

非视域成像中的中介面散射特性与成像仿真

方宇杰^{1,2}, 王霞^{1,2*}, 孙志斌^{3,4**}, 苏秉华²¹北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;²北京理工大学珠海学院, 广东 珠海 519085;³中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;⁴中国科学院大学, 北京 100049

摘要 中介面与目标表面光学散射特性对成像结果有直接影响,目前各种非视域成像方法多针对朗伯体中介面进行计算成像,系统结构复杂且成本昂贵。然而,应用场景中的常见材料均为非朗伯体,故基于中介面材料的双向反射分布理论,提出了一种材料散射特性描述方法。通过设置中介面中所包含的不同散射成分,经过大量光线追迹,实现了对非视域目标光强信号的追踪与仿真。仿真成像结果采用标准差进行评价,通过多因素方差分析,定量讨论了不同散射成分组合与非视域成像质量之间的关系。分析结果表明,材料中高斯散射角对非视域成像质量有显著影响。

关键词 散射; 计算成像; 光数据处理; 成像分析

中图分类号 O411.3 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS221341

1 引言

成像系统通过中介面对拐角或障碍物后面的目标实施计算成像的技术被称为非视域成像。针对视场外的目标成像问题,需要对中介面的光学散射特性进行分析,进而根据成像系统的工作原理,并且配合相应的算法,实现非视域成像的目的。由于非视域成像是从散射光信号中恢复目标信息,因此也是一种散射成像技术^[1-3]。该技术能够在多种设备无法直接观察的场景中发挥不可替代的作用,在医疗、军事、灾难救援等领域中存在潜在的应用价值,近年来逐渐成为人们关注的焦点^[4-6]。

非视域成像技术从实现原理上可分为主动非视域成像与被动非视域成像。主动非视域成像技术需要照明系统与探测系统同步工作,所采集光信号包含了时间与空间上的双重耦合信息,处理器需要根据照明方式从时空耦合的信息中解算出非视域成像结果。飞秒激光器与高速相机组合的瞬态成像法^[7,8]、单光子雪崩探测器扫描成像系统^[9-10]和距离选通非视域成像方法^[11-13]属于主动非视域成像。被动非视域成像没有特定的照明形式,探测器仅通过采集中介面上的散斑信号,借助光学传输模型或优化算法实现非视域目标重构^[14-17]。

Klein等^[18]采用普通相机对中介面上的阴影进行采集与分析,提出了一种优化迭代算法实现了非视域目标姿态探测。Saunders等^[19]采用液晶显示器对非视域目标进行照明,采用普通相机在朗伯体中介面上实施图像重构,该方法是依据一定的先验知识,从中介面上的阴影中重构出非视域图像。Sasaki等^[20]采用红外相机作为成像系统,以视场外的人作为非视域目标,利用人体表面的红外辐射不同于场景红外辐射的差异,实现了非视域重构。此类被动非视域成像的重构均通过中介面上的退化图像完成,因其低成本、快速性和易实现性而逐渐成为研究热点^[20-22]。

被动非视域成像技术基于中介面上的散斑信息,通过优化算法或模型逆问题求解等方法实现非视域目标重构。然而,在实际应用中,中介面散射特性对散斑信息有直接作用,且自然界材料形式各异,难以寻找标准散射特性的材料。Kadambi等^[14]使用半峰全宽(FWHM)描述材料的不同散射特点,并且测试了上百种材料的FWHM特性。为定量研究中介面散射特性与非视域成像质量之间的关系,包括针对实际中介面散射特性的应用方法,本文设计了一种简单易行的材料散射特性描述模型,在此基础上对非视域信号的散射行为进行了仿真研究,从而为非视域成像技术的实际应用提供了理论基础与实验依据,为中介面选择提

收稿日期: 2022-06-20; 修回日期: 2022-07-18; 录用日期: 2022-09-13; 网络首发日期: 2022-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(62031018, 61274024, 61474123)、国家重点研发项目(2016YFE0131500)、广东省普通高校重点领域专项(2021ZDZX3012, 2021B0707010001)

通信作者: *angelniuniu@bit.edu.cn; **zbsun@nssc.ac.cn

供了参考与成像模拟,具有实际应用价值。

2 非视域成像中散射信号传输特点分析

2.1 非视域目标光信号传输

非视域目标光信号通过中介面散射后被成像系统接收,所采集图像数据退化程度与中介面散射特性有

直接关系。假设中介面为理想朗伯面,非视域目标光信号将被完全随机散射,图像退化最为严重。若中介面表面存在类似塑料、金属的光泽特性,则所采集退化的非视域目标光信号将存在一部分有利于重构的成分。当点光源入射材料表面时,图 1 展示了一种出射光强度的分布效果,示意了中介面材料随 FWHM 特性发生变化时,非视域信号所呈现出的对应变化。

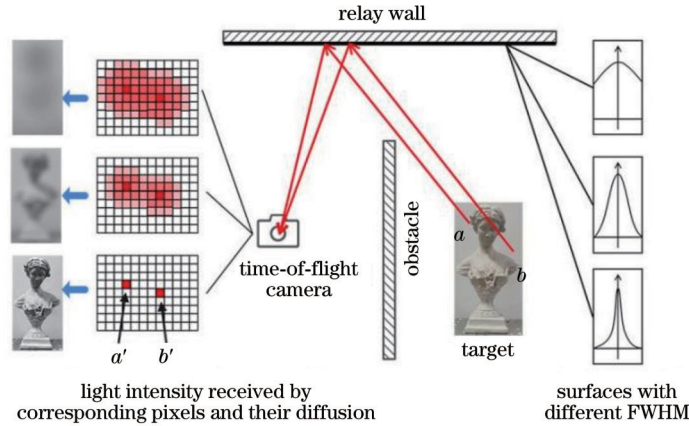


图 1 非视域成像中反射面表面不同散射特性对目标信号造成的影响

Fig. 1 Influence of different scattering characteristics of reflective surfaces on target signals in non-line-of-sight imaging

