

基于投影仪的“街角成像”和穿透散射介质成像

金浩强^{1,2} 石剑虹^{2*} 彭进业¹ 曾贵华²

¹西北工业大学电子信息学院, 陕西 西安 710072
²上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240

摘要 散射介质对传统成像的影响非常大, 散射严重时甚至使传统成像方式完全失效。如何在存在散射介质的情况下得到高分辨率的图像是人们一直关注的技术。将投影仪应用于关联成像(GI), 可以在实验室内实现“街角成像”, 即利用墙面的漫反射对墙角另一侧无法直接成像的物体进行成像, 并在此基础上实现了对隐藏在散射介质后的物体进行成像。该成像方案省去了传统关联成像系统中的参考臂的测量, 使用一个无空间分辨能力的桶探测器即可实现。对比实验结果与传统方式得到的结果并分析实验的分辨率以及影响因素, 证明了使用投影仪等普通光源在存在散射介质的情况下成像的可行性。

关键词 成像系统; 散射介质成像; 关联成像; 投影仪

中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0511006

Looking Around Corners and Through Turbid Media with Projector

Jin Haoqiang^{1,2} Shi Jianhong² Peng Jinye¹ Zeng Guihua²

¹School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China
²State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China

Abstract Turbid media has a great influence on traditional imaging, which may even result in complete failure when scattering becomes serious enough. It has attracted extensive attentions in practical applications to obtain high resolving images through turbid media. A projector is applied in the ghost imaging (GI) experiment, which achieves the goals of both looking around corners and imaging through turbid media. The images of objects can be obtained with a bucket detector which has no spatial resolution. The experiment results with that of the traditional imaging are compared and the influence factors on resolution are analyzed. It is feasible to image around corners through turbid media by means of simple illuminants, such as projectors.

Key words imaging systems; imaging though turbid media; ghost imaging; projector

OCIS codes 110.0113; 110.1758 110.3010

1 引 言

能够在有散射介质存在的条件下成像是人们一直期望得到的能力。从天文学中的穿透大气湍流的天文成像到医学上在组织中的微观成像都极需相应的技术, 比如穿透云层和战场硝烟对我双方进行成像分辨、穿过磨花玻璃对另一侧物体成像、穿透皮

肤等对人体内部组织结构成像等^[1-3]。除此之外, 如果物体的像在经过墙面、地面等漫反射介质散射后人们还能得到物体清晰的图像, 那么这对于军事探测等领域来说有着重要意义。然而传统的光学成像技术对上述的应用是无能为力的。近年来, 关联成像作为一条新思路被应用到穿透散射介质成像

收稿日期: 2013-04-01; 收到修改稿日期: 2013-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(60970109, 61170228)

作者简介: 金浩强(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事关联成像方面的研究。E-mail: jhq_199081@163.com

导师简介: 彭进业(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事图像处理, 量子通信等方面的研究。

E-mail: jinyepeng@nwpu.edu.com

* 通信联系人。E-mail: purewater@sjtu.edu.cn

领域。

关联成像(GI),又称为鬼成像,是近几年发展起来的新的成像机制^[4-24]。与传统的成像机制不同,它实现了物体的“非局域成像”。所谓的“非局域成像”是指把物体放在一个光路上,通过符合测量,可以在不包含物体的光路上成像。传统的关联成像中有探测臂和参考臂两条光路,探测臂测量的是物体信号的总光强,并不需要测量其光场分布,同时需要参考臂探测光源的光场强度分布信息。2008年,Shapiro^[4]在理论上提出使用空间光调制器(SLM)来预置光源的光场强度信息,从而省去了参考臂对光场的实时测量,实现了单臂关联成像的方案。这样只用一个单像素的探测器测量探测臂的光场总强度即可成像,这就是计算式鬼成像(CGI)。2009年,Bromber等^[5]在实验上实现了上述方案,成功得到了物体的像。

