

文章编号: 1002-1582(2025)05-0527-06

全息显示中雾气散射对视场角的影响研究

吴佳兴, 叶小慧, 刘娟*

(北京理工大学 光电学院 北京市混合现实与新型显示工程技术研究中心, 北京 100081)

摘 要: 全息三维显示视场角受光电调制器件像素尺寸的制约。针对此问题研究了雾气散射对全息三维显示中实像视场角的影响。通过研究散射颗粒直径和入射光波波长与散射角之间的关系, 发现在同一入射光波下, 散射角随着颗粒直径的增加而减小; 在同一颗粒直径下, 颗粒直径较小时, 散射角随着光波波长的增加而增加, 随着颗粒直径增加, 不同波长对应的散射角的差距慢慢减小。文中提出了在全息再现实像区间引入雾气介质, 通过控制散射颗粒直径大小来实现视场角的扩大。考虑不同波长对雾气颗粒的敏感性, 预测了预补偿的方法实现彩色。该工作为全息显示在虚拟现实等方面的应用提供了技术参考。

关 键 词: 全息显示; 视场角; 散射介质

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标识码: A

Research on the influence of fog scattering on viewing angle in holographic display

WU Jiaying, YE Xiaohui, LIU Juan*

(Beijing Engineering Research Center for Mixed Reality and New Display Technology, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The viewing angle of holographic three-dimensional display is restricted by the pixel size of photoelectric modulation device. The influence of fog scattering on viewing angle of real images in holographic three-dimensional display is studied. By studying the relationship between scattering particle diameter and incident light wave wavelength and scattering angle, it is found that the scattering angle decreases with the increase of particle diameter under the same incident light wave. Under the same particle diameter, when the particle diameter is small, the scattering angle increases with the increase of light wavelength, and with the increase of particle diameter, the difference of scattering angles corresponding to different wavelengths gradually decreases. A fog medium is introduced into the holographic reconstruction real image interval, and the angle of view is enlarged by controlling the diameter of scattered particles. Considering the sensitivity of different wavelengths to fog particles, the pre-compensation method is predicted to realize color. This work provides a technical reference for the application of holographic display in virtual reality.

Keywords: holographic display; viewing angle; scattering medium

0 引 言

全息三维显示技术凭借其能够完整记录和再

现物光波所有振幅和相位信息的特点, 成为目前最具潜力的真三维显示技术之一, 在虚拟现实、工业设计、医疗教育等领域展现出广阔的应用前

收稿日期: 2025-04-27; 收到修改稿日期: 2025-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62035003&U22A2079)

作者简介: 吴佳兴 (2001—), 女, 硕士研究生, 从事计算全息、微纳光学研究。3270402737@qq.com

刘娟 (1970—), 女, 教授, 博士, 从事计算全息、微纳光学研究。

* 通讯作者: juanliu@bit.edu.cn

景^[1,2]。目前计算全息技术在计算速度^[3,4]和成像质量^[5,6]方面已经取得了很大进展,但由于受到空间光调制器像素间隔大小的限制,全息显示再现视场角狭小的问题还需进一步解决。

针对上述问题,国内外研究团队在硬件设计方面开创了大量创新性研究。目前主要可以分为空分复用、时分复用、时空复用以及其它创新方法。空分复用方面,2017年,上海大学团队通过将2个空间光调制器进行曲面拼接,再经过倍焦4f系统,实现了14.8°的显示视角^[7];2022年,剑桥大学团队采用模块化设计将多个全息砖无缝拼接成一个全息显示系统,最终获得了全彩色、视场角达40°的全息三维显示效果^[8]。时分复用方面,北京大学研究团队通过用相位型SLM模拟离轴菲涅耳透镜对再现光束的偏转,再结合时分复用实现了水平方向和垂直方向视角的扩大^[9]。时空复用方面,2018年,Sando Y等通过将红、绿、蓝三分量的子全息图分别加载到DMD的三个不同调制区域,利用DMD的空分复用和时分复用相结合技术,实现了360°水平视角的彩色全息3D显示^[10];其它方法还包括在元器件和算法方面的改进,2018年,Goncharsky A等设计了一种基于衍射光学元件的全息显示装置,其在白光再现时可以实现360°的观看效果^[11]。2020年,北京理工大学研究团队设计了一个基于双层衍射结构全息光学元件的近眼显示系统,最终视角达到了80°的视角^[12]。2021年,韩国的Chae推导了菲涅尔全息图数值孔径和视角之间的关系,提出通过增加数值孔径来增加视角的方法^[13]。