假设目标 a 点发出的光信号经由中介面反射,由传感器对应像素 a' 接收。若中介面为平面镜,则传感器像素对 a 点的光能量进行成像。然而,由于中介面的扩散作用,像素 a' 周围的像素也能接收到 a 点发出的光能量。同理, b 点目标发出的光经由中介面扩散后落在像素 b' 及其周围,但所接收到的光能量强度和范围因材料的 FWHM 特性的不同而不同。因此,某像素实际接收的强度值是多个目标点扩散的叠加结果。

对于自由空间的目标光信号,基于波动光学理论可以将波信号 $\psi(x, y, z, t)$ 表达为

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)\psi = \nabla^2\psi - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

式中: $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ 为拉普拉斯算子; c 为光速。

由于目标具有空间特性,故给定的初始条件下计算波动方程解的数值方法有很多,包括有限元法和有限差分法。为简单起见,将与时间相关的自由波动方程表达为一种叠加平面波^[21],即

$$\psi(x, y, z, t) = \iiint \varphi(k_x, k_y, k_z) \exp[2\pi i(k_x x + k_y y + k_z z - ft)] dk_x dk_y dk_z, \quad (2)$$

式中: $\mathbf{k} = (2\pi k_x, 2\pi k_y, 2\pi k_z)$ 为平面波矢; $\varphi(k_x, k_y, k_z)$ 为与波矢相关的平面波的振幅和相位,即被测目标的清晰图像;函数 f 为与中介面散射相关的函数。非视域成像即对式(2)进行逆运算,当中介面为朗伯散射

时,Lindell等^[21]基于地震学震源推算的方法对此进行了逆向求解。非朗伯体时 f 和波矢的传播与散射特性相关,边界条件不足时难以实现逆向求解。为此,本文将通过计算机对非视域目标光信号进行大量光线追迹,从而分析不同散射情况下的成像结果。

2.2 中介面与目标表面光信号的传输特点

在被动非视域成像问题中,中介面对成像结果有直接的影响,同时被测目标的表面光学特性也是非视域成像的重要影响因素之一。假设被测目标是被充分照明的,传感器接收到的光能量是照明光经由两次散射后得到的,包括被测目标散射和中介面散射。传感器上某像素 $p(x, y)$ 接收到的实际光强信号可以表示为

$$I_{p(x,y)} = f_{bs}[g_{bs}(I_i)], \quad (3)$$

式中: I_i 为照明光强; $f_{bs}(\cdot)$ 与 $g_{bs}(\cdot)$ 分别为中介面与目标表面相关的散射分布特性函数。通过简单的实验可定性验证式(3)的实际效果。

被测目标选择洁净光滑的塑料字母与均匀粗糙的石膏人像,中介面选择光洁的瓷砖与均匀粗糙的石灰面板,测试方案如表 1 所列,光滑与粗糙的特性两两组合进行非视域信号采集对比,结果如图 2 所示,显示了 4 种方案的成像结果:1)当塑料字母为目标、瓷砖为中介面时,目标与中介面均较为光滑,镜面反射成分较多,因此部分像素因光强过大而饱和,出现暗斑;2)当目标粗糙、中介面光滑时,此时为镜面成像,极端情况是中介面光滑到成为平面镜;3)当目标光滑、中介面粗糙时,可以观察到目标的反射光,Saunders等^[19]与

Sasaki 等^[20]的场景与此类似;4)当目标与中介面均粗糙时,经过中介面散射后的目标光信号相比于上述几种情况较为微弱,极端情况下即两者均为朗伯散射,此时难以实现被动非视域成像。

表 1 不同散射特性的目标与中介面组合测试方案
Table 1 Combined schemes of target and relay wall with different scattering characteristics

Combined scheme	Example
Smooth target+smooth relay wall	Plastic letters+ceramic tile
Smooth target+rough relay wall	Plastic letters+lime wall
Rough target+smooth relay wall	Plaster figure+ceramic tile
Rough target+rough relay wall	Plaster figure+lime wall

综上所述,当中介面与目标两者均光滑或粗糙时,即中介面与目标表面粗糙度相近时,非视域成像难度大于两者表面粗糙度差异较大的情况。本文将进一步通过软件仿真的方法定量分析材料表面粗糙度与非视域成像质量之间的关系。

3 计算机模拟散射光信号传输的方法

3.1 计算机仿真中的散射理论

计算机模拟中介面散射行为的主要目的是将光能量散射数据图形化,进而能够分析非视域成像的散射光场分布情况。本文使用 Blinn-Phong 模型 f_{BP} 和 Torrance-Sparrow 模型 f_{TS} 的线性组合来表现材料表面漫反射、高斯散射和镜面反射特性,高斯散射特性即为金属、塑料等表面的“高光”效果。使用两种模型的线性组合是为了使材料光学特性与真实情况更接近,散射模型可表示为

$$f(\theta_i, \theta_o) = af_{BP}(\theta_i, \theta_o) + bf_{TS}(\theta_i, \theta_o), \quad (4)$$

