev A*, 2012, 86(6): 063817.