

激光关联成像在烟幕条件下的实验研究

胡洋颀¹, 程正东^{1*}, 梁振宇¹, 翟翔¹, 李进斌²

¹国防科技大学电子对抗学院脉冲激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037;

²中国人民解放军 32256 部队, 广西 桂林 541000

摘要 烟幕是一种复杂且特殊的散射介质, 穿透烟幕成像是一项具有广阔应用前景的课题。为探究计算关联成像技术在烟幕环境下的抗散射性, 设计烟幕箱结合计算关联成像的实验系统, 在静态与动态散射的环境下进行了实验, 得出了计算关联成像在探测路径存在静态与缓慢变化的动态烟幕情况下可实现成像的结论; 针对快速动态烟幕条件下的成像降质问题, 提出了逐点补偿方法。由于在动态散射的情况下光强涨落掺入了额外的衰减因素, 利用获得的以特定频率投影特定帧的强度值可追踪衰减系数的变化, 将原始光强值除以衰减系数得到校正后的光强值。该方法在低投影频率的条件下具有优势, 通过对比得到了该方法的适用条件。

关键词 成像系统; 计算关联成像; 散射; 烟幕; 动态

中图分类号 O438

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0401020

1 引言

烟幕是一种混合气溶胶, 属于离散混浊微粒, 光在穿透烟幕时受到折射率起伏、相位波动的影响, 其波前阵面被扰乱, 这极大地干扰了信息传输。烟幕环境下的成像对以“所见即所得”为成像规律的传统成像技术提出了挑战。在军事上, 烟幕的遮障与干扰作用不利于有效对抗光学制导武器; 在安全领域, 火灾救援时消防人员难以在烟幕弥漫的环境下迅速进行定位以营救受害者; 在生活中, 雾霾可造成能见度下降, 给交通出行带来了许多不便。因此透烟成像具有广阔的应用前景。近年来, 研究人员在透烟成像方面取得了诸多进展, 红外成像技术在该领域中得到了广泛应用, 如: 基于短红外波对烟幕、水蒸气的不敏感特性, 使用红外热成像仪^[1-3]时, 利用目标热量透视烟雾对物体进行定位或可视化, 但在场景温度对比度较低的情况下, 高质量成像的获得存在困难并且耗时; 毫米波成像^[4-5]与瞬态成像技术^[6]在进行透烟成像时, 大多使用阵列探测器, 而非可见光阵列探测器非常昂贵。一种低成本、以一个无空间分辨能力的桶探测器 (BD) 实现透过散射介质条

件下的二维、三维成像的新型技术——关联成像 (CGI), 近年来受到了广泛关注^[7]。

CGI, 也称为鬼成像, 即通过光场调制器件投影一系列测量矩阵至目标物体, 以单像素探测器记录光强的涨落, 最终在计算机端以特定算法对目标物体进行还原成像。CGI 具有抗散射、非可见光谱成像应用成本低^[8-9]的优点, 被证明可实现三维成像^[10]、拐角成像^[11]、在目标物体至探测器前端存在散射介质的情况下的成像^[12-14], 并可用于光学信息加密^[15]。这些特点使得 CGI 技术在散射成像领域中具有广阔的应用前景与很大的研究价值。

在对 CGI 抗散射效应的研究中, 人们已经发现该技术在穿透毛玻璃、动物肌肉组织、乳浊液、水等介质时具有良好的抗散射能力^[14, 16-19], 但烟幕是一种具有动态运动 (沉降、扩散) 的复杂散射介质, 且其折射率受热量的影响。在动态条件下, CGI 记录的光强涨落附加了散射介质粒子的吸收和折射作用。本文通过设计烟幕箱实验, 证明了 CGI 在静态、动态烟幕下的抗干扰性能, 并在动态烟幕的条件下验证了所提逐点补偿 (PPC) 算法的适用性。实验结果表明, 探测器接收路径上的静态烟幕介质与缓慢变

收稿日期: 2020-07-01; 修回日期: 2020-08-05; 录用日期: 2020-08-17

基金项目: 国家自然科学基金 (61271376)、安徽省自然科学基金 (1208085MF114)

* E-mail: chengzdmaths@163.com

化的动态烟幕介质的散射作用基本不会影响 CGI 的效果,变化迅速的动态烟幕会导致图像退化,使用 PPC 算法可在低投影频率下有效提高图像质量。

2 穿透烟幕介质的 CGI 系统

当经过扩束的激光被数字微镜装置(DMD)调制后,BD 测量值 $I^{(i)}$ 可以表示为

$$I^{(i)} = \mathbf{P}_{N \times N}^{(i)} \cdot \mathbf{T}_{N \times N} = \begin{pmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1N} \\ \vdots & & \vdots \\ p_{N1} & \cdots & p_{NN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_{11} & \cdots & t_{1N} \\ \vdots & & \vdots \\ t_{N1} & \cdots & t_{NN} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中: i 为投影的次序; $\mathbf{P}_{N \times N}^{(i)}$ 为 DMD 投影的观测矩阵, p_{ij} 为其元素, $i=1,2,\dots,N,j=1,2,\dots,N$; $\mathbf{T}_{N \times N}$ 为 $N \times N$ 大小的目标物体,其元素为目标离散像素化的灰度值。

图 1 为穿透烟幕介质的 CGI 过程,由 DMD 投影测量矩阵至目标物体,激光经反射后通过烟幕,由探测器记录其强度值,最后在计算机(PC)端恢复成像。当探测路径上存在烟幕时,烟幕对光场的影响可视作系统对输入信号的卷积响应,BD 测量值为

$$I_i = (\mathbf{P}_{N \times N}^{(i)} \cdot \mathbf{T}_{N \times N}) \otimes H + N_i, \quad (2)$$

式中: H 为烟幕的点扩展函数(PSF);“ \otimes ”为卷积符号; N_i 是第 i 次测量中的噪声。

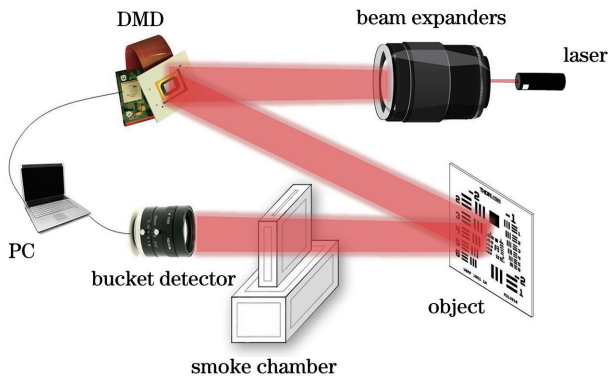


图 1 穿透烟幕的 CGI 系统示意图

Fig. 1 Diagram of CGI system penetrating smoke media

对于一维卷积,积分公式为

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \otimes h(x) dx &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) h(x - \tau) d\tau dx = \\ \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) \int_{-\infty}^{+\infty} h(x - \tau) dx d\tau &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) d\tau \int_{-\infty}^{+\infty} h(x) dx, \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $f(\cdot)$ 为一维目标物体函数; $h(\cdot)$ 为可积函数;

x 与 τ 为函数定义域内的所有实数。

可以推导得到二维卷积积分公式为

$$\sum_{x=-\infty}^{+\infty} \sum_{y=-\infty}^{+\infty} (\mathbf{P}_{N \times N}^{(i)} \cdot \mathbf{T}_{N \times N}) \otimes H(x, y) = \sum_{x=-\infty}^{+\infty} \sum_{y=-\infty}^{+\infty} (\mathbf{P}_{N \times N}^{(i)} \cdot \mathbf{T}_{N \times N}) \cdot \sum_{x=-\infty}^{+\infty} \sum_{y=-\infty}^{+\infty} H(x, y), \quad (4)$$

式中: y 为二维目标物体的纵坐标轴。

注意到,与(2)式相比,(4)式等号左侧第一个括号内不含噪声 N_i ,这意味着,当噪声 $N_i=0$ 时,因散射引起的卷积作用可以被看作是与点扩展函数 H 有关的乘性因子。

(2)式可改写为

$$I_i = \mathbf{P}_{N \times N}^{(i)} \cdot \mathbf{T}_{N \times N} \cdot \alpha_i + N_i, \quad (5)$$

式中: α_i 为散射介质的衰减系数。根据(4)式将该

值定义为 $\sum_{x=-\infty}^{+\infty} \sum_{y=-\infty}^{+\infty} H(x, y)$,光场在经过烟幕散射作用时,受到了变化的衰减系数的影响。当散射介质为静态时,加性噪声项得到有效控制,从而有 $N_i \approx 0$ 时,衰减系数 α_i 可在关联函数中作为常数项约去。因此,在烟幕呈静态的状态下,CGI 可以恢复图像。

$$G(x, y) = \frac{\langle (\alpha I + N) \cdot \mathbf{P} \rangle}{\langle \alpha I + N \rangle \cdot \langle \mathbf{P} \rangle} = \frac{\langle (I + \frac{N}{\alpha}) \cdot \mathbf{P} \rangle}{\langle I + \frac{N}{\alpha} \rangle \cdot \langle \mathbf{P} \rangle}, \quad (6)$$

式中: $\langle \cdot \rangle$ 为系综平均; $G(x, y)$ 为关联函数; α 为衰减系数; I 为投影矩阵与目标物体的内积; N 为噪声; \mathbf{P} 为测量矩阵。

上述讨论基于烟幕介质存在于探测路径,当烟幕介质存在于照明路径时,(2)式可修改为

$$I_i = (\mathbf{P}_{N \times N}^{(i)} \otimes \mathbf{H}) \cdot \mathbf{T}_{N \times N} + N_i, \quad (7)$$

此时 $\mathbf{P}_{N \times N}^{(i)}$ 退化而无法将散射引起的卷积作用化为乘性因子,退化的预制光场对强度 I_i 的测量造成不可逆影响,在此情况下 CGI 无法恢复图像。

CGI 透散射成像的本质在于其转换了传统成像的物像关系,即将传统成像中物平面与探测平面的共轭关系转换为照明平面与物平面的共轭关系,因此当照明光场能够清晰无损地投射于物平面上时,CGI 可获得成像而不受探测路径的干扰影响,但当照明光场受到干扰时,CGI 无法成像。

当探测路径的烟幕呈动态变化时,由于 CGI 依靠测量光强度的涨落与预制光场之间的关联还原成像,烟幕浓度的衰减系数变化为强度涨落时附加了不确定因素,在动态散射的条件下,CGI 会受到影响。

3 逐点补偿算法

烟幕的衰减系数变化是一个无序且伴随浓度变化的非线性过程,可以将一个非线性过程看作是分段线性的。即使烟幕浓度呈非线性变化,仍然可以在一定的时间尺度上将其视为线性,但是 CGI 测量得到的信息是有限的,仅得到随时间变化的一维强度值,该强度值并不标记当下的衰减系数。解决方

法是在每两帧投影矩阵中加入一张反射率全为 1 的矩阵图案,这些投影图案被称为标记帧(RF)。如果散射介质是静态的,这些全为 1 的投影矩阵对应的强度值保持不变;当散射介质呈动态变化时,这些强度值会随衰减系数的变化而变化。将 RF 得到的强度曲线进行拟合,可以得到衰减系数的近似变化过程,通过将原测量强度除以相应的因子,可对受散射畸变的光强值进行校正,从而实现还原成像。

$$\begin{pmatrix} i_1 \\ R \\ i_2 \\ R \\ \vdots \\ i_L \\ R \\ \vdots \\ i_n \\ R \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{through scattering}} \begin{pmatrix} \alpha_1 i_1 \\ \beta_1 R \\ \alpha_2 i_2 \\ \beta_2 R \\ \vdots \\ \alpha_L i_L \\ \beta_L R \\ \vdots \\ \alpha_n i_n \\ \beta_n R \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \alpha_1 i_1 \\ 0 \\ \alpha_2 i_2 \\ 0 \\ \vdots \\ \alpha_L i_L \\ 0 \\ \vdots \\ \alpha_n i_n \\ 0 \\ 0 \\ \beta_1 R \\ \vdots \\ \beta_L R \\ \vdots \\ \beta_n R \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \beta_1 R \\ 0 \\ \beta_2 R \\ \vdots \\ 0 \\ \beta_L R \\ \vdots \\ 0 \\ \beta_n R \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{correct}} \begin{pmatrix} \alpha_1 i_1 \\ \alpha_2 i_2 \\ \vdots \\ \alpha_L i_L \\ \vdots \\ \alpha_n i_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{2\beta_1 R}{\beta_1 R + \beta_2 R} \\ \vdots \\ \frac{2\beta_1 R}{\beta_{L-1} R + \beta_L R} \\ \vdots \\ \frac{2\beta_1 R}{\beta_{n-1} R + \beta_n R} \end{pmatrix} \approx \alpha_1 \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_L \\ i_{L+1} \\ \vdots \\ i_n \end{pmatrix}, \quad (8)$$

i-series *R*-series

式中: L 为测量次数; n 为原测量矩阵的总数; α_L 为第 L 次测量时的衰减系数; i_L 为投影原测量矩阵得到的强度值; R 为投影 RF 得到的强度值; β_L 标记了衰减系数的变化过程。先通过衰减系数拟合出系数的变化曲线,然后将畸变的测量值除以当前的衰减系数,以达到校正的目的。

标图为 5000 次测量所得结果,横坐标为测量次序,纵坐标为光强测量值,可以看出强度变化具有明显的非线性特征,将该图第 4001~4019 次测量的结果进行局部放大,RF 标记衰减系数的变化过程被表征为多段线性过程(中间图虚线)。使用线性拟合的方法得到中间时刻的衰减系数,然后将原投影矩阵的测量值(中间图星状点)除以衰减系数即可得到校正后的测量值(右图)。

图 2 为 PPC 方法校正强度测量值的过程,左测坐

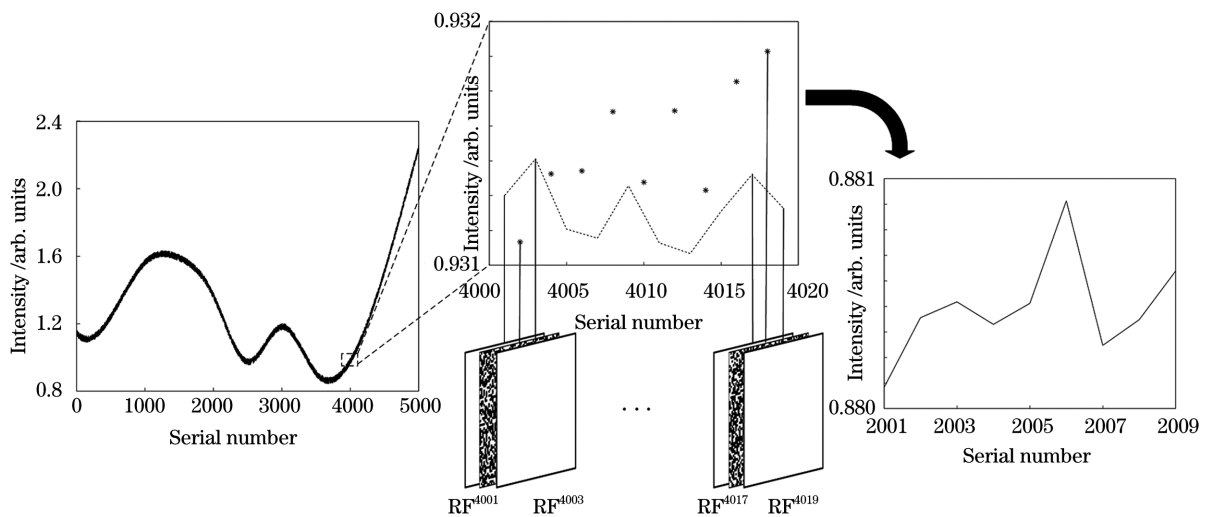


图 2 PPC 校正光强测量值示意图

Fig. 2 Schematic diagram of light intensity measurement value correction by PPC method

PPC 方法能够较好地校正受散射介质影响的光强值,其校正效果受烟幕介质变化速率与噪声的影响,下面对这两种情况分别进行讨论。

3.1 烟幕介质变化速率对 PPC 方法的影响

为更好地模拟烟幕介质变化,将衰减系数 α_i 的变化模拟为

$$\alpha_i = 1 + \exp\left(\frac{i+1}{2} \cdot a\right), \quad (9)$$

式中: a 为调整衰减系数变化剧烈程度的因子。图 3(a) 给出了 $a=1, 2, 3, 4$ 时烟幕衰减系数的变化, 衰减系数随 a 值的增大而增大, 当 $a=4$ 时衰减系数的变化曲线最为陡峭。随着测量的进行, 烟幕浓度逐渐变小, 衰减系数 α_i 逐渐增大, 相应地, 光强随着衰减系数的变化而发生不同程度的畸变, 以此模拟浓度变化对光强测量造成的畸变。重建图像为 BABOO, 图像像素数为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$, 由于 PPC 方法较 CGI 方法的测量次数多一倍, 因此, 为公平起见, 设定两种方法的总测量次数相同, 且都为 20001 次。成像

结果如图 3(b) 所示, 以均方根误差 (R_{MSE}) 为重建图像的质量衡量指标, 其表达式为

$$R_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{r,c}^{m,n} |U_0(r,c) - U(r,c)|^2}, \quad (10)$$

式中: $m \times n$ 为图像像素; $U_0(r,c)$ 、 $U(r,c)$ 分别为目标图像和重建图像; (r,c) 为图像的二维坐标。

当衰减系数变化较为缓慢时, 如 $a=1$, CGI 重建图像无论是在精细度和逼真度上皆优于 PPC 的重建结果, 这是因为虽然光强度测量值发生了一定程度的畸变, 但 CGI 方法本身具有一定的鲁棒性, 因此没有对重建结果造成过大的影响, 随着衰减系数变化速率的增加, 图 3(a) 所示曲线变得逐渐陡峭, 前后测量值发生的畸变程度加大, 采用 CGI 进行更多测量, 成像结果随 a 的增加而逐渐劣化, 在 $a=2, 3, 4$ 时, CGI 的结果明显劣于 PPC, 而 PPC 成像结果几乎不改变, PPC 对于动态散射介质表现出较强的抗散射效应能力。

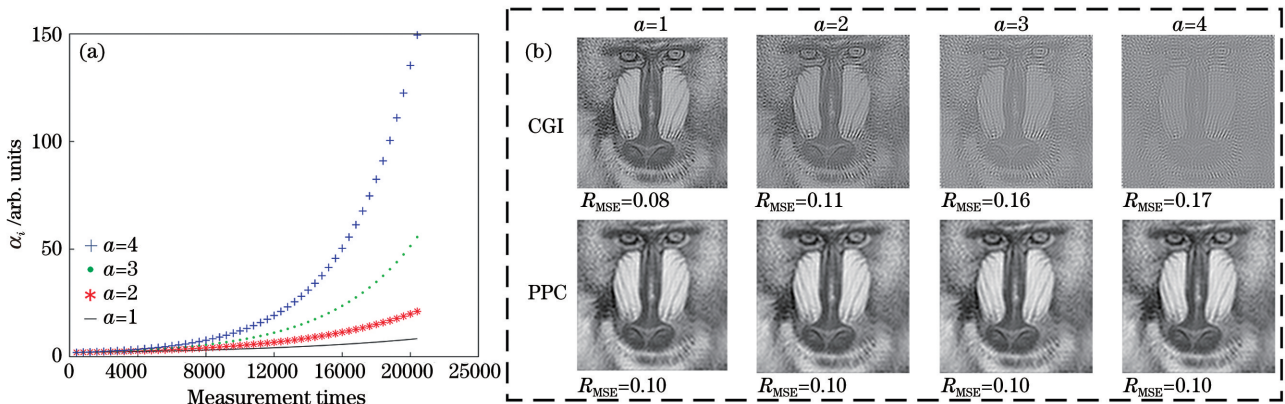


图 3 衰减系数的变化曲线及对应的成像结果。(a) $a=1, 2, 3, 4$ 时仿真的衰减系数变化曲线; (b) $a=1, 2, 3, 4$ 时, CGI 与 PPC 的成像结果

Fig. 3 Variation curves of attenuation coefficient and corresponding imaging results. (a) Variation curves of simulated attenuation coefficient for $a=1, 2, 3, 4$; (b) imaging results of CGI and PPC methods for $a=1, 2, 3, 4$

3.2 噪声对 PPC 方法的影响

CGI 系统成像中, 环境噪声、光源功率波动以及采集卡的暗电流噪声都会对成像结果造成不良影响, PPC 成像同样受到上述噪声的影响, 此外, 3.1 节中讨论的是当烟幕介质的衰减系数的变化曲线光滑时, 成像质量有较大改观, 但衰减系数的变化曲线的不光滑会对 PPC 方法校正带来不利影响。综合上述噪声因素, 对衰减系数的变化曲线[图 3(a)中 $a=4$ 时的曲线]进行加噪处理 (MATLAB 函数 `awgn`), 以仿真上述噪声对测量结果的影响, 成像结

果如图 4 所示。从图 4(a) 可以看出, 较大的噪声会造成强度测量值的信噪比 (S_{NR}) 降低, 当 $S_{\text{NR}} \leq 60$ 时, 噪声对 CGI 与 PPC 方法均造成了不小的影响 ($R_{\text{MSE}} \geq 0.17$); 如图 4(b) 所示, $S_{\text{NR}}=60$ 时无法辨认两种算法的成像结果, 成像淹没在噪声中。当噪声对信号的影响逐渐减小, $S_{\text{NR}}=70$ 时, 能够辨认出 PPC 方法所成图像的大致轮廓, 而 CGI 方法得到的图像仍有大量噪声弥漫, 随着噪声水平的下降, PPC 方法逐渐显示出优势, 强度测量信号的信噪比较低时会引入误差, 因此使用 PPC 方法需要有效地控制噪声。

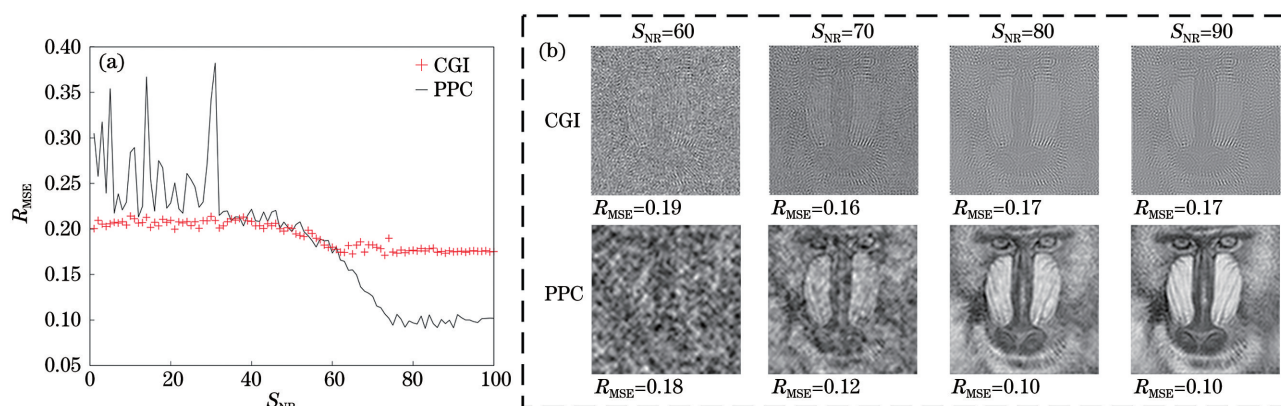


图 4 不同噪声水平下各算法对应的成像结果。(a)各算法在不同噪声水平下的 R_{MSE} ; (b)各算法在 S_{NR} 为 60, 70, 80, 90 时的成像结果

Fig. 4 Corresponding imaging results of algorithms under different noise levels. (a) R_{MSE} of each algorithm at different noise levels; (b) imaging results of algorithms for $S_{NR} = 60, 70, 80, 90$

4 实验及结果分析

穿透烟幕的 CGI 实验光路图如图 5 所示, 实验系统由 532 nm 激光器、准直扩束镜、DMD、透镜、成像目标、烟幕箱和探测器组成。考虑到烟幕对光强的严重衰减, 使用激光作为照明光源, 并设计成像方式为主动式 CGI, 烟幕箱位于成像光路的探测路径上。为达到快速成像的目的, 采用 DMD (分辨率为 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$, 型号 V-7000VIS, ViALUX 公司, 德国) 作为主动调制器件, 投影频率可达到 22 kHz, 微镜的像元大小为 $13.7 \mu\text{m}$ 。实验中, 激光器发出的光束通过准直扩束镜后形成方向性良好的激光面阵, 光场到达 DMD 镜面时, DMD 的镜面快速翻转成相应矩阵, 将其投影至目标物体, 最后由探测器接收穿透烟幕箱的目标反射光。实验所用探测器为 HT-SUA134GC-T, 在 DMD 进行投影时实施同步触发采集, 将单幅照片所得的光强值进行面积积分, 将积分结果作为桶探测器的光强值进行还原计算。

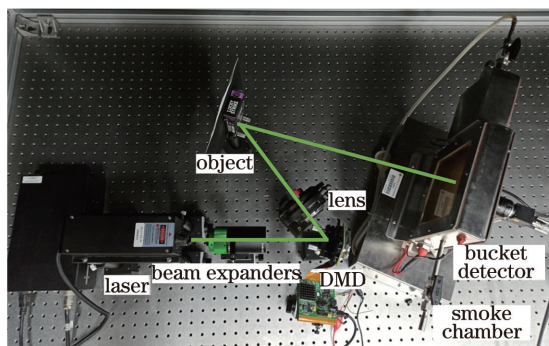


图 5 穿透烟幕的 CGI 光路图

Fig. 5 Light path of CGI for laser penetrating smoke

图 6 为烟幕箱的结构图, 烟幕箱装置由进烟部分、出烟部分、传感器部分、光学窗口和控制部分组成。实验使用香烟作为发烟材料, 烟草燃烧时会产生复杂的气相与液相成分, 产生一种具有较强代表性的烟幕。进烟部分在烟泵的抽吸作用下向储烟盒送烟, 光学窗口由透光率为 90% 的石英玻璃构成。实验时打开烟泵开关并点燃香烟, 待香烟燃尽时关闭烟泵并封闭进烟口与出烟口球阀, 这时可在储烟箱中得到不断变化的悬浮烟幕, 在此条件下进行 CGI 实验。

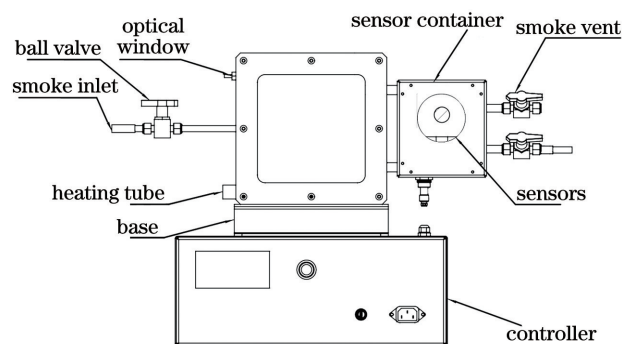


图 6 烟幕箱结构

Fig. 6 Structure of smoke chamber

4.1 静态烟幕下的 CGI 实验

为了说明 CGI 穿透静态烟幕成像的能力, 释放多次烟幕后, 将残存并附着于石英玻璃上的固态颗粒与液态烟油颗粒视为静态烟幕, 光在其中传播时同样会受到散射与吸收的作用。使用两组目标观察静态烟幕下的 CGI 与传统成像 (TI) 的差异, 投影矩阵的分辨率为 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$, CGI 投影帧数为 5000 帧, 强度值采样数据如图 7 所示, 图 7(a)、(b) 分别是目标 1 (汉字“泰山”) 与目标 2 (英文

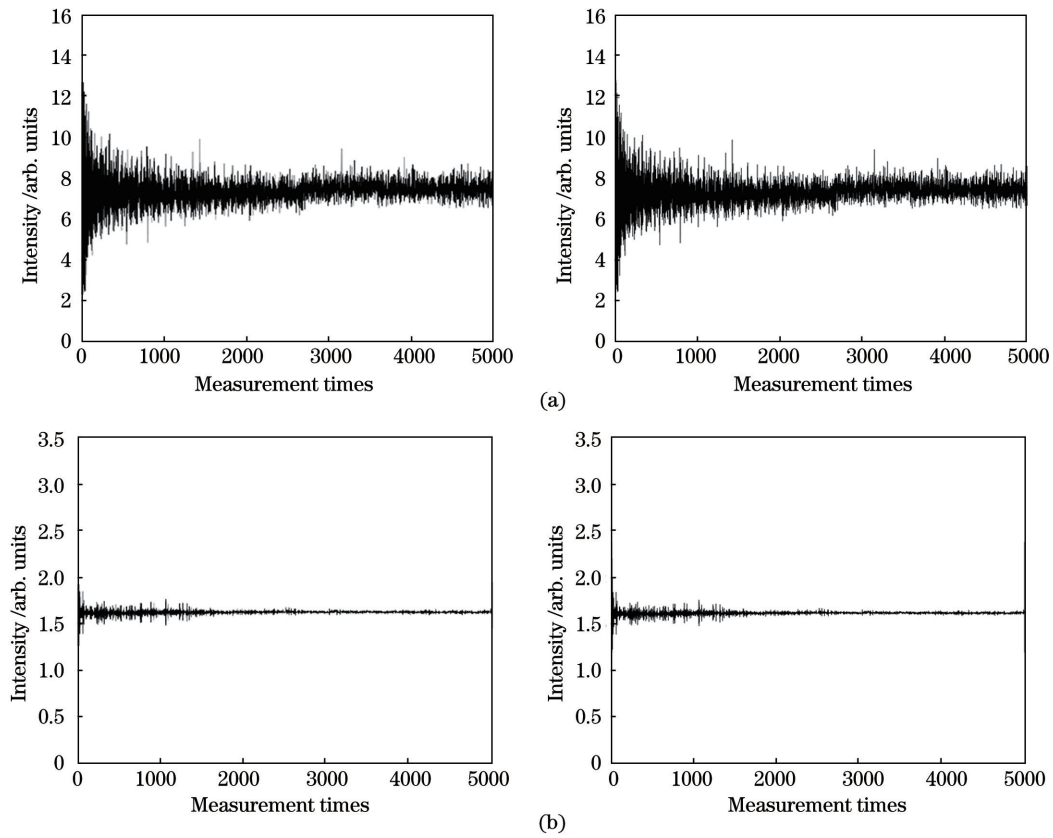


图 7 静态烟幕下的目标强度测量值分布。(a) 目标 1; (b) 目标 2

Fig. 7 Distributions of intensity measurements of targets under static smoke. (a) Target 1; (b) target 2

“LUCKY STRIKE”)的 5000 个强度测量值分布,横坐标为测量次数,纵坐标为强度值大小。

实验结果如图 8 所示,第一组实验针对目标 1,第二组实验针对目标 2,从结果可以看出,对于静态烟幕的情况,使用电荷耦合器件(CCD)作为阵列式探测器的 TI 方法时,静态烟幕颗粒的散射效应使得所

成图像变得模糊,因此无法分辨目标;而 CGI 所得图像具有一定程度的形变,这是由激光主动式 CGI 调制矩阵为面阵、传输光场到达目标时矩阵图案的不同部位存在光程差导致投影发生部分形变引起的,但所得图像具有更高的辨识度,因此 CGI 技术可在静态烟幕散射的条件下成像并获得较 TI 更高质量的图像。

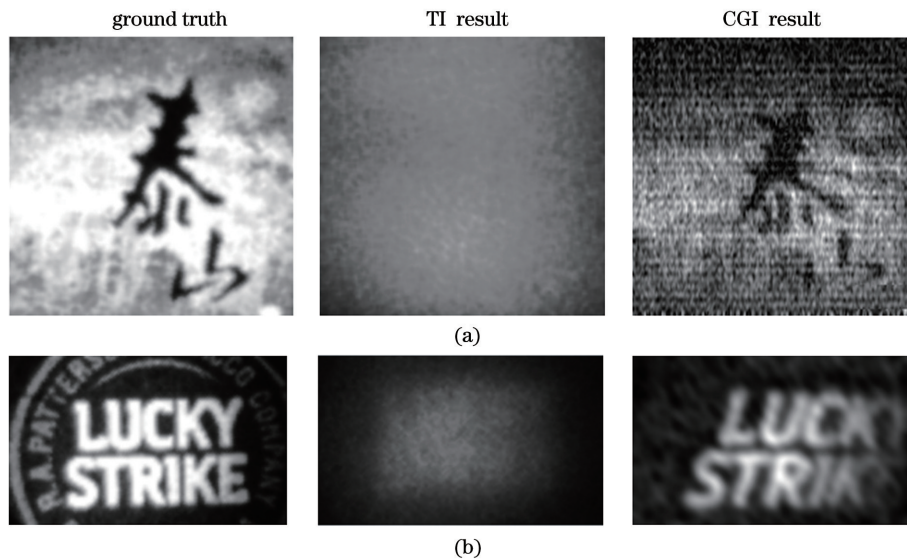


图 8 目标原图与静态烟幕环境下的 TI 成像结果、CGI 结果。(a) 目标 1; (b) 目标 2

Fig. 8 Original image of target, and results of TI and CGI in static smoke environment. (a) Target 1; (b) target 2

4.2 慢速动态烟幕下的 CGI 实验

为验证烟幕散射衰减系数在 CGI 测量中呈非线性动态变化,在单次泵烟结束后以 50 Hz 的投影频率连续投影 65536 次,将得到的光强强度值绘制为图 9 中的实线,为排除光源强度波动带来的干扰,将未泵烟条件时投影 RF 得到的光强值绘制为图 9 中的虚线。从图 9 可以看出,烟幕浓度在投影期间持续变化,且穿透烟幕的激光强度基本保持不变,由光源波动带来的影响很小,因此,实验条件下强度探测值的连续变化主要来源于烟幕的动态散射。

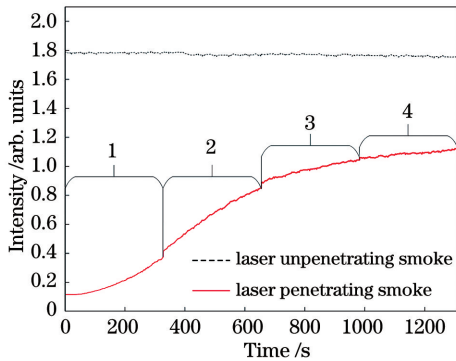


图 9 激光穿透烟幕与未穿透烟幕条件下的强度随时间的变化曲线

Fig. 9 Intensity varying with time for laser penetrating smoke and unpenetrating smoke

选取 2 号目标为本节实验对象,为验证 CGI 穿透烟幕的鲁棒性与 PPC 方法的适用性,实验比较了不同浓度变化速率下的成像结果。为区分不同浓度变化的速率,将图 9 的测量区间分为 4 个区段,为“1”、“2”、“3”、“4”,浓度变化速率先升后降,“2”区段为浓度速率变化最快的阶段,之后逐渐趋于平缓。

CGI 在 4 个区段进行采样并还原成像,衡量重

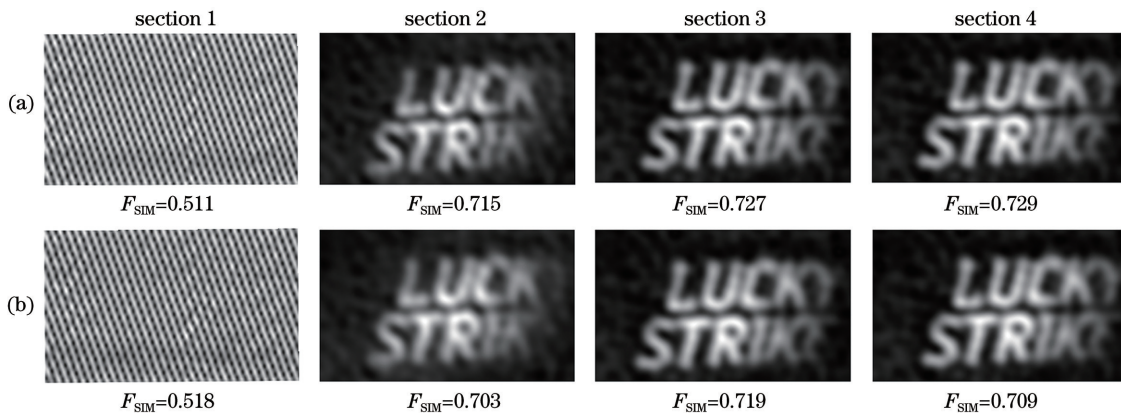


图 10 不同区段内的成像结果。(a) CGI 方法的成像结果;(b) PPC 方法的成像结果

Fig. 10 Imaging results in different sections. (a) Imaging results of CGI method; (b) imaging results of PPC method

建图像质量时没有采用常见的结构相似度和峰值信噪比指标,结构相似度评价主要注重于低级特征(如边缘等),但利用这种特征评价模糊与变形的图像具有局限性,因此采用了使用相位一致性与梯度幅值作为评价特征的特征相似度(F_{SIM})作为重建图像的评价指标。

F_{SIM} 是一种有效的通用图像质量评估指标,该方法使用相位一致性和梯度幅值作为图像评估的主要特征,其评价结果与人类的主观评估结果更加吻合。 F_{SIM} 的计算公式为

$$F_{SIM} = \frac{\sum_{x \in \Omega} S_{PC}(x) \cdot S_G(x) \cdot P_{PC,m}(x)}{\sum_{x \in \Omega} P_{PC,m}(x)}, \quad (11)$$

$$S_{PC}(x) = \frac{2P_{PC1}(x) \cdot P_{PC2}(x) + T_1}{P_{PC1}^2(x) + P_{PC2}^2(x) + T_1}, \quad (12)$$

$$S_G(x) = \frac{2G_1(x) \cdot G_2(x) + T_2}{G_1^2(x) + G_2^2(x) + T_2}, \quad (13)$$

$$P_{PC,m}(x) = \max [P_{PC1}(x), P_{PC2}(x)], \quad (14)$$

式中: Ω 为图像的空域; $P_{PC1}(x)$ 、 $P_{PC2}(x)$ 分别代表原图与被测图在位置 x 的相位一致值; $G_1(x)$ 与 $G_2(x)$ 分别代表原图与被测图在位置 x 处的梯度值; T_1 、 T_2 为一个避免(12)式和(13)式分母出现零的常量。 F_{SIM} 值越大,则图像的重建质量越高,反之,图像重建质量越低。

图 10 是“1”、“2”、“3”、“4”区段内的 CGI 与 PPC 成像结果,尽管“1”区段内烟幕浓度变化速率低,但烟幕浓度过大,激光难以穿透,因此 CGI 与 PPC 均无法成像。“2”、“3”、“4”区段成像结果的 F_{SIM} 值在 0.7 以上,获得的图像有一定可读性。从对比图中可以看出,“3”、“4”区段的结果略微好于“2”区段,这是由烟幕浓度变化速率不同造成的。图 10 结果证明在低速缓慢变化的烟幕介质

中, CGI 具有较强的抗散射能力, 在此情况下 PPC 方法不仅付出额外投影的代价, 且其成像质量较 CGI 无优势。

4.3 快速动态烟幕下使用逐点补偿方法的 CGI 实验

为模拟烟幕浓度快速变化的烟幕环境, 将烟幕箱加热至 55° , 烟幕在加热条件下快速消散, 从而达到浓度快速变化的目的。烟由完全泵入到其达到“4”区段平缓水平程度的时间缩短为约 7 min。待烟完全泵入储烟箱后关闭进出口, 在此条件下比较 CGI 与 PPC 两种方法, 使用的投影频率分别为 100, 50, 20, 10 Hz, 投影帧数均为 4001 帧。测量结果如图 11 所示, 当投影频率为 100 Hz 时, 由于烟幕刚充入箱内, 过高的浓度导致激光穿透效果不佳且烟幕剧烈地翻腾变化导致强度测量值附加了随机量。这两个因素导致本就很小的光强度值难以表达由预制光场引起的光强涨落与 RF 标记的衰减系数, 这对应(6)式中 N/α 无法约去的情形, 因此两种方法皆

无法成像。衰减系数的快速变化导致光强前后涨落过大, 因此 CGI 方法的成像质量降低, PPC 方法则由于线性拉伸校正了畸变的光强值而获得了更高质量的成像, 在投影频率变低时两者成像对比更为明显。虽然 CGI 在动态烟幕条件下使用特定投影帧率时能够获得与 PPC 质量相当的成像结果 (50 Hz), 但在实际成像中, 人们无法预先知道特定的投影帧率, 当投影频率或大或小地偏离该特定频率时, 容易造成成像结果劣化, PPC 相较于 CGI 方法虽然多进行了 1 倍数量的测量, 但是从可靠性与适用性方面而言, PPC 不失为一种有力地对抗动态散射介质的方法。需要注意的是, 如果探测器响应时间较长, 其响应时间的数量级足以比拟相邻帧投影的时间间隔的量级 (如探测器响应时间为 20 ms, 投影频率为 50 Hz) 时, 较高的投影频率会造成桶探测器的探测强度误差, 从而影响成像质量。

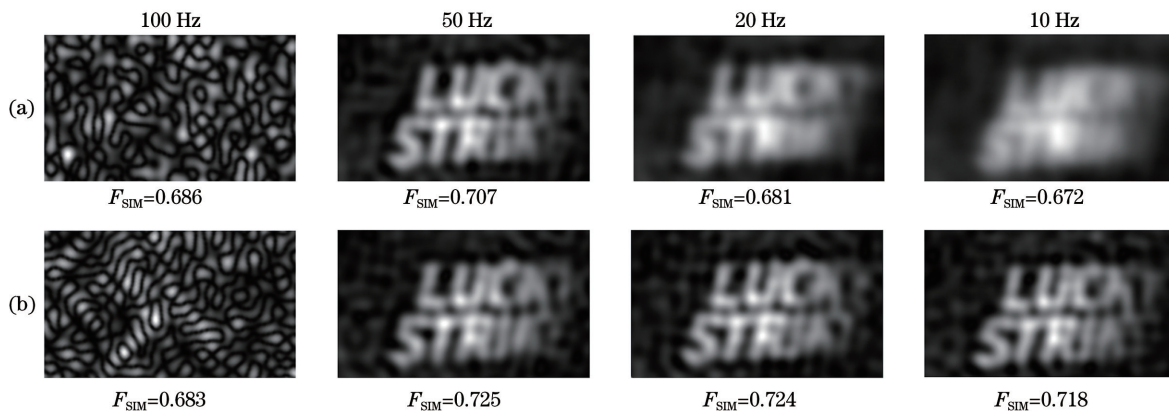


图 11 不同投影频率下 CGI 与 PPC 方法的成像结果对比。(a) CGI 结果; (b) PPC 结果

Fig. 11 Imaging results of CGI and PPC at different projection frequency. (a) Results of CGI; (b) results of PPC

图 12 为 50 Hz 与 10 Hz 投影频率下的数据分布, 图 12(a)、(b)、(c) 分别为 50 Hz 投影频率下测得的强度值、PPC 方法校正后的强度值、未使用 PPC 方法校正的强度值, 图 12 (d)、(e)、(f) 为 10 Hz 投影频率下测得的强度值、PPC 方法校正后的强度值、未使用 PPC 方法校正的强度值, 可以明显看到, 图 12 (b)、(e) 中的曲线分布相较于图 12(c)、(f) 中曲线的总体趋势更接近静态烟幕情况下的测量值分布。10 Hz 投影频率下前后测量值的差距较 50 Hz 大, 这也是 10 Hz 投影频率下 CGI 相较 50 Hz 投影频率下成像降质的主要原因。结合 4.2 节结论可以得到: CGI 对散射介质的质量浓度变化具有容忍度, 若散射介质的质量浓度变化程度在容忍度范围内, 则成像质量不表现出明显降质, 反

之, 成像质量劣化。PPC 方法通过加入 RF 记录散射介质质量浓度的变化趋势并校正失真的强度值, 以此限制散射介质质量浓度的变化程度。

为了量化成像时间, 表 1 列出了 PPC 与 CGI 方法成像的时间。总成像时间等于数据采集时间与重建时间, 这两种方法以同一投影频率投影相同帧数 (4001 次), 具有相同的数据采集时间, 并且 PPC 方法校正特别快, 因此这两种方法付出的计算成本几乎是相同的。

从几何光学的角度来看, 探测路径存在散射介质的 CGI 系统光路中, 激光光源相当于相位共轭镜, 可实现照明平面与物平面的共轭, 在此情况下, 无空间分辨能力的桶探测器相当于光源^[20], 由于 CGI 执行多次测量, 在测量期间内, 被散射介质削弱

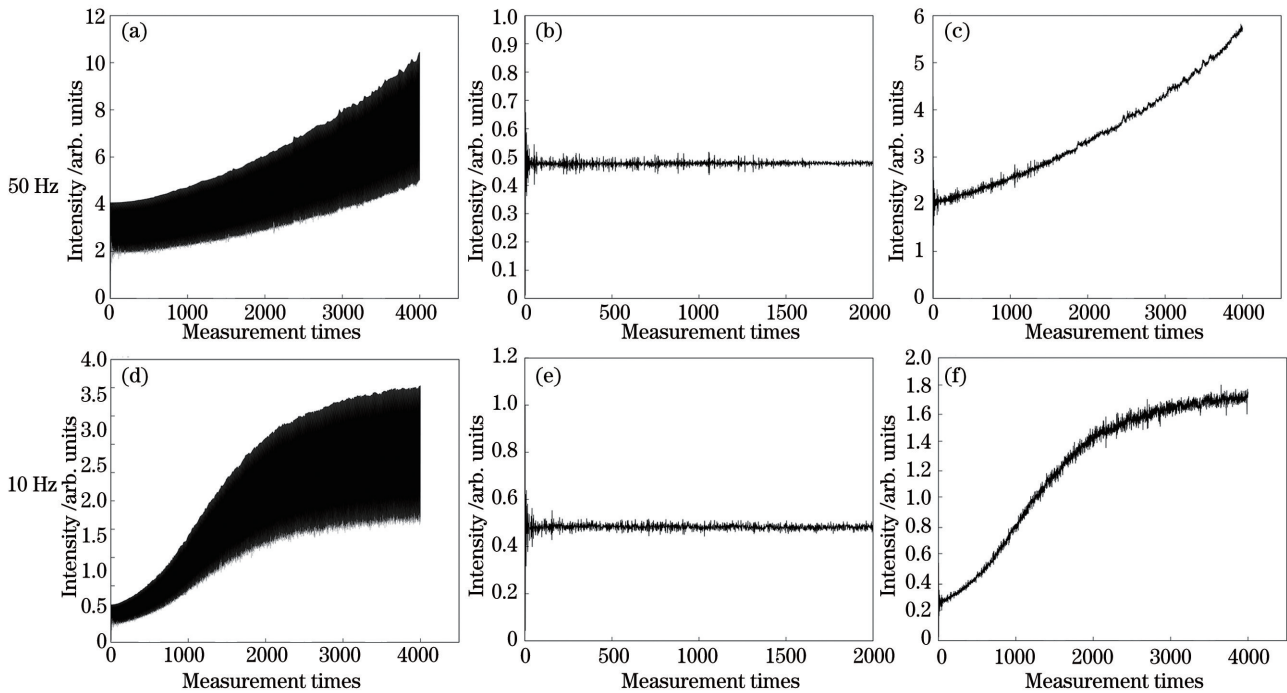


图 12 动态烟幕环境下 50 Hz 与 10 Hz 投影频率下测量的强度值分布。(a)(d)测得的强度值;(b)(e) PPC 方法校正后的强度值;(c)(f) 未使用 PPC 方法校正的强度值

Fig. 12 Distributions of intensity values measured at 50 Hz and 10 Hz projection frequencies in dynamic smoke environment. (a)(d) Measured intensity value; (b)(e) intensity value corrected by PPC method; (c)(f) intensity value without correcting by PPC method

表 1 在不同投影频率下各算法的成像时间

Table 1 Experimental imaging time for different algorithms at different frame rates

| Projection frequency /Hz | Algorithm | Number of projected frames | Time of projection /s | Reconstruction time /ms | Total time /s |
|--------------------------|-----------|----------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------|
| 100 | CGI | 4001 | 40.10 | 2 | 40.10 |
| | PPC | | | 3 | |
| 50 | CGI | 4001 | 80.20 | 2 | 80.20 |
| | PPC | | | 3 | |
| 20 | CGI | 4001 | 200.05 | 2 | 200.05 |
| | PPC | | | 3 | |
| 10 | CGI | 4001 | 400.10 | 2 | 400.10 |
| | PPC | | | 3 | |

了一定量光强的光源并不影响成像的空间特性,在静态烟幕情况下的 CGI 仍能实现成像,而当散射介质位于照明路径时,照明平面与物平面的共轭关系被破坏,因此在照明平面存在散射介质时,CGI 受到影响;而对于动态散射,光源光强的变化时刻影响测量信号的信噪比,若光源变化较小,则具有一定鲁棒性的 CGI 系统能够克服光源的变化,实现成像。若光源变化显著,则信噪比降低,成像质量下降,PPC 方法的本质正是校正光源光强。

5 结 论

设计结合烟幕箱的主动式激光 CGI,并通过实验证明了该设计实现透烟成像的能力,对不同状态的烟幕进行了系统分析并提出逐点补偿方法以提高成像质量。该设计方法将烟幕区分为静态区与动态区,在静态的烟幕条件下实现了对两个目标的成像,在动态的条件下提出逐点补偿方法并进行验证以区分动态烟幕的变化程度,得到了 4 个变化程度不同

的区段并在此基础上进行实验。在烟幕快速变化的条件下进行不同帧率的实验。实验结果表明:当烟幕浓度变化过于剧烈时,激光难以穿透烟幕,CGI 与 PPC 方法均无能为力;当烟幕的变化程度趋缓并足以使激光穿透烟幕时,CGI 能够获得较好的成像结果,即 CGI 对光强涨落量中掺入其他分量具有一定容忍度,这也是 CGI 技术鲁棒性的体现。当烟幕处于快速变化时,仅有处于特定投影频率下的 CGI 可以获得具有辨识度的成像,且当投影频率降低时图像降质的程度愈加严重,而 PPC 方法在此情况下可通过校正畸变的测量值的方式改善成像质量。这些结果以及改进方法对于 CGI 的应用具有一定参考意义。照明路径存在散射介质仍然是 CGI 的难点,因此未来需要对该情况进行研究与改进。

参 考 文 献

- [1] Kachurka V, Roussel D, Hadj-Abdelkader H, et al. SWIR camera-based localization and mapping in challenging environments [C] // Image Analysis and Processing-ICIAP 2019, September 9-13, 2019, Trento, Italy. New York: Springer, 2019: 446-456.
- [2] Bakker T, Turner D, Battaglia J. Development of a miniature InGaAs camera for wide operating temperature range using a temperature-parameterized uniformity correction [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6940: 69400K.
- [3] Khamidullin K A, Baliev D L, Lazarev P S, et al. Short-wave infrared camera with a focal plane array based on InGaAs/InP heterostructures[J]. Journal of Communications Technology and Electronics, 2019, 64(3): 319-324.
- [4] Patel V M, Mait J N, Prather D W, et al. Computational millimeter wave imaging: problems, progress, and prospects[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2016, 33(5): 109-118.
- [5] Luo B, Ong L C, Karim M F. Development of a 94 GHz passive millimeter wave imaging system for target detection in haze and smoke [C] // 2013 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications (IMWS-BIO), December 9-11, 2013, Singapore, Singapore. New York: IEEE Press, 2013: 1-3.
- [6] Wu R H, Dai F, Yin D, et al. Imaging through scattering media based on transient imaging technique [J]. Chinese Journal of Computers, 2018, 41(11): 2421-2435.
吴日辉, 代锋, 尹冬, 等. 基于瞬态成像技术的穿透
- 散射介质成像 [J]. 计算机学报, 2018, 41(11): 2421-2435.
- [7] Wu Z W, Qiu X D, Chen L X. Current status and prospect for correlated imaging technique [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(6): 060001.
吴自文, 邱晓东, 陈理想. 关联成像技术研究现状及展望 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(6): 060001.
- [8] Yan Y Q, Zhao C Q, Xu W D, et al. Research on the terahertz active ghost imaging technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 0814001.
闫昱琪, 赵成强, 徐文东, 等. 太赫兹主动关联成像技术研究 [J]. 中国激光, 2018, 45(8): 0814001.
- [9] Yan H Y, Zhao C Q, Xu W D, et al. Terahertz ghost imaging based on imaging-transformation measurement matrices [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1214001.
严海月, 赵成强, 徐文东, 等. 基于成像变换测量矩阵的太赫兹关联成像 [J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1214001.
- [10] Sun M J, Zhang J M. Single-pixel imaging and its application in three-dimensional reconstruction: a brief review [J]. Sensors, 2019, 19(3): 732.
- [11] Jin H Q, Shi J H, Peng J Y, 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.
- [12] Duran V, Soldevila F, Irlles E, et al. Imaging at depth in tissue with a single-pixel camera [EB/OL]. (2014-11-11) [2020-07-01]. <https://arxiv.org/abs/1411.2731>.
- [13] Zhou C, Liu B, Huang H Y, et al. Effect of scattering medium on multi-wavelength color object correlated imaging [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(10): 101102.
周成, 刘兵, 黄贺艳, 等. 散射介质对多波长彩色物体关联成像的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(10): 101102.
- [14] Le M N, Wang G, Zheng H B, et al. Underwater computational ghost imaging [J]. Optics Express, 2017, 25(19): 22859-22868.
- [15] Clemente P, Durán V, Torres-Company V, et al. Optical encryption based on computational ghost imaging [J]. Optics Letters, 2010, 35(14): 2391-2393.
- [16] Gong W L, Han S S. Correlated imaging in scattering media [J]. Optics Letters, 2011, 36(3): 394-396.
- [17] Zhang P, Gong W, Shen X, et al. Correlated

- imaging through atmospheric turbulence[J]. *Physical Review A*, 2010, 82(3): 033817.
- [18] Durán V, Soldevila F, Irlés E, et al. Compressive imaging in scattering media [J]. *Optics Express*, 2015, 23(11): 14424-14433.
- [19] Liu B L, Yang Z H, Qu S F, et al. Influence of turbid media at different locations in computational ghost imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1026017.
- 刘保磊, 杨照华, 曲少凡, 等. 不同路径下散射介质对计算关联成像的影响 [J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1026017.
- [20] Gao Y. Research on pseudothermal light ghost imaging based on the two-photon geometry optical mechanism [D]. Changsha: Hunan University, 2018: 73-75.
- 高阳. 赝热光鬼成像的双光子几何光学机制研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2018: 73-75.

Experimental Study on Laser Computational Ghost Imaging Through Smoke Media

Hu Yangdi¹, Cheng Zhengdong^{1*}, Liang Zhenyu¹, Zhai Xiang¹, Li Jinbin²

¹Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei, Anhui 230037, China;

²Army 32256 of PLA, Guilin, Guangxi 541000

Abstract

Objective Computational ghost imaging (CGI) uses a single-pixel detector to realize imaging. It has received a great deal of attention in recent years because it is a low-cost invisible spectrum imaging technology that can make the light transmit via a scattering medium. Researches on CGI through scattering media are mainly conducted on static scattering media such as water and ground glass. In contrast, few studies have been conducted on some complex scattering media, and the imaging situation for dynamic scattering media is unknown. A smoke screen is a type of scattering medium with diffusion and subsidence movements. At the same time, the heat of smoke changes the refractive index of the light. This is a representative of a complex scattering medium. Further, smoke imaging is of research value in the fields of military and life sciences. Dynamic smoke screens distort light intensity measurements and cause image deterioration, which is the difficulty in CGI. In this paper, we choose the smoke screen as the scattering medium for studying the imaging effects under static and dynamic smoke conditions. Smoke screen alleviates dynamically induced imaging degradation and provides a useful reference for CGI in permeable scattering imaging applications.

Methods A CGI system with a smoke screen in the detection path was built. A smoke chamber was used as the scattering medium, and a 532-nm laser was used as the light source. Scattering media were classified according to the motion state of smoke particles. The error factors of the dynamic smoke screen environment were analyzed by simulation. Under experimental conditions, imaging results were analyzed using various frame-rate projections. A point-by-point compensation (PPC) method was proposed and used to track the attenuation process of the light intensity caused by smoke motion, with the addition of a "1" measurement matrix before and after each CGI measurement matrix. The projected light intensity of these measurement matrices showed attenuation changes caused by the smoke screen motion. The distortion of light intensity due to the scattering medium was corrected according to the attenuation curve, and the results were compared. Based on analytical and comparative results, the feasibility of the CGI technique was verified, and the applicable range of PPC was obtained.

Results and Discussions The moving state of the smoke medium was classified into the static state, slow dynamic state, and fast dynamic state. The imaging results under three types of motion conditions were compared, and the following conclusions were obtained.

1) Simulation results show that CGI has strong robustness in a slow dynamic smoke environment, and the imaging results do not change significantly due to the scattering distortion of the light intensity. However, if smoke motion causes significant change in the light intensity before and after measurements, images will deteriorate significantly. At this moment, the images obtained by the PPC method are sufficiently improved, but the proposed

PPC method is also affected by noises, such as ambient light intensity and light source power. If the signal-to-noise ratio of the intensity measurement is less than 60, the CGI and PPC will fail. To improve imaging with PPC, these noises need to be strictly controlled.

2) The CGI system achieves relatively clear images in a static smoke environment, but the traditional imaging method fails.

3) In a slow dynamic smoke environment, the CGI imaging results are not significantly different from that in a static environment.

4) In a fast dynamic smoke screen environment, the lower the frame frequency, the weaker the CGI imaging effect. Conversely, suppose the frame frequency is too high. In that case, it will be difficult for the laser to pass through, making it impossible to image in the initial stages of smoke emission and making the function of CGI uncertain.

5) In a dynamic smoke screen environment, the PPC method can significantly improve the imaging quality when the projected frame frequency is low. This comparison is more pronounced at 10 and 50 Hz.

Conclusions CGI has obvious anti-scattering imaging capabilities. Imaging results under static and slow dynamic conditions are better, and there is no significant difference. In a fast dynamic smoke environment, CGI cannot work due to the distortion of the measured light intensity, and the lower the frame frequency, the greater the distortion. There is a certain tolerance for the degree of motion of the CGI scattering medium. Suppose the degree of motion is within a tolerance range. In that case, the imaging results show no significant quality reduction or are the same as that in static states, even though the measurements show detectable distortion. The PPC method corrects measurements by tracking the process of light intensity distortion to achieve considerable imaging effects. A powerful and stable laser is a suitable light source for transmitting smoke in a CGI system. In conclusion, CGI has unique advantages in anti-scattering imaging and can be improved by the PPC method using dynamic scattering media.

Key words imaging systems; computational ghost imaging; scattering; smoke screen; dynamic state

OCIS codes 110.0113; 110.1758; 110.4850