式中: θ_i 和 θ_o 分别为光能量入射角和出射角; a 与 b 为正的组系数,且存在关系 $a + b = 1$, 可通过这些参数进行散射成分的控制。

Blinn-Phong 模型基于微面元物理模型具有广泛的应用^[23], 通过设置不同参数来模拟材料表面的漫反射与高斯散射效果,其简化后的计算模型可表示为

$$f_{BP}(\theta_i, \theta_o) = \frac{k_L}{\pi} + k_G \frac{8+s}{8\pi} z^s, \quad (5)$$

式中: $z = \max(0, \mathbf{h} \cdot \mathbf{n})$, 其中 \mathbf{h} 为角平分向量, \mathbf{n} 为法向量; k_L 与 k_G 分别为朗伯反射率与高斯反射率; s 为高光指数, 高光指数用来模拟材料表面的光滑度, 高光指数越大越能表现出金属光泽度, 高光指数越小则能够表现出皮革、塑料等材料具有的哑光效果。

现实中的材料并非在镜面方向上获得出射光强的峰值, 本文同时采用 Torrance-Sparrow 模型来描述漫反射和镜面反射效果, 参考菲涅耳方程将反射率取为入射角函数, 化简后的模型^[24]可表达为

$$f_{TS}(\theta_i, \theta_o) = \frac{k_d}{\pi} + \frac{k_s}{4\pi(\mathbf{n} \cdot \theta_i)} DFG, \quad (6)$$

式中: k_d 与 k_s 分别为朗伯反射率与镜面反射率; D 为某微表面在 θ_o 方向上发射光的贡献比例, 对于越光滑的表面, 整体出射表面的法向量分布越靠近该表面点处的法向量 \mathbf{n} , 表现出镜面高光效果; G 可描述表面随机起伏过大时, 光线发生相互遮挡的效果; F 为菲涅耳系数, 表明材质反射光强的比例。Torrance-Sparrow 模型是基于微面元的物理模型, 引入该模型是希望组合公式的模拟结果与真实材料更接近, 整体的反射分布特性如图 3 所示。

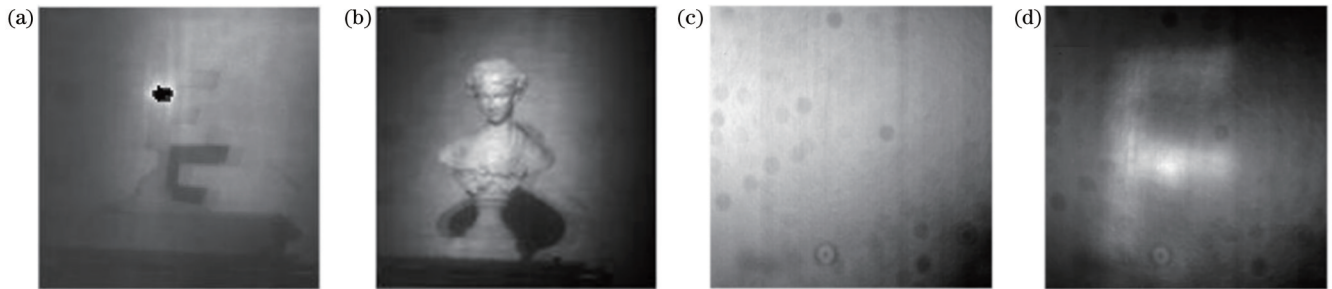


图 2 基于光强度的非视域成像。(a)塑料字母与瓷砖中介面;(b)石膏人像与瓷砖中介面;(c)石膏人像与石灰面板;(d)塑料字母与石灰墙面板

Fig. 2 Non-line-of-sight imaging based on intensity. (a) Plastic letters and ceramic tile; (b) plaster figure and ceramic tile; (c) plaster figure and lime wall; (d) plastic letters and lime wall

本文假设材料表面是均匀的,且不考虑光能量吸收与透射,同时忽略材料表面的浅层散射作用。将中介面与目标表面光学特性视作由漫反射、镜面反射和高斯散射三种成分组成,从而进一步通过蒙特卡罗积分对散射光进行光路追迹,观察不同散射组分与成像质量之间的定量关系。

3.2 非视域光信号散射仿真设计与应用方法

中介面材料从微观角度观察可视作微小镜面单元:总体的光能量表现比较集中则可认定为镜面反射,或者高斯角较小的反射成分;总体表现出各个方向均有反射能量,则表现为朗伯反射。因此,存在一种固定散射组分对应多种材料,或一种材料经过加工存在多种对应组分。不同散射组合情况下可能相关联的实际

