

散斑成像中散斑旋转去相关角的影响因素

余明^{1*}, 施瑶瑶²

¹南京航空航天大学党政办公室, 江苏 南京 210016;

²南京航空航天大学航天学院, 江苏 南京 210016

摘要 研究散斑旋转去相关的原理, 分析散斑旋转去相关角的影响因素, 推测出散斑旋转去相关角主要受散斑无序程度和计算时所用散斑面积大小这两方面因素的影响。为进行实验验证, 分别改变光学系统的四个可调参数来观测散斑旋转去相关角的相应变化, 即改变计算时所用的散斑面积、改变散射介质到探测器的距离、横向平移探测器、更换散射介质。实验结果表明, 计算时选取的散斑面积越大、无序程度越高, 对应的散斑旋转去相关角越小。在基于记忆效应的散斑成像中, 研究结果能够给散斑旋转去相关的相关研究和应用带来帮助, 具有一定的实际意义。

关键词 图像处理; 散斑; 相关; 散斑旋转去相关角; 散斑成像

中图分类号 O438.2 **文献标志码** A

doi: 10.3788/LOP57.241015

Factors Influencing Speckle-Rotation Decorrelation Angle in Speckle Imaging

She Ming^{1*}, Shi Yaoyao²

¹Party and Government Offices, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China;

²Academy of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

Abstract In this paper, we analyze the principle of speckle-rotation decorrelation, including the factors that influence the speckle-rotation decorrelation angle. We infer that this angle is mainly affected by the degree of speckle disorder and the size of the speckle area used in the calculation. To perform experimental tests, we change four parameters of the optical system and observe the corresponding changes in the speckle-rotation decorrelation angle. Specifically, we change the speckle area used in the calculation, change the distance between the scattering medium and the detector, shift the detector horizontally, and replace the scattering medium. The experimental results show that the larger the speckle area and the higher the degree of disorder, the smaller is the speckle-rotation decorrelation angle. In speckle imaging based on the memory effect, these research results can help both related research and applications of speckle-rotation decorrelation that have practical significance.

Key words image processing; speckle; correlation; speckle-rotation decorrelation angle; speckle imaging

OCIS codes 110.2960; 110.0113; 110.1758; 110.6150

1 引言

当光在传播时遇到散射介质后会发生散射, 从而形成散斑^[1]。20 世纪 60 年代初, 人们初次发现了光学散斑, 并对其进行了深入研究。一方面是对

散斑性质的研究, 例如光学散斑的统计性质、散斑的偏振性质、散斑的自相关函数等^[2-4]; 另一方面则是对散斑应用的研究, 例如散斑摄影技术、散斑干涉测量技术、数字散斑图像相关技术等^[5-7]。近年来, 散斑在光学成像中的研究也有了很大进展, 并在生物

收稿日期: 2020-05-14; **修回日期:** 2020-06-09; **录用日期:** 2020-06-17

基金项目: 南京航空航天大学基本科研业务费青年科技创新基金(NR2019033)、江苏省研究生科研创新计划(KYCX17_0247)

* **E-mail:** sheming@nuaa.edu.cn

医学成像、天文学、密码学等众多领域都有重要的应用。研究人员先后提出了多种有效的透过散射介质成像方法,例如光学相干层析成像技术、波前整形技术、传输矩阵技术、光相位共轭技术、计算成像技术、自适应光学技术、鬼成像技术等^[8-16]。

近年来,基于散斑的记忆效应的散斑成像技术受到了很多人的关注^[17-18]。该技术主要基于散斑的平移不变的性质^[19-20],即小角度转动的入射光出射时散斑之间相关度较高的性质,主要包括散斑相关成像和散斑解卷积2种方法。由于散斑天然地具有无序性和随机性,因此散射介质的某些运动很容易造成散斑去相关,而散斑去相关无疑会使基于记忆效应的散斑成像质量大幅下降。多年来,人们常常将散斑去相关视为一项需要克服的困难,却忽略了它的实用性。事实上,散斑的去相关性同样可以加以利用,例如基于不同波长的散斑之间去相关性质的单次曝光彩色成像^[21]、结合随机相位形成散斑去相关的单次曝光录像^[22]、利用散斑去相关性扩大视场^[23]、基于散斑旋转去相关的单次曝光录像^[24]、基于散斑旋转去相关的多图像光学加密^[25]等。散斑去相关的实现方式有很多,例如改变入射光的波长^[21]、利用空间光调制器加载随机相位^[22]、利用超出记忆效应范围的去相关性^[23]、旋转散射介质或探测器^[24-25]等。其中,利用散射介质或探测器的旋转实现的散斑去相关被称为散斑旋转去相关^[24]。最近,散斑旋转去相关性被应用于散斑成像领域,但是在该领域中关于这一性质的研究程度仍相对较浅^[24-25],尤其是该性质中的一个重要参数,即散斑旋转去相关角,一直没有得到充分的分析和研究。