尽管上述研究在视场角扩大方面取得了显著进展,但普遍存在系统结构复杂、成本高昂、操作难度大的问题。针对现有技术的不足,本文通过研究全息显示中散射介质对视场角的影响,提出了一种基于水雾颗粒散射作用的视场角扩展方案。首先通过数值仿真研究了不同直径和波长下球形水雾颗粒的光散射特性,建立了不同波长下颗粒直径与散射角度之间的关系模型。实验部分采用直径3μm的水雾颗粒作为散射介质放置在全息再现光路中,展示了红绿蓝三色光下全息三维显示视场角扩展效果。结果表明,在光路中引入散射颗粒可以有效扩大全息显示视场角大小,且该方法结构简单、成本低、操作简单,无需对现有全息显示硬件进行大幅改造,可为全息显示扩大视场角技术提供新的思路。

1 球形颗粒 Mie 散射理论

由于文中研究的散射介质为水雾散射颗粒,

其粒子直径大小远远小于入射波长,可以等效为球形粒子,故下面将运用球形粒子 Gustav Mie 散射理论进行分析^[14]。

图1为Mie散射矢量示意图^[15]。

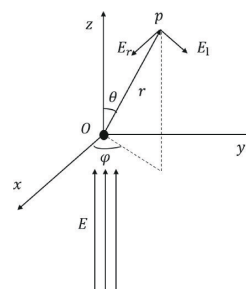


图1 Mie散射矢量示意图

其中, O 为原点,也即散射颗粒所在位置, E 为入射光场,为测量点;散射面 zOp 是光入射方向和散射方向形成的平面, E_t 为平行于散射面的散射光场, E_r 为垂直于散射面的散射光场, E_{t0} 为平行于散射面的入射光场, E_{r0} 为垂直于散射面的入射光场; θ 为散射角, φ 方位角, r 为测量点 p 距离球形粒子中心的距离。

散射光场分布可由下式求得

$$\begin{bmatrix} E_t \\ E_r \end{bmatrix} = \frac{e^{-ikr}}{ikr} S(\theta, \varphi) \begin{bmatrix} E_{t0} \\ E_{r0} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $S(\theta, \varphi)$ 为散射振幅函数。

对于各向同性的球形颗粒,散射振幅函数表示为

$$S(\theta, \varphi) = \begin{bmatrix} S_2(\theta) & 0 \\ 0 & S_1(\theta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

观察点 p 处的散射光强为

$$I = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} I_0 \left(|S_1(\theta)|^2 \sin^2 \varphi + |S_2(\theta)|^2 \cos^2 \varphi \right) \quad (3)$$

当入射光为非偏振光时,散射光强分布为

$$I = \frac{\lambda^2}{8\pi^2 r^2} I_0 \left(|S_1(\theta)|^2 + |S_2(\theta)|^2 \right) \quad (4)$$

$S_1(\theta)$ 和 $S_2(\theta)$ 可表示为^[16]

$$S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n + b_n \tau_n) \quad (5)$$

$$S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \tau_n + b_n \pi_n) \quad (6)$$

式中, π_n 和 τ_n 与散射角 θ 相关; a_n 和 b_n 为Mie散射系数,与散射颗粒尺度参数 $\alpha = \frac{\pi d}{\lambda}$ 和散射颗粒的复折射率 $m = m_1 - im_2$ 相关, d 为散射颗粒直径, m_1 表示颗粒的散射特性, m_2 表示颗粒的吸收特性^[17]。

由公式可知,影响散射光强的因素包括散射颗粒直径和入射光波长。

2 球形颗粒光散射特性仿真

为了验证上述球形粒子 Mie 散射理论结果的正确性,下面用 Matlab 仿真出了球形颗粒在

极坐标和直角坐标下的散射光强分布图进行分析。

图2为散射颗粒直径为 $1\mu\text{m}$ 时不同波长入射的散射光强极坐标分布图。图2(a)、(b)、(c)分别为红、绿、蓝光入射下的散射光强分布图,波长分别为 639nm 、 532nm 、 473nm 。

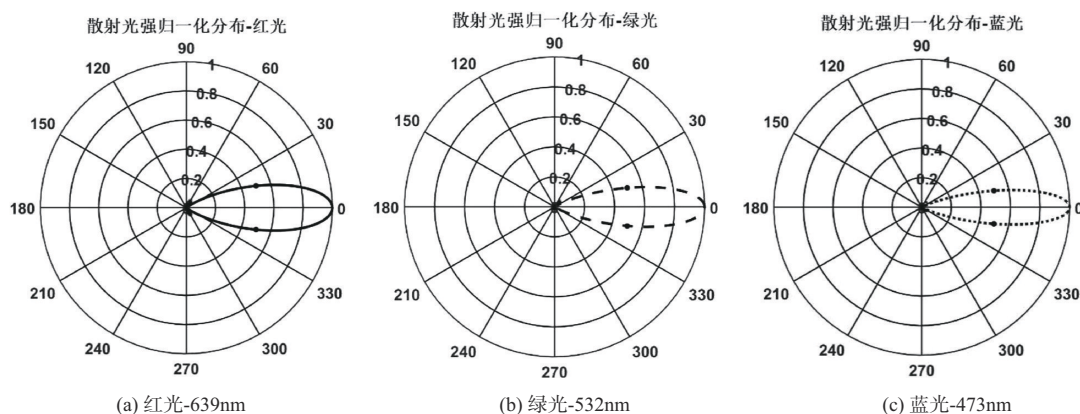


图2 不同波长下散射光强分布图(极坐标)

为更好分析散射角与颗粒直径和入射波长之间的关系,定义 0° 和 360° 方向为光线入射方向,偏离入射方向的角度大小为散射角度,散射光强衰减到入射方向光强一半时的角度宽度为散射角。

从图2可以看出沿着顺时针和逆时针散射角度的增大,散射光强逐渐减弱;顺时针和逆时针散射角度相同处散射光强相同。

虽然极坐标下的散射光强分布图可以直观看出散射光强随着散射角度之间的变化。但为了更好研究散射角与颗粒直径和光波长之间的关系,进一步计算了散射颗粒直径为 $3\mu\text{m}$ 与 $5\mu\text{m}$ 时不同波长入射的散射光强分布,并在图3中绘制了直角坐标系下不同波长、不同颗粒直径下的散射光强分布图。图3(a)、(b)、(c)对应的散射颗粒直径分为 $1\mu\text{m}$ 、 $3\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 。

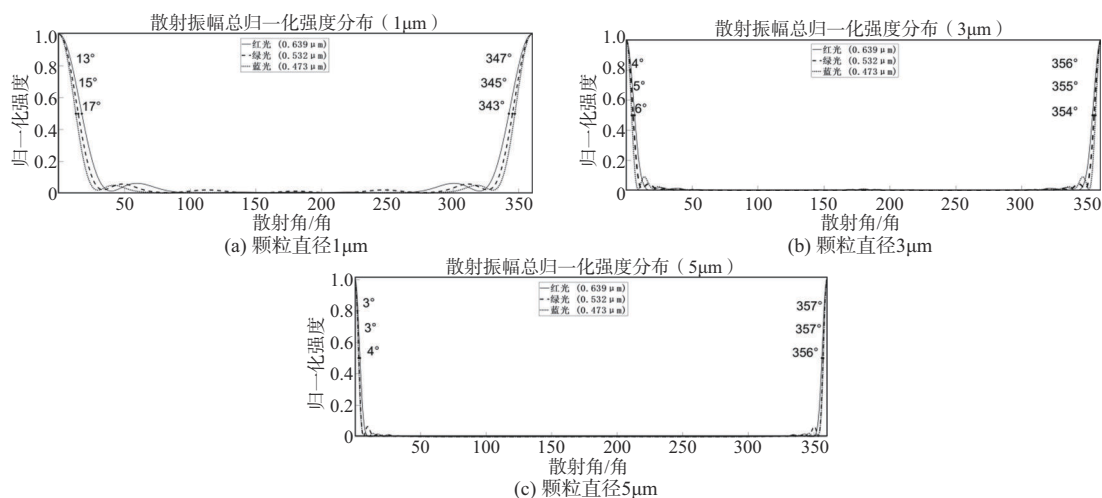


图3 不同颗粒直径下散射光强分布图(直角坐标)

从图3中得知散射颗粒直径为 $1\mu\text{m}$ 时红、绿、蓝光对应的散射角分别为 34° 、 30° 、 26° ; $3\mu\text{m}$ 时红、绿、蓝光对应的散射角分别为 12° 、 10° 、 8° ; $5\mu\text{m}$ 时红、绿、蓝光对应的散射角分别为 8° 、 6° 、 6° 。

上面仅展示了三组不同颗粒直径下的仿真结果,为了更好探究散射颗粒尺寸大小与散射角关系,表1中给出了更多红、绿、蓝光下不同颗粒直

径下的仿真结果。

根据表1中的数据可绘制出红、绿、蓝光下散射角与颗粒直径之间的关系图,即为图4。从图4中可知,同一入射光波下,散射角随着颗粒直径的增加而减小;在同一颗粒直径下,颗粒直径较小时,散射角随着光波波长的增加而增加,但随着颗粒直径增加,不同波长对应的散射角之间的差距慢慢减小。

表 1 不同波长下颗粒直径与散射角度关系

波长	颗粒直径/ μm	散射角/ $^\circ$	颗粒直径/ μm	散射角/ $^\circ$	颗粒直径/ μm	散射角/ $^\circ$
639nm	1	34	2	16	3	12
	4	8	5	8	6	6
	7	6	8	4	9	4
532nm	1	30	2	12	3	10
	4	8	5	6	6	6
	7	4	8	4	9	4
473nm	1	26	2	12	3	8
	4	6	5	6	6	4
	7	4	8	4	9	2

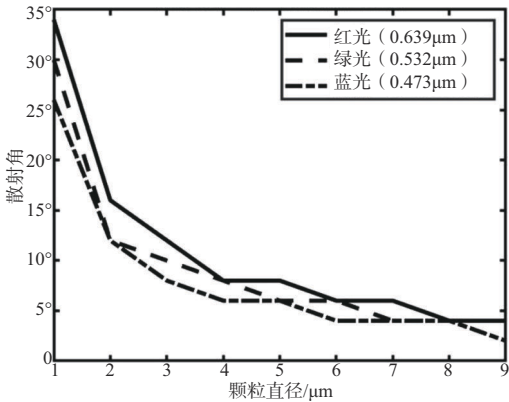


图 4 不同波长下颗粒直径与散射角关系图

3 散射介质扩大视场角实验结果

上面通过仿真得出了散射角与颗粒直径和入射光波波长的关系。为了进一步检验散射介质在实际光路中对全息显示视场角的影响，下文用 $3\mu\text{m}$ 直径的水雾散射颗粒，以 4m/s 的流速从窄嘴喷口喷出形成雾屏作为散射介质放置在全息三维显示再现光路中，实际测量了红、绿、蓝光入射下散射角度与散射光强的对应关系。测量光路如图 5 所示

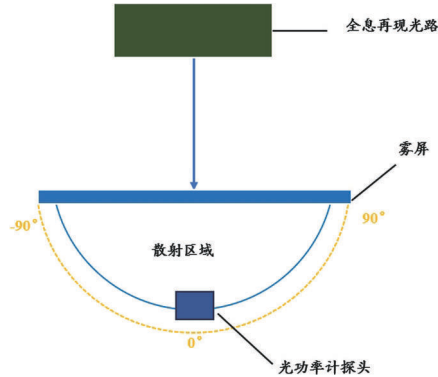


图 5 散射强度测量示意图

实验中采用光功率计从不同角度测量光强值。具体测量时，保持环境暗室条件下，测量时保持光功率计探头正对测量位置并保持测量距离一致。

实验中选用激光器波长分别为 639nm、532nm、473nm，出射功率为 50mw；空间光调制器为 HOLOEYE 生产，分辨率为 1080×1920 ，像素间隔为 $8\mu\text{m}$ ；图像原图为 ‘CGH’。

表 2~4 中分别给出了红、绿、蓝光下散射角度与散射光强的测量结果。其中 0° 代表入射方向， 0° 到 90° 方向代表沿入射方向逆时针的方向， 0° 到 -90° 代表沿入射方向顺时针方向。散射光强测量点距离全息再现像 60cm。

表 2 红光(639nm)入射下散射角度与散射光强测量结果

散射角度/ $^\circ$	散射光强 uw	散射角度/ $^\circ$	散射光强 uw	散射角度/ $^\circ$	散射光强 uw
0	1	12	0.15	-6	0.5
1	0.95	13	0.17	-7	0.38
2	0.86	14	0.18	-8	0.29
3	0.79	15	0.14	-9	0.20
4	0.75	30	0.13	-10	0.18
5	0.63	90	0.14	-11	0.17
6	0.48	0	1	-12	0.18
7	0.38	-1	1.04	-13	0.17
8	0.20	-2	0.92	-14	0.15
9	0.17	-3	0.83	-15	0.14
10	0.15	-4	0.75	-30	0.14
11	0.17	-5	0.64	-90	0.14

表 3 绿光(532nm)入射下散射角度与散射光强测量结果

散射角度/ $^\circ$	散射光强 uw	散射角度/ $^\circ$	散射光强 uw	散射角度/ $^\circ$	散射光强 uw
0	1	12	0.22	-6	0.38
1	0.97	13	0.23	-7	0.27
2	0.83	14	0.23	-8	0.25
3	0.66	15	0.22	-9	0.24
4	0.56	30	0.21	-10	0.21
5	0.47	90	0.21	-11	0.22
6	0.33	0	1	-12	0.22
7	0.26	-1	1.01	-13	0.22
8	0.23	-2	0.87	-14	0.22
9	0.21	-3	0.73	-15	0.22
10	0.22	-4	0.58	-30	0.22
11	0.23	-5	0.47	-90	0.22

图 6 为根据表 2~4 中数据绘制的不同波长下的散射光强分布图。

与仿真中散射角定义相同，同样用极值一半处对应的角度差作为散射角。可以计算出 $3\mu\text{m}$ 直径下红、绿、蓝光对应的散射角约为 12° 、 10° 、 9° ，与仿真结果大体一致。

同时，为了进一步验证不同散射角度下全息再现像的物面显示效果。按照如图 7 所示的实验系统开展了光学成像实验。

表 4 蓝光(473nm)入射下散射角度与散射光强测量结果

散射 角度/(°)	散射 光强 uw	散射 角度/(°)	散射 光强 uw	散射 角度/(°)	散射 光强 uw
0	1	12	0.21	-6	0.33
1	1	13	0.20	-7	0.30
2	0.83	14	0.20	-8	0.29
3	0.69	15	0.19	-9	0.25
4	0.51	30	0.19	-10	0.23
5	0.37	90	0.19	-11	0.24
6	0.35	0	1	-12	0.24
7	0.28	-1	1	-13	0.23
8	0.25	-2	0.85	-14	0.24
9	0.22	-3	0.70	-15	0.23
10	0.20	-4	0.54	-30	0.22
11	0.22	-5	0.38	-90	0.22

图 7 中,空间光调制器调制后的光经 4f 系统滤波后在出射空间重建图像,在成像面用雾面发生器产生的雾面屏进行承接,扩大视场角。之后用相机以像面为中心环绕多角度拍摄成像结果,得到不同散射角度的全息再现像。图 8 给出了 3 μm 直径散射介质下红、绿、蓝光入射下不同散射角度的全息再现像。

从图 8 中得知,若用人眼观察效果作为视场角判断依据,散射颗粒直径为 3 μm 时,红光下能完

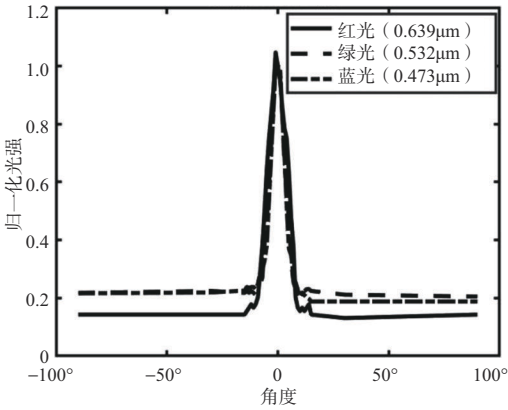


图 6 不同波长下散射光强分布图(3 μm)

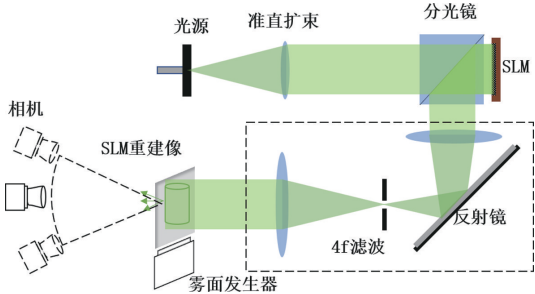


图 7 光学实验系统示意图

整看出再现像的角度为 $\pm 6^\circ$,绿光为 $\pm 5^\circ$,蓝光为 $\pm 4^\circ$,即视场角分别为 12° , 10° , 8° 。与仿真中 3 μm 直径下红、绿、蓝光对应的散射角一致。

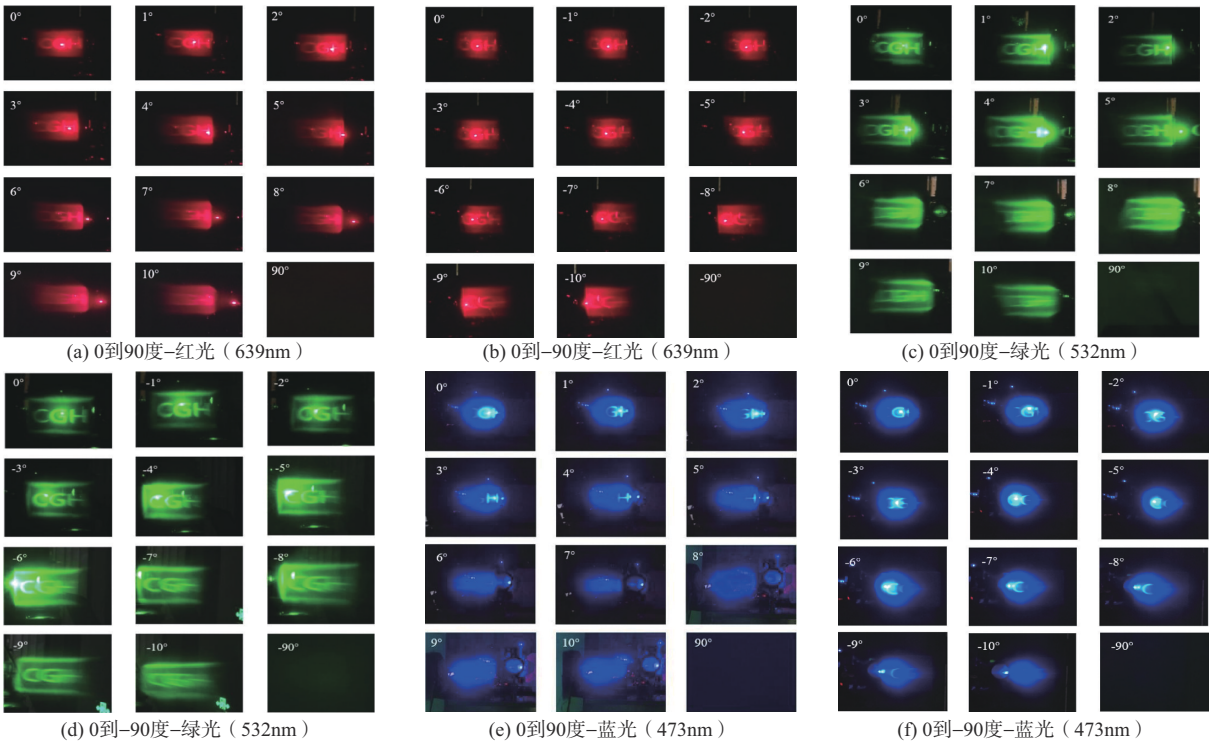


图 8 不同角度下全息图再现效果(3 μm)

根据仿真和实验得出的结论,小颗粒直径下,不同波长对应的散射角不一致,随着颗粒直径的增加,不同波长对应的散射角的差距减小,但同时整体的散射角也会减小。因此,为了平衡散射

角大小和不同波长散射角差异的问题,未来可以从以下两个方向改进:选用不同直径的散射颗粒混合,通过调整不同散射颗粒的比例,找到能使不同波长散射角差异减小且整体散射角大小处于

合适范围的混合方案；或者在计算全息图时进行预补偿，根据不同波长的光在散射介质中的传播特性，结合散射介质的实际参数建立更准确的光学模型进行编码。

4 总 结

针对全息显示再现像视场角受限的问题，研究了散射介质对全息显示视场角的影响，提出了引入雾气颗粒作为散射介质置于三维实像显示区域，理论和实验结果表明，有效地扩大了全息显示的视场角。该方法系统结构简单、成本低、操作难度低，可以为全息显示视场角扩大技术提供一种解决思路。但同时本文引入散射介质也会导致再现像质量降低，因此未来还需要进一步探索更为完善的改进方案。

参考文献：

- [1] Pi Dapu, Liu Juan, Wang Yongtian. Review of computer-generated hologram algorithms for color dynamic holographic three-dimensional display[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11:231.
- [2] Blinder D, Birnbaum T, Ito T, et al. The state-of-the-art in computer generated holography for 3D display[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(3):35.
- [3] Blinder D, Nishitsuji T, Schelkens P. Real-time computation of 3D wireframes in computer-generated holography[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2021, 30:9418—9428.
- [4] Nishitsuji T, Blinder D, Kakue T, et al. GPU-accelerated calculation of computer-generated holograms for line-drawn objects[J]. *Optics Express*, 2021, 29(9):12849—12866.
- [5] Liu Shengchi, Chu Daping. Deep learning for hologram generation[J]. *Optics Express*, 2021, 29(17):27373—27395.
- [6] Shimobaba T, Blinder D, Makowski M, et al. Dynamic-range compression scheme for digital hologram using a deep neural network[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(12):3038—3041.
- [7] Zeng Zhenxiang, Zhang Huadong, Yu Yingjie, et al. Full-color holographic display with increased-viewing-angle[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(13):F112—F120.
- [8] Li Jin, Smithwick Q, Chu Daping. Holobricks: modular coarse integral holographic displays[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11:57.
- [9] Yang Guanglin, Han Weihao, Xie Taomin, et al. Electronic holographic three-dimensional display with enlarged viewing angle using non-mechanical scanning technology[J]. *OSA Continuum*, 2019, 2(6):1917—1924.
- [10] Sando Y, Barada D, Yatagai T. Full-color holographic 3D display with horizontal full viewing zone by spatiotemporal-division multiplexing[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(26):7622—7626.
- [11] Goncharsky A, Durlevich S. Cylindrical computer-generated hologram for displaying 3D images[J]. *Optics Express*, 2018, 26(17):22160—22167.
- [12] Duan XinHui, Liu Juan, Shi XueLiang, et al. Full-color see-through near-eye holographic display with 80° field of view and an expanded eye-box[J]. *Optics Express*, 2020, 28(21):31316—31329.
- [13] Chae B G. Wide viewing-angle holographic display based on enhanced-NA Fresnel hologram[J]. *Optics Express*, 2021, 29(23):38221—38236.
- [14] Gustav M. Contributions to the optics of turbid media particularly of colloidal metal solutions[J]. *Annals of Physics*, 1976, 25(3):377—445.
- [15] 李文龙. 水分子及水雾的散射特性研究[D]. 长春:长春理工大学, 2014.
Li Wenlong. Scattering characterization of water molecules and water mist[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2024.
- [16] 刘静怡. 多视场激光雷达系统探测云的多重散射技术研究[D]. 西安:西安理工大学, 2024.
Liu Jingyi. Research on the detection of multiple scattering effect of cloud using the multi-field LiDAR system[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2024.
- [17] 李广宁. 二维雾屏成像技术光散射特性研究[D]. 桂林:桂林电子科技大学, 2019.
Li Guangning. Research on the property of light scattering from two-dimensional fog screen imaging technology[D]. Guilin: Guilin University of Electronic Science and Technology, 2019.