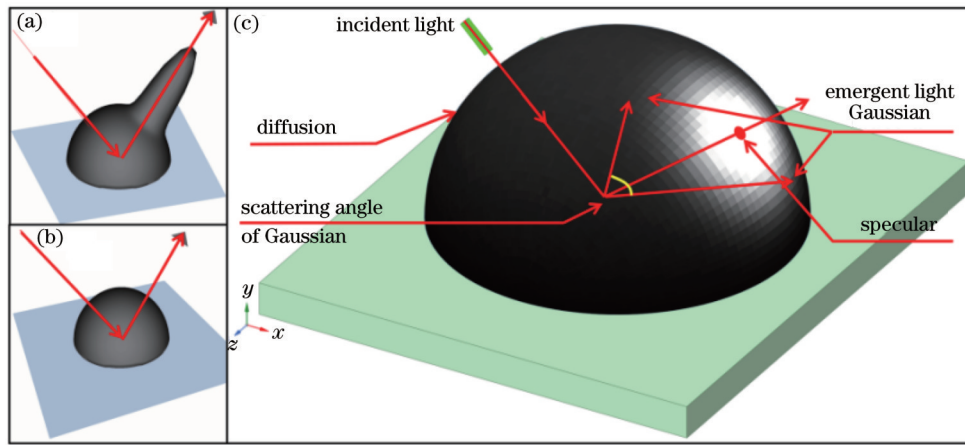


图 3 反射特性分布。(a)Blinn-Phong 模型;(b) Torrance-Sparrow 模型;(c)组合模型

Fig. 3 Reflection distribution. (a) Blinn-Phong model; (b) Torrance-Sparrow model; (c) combined model

材料分类如表 2 所示。

在实际应用中,信号强度散射仿真结果能够为非视域成像选择合适的中介面提供参考。首先,针对欲观测场景进行仿真,得出在此场景下观测需要何种散射特性的中介面,进而通过仿真结果的组分参数且根据基础分类表 2 寻找对应的中介面,实现非视域场景成像。在已确定某种材料后,通过测量材料的散射分布,按照式(4)进行参数拟合,获得该材料的散射组合

成分,从而进行仿真成像的验证与分析,给出实际成像的理论参考。

基于图 2 的简单测试分析可得,目标表面不宜过于光滑,否则在中介界面由朗伯散射开始逐渐光滑产生“高光”效果的测试过程中,容易引起探测器饱和。因此,目标表面散射成分组成方案中不加入高斯散射,如表 3 所示,即令中介面为理想朗伯散射,测试当目标表面镜面成分逐渐增加时对非视域成像的影响。

表 2 不同散射组合情况下可能相关联的实际材料分类

Table 2 Material classification that may be associated with different scattering combinations

Gaussian angle+ diffuse reflection	Specular 0	Specular 5%	Specular 10%
10°+20%	Matte wall coating, satin	Flat paint, plastic, polished wood	Smooth plastic, painted wood, rough metal
30°+60%	Matte plastic, glossy fabric	Paper, glossy satin	Hard plastic, flat paint
50°+80%	Frosted metal, frosted plastic	Ground glass, rough metal	Smooth paper, withe wall

表 3 目标表面散射组成方案

Table 3 Composition scheme for surface scattering of target

Diffusion /%	100.0	99.9	99.8	99.7	99.6	99.5	99.4	99.3	99.2	99.1
Specular /%	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9

针对中介面的散射特性,镜面反射、高斯散射、高斯散射角、朗伯散射分别为 4 种影响非视域成像的因素。其中,镜面反射、高斯散射与朗伯散射三种成分之和为 100%,由于不同因素水平之间相互关联,因此

将高斯散射与朗伯散射作为整体因素来设计,每个影响因素的水平设计如表 4 所示。其中,S 为镜面反射成分,G 为高斯散射成分,Ga 为高斯散射角,L 为朗伯散射成分。

表 4 多种因素的不同水平设计

Table 4 Design of different levels for multiple factors

No.	Factor	Level							
1	S	0	3%	5%					
2	Ga	10°	15°	30°	45°	50°			
3	S+G+L	0+95%+5%	0+80%+20%	0+60%+40%	0+40%+60%	0+20%+80%	0+5%+95%		
4	S+G+L	3%+95%+2%	3%+80%+17%	3%+60%+37%	3%+40%+57%	3%+20%+77%	3%+5%+92%		
5	S+G+L	5%+95%+0%	5%+80%+15%	5%+60%+35%	5%+40%+55%	5%+20%+75%	5%+5%+90%		

表 4 列有 5 种因素,其中镜面成分水平 3 种、高斯散射角水平 5 种、三种组合因素水平 6 种。由于因素 1、3、4、5 具有相关性,不能同时共存,因此只能进行如表 5 所示的不同水平下的实验,三列情况分别对应实验一、实验二和实验三。例如,当镜面成分选择为 0 时,实验所选择因素组合为高斯散射角与因素 3 所示方案。在不同水平下进行非视域成像实验,计算图像标准差(STD)后进行方差分析。

表 5 不同因素组合的实验方案

Table 5 Experimental schemes with different factor combinations

S	0	3%	5%
Factor No.	2, 3	2, 4	2, 5

4 实验数据

4.1 仿真场景设置

仿真系统采用 ANSYS 公司的 SPEOS 专业软件,该平台能够实现材料散射特性的自由编辑,具备光线追踪与探测的功能。仿真场景模型如图 4 所示。

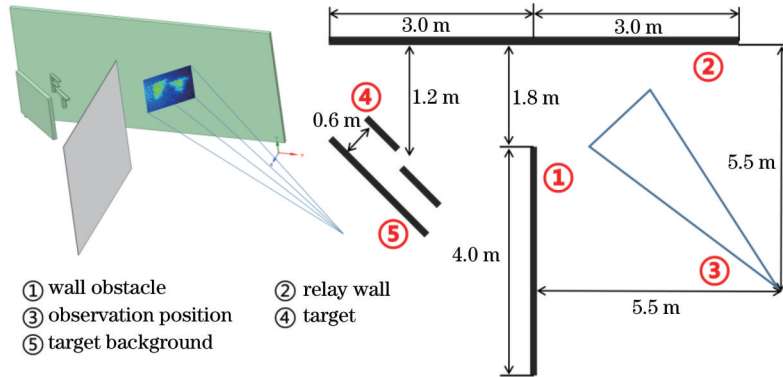


图 4 计算机仿真场景设置图示

Fig. 4 Schematic diagram of scenario setting of computer simulation

表 6 仿真参数设置

Table 6 Simulation parameter setting

Parameter	Description
Scattering of obstacle and target background	100% Lambert reflector
Scattering of target and relay wall	Experimental settings
Sampling number	1000×1000
Beam number	8×10 ⁷
Wavelength	850 nm