本文将对基于记忆效应的散斑成像方法进行简单介绍,在此基础上对散斑旋转去相关的原理进行分析,并推测出散斑旋转去相关角的影响因素。根据原理分析进行实验验证,对计算时所用散斑面积、介质到探测器的距离、相机的位置、介质型号等参数进行调整,从实验上证明散斑旋转去相关角的影响因素。研究结果能够为基于散斑旋转去相关的相关研究提供一定帮助。

2 原理

图1(a)为一种常用的基于记忆效应的透过散射介质层的成像系统。从空间非相干光源出射的光穿过透射型物体“斑”后照射到散射介质上,在散射介质层另一侧出射的光即为散斑光,此时可以用相机探测到散斑 I 。根据记忆效应,物体 O 上的每一点出射的散斑近似平移不变。若将物体 O 上的某一点出射的散斑视为系统的点扩展函数 S ,那么从物体发出的散斑 I 就可以表示为

$$I = O * S, \quad (1)$$

式中: $*$ 为卷积运算符。将物平面上的物体用一个小孔代替,此时探测到的散斑强度分布即可视为系统的点扩展函数 S 。利用基于记忆效应的互相关解卷积法^[24-25],可以通过计算探测到的散斑 I 和点扩展函数 S 的互相关来重建出物体 O 的信息,表达式为

$$I \otimes S = (O * S) \otimes S = O * \delta + C = O + C, \quad (2)$$

式中: \otimes 为相关运算符; δ 为脉冲尖峰函数; C 为背景噪声项。图2(a)即为通过散斑解卷积法重建的物体“斑”的图像,可以看出,恢复的图像质量较高。

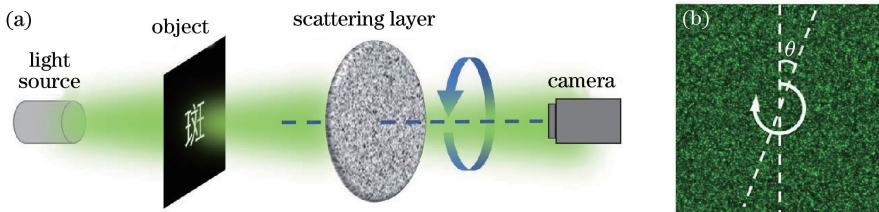


图1 散斑旋转实验原理图。(a)基于记忆效应的透过散射介质层的成像系统示意图;(b)散斑旋转示意图
Fig. 1 Schematic of speckle-rotation experiment principle. (a) Schematic of imaging system based on memory-effect through scattering layer; (b) schematic of speckle-rotation

然而在实验中,散射介质层绕光轴的旋转会导致重建图像模糊、甚至无法重建图像。例如,在系统参数不变的情况下,探测好散斑 I 之后,将散射介质层旋转 0.2° ,再探测一幅散斑图像,其强度分布即为新的系统点扩展函数 S_2 ,对(2)式的 I 和 S_2 进行互相关来重建物体图像,得到的结果如图2(b)所

示,可以看出,图像质量下降较为明显。同样地,当散射介质层旋转 0.4° 以上后,图像质量大幅下降,直至无法识别物体信息,如图2(c)~(f)所示。这是因为散射介质层绕光轴旋转后,相机探测到的散斑也旋转了对应角度^[24-25],如图1(b)所示,其中 θ 代表旋转前后的两幅散斑之间的夹角。而(2)式的相

关计算在信息光学中计算的是两个函数平移后的相似程度,散斑经过旋转后,与初始散斑之间的旋转相似性很高,但平移相似性却变得很低,因此,用旋转后的点扩展函数对散斑 I 进行互相关解卷积计算时重建的图像结果会变得很差。也就是说,散斑旋转会强力引起散斑去相关,称之为散斑旋转性质。