本文基于关联成像技术,使用投影仪代替空间光调制器(SLM)作预置光源,实现了“街角成像”和透过散射介质成像。所谓“街角成像”是指通过墙面的漫反射对墙角另一侧的街道内物体进行成像,穿透散射介质成像是指对隐藏在散射介质(如磨花玻璃,云雾等)后的物体进行成像。

2 关联成像基本原理

关联成像起源于双光子的纠缠特性,后来国内的专家学者从理论中证实了应用热光源也能实现关联成像^[6]。并在实验中使用赝热光源和真热光源都实现了关联成像^[7-13]。使得关联成像具有了更加广阔的应用空间。与传统直接成像方式不同,关联成像需要光源的信息参与成像,且光源的光场强度分布具有随机涨落的特性,探测端采样的数据要和光源的变化是关联的。传统的基于热光的关联成像原理如图1所示。

整个成像系统,由分束棱镜分为参考臂和探测

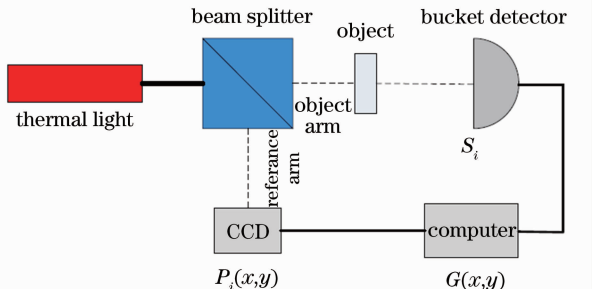


图1 关联成像原理框图

Fig. 1 Schematic of ghost imaging

臂两条光路。参考臂需要探测光源的空间光场强度分布,一般由电荷耦合器件(CCD)相机完成;探测臂是包含物体的光路,在探测臂上只需要一个桶探测器记录光场的总光强。成像系统的成像条件是物体表面上的光场和 CCD 面上的光场相互关联,要求 CCD 的探测和桶探测器的探测是同步的。最后可以由二阶关联算法解算出物体的像。对于 N 次测量, CCD 每次得到的光场空间分布 $P_i(x, y)$ ($1 \leq i \leq N$) 和桶探测器得到的相应的光场总强度 S_i 。显然

$$S_i = \sum_{(x,y) \in \Omega} I_i(x,y), \quad (1)$$

式中 $i_i(x, y)$ 为探测平面上的光强分布, Ω 为光源是在该平面上的投影区域。那么重构的图像 $G(x, y)$ 由二阶关联算法计算得到

$$G(x, y) = \langle (S_i - \langle S_i \rangle) [P_i(x, y) - \langle P_i(x, y) \rangle] \rangle, \quad (2)$$

式中 $\langle \cdot \rangle = \frac{1}{N} \sum_i$ 表示 N 次测量的平均值。

在“街角成像”的情况下,在散射墙面上的光场强度分布为 $I_i(x, y)$, 总光强为 S_i 。经过墙面漫反射之后,物体的像被随机的散射,其空间分布被破坏。经墙面漫反射之后探测器可以探测到部分光场能量,其总强度 S_i^p 满足(3)式^[24]。在物体和探测器之间存在散射介质之后的情况与“街角成像”类似,采集到的部分光场强度依然满足(3)式。

$$S_i^p \propto \sum_{(x,y) \in \Omega} I_i(x,y), \quad (3)$$

由(2)式和(3)式可得,由 S_i^p 重构出的图像 $G(x, y)^p$

$$G(x, y)^p \propto G(x, y), \quad (4)$$

(4)式说明“街角成像”或存在散射介质的情况下,探测器实际得到的值是光场的部分能量。然而该值与真正的光场总强度值成正比,且包含了物体的所有信息,那么即可由(5)式值重构出物体的像。

$$G(x, y)^p = \langle (S_i^p - \langle S_i^p \rangle) [P_i(x, y) - \langle P_i(x, y) \rangle] \rangle. \quad (5)$$

如果光源的强度分布是已知的,那么只需要知道探测臂上的总光强就可以成像,实现“单像素成像”。现在计算式关联成像一般使用空间光调制器和数字微镜阵列(DMD)对光源进行随机的强度调制。特别是利用 DMD 进行关联成像的系统对光源不再有特别要求,发光二极管(LED)、激光,甚至太阳光均可实现关联成像。

投影仪可以改变光场的强度分布,这使它完全可以作为预置光源,实现计算关联成像。投影仪主

要有阴极射线显像管(CRT),液晶显示器(LCD),数字光处理(DLP)等工作模式,其中DLP模式使用的是DMD技术,DMD已经被应用到关联成像中^[17]。LCD液晶投影仪,通过控制各个点电场的强度分布改变液晶分子的排列,从而改变液晶单元的透光率或分辨率,得到预设的光场强度分布。

3 实验过程及结果

3.1 “街角成像”

使用投影仪实现街角成像的实验系统示意图如图2所示,整个实验系统包括计算机、投影仪、成像物体、散射纸板和 CCD 相机(测量光场强度,可以由其他不具备空间分辨能力的桶探测器代替)。计算机控制投影仪显示随机的二值图像,这样就用投影仪产生了空间强度二值随机分布的涨落光场,调节投影仪的镜头使得其像面在物体的表面上,物体是透射性物体,透过的光直接打到散射墙面上(实验中使用普通的白色纸板代替),使用 CCD 作为桶探测器在任意角度收集散射的光强,CCD 相机与物体、光源之间用一块不透光的木板挡住,模拟街角成像。

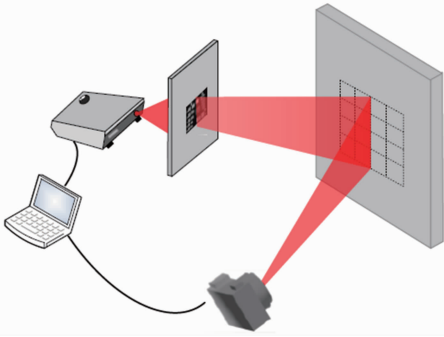


图2 基于投影仪的“街角成像”实验示意图
Fig.2 Schematic of looking “around corners”
with projector

实验中使用的LCD工作机制的日立投影仪CP-X380,其分辨率为1024 pixel×768 pixel,亮度为2400 lm。随机图是用Matlab生成的随机分布的二值图像,其黑白像素的比例是1:0.7。图片的大小为1024 pixel×768 pixel,最小的变换单位是2 pixel×2 pixel。物体为Thorlabs公司的负1951 USAF测试靶。CCD相机是IOI公司的flare 2M360相机,CCD探测与投影仪调制的同步由计算机中的软件控制。CCD把每次测量得到的图像总光强保存下来。

投影仪和物体相距70 cm,物体到纸板的距离为130 cm,CCD到纸板的距离和角度任意,实验中

CCD到纸板距离为100 cm,与纸板法线的角度为30°。投影仪在物体表面上的像面大小为24 cm×18 cm,物体的大小为7.6 cm×7.6 cm。随机的二值图像预存在计算机中,总共进行了100000次测量。图3为根据关联算法所得到的像。

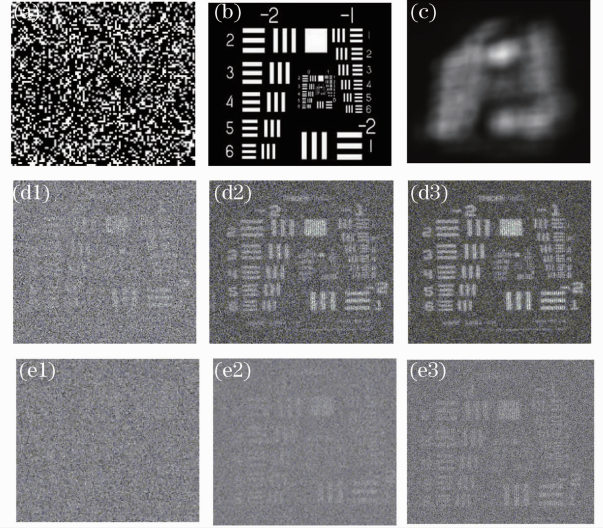


图3 “街角成像”实验结果。(a)投影仪的调制随机图;(b)原物体;(c)传统成像得到的图像;(d1)~(d3)关联成像得出的结果:(d1) $N=5000$, (d2) $N=50000$, (d3) $N=100000$;(e1)~(e3)最小像素点为1 pixel×1 pixel时的结果:(e1) $N=5000$, (e2) $N=50000$, (e3) $N=100000$

Fig.3 Experiment result of “looking ‘around corners””. (a) Random pattern of projector; (b) original object; (c) image achieved by traditional imaging; (d1)~(d3) images achieved by ghost imaging with (d1) $N=5000$, (d2) $N=50000$, (d3) $N=100000$; (e1)~(e3) result achieved with 1 pixel×1 pixel random pattern; (e1) $N=5000$, (e2) $N=50000$, (e3) $N=100000$

从图3(c)可以看出,传统的成像方式对于“街角成像”的分辨能力非常有限。图3(d1)~(d3)为不同测量次数下关联成像得到的结果,可以看出,实验能够很好的恢复出原来的图像,然而它需要很多次测量的叠加,少量的测量次数只能得到模糊的轮廓。在测量到100000次时成像结果可以看出该实验大概率能分辨1 mm的间距。成像系统的分辨率与光源打到物体表面上的散斑的大小有关。对于投影仪来说,与投影仪的分辨率和像面总大小以及像素之间的间距有关。对于CP-X380来说,忽略像素间的间距可以由(6)式估算得到最小分辨率

$$\frac{24 \text{ cm}}{1024/2} = \frac{18 \text{ cm}}{768/2} \approx 470 \mu\text{m}, \quad (6)$$

关联成像系统的信噪比(R_{SN})与测量次数 N 和从物体上反射或者投射过的散斑数 N_S 有关^[18-20], 如(7)式所示

$$R_{SN} \propto \sqrt{N/N_S}, \quad (7)$$

当物体和光路不变时, $R_{SN} = k \sqrt{N/N_S}$, k 为和物体及光路相关的常数。根据投影仪在物体表面上像面的大小和物体的大小可以计算出 $N_S \approx 26250$, 由此可计算出图 3(d1)~(d3)的信噪比分别为 $0.436k$ 、 $1.380k$ 、 $1.952k$ 。

由分析可知, 若想获得更高的分辨率, 可以采用以下方法: 把随机图的最小变换像素变小(如 $1 \text{ pixel} \times 1 \text{ pixel}$)、使用分辨率更高的投影仪、缩小投影仪在物体表面的像面。但同时这也造成信噪比的降低, 若想获得清晰的图像, 必须要进行更多的测量。图 3(e1)~(e3)是把随机图的最小变换像素降低为 $1 \text{ pixel} \times 1 \text{ pixel}$ 后得到的结果, 此时 $N_S \approx 105000$, 图 3(e1)~(e3)的信噪比分别为 $0.218k$ 、 $0.690k$ 、 $0.976k$ 。可以图中也可以看出, 与图 3(d1)~(d3)相比在相同测量次数条件下清晰度差距较大。

近几年出现的压缩感知(CS)技术和关联成像技术有很多相通之处, 关联成像得到的数据可以根据压缩感知技术的算法进行处理, 这样能很大程度上减少测量的次数, 然而后期的重构算法非常复杂,

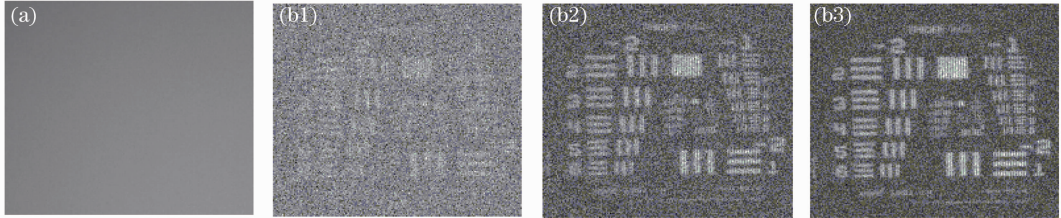


图 5 穿透散射介质实验结果。(a) 传统成像得到的图像;(b1)~(b3)关联成像结果:

(b1) $N=5000$, (b2) $N=50000$, (b3) $N=100000$

Fig. 5 Experiment result of looking through turbid media. (a) Image achieved by traditional imaging; (b1)~(b3) images achieved by ghost imaging with (d1) $N=5000$, (d2) $N=50000$, (d3) $N=100000$

随着散射程度的加强, 探测器收集到的能量减小, 这就使得环境噪音和探测器本身的精度对成像系统的质量影响变大。然而如果环境噪音很小且探测器的精度足够高, 那么随着散射程度的加强, 信噪比会基本保持不变, 依然可以得到较好的图像。如不考虑环境噪音和设备精度的影响, 那么图 5 中关联成像结果的信噪比和图 3(d1)~(d3)相同。

4 结 论

基于计算关联成像理论, 利用投影仪作为预置

需要较长的处理时间^[17,25-26], 且处理像素较高的图像时算法对计算机的内存等要求很高。

3.2 穿透散射介质成像

“街角成像”在一定程度上已经说明了该成像方案可穿透散射介质成像的能力, 为了进一步说明, 在成像物体的后边加上散射介质(厚度为 5 mm 的毛玻璃), 如图 4 所示。实验过程与上述相同, 随机图最小变换单位是 $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$, 得到的结果如图 5 所示, 由图 5(a)可以看出物体的空间分布信息已经被完全破坏, 传统成像方式已经无能为力。图 5(b1)~(b3)是利用关联成像在不同测量次数下得到的结果, 得到了较好的图像。

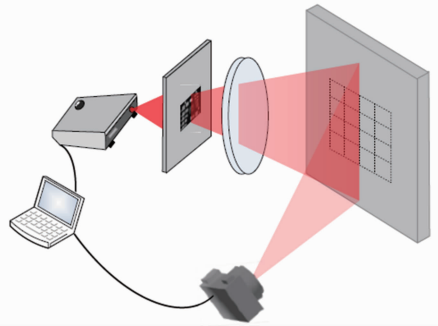


图 4 基于投影仪的穿透散射介质成像实验示意图

Fig. 4 Schematic of looking through turbid media with projector

光源, 实现了“街角成像”和穿透散射介质成像, 得到了良好的成像效果, 并在此基础上分析了影响成像质量的因素。实验利用投影仪对光场进行调制, 使用一个没有空间分辨能力的桶探测器即可成像。实验设备简单、成本低、易于实现。验证了该成像方案在散射介质存在的条件下进行成像的可行性, 在多个领域有着较高的实用价值和广阔的前景。

参 考 文 献

- 1 A Yodh, B Chance. Spectroscopy and imaging with diffusing light [J]. Phys Today, 1995, 48(3): 34-40.
- 2 A P Gibson, J C Hebden, S R Arridge. Recent advances in

- diffuse optical imaging [J]. *Phys Med Biol*, 2005, 50(4): R1—R43.
- 3 L V Wang, H I Wu. *Biomedical Optics: Principle and Imaging* [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.
- 4 J H Shapiro. Computational ghost imaging [J]. *Phys Rev A*, 2008, 78(6): 061802.
- 5 Y Bromberg, O Katz, Y Silberberg. Ghost imaging with a single detector [J]. *Phys Rev A*, 2009, 79(5): 053840.
- 6 T B Pittman, Y H Shih, D V Strekalov, *et al.*. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement [J]. *Phys Rev A*, 1995, 52(5): R3429—R3432.
- 7 R S Bennink, S J Bentley, R W Boyd. “Two-photon” coincidence imaging with a classical source [J]. *Phys Rev Lett*, 2002, 89(11): 113601.
- 8 A Gatti, E Brambilla, M Bache, *et al.*. Correlated imaging, quantum and classical [J]. *Phys Rev A*, 2004, 70(1): 013802.
- 9 A Gatti, E Brambilla, M Bache, *et al.*. Ghost imaging with thermal light: comparing entanglement and classical correlation [J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 93(9): 093602.
- 10 Jing Cheng, Shensheng Han. Incoherent coincidence imaging and its applicability in X-ray diffraction [J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 92(9): 093903.
- 11 Minghui Zhang, Qing Wei, Xia Shen, *et al.*. Lensless Fourier-transform ghost imaging with classical incoherent light [J]. *Phys Rev A*, 2007, 75(2): 021803.
- 12 Hu Li, Zhipeng Chen, Jin Xiong, *et al.*. Periodic diffraction correlation imaging without a beam-splitter [J]. *Opt Express*, 2012, 20(3): 2956—2966.
- 13 Hu Li, Yinzuo Zhang, Jianhong Shi, *et al.*. Experimental realization of reflection-type periodic diffraction correlation imaging [J]. *Appl Phys Lett*, 2013, 102(20): 201901.
- 14 Shen Xia, Zhang Minghui, Liu Honglin, *et al.*. Research on the pulsed pseudo-thermal light [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(11): 2893—2898.
沈夏, 张明辉, 刘红林, 等. 脉冲式赝热光源的实验研究[J]. *中国激光*, 2009, 36(11): 2893—2898.
- 15 Zhang Minghui, Wei Qing, Shen Xia, *et al.*. Statistical optics based numerical modeling of ghost imaging and its experimental approval [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(10): 1858—1866.
张明辉, 魏青, 沈夏, 等. 基于统计光学的无透镜鬼成像数值模拟和实验验证[J]. *光学学报*, 2007, 27(10): 1858—1866.
- 16 Wenlin Gong, Shensheng Han. Lens ghost imaging with thermal light: from the far field to the near field [J]. *Phys Lett A*, 2010, 374(36): 361102.
- 17 Lu Minghai, Shen Xia, Han Shensheng. Ghost imaging via compressive sampling base on digital micromirror device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 0711002.
陆明海, 沈夏, 韩申生. 基于数字微镜器件的压缩感知关联成像研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(7): 0711002.
- 18 A Gatti, D Magatti, F Ferri. Three-dimensional coherence of light speckles; theory [J]. *Phys Rev A*, 2008, 78(6): 063806.
- 19 B I Erkmen, J H Shapiro. Signal-to-noise ratio of Gaussian-state ghost imaging [J]. *Phys Rev A*, 2009, 79(2): 023833.
- 20 Hu Li, Jianhong Shi, Zhipeng Chen, *et al.*. Detailed quality analysis of ideal high-order thermal ghost imaging [J]. *J Opt Soc Am A*, 2012, 29(11): 2256—2262.
- 21 Wenlin Gong, Shensheng Han. Correlated imaging in scattering media [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(3): 394—396.
- 22 N D Hardy, J H Shapiro. Reflective ghost imaging through turbulence [J]. *Phys Rev A*, 2011, 84(6): 063824.
- 23 M Bina, D Magatti, M Molteni, *et al.*. Backscattering differential ghost imaging in turbid media [J]. *Phys Rev Lett*, 2013, 110(8): 083901.
- 24 Hu Li, Jianhong Shi, Yongchao Zhu, *et al.*. Periodic diffraction correlation imaging through strongly scattering mediums [J]. *Appl Phys Lett*, 2013, 103(5): 051901.
- 25 Chen Tao, Li Zhengwei, Wang Jianli. Imaging system of single pixel camera based on compressed sensing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(11): 2523—2530.
陈涛, 李正伟, 王建立. 应用压缩感知理论的单像素相机成像系统[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(11): 2523—2530.
- 26 D L Donoho. Compressed sensing [J]. *IEEE Trans Information Theory*, 2006, 52(4): 1289—1306.

栏目编辑：李志兰