表 7 计算机配置

Table 7 Computer configuration

Device	Description
CPU	i7-10700K
RAM	32 GB
Display card	GeForce RTX 3070
Display RAM	8 GB

中介面和障碍物墙壁采用理想的朗伯体反射材质,以模拟普通石灰墙壁等完全不透光的材料。仿真过程通过变更中介面和目标的光学散射特性来研究光场传输方法。本论文的主要研究内容是光信号在不同散射特性中介面作用下的传播特点和中介面散射特性对非视域目标成像质量的影响。假设目标是被充分照明且均匀的,并且使用单一波长非相干光源,以排除由波长引起的不同散射干扰。成像时选用理想相机对中介面实施清晰成像,旨在排除成像系统带来的如镜头畸变、成像噪声等干扰。表 6 和表 7 列出了相关的仿真参数和计算机配置。

4.2 仿真结果

仿真实验分为目标散射特性测试与中介面散射特性测试:在进行目标散射特性测试时,设置中介面为纯朗伯体;在进行中介面散射特性测试时,设置目标散射特性为 99% 朗伯散射成分和 1% 镜面成分。

当设置中介面为纯朗伯体,目标表面散射特性分别按照表 3 进行设置,所得非视域成像结果如图 5 所示。其中,成像质量采用图像标准差进行评价,标准差越大,表明图像细节越丰富。

主观上,当目标表面为纯朗伯体时,基于强度的非视域成像结果无法分辨图像细节,图像呈半圆状图案反映了障碍物的光反射干扰。当镜面成分增加为 0.1% 时,出现了图像细节,当目标存在 1% 的镜面成分时,非视域图像的细节已经非常明显,从而验证了图 2(a)和图 2(d)所示的实际情况,同时支撑了表 3 的合理性,即目标表面不宜过于光滑,否则当中介面为非朗

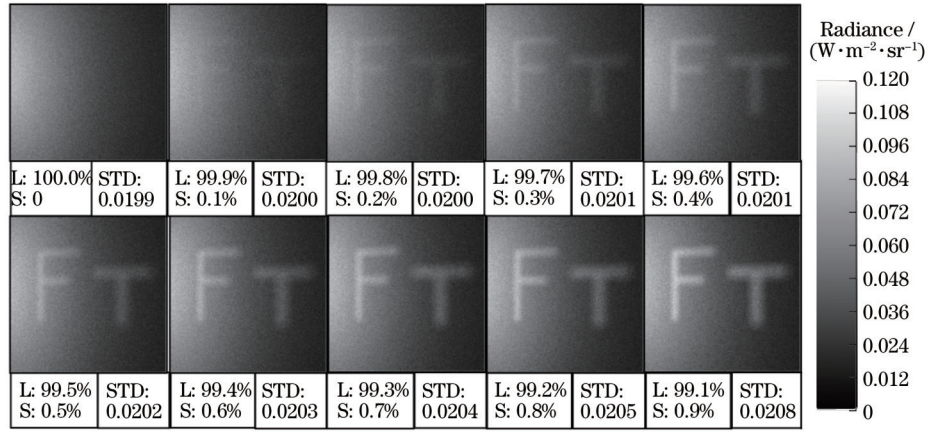


图 5 朗伯体中介面条件下不同散射特性目标的非视域仿真图

Fig. 5 Non-line-of-sight simulated images of targets with different scattering characteristics under Lambertian relay wall

伯体时,容易使传感器饱和。同时,当目标表面镜面成分越多时,实现非视域成像相对更容易。客观上,镜面成分的增加使得图像标准差增大,表明图像中细节更丰富。

当设置目标表面散射特性为 99% 朗伯散射成分和 1% 镜面成分时,中介面测试按照表 5 所列方案实施非视域成像,成像结果计算所得标准差如图 6 所示,图像数据如表 8~10 所示。

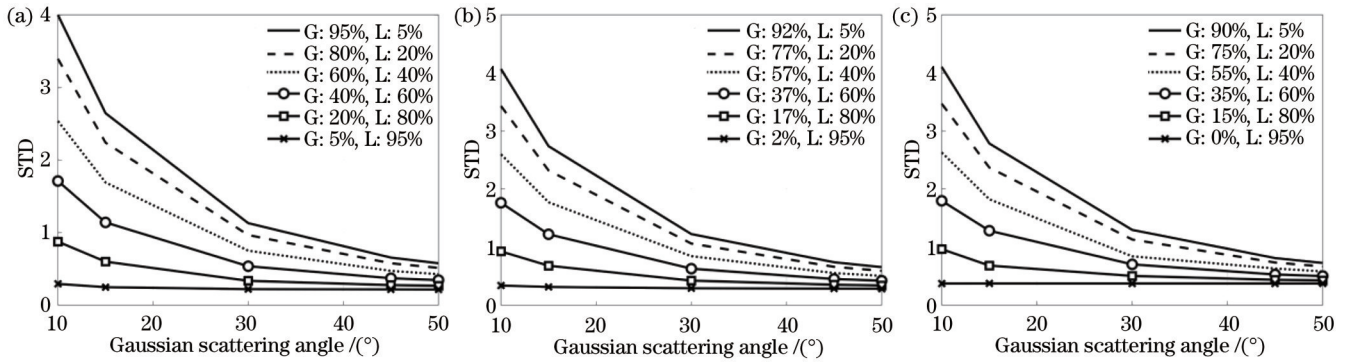


图 6 不同散射特性的非视域图像 STD 对比。(a) S 为 0%; (b) S 为 3%; (c) S 为 5%

Fig. 6 Comparison of STD of non-line-of-sight images with different scattering characteristics. (a) S of 0%; (b) S of 3%; (c) S of 5%

表 8 S 为 0 时非视域图像的 STD 数据

Table 8 STD data of non-line-of-sight images at S of 0

Ga / (°)	95%+5%	80%+20%	60%+40%	40%+60%	20%+80%	5%+95%
10	0.4000	0.3395	0.2537	0.1710	0.0874	0.0292
15	0.2646	0.2240	0.1691	0.1140	0.0599	0.0247
30	0.1129	0.0960	0.0750	0.0535	0.0335	0.0220
45	0.0655	0.0576	0.0471	0.0370	0.0276	0.0216
50	0.0577	0.0513	0.0427	0.0344	0.0266	0.0215

表 9 S 为 3% 时非视域图像的 STD 数据

Table 9 STD data of non-line-of-sight images at S of 3%

Ga / (°)	95%+2%	80%+17%	60%+37%	40%+57%	20%+77%	5%+92%
10	0.4069	0.3431	0.2598	0.1763	0.0925	0.0337
15	0.2739	0.2320	0.1772	0.1220	0.0679	0.0313
30	0.1224	0.1060	0.0843	0.0628	0.0422	0.0290
45	0.0738	0.0660	0.0552	0.0450	0.0351	0.0283
50	0.0654	0.0590	0.0503	0.0420	0.0338	0.0282

表 10 S 为 5% 时非视域图像的 STD 数据
Table 10 STD data of non-line-of-sight images at S of 5%

Ga / (°)	95%+0	80%+15%	60%+35%	40%+55%	20%+75%	5%+90%
10	0.4105	0.3471	0.2631	0.1797	0.0964	0.0372
15	0.2785	0.2369	0.1824	0.1282	0.0681	0.0372
30	0.1296	0.1131	0.0840	0.0702	0.0503	0.0372
45	0.0810	0.0734	0.0630	0.0528	0.0435	0.0371
50	0.0726	0.0665	0.0580	0.0501	0.0425	0.0373

由图 6 可知,三种不同镜面成分所计算的结果均表明,无论高斯散射成分与朗伯散射成分的组合怎样变化,随着高斯散射角的增加,图像标准差均在下降,即图像会变得越来越模糊。从固定高斯散射角分析,镜面成分略微增加会使得标准差有所提升,即在固定高斯散射角条件下,镜面散射的增加对非视域成像有

利。当镜面成分固定时,随着高斯成分的增加,图像标准差也会显著提升。镜面成分、高斯成分与高斯散射角均能对非视域图像成像质量起到提升作用。图 7 进一步展示了部分成像结果,抽取镜面成分为 3%、高斯散射角分别为 15°、30°、45° 下 G+L 组合的非视域图像。

