

浑浊介质中图像对比度与成像方式的关系*

田恒 朱京平† 张云尧 管今哥 侯洵

(西安交通大学, 电子物理与器件教育部重点实验室, 陕西省信息光子技术重点实验室, 西安 710049)

(2015年10月22日收到; 2016年1月5日收到修改稿)

浑浊介质中图像对比度的物理增强方法一直是研究热点, 目前学者们提出的距离选通成像、偏振差分成像和偏振距离选通成像均能提高图像的对比度, 但提高效果与成像距离的关系尚不明确. 本文分别利用以上三种成像方式及普通强度成像对处于不同浓度浑浊介质中的目标进行成像, 研究了图像强度和对比度随成像距离的变化情况. 结果表明: 从滤除的散射光强来看, 偏振距离选通成像最优, 而偏振差分成像在成像距离较远时优于距离选通成像; 三种成像方式滤除的散射光强值趋于稳定的阈值距离各不相同; 对比度改变相同量时, 偏振距离选通成像对应成像距离的变化量最大, 偏振差分成像次之, 强度成像最小, 且均与散射系数成反比. 本文对浑浊介质成像效果及机理的分析, 对进一步提高浑浊介质中目标的分辨及识别具有重要意义.

关键词: 偏振差分, 距离选通, 偏振距离选通, 对比度

PACS: 42.25.Ja, 42.30.Sy, 42.68.Mj, 42.68.Ay

DOI: 10.7498/aps.65.084201

1 引言

由于光的散射使得图形信息衰减, 图像质量降低, 所以获取浑浊介质中目标的清晰图像十分困难. 因此, 对浑浊介质中的目标成像对比度的增强成为近年来关注的热点. 提高图像对比度的方法通常分为两大类: 计算机视觉方法和物理方法. 计算机视觉方法包括基于多光谱图像空天一体融合仿真法^[1], 基于波长补偿和图像去雾的水下图像增强技术^[2]和基于结构信息的单幅图像去雾技术等^[3], 这些方法均能提高图像对比度, 但同时也会丢失一些重要的细节信息. 因此在增强对比度的同时又可以保存图像细节信息的物理方法受到学者的青睐, 并对其进行了大量的理论分析和实验研究^[4].

物理方法主要原理是将探测器接收到的浑浊介质散射光和目标反射光进行区别和分离. 距离选通成像^[5-7]是根据介质后向散射光和目标反射光经历的光程不同, 将二者分离, 从而提高图像对比度. 偏振成像^[8-11]是根据目标反射光和介质散射

光偏振态不同, 将具有不同偏振态的目标反射光和介质散射光区分开来, 从而提高图像对比度. 偏振差分成像^[12-14]利用两正交偏振态图像作差来消除非偏振光, 避免目标光偏振方向上的介质散射光对图像对比度的影响. 偏振距离选通成像^[15,16]能够在距离选通成像滤除散射次数较少介质光的基础上滤掉经过多次散射而消偏的介质漫射光与目标漫射光, 进一步提高对比度.

相对于强度成像, 距离选通成像、偏振差分成像和偏振距离选通成像对图像对比度均有不同程度的提高, 但各成像方式滤除的散射光强、图像对比度与成像距离的关系尚不清晰. 本文研究了强度成像、距离选通成像、偏振差分成像和偏振距离选通成像四种成像方式对图像对比度的影响, 分析并比较了同一浓度溶液下四种成像方式滤除的散射光强值的大小及其与成像距离的关系, 研究了四种成像方式获得的对比度随成像距离的变化规律, 并定量分析了不同浓度浑浊液中图像对比度改变量相同时各成像方式对应的成像距离变化量的差异.

* 中央高校基本科研业务费 (批准号: xkjc2013008) 和北京石油化工学院光机电装备技术北京市重点实验室开放课题基金 (批准号: KF2014-01) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jpzhu@xjtu.edu.cn

2 实验装置

实验装置如图1所示. 本文选取波长为632.8 nm的氦氖激光器作为光源, 选取10%-Intralipid溶液模拟浑浊介质. 研究表明: 散射系数相同的各散射体对光的散射作用可用同一种浑浊介质来模拟^[17], 因而有关研究结果可采用等比放大法定性地应用于浑浊河水、海水中等. 从Nikon CD盘上裁下尺寸为10 mm × 12 mm的部分作为目标T, 将其悬空放置在位于微位移平台(MDP)上、大小为50 mm × 50 mm × 55 mm 石英比色皿中. 参考文献[18]给出了10%-Intralipid溶液的散射系数与波长和溶液浓度之间的关系, 根据此关系我们向比色皿中加入不同量的10%-Intralipid原液形成溶液1、溶液2, 对应的散射系数分别为0.714, 1.19 cm⁻¹, 溶液的各向异性因子 g 为0.73.

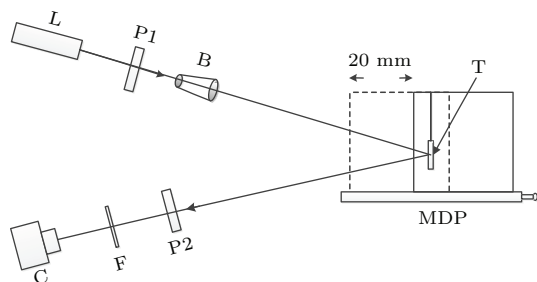


图1 实验装置示意图

Fig. 1. The schematic of experimental setup.

光源L发出的激光, 先通过线偏振片P1起偏, 再经过光扩束器B将光束直径扩展成15 mm, 之后照射到目标T上. 另一线偏振片P2放在探测器前做检偏器. 滤波片F放置在相机C(DMK 41BU02 德国)前来选择光线. 当P2从样本前移出时, 相机得到目标的强度图像; 当P2放置在样本前, 且使其偏振方向与P1偏振方向平行时, 可获取与入射光偏振方向平行的光强图像, 记为 I_{co} ; 旋转P2使其偏振方向与P1偏振方向正交时, 可获取与入射光偏振方向正交的光强图像, 记为 I_{cross} . 偏振差分成像为以上两相互垂直偏振态光强的差: $I_{difference} = I_{co} - I_{cross}$.

用印度墨水作为吸收剂, 可吸收散射次数较多光子^[19]. 向脂肪乳溶液中滴入印度墨水, 直至目标物体消失. 随着距离的变化, 所需滴入的墨水量也不同. 用未滴墨水时的强度图像减去滴入不同浓度墨水时的强度图像的方法可得到不同成像距离处目标的强度图像, 从而用连续激光代替脉冲激光来实现距离选通成像.

利用距离选通成像的方法, 获取与入射光偏振方向相同光强图像 I'_{co} 和与入射光偏振方向垂直的光强图像 I'_{cross} , 二者作差即可实现偏振距离选通成像.

目标T上有一光滑的字母“N”发生镜面反射, 其外部被漆层覆盖. 考虑光在浑浊液中的衰减, 将光盘放置在浑浊液中距比色皿前壁20 mm处, 并利用MDP以1 mm为步长移动比色皿, 逐步增加其前壁与目标的距离(成像距离). 分别利用强度成像、距离选通成像、偏振差分成像和偏振距离选通成像对处在两种浑浊液中的目标成像.

3 结果与讨论

3.1 图像强度与成像方式的关系

本部分研究成像距离固定时各成像方式图像强度的特点. 将光盘放置在溶液1中, 以光盘距比色皿前壁距离为26 mm为例, 利用四种成像方式对CD盘成像. 为了定量比较四种成像方式的成像特点, 选取如图2(a)标示的水平位置为161—170像素点的10条垂直直线进行平均, 以减小测量误差, 得到图像强度曲线如图2(b).

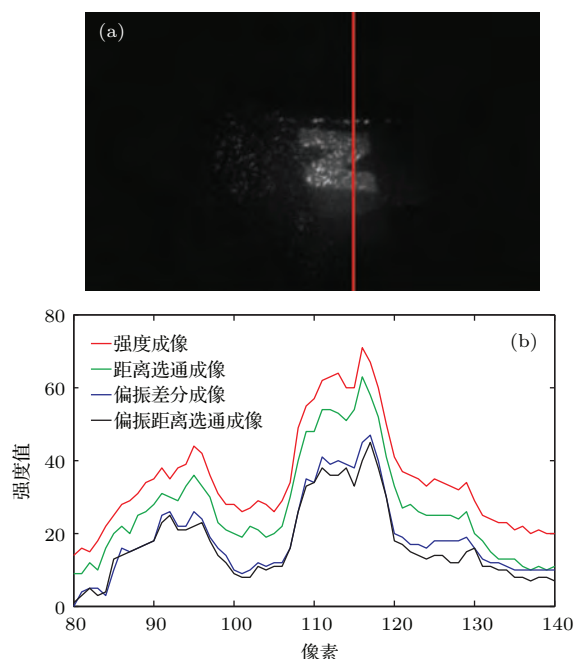


图2 (网刊彩色) (a) 画强度曲线时选取的像素点; (b) 四种成像方式测得的强度曲线(由于目标形状不规则, 距离26 mm处观察第二个波峰)

Fig. 2. (color online) (a) The pixel points selected to obtain the intensity curve; (b) the intensity curve of four different imaging methods(due to the irregular target shape, the second peak of wave is observed at 26 mm).

可见, 四种成像方式中探测器接收的光强大小依次为: 强度成像 > 距离选通 > 偏振差分 > 偏振距离选通. 究其原因可归为: 1) 强度成像时, 相机接收的光强为目标与介质弹道光、蛇形光和漫射光之和(图3中的1, 2, 3, 4, 5, 6之和), 强度值最大; 2) 距离选通成像将1和2的大部分2'(距目标近的介质蛇形光)滤除, 光强仅为目标反射光(4, 5, 6)、2''(距目标远的介质蛇形光)与3之和; 3) 偏振差分成像能够滤除介质和目标的散射光, 包括2'', 3, 6, 所得图像由1, 2'和4, 5的水平偏振部分构成. 由于偏振差分成像和距离选通成像均消除了部分非兴趣光, 因而图像强度均低于强度成像. 同时, 成像距离较远时, 由于多次散射光成分增多, 偏振差分成像消除的光强多于距离选通成像, 因而其强度低于距离选通成像.

偏振距离选通成像是距离选通成像与偏振成像的结合, 既能消除短程介质散射光(偏振光1, 2'), 也能滤除长程散射光(非偏振光3, 6), 只有目标弹道光4和蛇形光5进入探测器, 光强最弱, 但保留了最有效的目标信息.

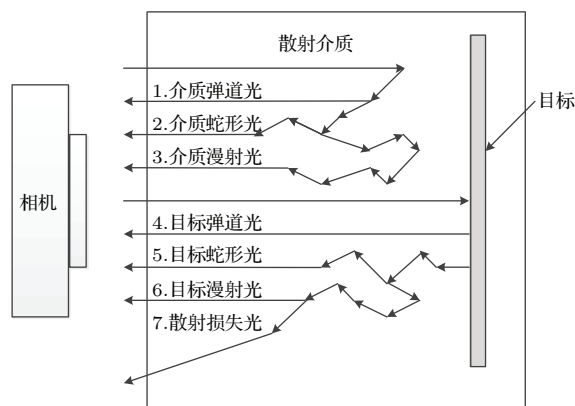


图3 光在散射介质中的分布

Fig. 3. Major paths of light in the scattering medium.

3.2 图像强度与成像距离的关系

采用四种成像方式对放置在溶液1中的Nikon CD盘成像, 测得CD盘与比色皿前壁的距离分别为22, 24, 26, 28, 30 mm时的强度曲线(强度曲线的画法与3.1章节相同)如图4所示.

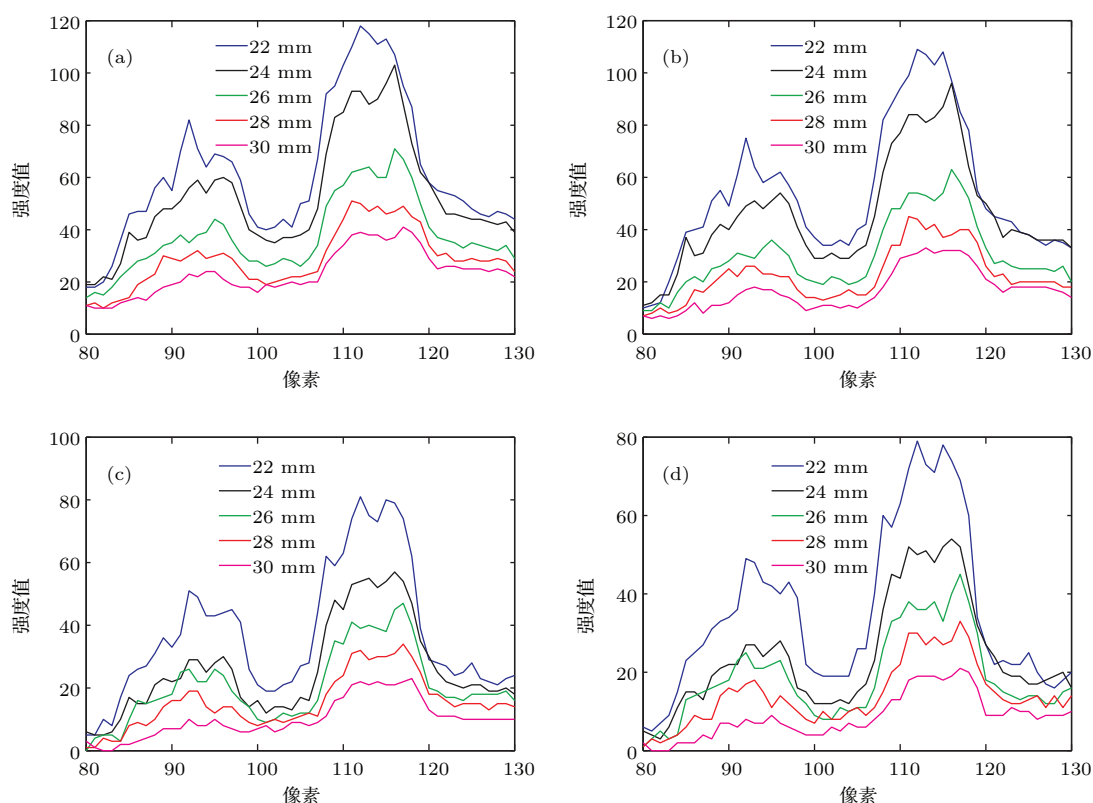


图4 (网刊彩色) 四种不同成像方式的图像强度随距离的变化 (a) 强度成像; (b) 距离选通成像; (c) 偏振差分成像; (d) 偏振距离选通成像

Fig. 4. (color online) The image intensity of four different imaging methods varies with the imaging distance: (a) Intensity imaging system; (b) range-gated imaging system; (c) polarization difference imaging system; (d) polarization-based range-gated imaging system.

将图4(b)和图4(a)中的强度曲线作差,如图5(a)所示.可知成像距离不小于22 mm时,强度成像与距离选通成像的光强差趋于恒定(保持在7左右).这说明成像距离大于阈值后,距离选通成像滤除的介质散射光随距离基本不变,但目标光强度下降,导致距离选通成像图像对比度提高能力受限.

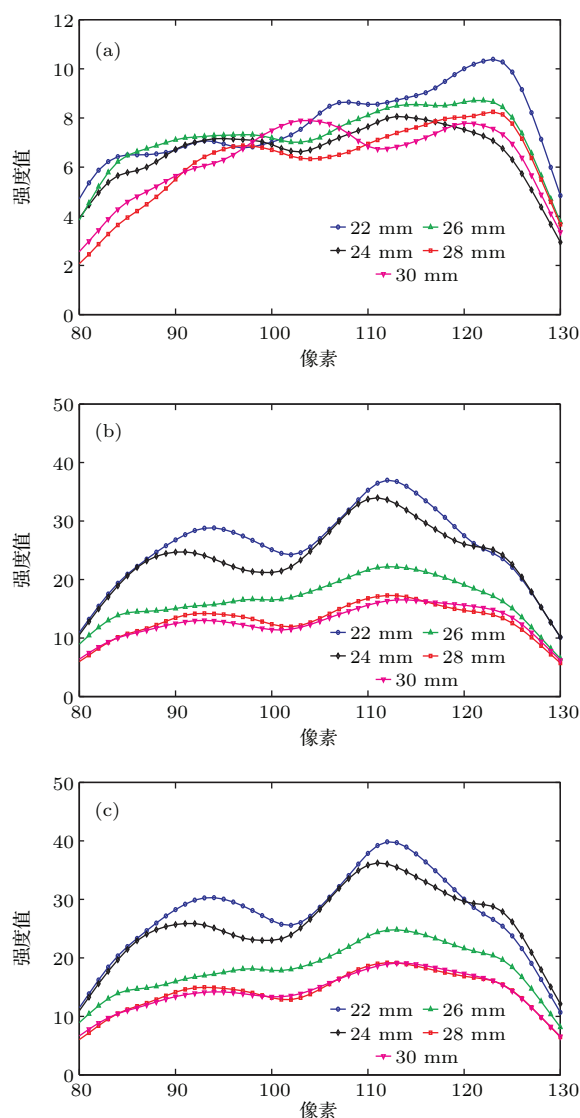


图5 (网刊彩色) 三种成像方式与强度成像的图像强度差随距离的变化 (a) 距离选通成像; (b) 偏振差分成像; (c) 偏振距离选通成像

Fig. 5. (color online) The image intensity difference between the three different imaging methods and the raw intensity imaging method varies with the imaging distance: (a) Range-gated imaging system; (b) polarization difference imaging system; (c) polarization-based range-gated imaging system.

由图4(c)可见,随着成像距离的增加,偏振差分成像的强度值不断减小.这是由于光子经历的散射次数 N 随成像距离的增加而增加,导致目标反射

光和介质散射光中经历多次散射的部分增多,于是偏振度降低.由 $I_{\text{difference}} = I_{\text{co}} - I_{\text{cross}}$, I_{co} 为与入射光偏振方向平行的光强, I_{cross} 为与入射光偏振方向垂直的光强可知, $I_{\text{difference}}$ 不断减小.将之与图4(a)的强度曲线作差,如图5(b),可得强度成像与偏振差分成像的图像强度之差随成像距离的增大而减小,且当成像距离增大到某值时保持不变(约为16).在本文实验条件下,该成像阈值距离为30 mm.此时,介质中弹道光、蛇形光与漫射光的比例确定.散射光偏振态不再发生变化,偏振差分成像滤除的散射光量固定.

将图4(d)与图4(a)作差得图5(c),可知偏振距离选通成像与强度成像的光强差随距离的增加而减小,且至阈值距离(30 mm)时保持不变,光强保持在19附近.因偏振距离选通成像是偏振差分成像与距离选通成像的结合,在距离选通成像消除短程介质光的基础上利用偏振差分成像消除长程介质光.所以偏振距离选通成像与偏振差分成像的成像阈值距离相同,但消除的非兴趣光强高于偏振差分成像.

3.3 图像对比度与成像距离及散射系数的关系

将CD盘放置在溶液1和溶液2中,四种成像方式测得的图像对比度随成像距离的变化曲线如图6所示.图像对比度定义为: $C = \frac{I_{\text{obj}} - I_{\text{bg}}}{I_{\text{obj}} + I_{\text{bg}}}$, 其中 I_{obj} 和 I_{bg} 分别代表图像边缘区域的目标光强度和背景光强度.

可见,偏振距离选通成像测得的图像对比度最大,偏振差分成像次之,距离选通成像第三,强度成像最小.这是因为:偏振距离选通成像滤除了介质单次散射光和多次散射光,最大程度上消除了介质散射光,目标受非兴趣光线的影响最小,因而获得了最大的图像对比度;而偏振差分成像不能够消除散射次数较少的介质光,导致其成像时与目标光叠加,抑制了图像对比度的提高;距离选通成像能够滤除散射次数较少的介质光,使图像对比度高于强度成像的图像对比度.本实验中目标到容器前壁的最短距离为20 mm,因而介质多次散射光所占比例较大,导致距离选通成像滤除的介质散射光量低于偏振差分成像滤除的量,从而使得距离选通成像的图像对比度低于偏振差分成像.

从图6可得该四种成像方式在获得相同图像对比度时的成像距离,列于表1.

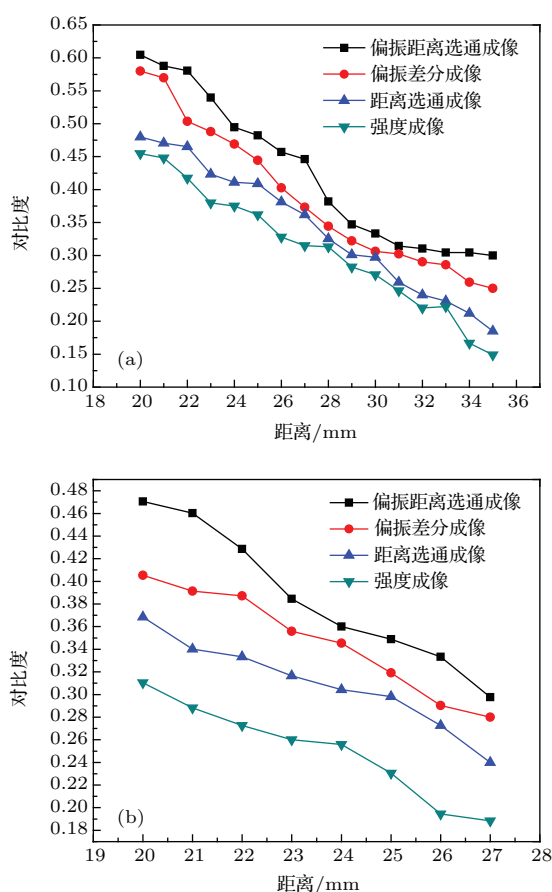


图6 (网刊彩色) 四种成像方式图像对比度随距离变化的定量分析曲线 (a) 溶液1, $\mu_s = 0.714 \text{ cm}^{-1}$; (b) 溶液2, $\mu_s = 1.19 \text{ cm}^{-1}$

Fig. 6. (color online) The quantitative analysis curve of the relationship between the image contrast and the imaging distance: (a) Solution 1, $\mu_s = 0.714 \text{ cm}^{-1}$; (b) solution 2, $\mu_s = 1.19 \text{ cm}^{-1}$.

表1 对比度相同时四种成像方式的成像距离

Table 1. The imaging distance of the four imaging methods under the same image contrast.

对比度	溶液	成像距离 L/mm			
		强度成像	距离选通成像	偏振差分成像	偏振距离选通成像
0.3	1	25	29	31.4	34.8
	2	20.4	23.6	25.2	26.8
0.4	1	22.5	25.5	26.2	27.8
	2	< 20	< 20	20.8	22.6

从表1中可知, 对比度从0.3增到0.4时, 溶液1中各成像方式对应的成像距离变化量分别为2.5, 3.5, 5.2, 7 mm. 可见同一溶液中, 提高相同的对比度, 偏振距离选通成像能够最大程度上提高成像距离, 距离选通成像对成像距离的改变量低于偏振差

分成像对成像距离的改变量. 成像距离的变化与各成像方式提高图像对比度的作用机理相关. 介质散射光的形成受散射次数的影响, 故对同一溶液、成像距离相同时, 介质散射光的成分和比例相同, 而不同成像方式消除的背景光成分不同, 因此在图像对比度增强量相同时, 成像距离的变化量不同.

从表1还可知, 溶液浓度不同时, 同一成像方式提高相同对比度时成像距离的改变量也不同: 溶液浓度增大时, 成像距离的变化量减小. 这主要受溶液散射系数 μ_s 的影响. μ_s 增大, 光子在溶液中传播相同距离时发生的散射次数增多, 成像距离的变化量减小.

4 结 论

本文利用强度成像、偏振差分成像、距离选通成像和偏振距离选通成像得到处于脂肪乳溶液中目标的图像强度, 研究了图像强度和对比度随成像距离的变化规律. 结果表明: 距离选通因能消除干扰目标成像的短程介质散射光而可提高对比度; 偏振差分因能消除长程介质散射光及目标散射光而在较长距离成像方面对比度提高能力更强; 偏振距离选通成像综合二者优势, 可获得最好的对比度. 对比度改变值相同时, 偏振距离选通成像的成像距离增加最大, 偏振差分成像改变的成像距离高于距离选通成像. 各成像方式都存在阈值成像距离, 超过该阈值时, 滤除的介质散射光强值近似定值. 各成像方式的成像距离与对比度改变量的变化关系是非线性的, 且受散射系数影响, 随着散射系数增大, 各成像方式对成像距离的改变量均变小.

参考文献

- [1] Chen S J, Hu Y H, Sun D J, Xu S L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 204201 (in Chinese) [陈善静, 胡以华, 孙杜娟, 徐世龙 2013 物理学报 **62** 204201]
- [2] Chiang J Y, Chen Y C 2012 *IEEE Trans. Image Process.* **21** 1756
- [3] Qi M, Hao Q H, Guan Q J, Kong J, Zhang Y 2015 *Optik* **126** 3400
- [4] Li X Y, Sun B, Yu Y Y 2014 *Chin. Phys. B* **23** 064219
- [5] Tan C S, Sluzek A, Seet G 2005 *Opt. Eng.* **44** 116002
- [6] Huang Y W, Wang X, Jin W Q, Ding K, Li H L, Liu J 2010 *Acta Opt. Sin.* **30** 3177 (in Chinese) [黄有为, 王霞, 金伟其, 丁琨, 李海兰, 刘敬 2010 光学学报 **30** 3177]
- [7] Tong J Y, Tan W J, Si J H, Chen F, Yi W H, Hou X 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 024207

- [8] Cao N W, Liu W Q, Zhang Y J 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 61 (in Chinese) [曹念文, 刘文清, 张玉钧 2000 物理学报 **49** 61]
- [9] Kartazayeva S A, Ni X H, Alfano R R 2005 *Opt. Lett.* **30** 1168
- [10] Zhang Y, Zhao H J, Li N 2013 *Appl. Opt.* **52** 1284
- [11] Liang J, Ren L Y, Ju H J, Zhang W F, Qu E S 2015 *Opt. Express* **23** 26146
- [12] Rowe M P, Pugh E N, Tyo J S 1995 *Opt. Lett.* **20** 608
- [13] Zeng N, Jiang X Y, Gao Q, He Y H, Ma H 2009 *Appl. Opt.* **48** 6734
- [14] Guan J G, Zhu J P, Tian H, Hou X 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 224203 (in Chinese) [管今哥, 朱京平, 田恒, 侯洵 2015 物理学报 **64** 224203]
- [15] Guan J G, Zhu J P 2013 *Opt. Express* **21** 14152
- [16] Guan J G, Zhu J P, Tian H 2015 *Chin. Phys. Lett.* **32** 074201
- [17] Berrocal E, Sedarsky D L, Paciaroni M E, Meglinski I V, Linne M A 2007 *Opt. Express* **15** 10649
- [18] Vanstaveren H J, Moes C J M, Vanmarle J, Prah S A, Vangemert M J C 1991 *Appl. Opt.* **30** 4507
- [19] Swami M K, Manhas S, Patel H, Gupta P K 2010 *Appl. Opt.* **49** 3458

Image contrast for different imaging methods in turbid media*

Tian Heng Zhu Jing-Ping[†] Zhang Yun-Yao Guan Jin-Ge Hou Xun

(Shaanxi Key Laboratory of Information Photonic Technique, Key Laboratory for Physical Electronics and Devices of the Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 22 October 2015; revised manuscript received 5 January 2016)

Abstract

The physics-based methods that can effectively improve the image contrast in turbid media while truly preserving all the detailed information, have received great attention in recent years. The range-gated imaging (RGI), polarization difference method (PD) and polarization-based range-gated technology (PRG) are three effective methods of enhancing the contrast. However, the relationship between the extent of contrast enhancement and the imaging distance for each method has not been revealed. In this paper, a compact disc (CD) plate is set to be in the intralipid with different concentrations contained in a glass cell and imaged by RGI, PD, PRG and raw intensity imaging (RI). The Indian ink is used as the absorber which eliminates the multiple scattered photons and achieves the range-gated technology. In order to investigate the number of the scattered photons filtered out by the 4 methods, the image intensity curves are acquired while the imaging distance, the distance between the target surface and the front surface of the cell, is set to be 26 mm. The results indicate that PRG filters out the largest number of the scattered photons, followed by PD and RGI because the long imaging distance results in more multiple scattering photons. Then the influence of the imaging distance on the image intensity is investigated by the 4 methods. The image intensity is recorded while the imaging distance varies from 22 mm to 30 mm with even increments. Then four sets of intensity curves are plotted against the imaging distance corresponding to RI, RGI, PD and PRG respectively. Based on the RI, three sets of image intensity difference curves of RGI, PD and PRG are also calculated. The tendencies of the curves show that these imaging methods have their own imaging distance thresholds. It implies that the numbers of the photons filtered out by these methods are all constant when their imaging distances exceed their thresholds of 22 mm, 30 mm and 30 mm, respectively. Finally, the effect of the imaging distance on the contrast variation is studied in turbid media with two different scattering coefficient 0.714 cm^{-1} and 1.19 cm^{-1} . The results show that PRG is superior to other methods in contrast enhancement. In addition, the imaging distances of the 4 methods under the same image contrast are obtained, showing that under the same contrast increment, the PRG presents the largest imaging distance enhancement, followed by PD, RGI and RI. The increase of scattering coefficient could also cause the decrease of the imaging distance. These results can be very useful to understand the mechanism of imaging in turbid media and are of great significance for improving the ability to recognize the target.

Keywords: polarization difference imaging, range-gated imaging, polarization-based range-gated technology, contrast

PACS: 42.25.Ja, 42.30.Sy, 42.68.Mj, 42.68.Ay

DOI: 10.7498/aps.65.084201

* Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant No. xkjc2013008) and the Beijing Area Key Lab of Opto-Mechatronic Equipment Technology, China (Grant No. KF2014-01).

[†] Corresponding author. E-mail: jpzhu@xjtu.edu.cn