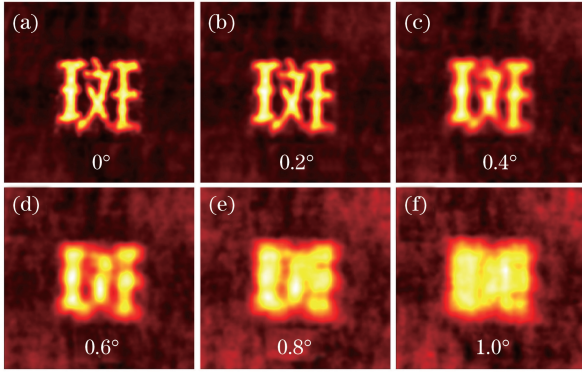


图2 散斑旋转对散斑成像质量的影响

Fig. 2 Effect of speckle-rotation on quality of speckle imaging

为了对散斑旋转去相关性质进行研究,将图 1(a)所示的成像系统中的物体换成小孔。在散斑旋转前,探测到图 1(b)所示的散斑 S_0 。将散射介质绕光轴旋转,相机即可探测到绕图像中心旋转的散斑 $S(\theta)$ 。需要说明的是,散斑旋转可以通过以光轴为中心线旋转散射介质层、以光轴为中心线旋转相机、数值旋转散斑强度图的方式实现^[24-25]。然后,计算旋转前后的散斑之间互相关,表达式为

$$\text{Corr}(\theta) = S_0 \otimes S(\theta), \quad (3)$$

式中: $\text{Corr}(\theta)$ 为旋转 θ 后对应的散斑相关结果。由(2)式可知,这个散斑相关结果对基于记忆效应的散斑成像结果是很重要的。当 $\theta=0^\circ$ 时,(3)式的计算结果为一个尖峰脉冲函数,当 θ 从 0° 逐渐增大,对应的脉冲尖峰函数的峰值逐渐下降。取出每个脉冲函数的最大值,可以得到随 θ 变化的散斑相关曲线,其变化趋势如图 3 所示。相关结果已经过归一化处理,称为相关系数。当相关系数下降到 0.5 时,对应的旋转角 θ 称为散斑旋转去相关角^[24-25]。散斑旋转去相关角一般都非常小,也就是说,很小角度的散斑旋转即可造成散斑去相关,图 3 所示的结果亦是如此。对比图 2、3 可以看出,成像质量与相关曲线的变化是一致的。散斑旋转去相关角是一个判断旋转前后散斑是否相关的关键参数,因此,该去相关角的大小对散斑成像的影响非常大。此外,在其他应用

中,散斑旋转去相关角的大小还会影响录像旋转步长^[24]、加密图像的间隔^[25]等因素。因此,透彻研究散斑旋转去相关角的影响因素十分必要。

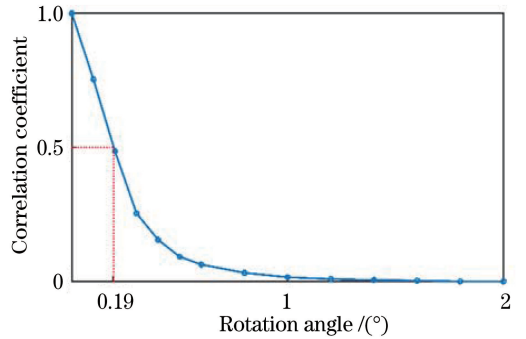


图3 散斑相关随旋转角的变化

Fig. 3 Correlation of speckles varying with rotation angle

由于主要研究基于记忆效应的成像系统中散斑旋转去相关的内容,因此,在对散斑旋转去相关角的影响因素进行研究时,将对成像系统中所有可以调节的参数进行改变,以观察某一参数对散斑旋转去相关角的影响。可调参数分别为计算时所用的散斑面积、散射介质到探测器的距离、相机的横向位置、散射介质型号。在进行实验之前,根据原理分析,可以推测出散斑旋转去相关角主要受两大因素影响,第一是计算相关时所用散斑面积大小,第二是散斑的无序程度。首先解释第一个因素。如图 1(b)所示,经过同样角度 θ 的旋转后,靠近旋转中心的散斑转动位移较小,距离旋转中心较远的散斑则转动位移较大,因此,距离旋转中心越远的部分相关度下降得更快。经过相同角度的旋转后,计算时选取的散斑面积越大,散斑的转动位移即散斑改变就越大,旋转前后的散斑相关度就减小得越多。因此,计算时所用的散斑面积越大,散斑旋转去相关角就越小。解释第二个因素。散斑的无序性体现在散斑分布的混乱程度和散斑的颗粒密度两方面。散斑的无序性越高,对称性就越低,经过相同角度旋转后,越无序的散斑,相关度下降得越多。因此,无序程度越高的散斑对应的散斑旋转去相关角就越小。综上,计算时所用的散斑面积越大、散斑无序程度越高,对应的散斑旋转去相关角就越小。

3 实验

为了验证上述推论,通过实验,对散斑旋转去相关角的影响因素进行分析。光源为由 532 nm 激光器(G4 DPSS, Coherent 公司)和旋转毛玻璃构成的空间非相干光源,小孔直径为 $100 \mu\text{m}$,散射介质为

220 砂的毛玻璃(DG20-220, Thorlabs 公司), 探测器为面积为 $3376 \text{ pixel} \times 2704 \text{ pixel}$ 的相机(GS3-U3-91S6C-C, Point Grey 公司), 散射介质到探测器的距离为 11.5 cm。通过改变系统中的各项可调参数, 探测不同情况下散斑旋转的相关曲线, 观察散斑旋转去相关角的变化。

3.1 改变计算时所用的散斑面积

在其他参数不变的情况下, 从最初探测到的面积为 $3376 \text{ pixel} \times 2704 \text{ pixel}$ 的散斑中心选取面积依次为 $1800 \text{ pixel} \times 1800 \text{ pixel}$, $1350 \text{ pixel} \times 1350 \text{ pixel}$, $900 \text{ pixel} \times 900 \text{ pixel}$, $450 \text{ pixel} \times 450 \text{ pixel}$ 的散斑, 并计算对应的散斑旋转相关曲线, 结果如图 4(a) 所示。可以看出, 计算时选取的散斑面积越大, 相关曲线下落得越快。找出各个曲线中相关系数为 0.5 处对应的散斑旋转去相关角,

依次为 $0.19^\circ, 0.25^\circ, 0.38^\circ, 0.68^\circ$, 即可得到散斑旋转去相关角随散斑面积变化的曲线, 如图 4(b) 所示。可以看出, 计算时选取的散斑面积越大, 散斑旋转去相关角就越小。此外, 在本实验中, 散斑旋转去相关角的最大值是最小值的 3.5 倍以上, 说明旋转去相关角受散斑面积的影响较大。从原理上解释, 如图 4(c) 所示, 两边的散斑具有同样的随机分布, 右边的小面积散斑相当于左边大面积散斑中虚线方框内的部分。经过相同角度的旋转后, 散斑面积越大, 散斑的改变就越大, 旋转前后的散斑相关度就减小得越多, 对应的旋转去相关角也就越小。实验结果与原理部分的推论一致。值得一提的是, 在实验中改变相机感光面的面积, 也可以得到同样的效果, 由于在实验中更换多个相机并不容易, 因此此次选择了在数值计算时改变散斑像素面积的方式。

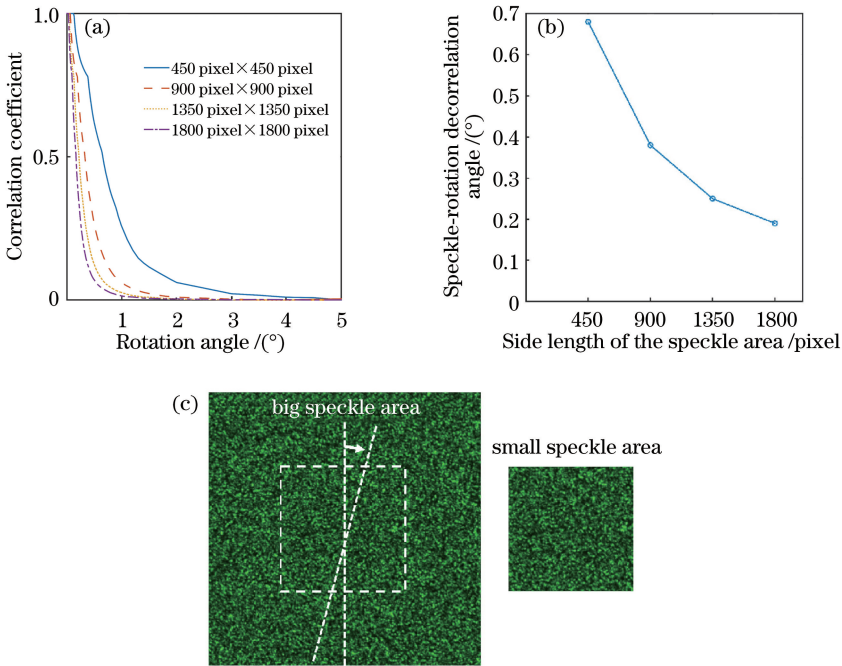


图 4 散斑面积对散斑旋转去相关角的影响。(a)不同散斑面积下散斑相关随旋转角的变化; (b)散斑旋转去相关角随散斑面积的变化; (c)不同散斑面积对应的散斑旋转示意图

Fig. 4 Effect of speckle area on speckle-rotation decorrelation angle. (a) Correlation of speckles varying with rotation angle under different speckle areas; (b) speckle-rotation decorrelation angle varying with speckle area; (c) schematic of speckle-rotation corresponding to different speckle areas

3.2 改变散射介质到探测器的距离

在其他参数条件不变的情况下, 将图 1(a) 中毛玻璃到相机的距离依次调节至 6.5, 9, 11.5, 14 cm, 在每个相机位置处分别探测一张散斑图像, 并用 MATLAB 软件进行数值旋转。各个距离下对应的散斑旋转相关曲线如图 5(a) 所示。可以看出, 散射

介质到探测器的距离越近, 相关曲线下落得越快。找出每个曲线中相关系数为 0.5 处对应的散斑旋转去相关角, 依次为 $0.14^\circ, 0.17^\circ, 0.19^\circ, 0.21^\circ$, 即可得到散斑旋转去相关角随散射介质到探测器距离的变化曲线, 如图 5(b) 所示。结果显示, 散射介质到探测器距离越大, 旋转去相关角就越大。

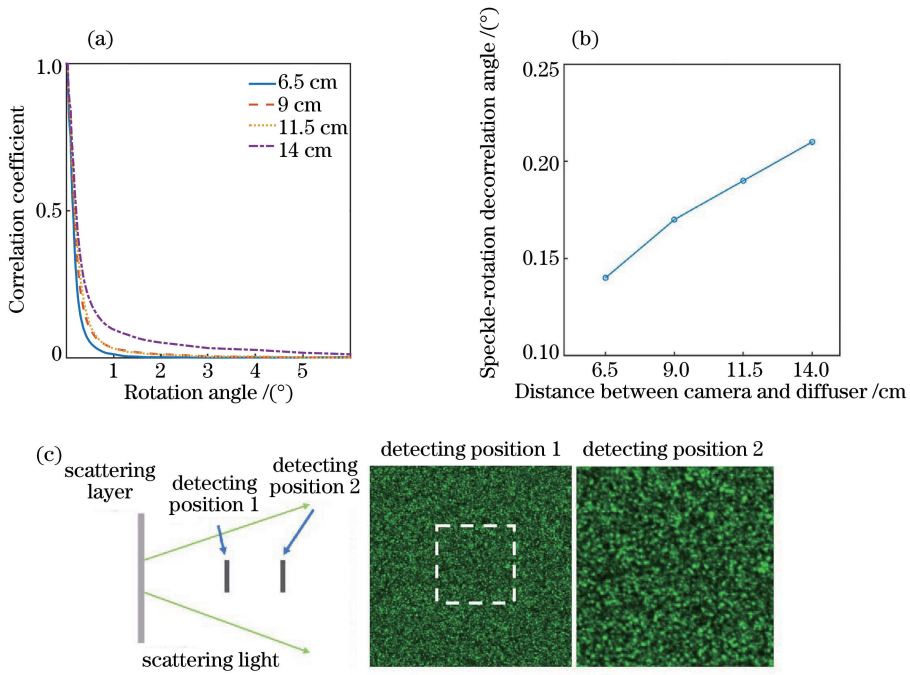


图5 散射介质到探测器的距离对散斑旋转去相关角的影响。(a)不同距离下散斑相关随旋转角的变化;

(b)散斑旋转去相关角随距离的变化;(c)不同距离下探测散斑的原理示意图及对应散斑

Fig. 5 Effect of distance between camera and diffuser on speckle-rotation decorrelation angle. (a) Correlation of speckles varying with rotation angle under different distances; (b) speckle-rotation decorrelation angle varying with distance;

(c) schematic of speckle detection principle at different distances and corresponding speckle

从原理上对结果进行解释,这是因为随着距离的增大,散斑变得稀疏。如图5(c)所示,相机在距离介质较远的探测位置2处探测到的散斑比距离较近的探测位置1处探测到的散斑更加稀疏。散斑的颗粒密度越大,散斑的无序程度就越高,导致在相同的旋转角度下,距离相机较近位置处探测的散斑改变越大,因此相关度下降得越多,相应的散斑旋转去相关角也就越小。从另一个角度解释,在图5(c)中,探测位置2的散斑相当于是在探测位置1虚线框内的部分,如果将两者的密集程度转化成一样的话,那么位置2的散斑面积就比位置1的散斑面积更小,根据3.1节的结论,同样能够推出探测位置2处散斑旋转去相关角更大的结论。综上所述,实验结果有效证明无序程度越高的散斑对应的旋转去相关角越小。

3.3 横向平移探测器

在其他参数条件不变的情况下,将图1(a)中的相机在垂直于光轴的另一平面内以2 mm的步长依次平移至12 mm,并在各个位置处分别探测一张散斑图像。用MATLAB软件分别对每张散斑图像进行数值旋转,对应的散斑旋转相关曲线如图6(a)所示。可以看出,所有曲线几乎完全重叠在一起。找出每个曲线中相关系数为0.5处对应的散斑旋转去

相关角,发现旋转去相关角不变,一直为 0.19° ,如图6(b)所示。从原理上分析,这是因为横向平移相机时不会改变散斑的探测面积,也不会改变散斑的无序程度,因此,横向平移相机不会使散斑旋转去相关角发生改变。实验结果与原理部分的推论一致。

3.4 更换散射介质

在其他参数条件不变的情况下,将图1(a)中的毛玻璃依次更换成毛玻璃1(10DKIT-C3- 30° , Newport公司)、毛玻璃2(10DKIT-C3- 80° , Newport公司)、毛玻璃3(DG20-120, Thorlabs公司)、毛玻璃4(DG20-220, Thorlabs公司)。随后依次探测对应的散斑图像,并对其进行数值旋转。计算出的各个散斑旋转相关曲线如图7(a)所示。找出每个曲线中相关系数为0.5处对应的散斑旋转去相关角,发现去相关角的变化不大,依次为 0.19° , 0.19° , 0.13° , 0.19° ,如图7(b)所示。其中仅有的微小变化对应毛玻璃3,其粗糙度与其他毛玻璃相差较大,对散斑的无序程度造成了一定影响,因此去相关角也有一定变化。此外,如果将毛玻璃换成其他类型的强散射介质,相信会对旋转去相关角带来较大影响,在接下来的研究中可以对此进行更深一步的探究。本实验结果与原理部分的推论一致。

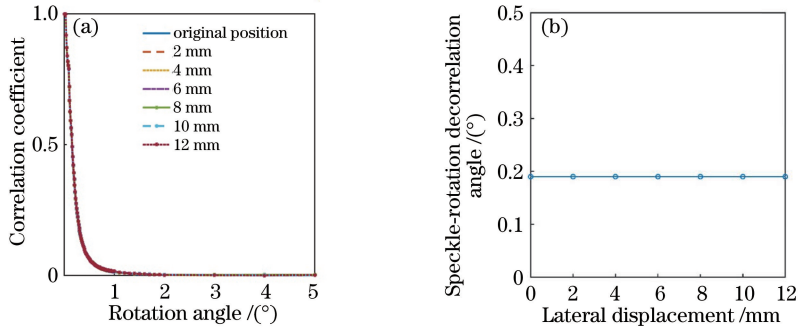


图 6 横向平移探测器对散斑旋转去相关角的影响。(a)不同横向探测位置下散斑相关随旋转角的变化；
(b)散斑旋转去相关角随横向位置的变化

Fig. 6 Effect of lateral displacement of camera on speckle-rotation decorrelation angle. (a) Correlation of speckles varying with rotation angle under different detection positions; (b) speckle-rotation decorrelation angle varying with lateral displacement

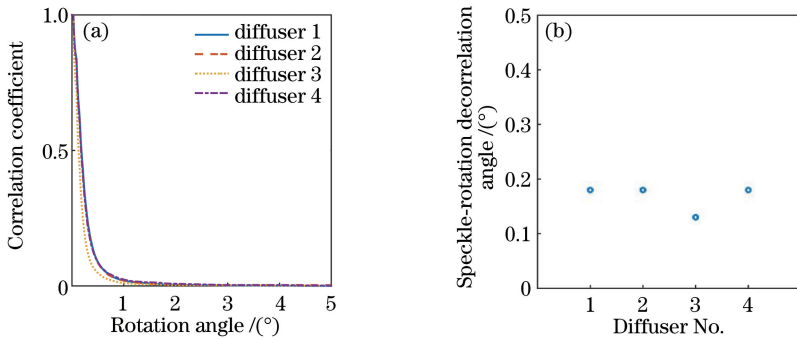


图 7 毛玻璃类型对散斑旋转去相关角的影响。(a)不同毛玻璃下散斑相关随旋转角的变化；
(b)散斑旋转去相关角随毛玻璃型号的变化

Fig. 7 Effect of glass type on speckle-rotation decorrelation angle. (a) Correlation of speckles varying with rotation angle under different types of glasses; (b) speckle-rotation decorrelation angle varying with glass type

4 分析与讨论

根据上述实验,可以得出结论:计算时选取的散斑面积越大、散射介质到探测器距离越小,散斑旋转去相关角就越小;而探测器的横向平移和毛玻璃型号的更换对散斑旋转去相关角的影响并不显著。在原理部分,推测出的结论是:计算相关时所用的散斑面积越大、散斑无序程度越高,对应的散斑旋转去相关角就越小。由于改变选取的散斑面积即对计算相关时所用的散斑面积产生影响、散射介质到探测器的距离影响了散斑的无序程度、探测器的横向平移对散斑面积和无序程度几乎没有影响、更换毛玻璃对散斑面积几乎没有影响而对散斑无序程度影响较小,因此实验结果均与原理推论一致。

需要补充说明的是,在 4 个实验中,调节选取的散斑面积时采用的是数值计算的方式,因而实验结果在理论上是最精确的;调节相机到散射介质的距离、探测器的横向平移都采用机械调整的方式,因此实验结果理应存在微小的误差;在更换毛玻璃型号

的实验中,由于实验条件有限,测量的型号类型不多,但已基本得到了毛玻璃型号对旋转去相关角的影响程度,为实际应用提供了一定的信息支撑。

从实验结果来看,散斑面积对去相关角的影响相对来说是最大的,介质到相机的距离影响次之。在基于散斑旋转去相关的各项研究和应用中,在需要调整去相关角的大小时,可以优先调节散斑面积及相机到散射介质的距离。

5 结论

对散斑旋转去相关角的影响因素进行了研究。首先,对基于记忆效应的散斑成像方法进行了介绍,在此基础上对散斑旋转去相关的原理进行了分析,并推测出散斑旋转去相关角主要受散斑无序程度和计算时所用散斑面积这两方面因素影响的结论。随后,设计了 4 组实验,分别改变散斑成像系统中的 4 个可调参数,即通过改变计算时选取的散斑面积、改变散射介质到探测器的距离、横向平移探测器、更换散射介质,来观测散斑旋转去相关角的相应变化。

实验证明,计算时选取的散斑面积越大、散斑无序程度越高,对应的散斑旋转去相关角就越小。研究结果能够在基于记忆效应的散斑成像领域中给基于散斑旋转去相关的研究和应用带来帮助,具有一定的实际意义。

参 考 文 献

- [1] Goodman J W. Speckle phenomena in optics: theory and applications [M]. Greenwood Village: Roberts and Company Publishers, 2007.
- [2] Henry S, John W W. Probability, random processes and estimation theory for engineers[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1986.
- [3] Wolf E. Coherence properties of partially polarized electromagnetic radiation[J]. Nuovo Cimento, 1959, 13(6): 1165-1181.
- [4] Goldfischer L I. Autocorrelation function and power spectral density of laser-produced speckle patterns [J]. Journal of the Optical Society of America, 1965, 55(3): 247-253.
- [5] Hu Y Q. Measurement of Young's fringe in speckle photography along circular loci[J]. Chinese Journal of Lasers, 1989, 16(4): 218-220.
胡逸群. 沿圆周路径测量散斑摄影杨氏条纹[J]. 中国激光, 1989, 16(4): 218-220.
- [6] Cheng H Y, Luo Q M, Wang Z, et al. Dynamic change of lymph flow monitored by laser speckle interference and spectroscopy methods [J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(s1): 221-224.
程海英, 骆清铭, 王征, 等. 利用激光散斑干涉法与光谱技术实时监测淋巴流的动态特征[J]. 中国激光, 2003, 30(s1): 221-224.
- [7] Pan B. Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals [J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(8): 082001.
- [8] Huang D, Swanson E A, Lin C P, et al. Optical coherence tomography [J]. Science, 1991, 254(5035): 1178-1181.
- [9] Vellekoop I M, Mosk A P. Focusing coherent light through opaque strongly scattering media[J]. Optics Letters, 2007, 32(16): 2309-2311.
- [10] Yaqoob Z, Psaltis D, Feld M S, et al. Optical phase conjugation for turbidity suppression in biological samples[J]. Nature Photonics, 2008, 2(2): 110-115.
- [11] Sun X Y, Wang J N, Li W, et al. Dynamic target imaging through scattering media based on optical transmission matrix[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1205001.
孙雪莹, 王剑南, 李伟, 等. 基于光学传输矩阵实现透过散射介质的动态目标成像[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1205001.
- [12] Zhao M, Zhao M J, Sun C W, et al. Measurement and light focusing by transmission matrices of scattering media based on phase-only modulation[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(1): 0129001.
赵明, 赵美晶, 孙程伟, 等. 基于纯相位调制的散射介质传输矩阵测量与光波聚焦[J]. 光学学报, 2018, 38(1): 0129001.
- [13] Zhu L, Shao X P. Research progress on scattering imaging technology[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111005.
朱磊, 邵晓鹏. 散射成像技术的研究进展[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111005.
- [14] Cai H J, Yao Z H, Gao C, et al. Reflection ghost imaging based on superimposed speckle-pattern [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(7): 071101.
蔡宏吉, 姚治海, 高超, 等. 基于叠加散斑图的反射鬼成像[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(7): 071101.
- [15] Chen Y, Fan X, Cheng Y B, et al. Compressive sensing ghost imaging based on neighbor similarity [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(7): 0711001.
陈熠, 樊祥, 程玉宝, 等. 基于邻域相似度的压缩感知鬼成像[J]. 光学学报, 2018, 38(7): 0711001.
- [16] Wang C L, Gong W L, Shao X H, et al. Influence of receiving numerical aperture and rough target size on ghost imaging via sparsity constraint [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0810002.
王成龙, 龚文林, 邵学辉, 等. 接收数值孔径和粗糙目标尺寸对稀疏限制的鬼成像影响研究[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0810002.
- [17] Bertolotti J, van Putten E G, Blum C, et al. Non-invasive imaging through opaque scattering layers[J]. Nature, 2012, 491(7423): 232-234.
- [18] Katz O, Heidmann P, Fink M, et al. Non-invasive single-shot imaging through scattering layers and around corners via speckle correlations [J]. Nature Photonics, 2014, 8(10): 784-790.
- [19] Feng S, Kane C, Lee P A, et al. Correlations and fluctuations of coherent wave transmission through disordered media[J]. Physical Review Letters, 1988, 61(7): 834-837.
- [20] Freund I, Rosenbluh M, Feng S. Memory effects in propagation of optical waves through disordered

- media[J]. Physical Review Letters, 1988, 61(20): 2328-2331.
- [21] Sahoo S K, Tang D, Dang C. Single-shot multispectral imaging with a monochromatic camera [J]. Optica, 2017, 4(10): 1209-1213.
- [22] Li X, Stevens A, Greenberg J A, et al. Single-shot memory-effect video[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 13402.
- [23] Li L, Li Q, Sun S, et al. Imaging through scattering layers exceeding memory effect range with spatial-correlation-achieved point-spread-function[J]. Optics Letters, 2018, 43(8): 1670-1673.
- [24] Shi Y Y, Liu Y W, Sheng W, et al. Speckle-rotation decorrelation based single-shot video through scattering media[J]. Optics Express, 2019, 27(10): 14567-14576.
- [25] Shi Y Y, Liu Y W, Sheng W, et al. Multiple-image double-encryption via 2D rotations of a random phase mask with spatially incoherent illumination [J]. Optics Express, 2019, 27(18): 26050-26059.