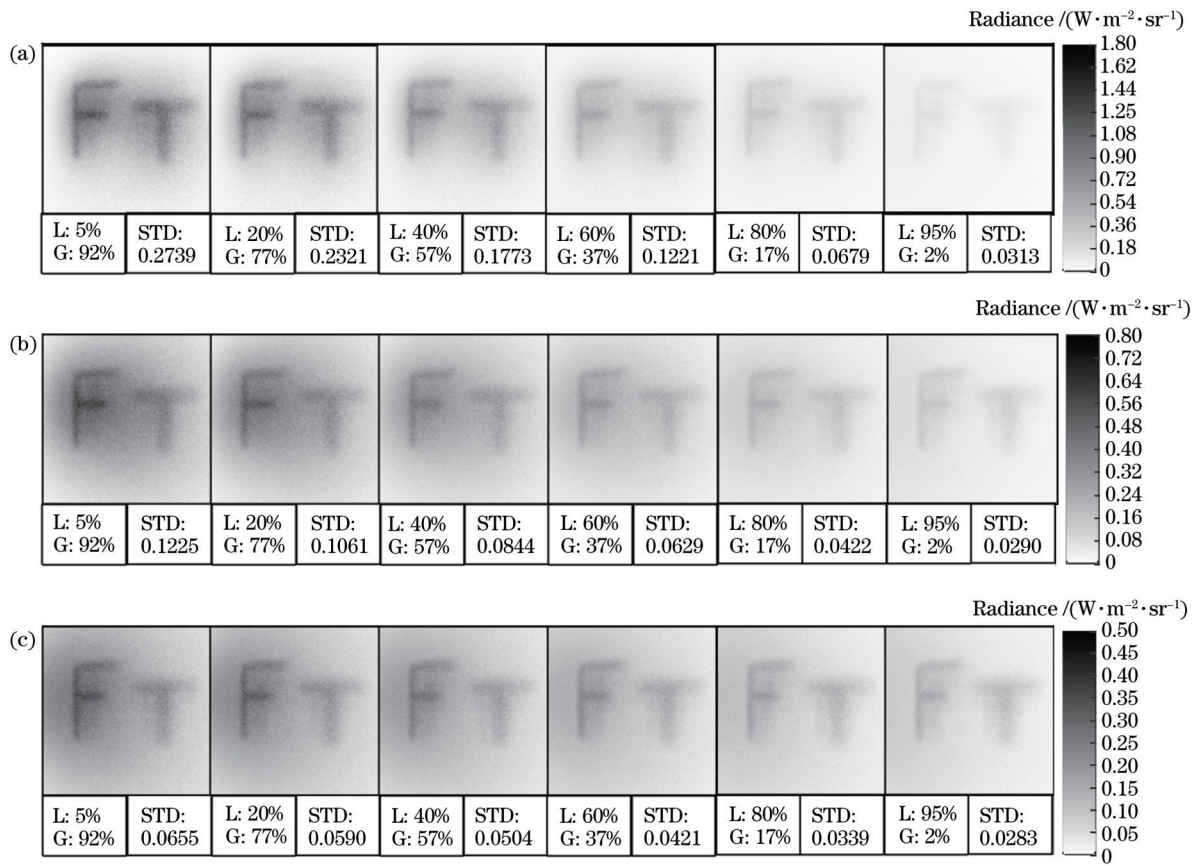


图 7 不同散射特性下的非视域图像。(a) S: 3%, Ga: 15°; (b) S: 3%, Ga: 30°; (c) S: 3%, Ga: 45°

Fig. 7 Non-line-of-sight images with different scattering characteristics. (a) S: 3%, Ga: 15°; (b) S: 3%, Ga: 30°; (c) S: 3%, Ga: 45°

主观上,高斯散射成分的减少与朗伯散射的增加会导致图像对比度明显下降,并且能够观察到高斯散射角的增加会导致非视域目标图像的扩散,与图 1 成像结果一致。然而,对图 7 的纵向对比可以看出,这种高斯角扩散作用在高斯-朗伯组合材料中似乎是有利的。由于仿真能够使得散射特性量化,因此进一步通过方差分析定量计算散射特性对成像质量显著性的影响。

5 分析与讨论

成像结果从主观与客观两方面均能看出随散射特性变化而非视域图像质量变化的特点。何种因素起主导作用需要进一步通过方差分析进行讨论。方差分析即是对方差进行比较的方法,通过假设检验的过程来判断多个因素是否对因变量产生显著影响。在本实验中,镜面反射、高斯散射角、高斯散射与朗伯散射的组

合为自变量,非视域图像标准差为因变量。方差分析中需要计算残差(Error)、总平方和(SS)、自由度(df)、均方(MS)、 F 检验数、显著性衡量值 p 和因素相关性检验 r^2 。其中, r^2 表明了各个因素对因变量影响的相关性,该值越大表明因素与因变量的相关性越强。表 11~13 分别为表 5 所提三种方案的双因素方差分析结果,其中方案一满足 $r^2=0.783, p<0.05$, 方案二满足 $r^2=0.782, p<0.05$, 方案三满足 $r^2=0.773, p<0.05$ 。

表 11 方案一方差分析结果

Table 11 Results of test 1 using variance analysis

Source	SS	df	MS	F	p
Distance	0.305	1	0.305	95.588	0
Scattering angle	0.137	4	0.034	10.771	0
Test 1	0.093	5	0.019	5.824	0.002
Error	0.064	20	0.003		

表 12 方案二方差分析结果

Table 12 Results of test 2 using variance analysis

Source	SS	df	MS	F	p
Distance	0.351	1	0.351	110.367	0
Scattering angle	0.134	4	0.033	10.502	0
Test 2	0.095	5	0.019	5.935	0.002
Error	0.064	20	0.003		

表 13 方案三方差分析结果

Table 13 Results of test 3 using variance analysis

Source	SS	df	MS	F	p
Distance	0.392	1	0.392	121.082	0
Scattering angle	0.127	4	0.032	9.808	0
Test 3	0.093	5	0.019	5.775	0.002
Error	0.064	20	0.003		

三张表对比可知:若置信度为 $p<0.05$, 散射角 ($p=0<0.05$) 与组合方案 ($p=0.002<0.05$) 均对因变量图像标准差有显著影响;散射角 F 数值更大且 p 值更小表明中介面高斯成分中高斯散射角的大小对非视域成像起更显著的影响。 $r^2>0.773$ 表明所选因素对图像标准差的影响相关性大于 77.3%。

三种表格的分析方法是分别在三种镜面成分条件下单独分析,并未将镜面成分考虑在内。由图 6 可知镜面成分的改变能够使标准差增加,故将镜面成分同时考虑在内,进行所有因素不同水平下的方差分析,计算结果如表 14 所示,此时 $r^2=0.780$ 且 $p<0.05$ 。

表 14 计算结果表明:镜面成分满足 $p=0.573>0.05$, 推翻了镜面成分对图像标准差有显著影响的假设;高斯散射角仍然是非视域图像质量的主要影响因素。理论上,镜面成分的大幅增加会导致非视域成像成为镜面成像,失去研究意义。因此,本文数据分析结果是在散射中介面镜面成分不大于 5% 时得出的。

表 14 多因素方差分析结果

Table 14 Results of multi-factors using variance analysis

Source	SS	df	MS	F	p
Distance	1.045	1	1.045	423.995	0
Specular	0.003	2	0.001	0.560	0.573
Gaussian and Lambert	0.281	5	0.056	22.776	0
Scattering angle	0.398	4	0.099	40.355	0
Error	0.192	78	0.002		

6 结 论

通过中介面散射特性对视场外目标实施非视域成像的技术近年来受到广泛关注。通过材料表面光学散射理论,提出了将自然界一部分材料的光学散射特性表达为漫反射、镜面反射与高斯散射的组合的假设。基于这种假设,采用计算机仿真方法模拟了中介面与目标表面不同散射特性对非视域成像质量的影响。基于图像标准差评价图像清晰度的方法,多因素方差分析表明,材料散射特性中高斯散射成分对非视域图像的标准差呈显著影响。在确定中介面散射特性情况下,所提非视域成像中的中介面散射分析仿真方法能够为被动非视域成像算法提供先验知识,并能够给出理想非视域目标光信号的传播结果,为实际结果提供参考。对于理想非视域传播信号重构,利用所提方法能够验证实际重构算法的有效性。同时,所提方法能够为非视域成像提供中介面材料选择方案,提供了一种被动非视域成像条件分析方法。

参 考 文 献

- [1] 金欣,王泉宇,杜东宇,等. 散射成像研究现状及展望[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(18): 1811002.
Jin X, Wang X Y, Du D Y, et al. Progress and prospect of scattering imaging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(18): 1811002.
- [2] 高敬敬,刘红林,王歆,等. 毛玻璃和体散射介质的散射等效性对比研究[J]. 光学学报, 2021, 41(17): 1729002.
Gao J J, Liu H L, Wang X, et al. Comparison of scattering equivalence between ground glass and volume scattering media [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(17): 1729002.
- [3] 李修建,唐武盛,衣文军,等. 宽视场远距光学散射成像技术研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(4): 0401012.
Li X J, Tang W S, Yi W J, et al. Review of optical scattering imaging technology with wide field of view and long distance[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(4): 0401012.
- [4] 李国栋,刘月,韩一菲,等. 非视域成像系统的研究现状和发展趋势[J]. 导航与控制, 2020, 19(1): 27-33, 137.
Li G D, Liu Y, Han Y F, et al. Research status and development trend of non-line-of-sight imaging system[J]. Navigation and Control, 2020, 19(1): 27-33, 137.
- [5] Faccio D, Velten A, Wetzstein G. Non-line-of-sight imaging[J]. Nature Reviews Physics, 2020, 2(6): 318-327.
- [6] 杨燕,杜康,武旭栋. 基于改进线性变换的迭代优化去雾算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(6): 0610011.
Yang Y, Du K, Wu X D. Iterative optimization dehazing algorithm based on improved linear transformation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(6): 0610011.
- [7] Ramesh R, Davis J. 5d time-light transport matrix: what can we

- reason about scene properties? [EB/OL]. (2008-03-01)[2022-03-05]. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/67888>.
- [8] Kirmani A, Hutchison T, Davis J, et al. Looking around the corner using ultrafast transient imaging[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2011, 95(1): 13-28.
- [9] O'Toole M, Lindell D B, Wetzstein G. Confocal non-line-of-sight imaging based on the light-cone transform[J]. *Nature*, 2018, 555(7696): 338-341.
- [10] La Manna M, Kine F, Breitbach E, et al. Error backprojection algorithms for non-line-of-sight imaging[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2019, 41(7): 1615-1626.
- [11] Chan S S, Warburton R E, Garipey G, et al. Non-line-of-sight tracking of people at long range[J]. *Optics Express*, 2017, 25(9): 10109-10117.
- [12] 许凯达, 金伟其, 刘敬, 等. 基于激光距离选通成像的非视域成像应用[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(8): 2073-2078.
Xu K D, Jin W Q, Liu J, et al. Non-line-of-sight imaging based on laser range-gated imaging technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2073-2078.
- [13] Xu K D, Jin W Q, Zhao S Y, et al. Image contrast model of non-line-of-sight imaging based on laser range-gated imaging[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(6): 061610.
- [14] Kadambi A, Zhao H, Shi B X, et al. Occluded imaging with time-of-flight sensors[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2016, 35(2): 15.
- [15] Batarseh M, Sukhov S, Shen Z, et al. Passive sensing around the corner using spatial coherence[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 3629.
- [16] Beckus A, Tamasan A, Dogariu A, et al. On the inverse problem of source reconstruction from coherence measurements [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2018, 35(6): 959-968.
- [17] 王雪峰, 张自豪, 陈兴酥, 等. 基于二次相关法的非视域物体定位研究[J]. *激光与红外*, 2022, 52(4): 530-536.
Wang X F, Zhang Z H, Chen X S, et al. Study on non-line-of-sight hidden objects localization based on the quadratic correlation method[J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(4): 530-536.
- [18] Klein J, Peters C, Martin J, et al. Tracking objects outside the line of sight using 2D intensity images[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 32491.
- [19] Saunders C, Murray-Bruce J, Goyal V K. Computational periscope with an ordinary digital camera[J]. *Nature*, 2019, 565(7740): 472-475.
- [20] Sasaki T, Hashemi C, