

生物组织单像素成像重构的散射干扰抑制

陆秋萍, 石 岩, 戴晟昕, 陈 义, 赵春柳, 赵天琦, 金尚忠, 牛海彬

(中国计量大学 光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310000)

摘要: 针对单像素成像重构中的散射介质影响而导致重构图像无法达到最佳效果的问题, 研究了有无散射介质的情况下, 关联算法和压缩感知算法的图像重构适用性。分析了散射介质在成像光路造成的调制信息空间结构变化和探测光路造成的信号损耗对成像的影响, 建立了近红外单像素成像系统, 使用 CGI 算法和 TVAL3 算法实现了穿透生物组织散射介质的单像素成像实验。实验发现, 在无散射介质时, TVAL3 算法的重构时间、峰值信噪比和相似度等均优于 CGI 算法; 而在有散射介质时, CGI 算法的三项数值中有两项优于 TVAL3 算法, 其最大重构时间 (0.304091 s) 小于 TVAL3 算法最小时间 (1.766299 s), 其最小峰值信噪比 (9.9831 dB) 高于 TVAL3 算法的最大值 (9.170456 dB), 其相似度 (0.0982, 0.1178) 则位于 TVAL3 算法的范围内 (0.099258~0.497622)。结果表明, 基于关联成像理论的 CGI 算法较适合散射介质成像, 基于压缩感知理论的 TVAL3 算法更适合无散射介质成像。

关键词: 单像素成像; 散射介质成像; 压缩感知; 关联算法

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210722

Scattering interference suppression for single-pixel imaging reconstruction of biological tissues

Lu Qiuping, Shi Yan, Dai Shengxin, Chen Yi, Zhao Chunliu, Zhao Tianqi, Jin Shangzhong, Niu Hai bin

(College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310000, China)

Abstract: In view of the influence of the scattering medium in the reconstruction of single-pixel imaging, the reconstructed image cannot achieve the best effect. The applicability of the correlation algorithm and compressed sensing algorithm for image reconstruction with or without the scattering medium was investigated. The influence of the spatial structure change of modulated information in the imaging path and the signal loss in detection path caused by the medium was analyzed, a near-infrared single-pixel imaging system was established, and the single-pixel imaging of penetrating the biological tissues scattering medium with the CGI algorithm and the TVAL3 algorithm was realized. It was found that the reconstruction time, peak signal-to-noise ratio and SSIM of the TVAL3 were better than CGI when there was no medium; while two of the three values of the CGI were better when there was medium, its maximum reconstruction time (0.304091 s) was smaller than the minimum (1.766299 s) of the TVAL3, and its minimum PSNR (9.9831 dB) was higher than the maximum (9.170456 dB) of the TVAL3, and its SSIM (0.0982, 0.1178) lay within the range of the SSIM of the TVAL3 (0.099258-0.497622). The results show that the CGI based on correlation imaging theory is more suitable for imaging scattering media, and the TVAL3 based on compressed perception theory is more suitable for imaging non-scattering media.

收稿日期: 2021-09-30; 修订日期: 2021-12-06

基金项目: 浙江省重点研发计划 (2021 C01068); 国家市场监督管理总局科技计划 (2019 MK148); 浙江省属高校基本科研业务费专项资金 (2020 YW30)

作者简介: 陆秋萍, 女, 硕士生, 主要从事单像素成像方面的研究。

导师简介: 石岩, 男, 副研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事量子成像与计算成像、光学设计等方面的研究。

Key words: single-pixel imaging; scattering medium imaging; compressed sensing; correlation algorithm

0 简介

单像素成像 (SPI) 是近年快速发展的新型计算成像技术, 在扩展谱带、抗干扰能力和高灵敏度等方面具有独特的优势。如图 1 所示, 单像素成像系统按功能可以分为五个部分: 光源照明模块、编码光调制模块、同步模块、数据采集模块和图像计算重构模块。光源发出的光束在编码光调制模块中被调制^[1], 通过结构照明的方式对待成像物体进行采样, 同时同步模块发出同步信号到单点探测器, 这样探测器探测到的信号与变化的照明模式是相互对应的, 记录的光强数据通过重构算法恢复出原始目标图像。

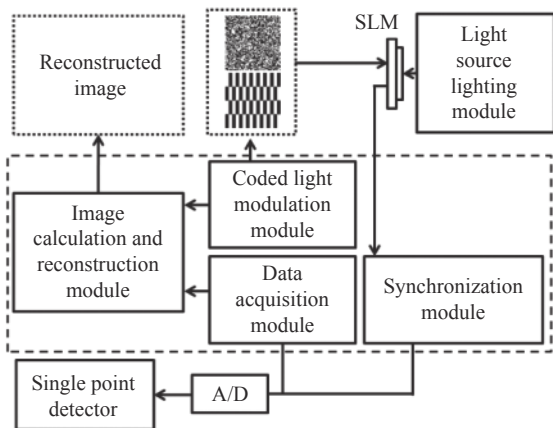


图 1 单像素成像系统各功能模块划分图

Fig.1 Division diagram of each functional module of single-pixel imaging system

在单像素成像实验中, 通常选用数字微镜阵列 (DMD) 作为空间光调制器 (SLM)。单点探测器的选择较多, 有光电二极管 (PD)、光电倍增管 (PMT)、单光子雪崩光电二极管 (SPAD) 等。单点探测器的一个优势是: 在非可见波段下, 成本比二维阵列探测器低^[2]; 另一个特点是: 无空间分辨能力, 仅探测记录某个小范围区域内的光强值, 因此对成像环境要求较低, 抗噪能力较强, 与光学元件配合可以收集到微弱的信号。基于这个优点, 单像素成像技术可应用在生物光子学上^[3], 结合近红外波段的光源可以穿透皮肤、血管等生物组织, 对人体内部组织结构进行成像^[4], 为医学诊断提供一种新方法。

重构算法是单像素成像的关键技术, 主要分为两

种: 关联算法和压缩感知算法。

2011 年, Gong W 等人利用光场的二阶相关性实施了穿透散射介质的物体成像^[5]。传统二阶关联算法计算参考光束的结构光空间分布和物光束的强度之间的二阶相关函数^[6-7], 可以很大程度上消减环境影响, 在强吸收、弱散射介质下也可以稳定成像^[8]。研究人员不断优化实验的装置、光路和算法, 在计算鬼成像中, 用测量矩阵代替参考光路, 光路得到简化, 其计算方法更加多样化。差分关联算法增加了一个对信号波动部分感兴趣的差分桶信号, 显著提高了信噪比, 使得鬼成像也可应用在一些对环境要求严格的成像问题上^[9]。

2006 年, Donoho D L 等人提出压缩感知理论^[10], 利用原始信号的稀疏性, 将得到的少量采样值进行处理, 恢复出准确的原始信号。将压缩感知理论运用到单像素散射成像, 不仅可以提高图像的信噪比, 而且降低了采样时间^[11]。匹配追踪算法复杂度低^[12], 局部匹配追踪算法可重构强散射介质下的目标图像, 分辨率高、成像锐度好^[13]。凸优化算法精度高、计算量大^[14], 可实现在动态散射介质下的单像素成像^[15]。最小全变分法依靠图像的离散梯度处理图像中人眼敏感的区域^[16], 可以对隐藏在硅片下的物体进行单像素成像^[17]。

文中针对单像素成像重构算法在受散射介质影响时表现不同, 导致重构图像无法达到最佳效果的问题, 提出了针对无散射介质和有散射介质的情况, 利用近红外光源与生物组织散射介质, 选择将散射介质分别紧贴于目标物体前后, 采用关联算法和压缩感知算法进行实验并比较重构图像质量的方法, 开展了 CGI 算法与 TVAL3 算法在两种情况下的成像质量研究。

1 算法仿真效果分析

文中分别选取了传统二阶关联算法 (GI)、传统差分关联算法 (DGI)、计算差分关联算法 (CGI)、随机二值矩阵正交匹配追踪算法 (OMP)、阿达玛矩阵正交匹配追踪算法和阿达玛矩阵全变分正则化算法 (TVAL3) 对模拟测量值信号进行重构, 并且对比了不同采样率下的成像效果。GI 算法通过调制光路上的总光强 S_i 与参考光路上的光强分布 $I_i(x,y)$ 来计算得到待成

像物体 $T_{GI}(x,y)$:

$$T_{GI}(x,y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i(x,y) - \langle I_i(x,y) \rangle) (S_i - \langle S_i \rangle) \quad (1)$$

DGI 算法在此基础上,将参考光路的光强分布做离散化求和处理。CGI 算法对观测矩阵的选择性更多,通过 DMD 实现二值光场调制,提高了投影的对比度。OMP 算法通过贪婪迭代找到观测矩阵中与当前残差相关性最好的一列,迭代剔除。TVAL3 算法引入增广拉格朗日函数和交替方向变换,使用梯度下降法迭代求解^[18]。

从图 2 和图 3 中可以看出,前两种算法得到的图像效果较差; CGI 算法在全采样下,重构结果与原图几乎无差异,并且所需时间最短; OMP 算法在采样率为 0.3 时可重构出图像的轮廓和部分细节,但所需时间最长; 图 3 (b)、(c) 显示, TVAL3 算法明显重构效果最优,采样率为 0.1 时就可以大致重构出图像的轮廓和细节特征,相似度为 0.474,采样率为 0.3 时相似度可达 0.773,并且计算速度比 OMP 算法快。

上述仿真模拟仅针对无散射介质时单像素成像重构算法的比较。在光路上放置散射介质后,携带调

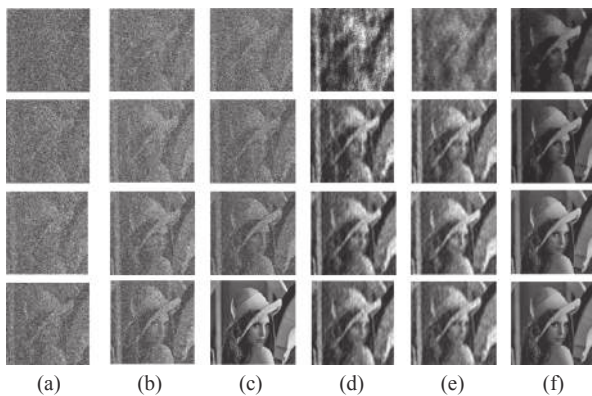


图 2 不同算法下的重构图像。(a)-(f) 分别采用传统二阶关联算法、传统差分关联算法、计算差分关联算法、随机二值矩阵 OMP 算法、阿达玛矩阵 OMP 算法和阿达玛矩阵 TVAL3 算法,采样率为 0.1、0.3、0.6 和 1.0

Fig.2 Reconstructed images under different algorithms. The algorithms used in (a)-(f) are the traditional second-order correlation algorithm, the traditional differential correlation algorithm, the calculated differential correlation algorithm, the random binary matrix OMP algorithm, the Hadamard matrix OMP algorithm and the Hadamard matrix TVAL3 algorithm, and the sampling rates are 0.1, 0.3, 0.6 and 1.0

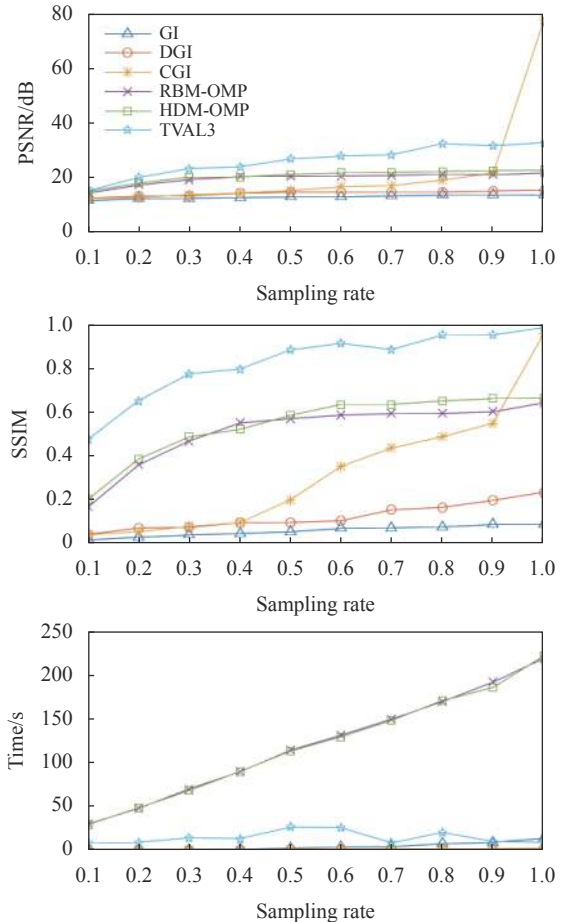


图 3 在不同采样率下使用不同重构算法的像质评价

Fig.3 Image quality evaluation using different reconstruction algorithms at different sampling rates (PSNR, SSIM, TIME)

制信息的光束会改变传播方向以及被介质吸收^[19],在目标平面形成一个散射光晕。在散射介质成像实验中,散射介质影响的不仅是成像光路,还有目标到探测器的一段探测光路。差分关联计算主要计算调制信号与经过调制的目标信号之间的联系,可以削减成像光路信号变化带来的不利影响。而压缩感知的特点是通过稀疏约束以少量信号来恢复高精度的原始信号,与采样率关系较大,与被散射介质强散射性削弱的探测光路信号有一些相似性,作为重构算法可以抵消非成像光路上的不利影响。

2 实验结果与分析

以厚度 1 mm 的猪肉切片为散射介质,光源采用光纤卤钨灯和红外滤光片,对 USAF-1951 分辨率板进行成像, InGaAs 探测器为单像素探测器进行信号采集,具体参数和光路如表 1、图 4 所示。

表 1 实验中的关键器件参数

Tab.1 Key device parameters in the experiment

Key device	Parameter
Light source	Wave length: 260-2500 nm
Lens 1	AR COATED 650-1 050 nm, $f=26$ mm
Lens 2	$f=100$ mm
Infrared filter	800-2500 nm
DMD	Operating 350-2 700 nm, 1 024×768 pixel
Projection lens	$f=35$ mm
Single point detector	Operating 800-1 750 nm
Focusing lens	AR COATED 650-1 050 nm, $f=60$ mm

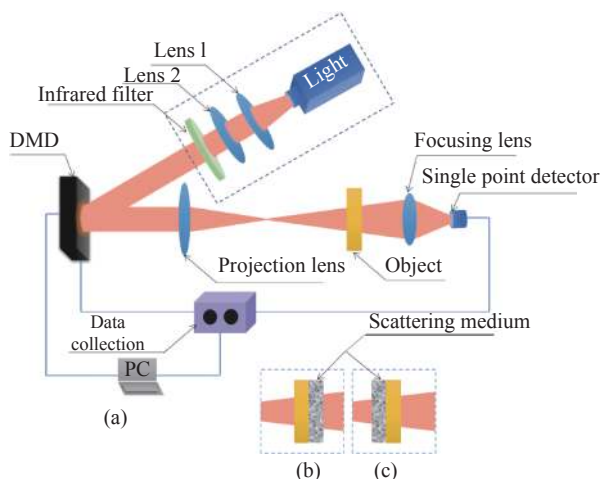


图 4 基于 DMD 的主动式单像素成像系统设计图。(a) 无散射介质时; (b) 散射介质在探测光路时; (c) 散射介质在成像光路时

Fig.4 Layout of active single-pixel imaging system based on DMD. (a) When there is no scattering medium; (b) When the scattering medium in detection path; (c) When the scattering medium in imaging path

首先在无散射介质的情况下实施近红外单像素成像实验, 采用分辨率为 64×64 的阿达玛矩阵, 分别使用 CGI 算法和 TVAL3 算法在不同采样率下恢复。为了减少随机误差的影响, 循环采集四次数据并取平均值作为实验结果的最终测量值。

CGI 算法使用 4096 个测量值重构了目标图像, PSNR 与 SSIM 分别为 16.305 1、0.633 7。TVAL3 算法在采样率为 0.4 时就可以重构出图像的轮廓和细节特征, PSNR 与 SSIM 分别为 16.963 6、0.632 6, 如图 5(b) 所示, 两种算法的重构效果相近。可以看出, 在无散射介质时, 基于压缩感知理论的 TVAL3 算法的成像质量优于基于关联成像理论的 CGI 算法。

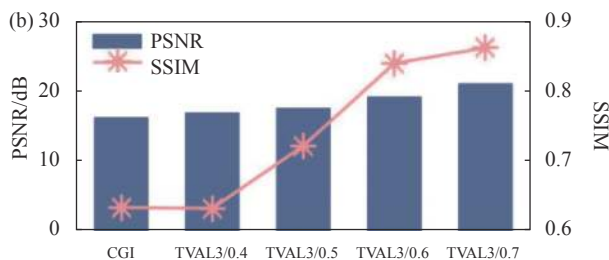
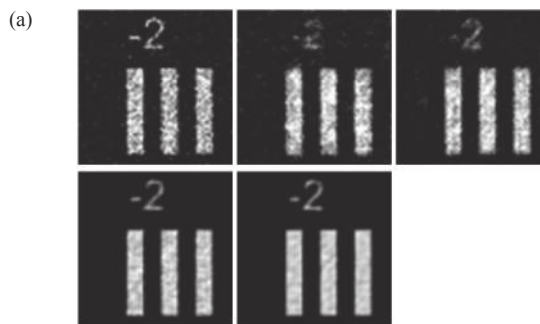


图 5 无散射介质下两种算法的重构效果对比。(a) 第一张由 CGI 算法重构, 后四张图由 TVAL3 算法重构, 其采样率为 0.4~0.7; (b) 重构图像的 PSNR、SSIM 对比

Fig.5 Comparison of the reconstruction effects of the two algorithms with non-scattering medium. (a) The first image recovered by CGI, and the last four images are recovered by TVAL3, with a sampling rate of 0.4-0.7; (b) PSNR and SSIM comparison of reconstructed image

在图 4 所示的光路上加入散射介质后, 介质的多重散射作用促使光束随机偏离原来的传播方向。成像光路上结构光的空间信息将被打乱^[20-21], 抵消了结构光照明可增加有效信息提取^[22]的优势, 造成成像质量下降。如图 6 (a)、(b) 所示, 在结构光的传播路径上放置毛玻璃做散射介质。在 d_1 距离处, 光束经过毛玻璃后空间结构细节变得模糊, 并且距离越远, 图像越模糊, 最终如图 6 (b) 所示, 在 d_2 距离处图像失去正方形形状, 变成一个大的光斑。同样的, 如果将散射介质放在非成像光路中, 光被混匀, 可探测到的光束强度衰减。如图 6(c)、(d) 所示, 均匀光经过物体和紧贴物体的毛玻璃后, 光束的传播方向同样发生了变化, 如同经过了一个光扩散板, 并且随着距离变长, 光束愈发扩散。

选择厚度约为 1 mm 的生物组织, 分别固定在分辨率板的前面 (图 4 (c)) 与后面 (图 4 (b))。介质的散射作用会限制成像深度, 使被介质包裹着的目标信号不容易被探测器接收到, 并且探测到的微弱信号易与探测器噪声混杂。因此, 在重构运算前, 需要在测量

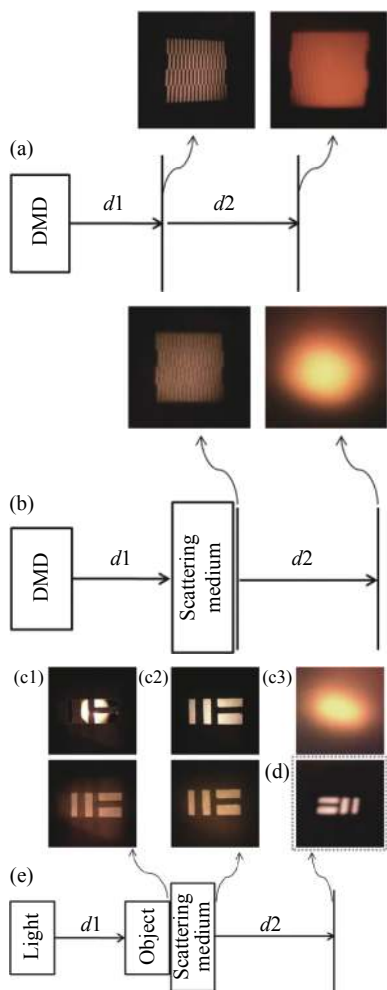


图 6 光束在毛玻璃散射作用下的表现。(a)~(b) 结构光是否经过散射介质后的强度分布对比; (e) 均匀光经过物体和散射介质后的强度分布, (c1)~(c2) 上方是直接拍摄的照片, 下方是使用一张白纸做观察面、然后拍摄观察面得到的照片; (c3) 均匀光经过物体和散射介质后的强度分布; (d) 均匀光直接经过物体的强度分布

Fig.6 Performance of the light beam under the scattering of ground glass. (a)-(b) Intensity distribution comparison of structured light with or without scattering medium; (e) Uniform light passing through the object and scattering medium; The upper of (c1)-(c2) is a photo taken directly, and the below is a picture taken from the observation surface; (c3) Uniform light passing through the object and scattering medium; (d) Uniform light passing through the object

值中减去无光和有光环境下探测器的暗噪声平均值。此外, 在重复测量的数据中选择最大的数据作为测量值。经过预处理的测量值可以在一定限度内减小探测器噪声、环境光照、光源强度波动对测量值的影响。对于 TVAL3 算法, 选取多个采样率进行图像

重构并对比, 调整了重构图像的灰度, 增加非线性映射操作, 增强了对比度。

图 7 的成像结果表明, 生物组织散射介质对成像有一定程度的影响, 重构图像质量下降。CGI 算法得

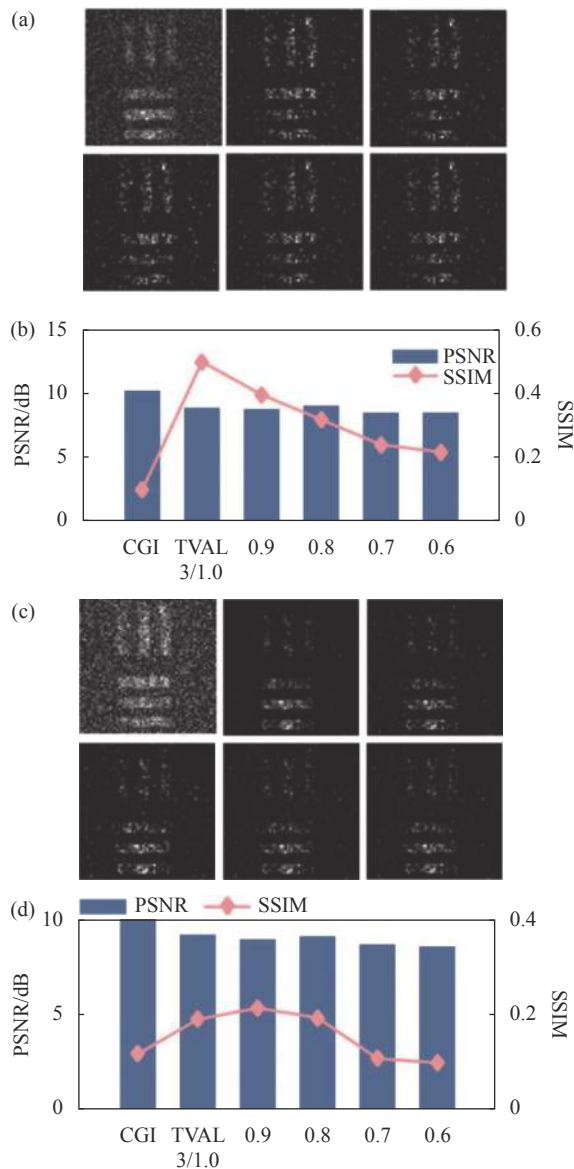


图 7 穿透散射介质成像结果。(a) 散射介质在成像光路上的重构图像, 分别使用 CGI 算法和 TVAL3 算法, 后者采样率为 1~0.6, 其峰值信噪比与相似度的对比在 (b) 中; (c) 散射介质在探测光路上的重构图像, 其峰值信噪比与相似度的对比在 (d) 中

Fig.7 Reconstructed image of penetrating scattering medium. (a) When the medium in imaging path, using CGI algorithm and TVAL3 algorithm, the latter sampling rate is 1-0.6, its peak signal-to-noise ratio and similarity. Comparison of (a) is in (b); (c) When scattering medium in detection path, and the comparison is in (d)

到的图像底噪多,其 SSIM 值略低于 TVAL3 算法,但 PSNR 值 (10.1886、9.9831) 均高于 TVAL3 算法重构图像的 PSNR(9.170456)。当 TVAL3 算法的采样率减小时,图像结构越发不明显。

当涉及到动态成像时,单像素成像对成像时间也有要求。实验选用了高速切换状态的 DMD 对光束进行编码^[23],其照明时间与探测器的响应时间相对应,因此不同场景下的数据采集时间相同,在静态成像下对成像结果影响不大。图 8 为在有散射介质的情况下两种算法分别重构图像所需的时间,可以看出 CGI 算法所需的时间远小于 TVAL3 算法。

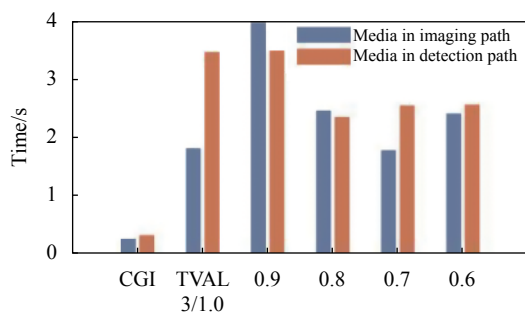


图 8 CGI 算法与 TVAL3 算法在穿透散射介质成像中的重构时间对比
Fig.8 Comparison of reconstruction time between CGI algorithm and TVAL3 algorithm in penetrating scattering media imaging

从以上实验结果可以看出,在有散射介质的情况下,CGI 算法重构的图像质量略优于欠采样率的 TVAL3 算法,而可压缩性正是压缩感知理论的特点,采样率越低时,基于压缩感知理论的重构算法优势逐渐降低。

3 结 论

设计搭建了基于近红外波段的单像素成像系统,并根据单点探测器只需探测光强变化的特点,将其应用于生物组织散射介质成像中。并且分析了调制光投影的成像光路与收集光强值的探测光路的特点,除去探测值中的探测器噪声,取多次测量值的最大值。分别进行了两种重构算法下的无散射介质和有散射介质成像,发现基于关联成像理论的 CGI 算法较适合散射介质成像,基于压缩感知理论的 TVAL3 算法更适合无散射介质成像。除此之外还有许多问题需要深入研究,如动态成像中探测器的积分时间等其他因

素对单像素成像质量的影响,后续可以继续深入研究。

参考文献:

- [1] Bromberg Y, Katz O, Silberberg Y. Ghost imaging with a single detector [J]. *Physical Review A*, 2009, 79(5): 053840.
- [2] Edgar M P, Gibson G M, Padgett M J. Principles and prospects for single-pixel imaging [J]. *Nature Photonics*, 2013(1): 13-20.
- [3] Durán V, Soldevila F, Irlés E, et al. Compressive imaging in scattering media [J]. *Optics Express*, 2015, 23(11): 14424.
- [4] Gibson A P, Hebden J C, Arridge S R. Recent advances in diffuse optical imaging [J]. *Physics in Medicine & Biology*, 2005, 50(4): R1.
- [5] Gong W, Han S. Correlated imaging in scattering media [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(3): 394-396.
- [6] Fan X H. Research of single-pixel imaging experiment based on spatial light modulator[D]. Luoyang: Zhengzhou University, 2017. (in Chinese)
- [7] Zhao Z D, Yang Z H, Li G L. Sub-Nyquist single-pixel imaging by optimizing sampling basis [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(5): 1008-1013. (in Chinese)
- [8] Ma Y Q, Zhang Z J, Wu C Q. Experiment study on ghost imaging in strong absorption and weakscattering media [J]. *Optical Instruments*, 2020, 42(1): 58-62. (in Chinese)
- [9] Ferri F, Magatti D, Lugiato L A, et al. Differential ghost imaging [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(25): 253603.
- [10] Donoho D L. Compressed sensing [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [11] Katz O, Bromberg Y, Silberberg Y. Compressive ghost imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(13): 739-433.
- [12] Tropp J A, Gilbert A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 53(12): 4655-4666.
- [13] Wen Z B, Wu Y L, Zhang X D, et al. A real time imaging method for internal targets of strongly scattering media with high resolution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0211006. (in Chinese)
- [14] Candès E J, Wakin M B, Boyd S P. Enhancing sparsity by reweighted L1 minimization [J]. *Journal of Fourier Analysis and Applications*, 2008, 14(5): 877-905.
- [15] Tajahuerce E, Durán V, Clemente P, et al. Image transmission through dynamic scattering media by single-pixel photodetection [J]. *Optics Express*, 2014, 22(14): 16945-16955.
- [16] Rudin L I, Osher S, Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms [J]. *Physica D Nonlinear Phenomena*,

- 1992, 60(1-4): 259-268.
- [17] Stantchev R I, Sun B Q, Hornett S M, et al. Noninvasive, near-field terahertz imaging of hidden objects using a single-pixel detector [J]. *Science Advances*, 2016, 6(3): e1600190.
- [18] Li C, Yin W, Jiang H, et al. An efficient augmented Lagrangian method with applications to total variation minimization [J]. *Computational Optimization and Applications*, 2013, 56(3): 507-530.
- [19] Zhao X, Liu T J, Chen P, et al. Extending dynamic range of detector in non-contact diffuse optical tomography system using deep learning [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 9: 1-10. (in Chinese)
- [20] Yang X, Jiang P F, Wu L, et al. Underwater Fourier single pixel imaging based on water degradation function compensation method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(11): 20200281. (in Chinese)
- [21] Lu D X, Fang W H, Li Y Y, et al. Optical coherence tomography: Principles and recent developments [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(5): 919-935. (in Chinese)
- [22] Zheng S S, Yang W Q, Situ G H. Application of computational optical imaging in scattering [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(6): 0603005. (in Chinese)
- [23] Liu M X, Zhang X, Wang L J, Shi G W. Optimization of matching coded aperture with detector based on compressed sensing spectral imaging technology [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(2): 290-301. (in Chinese)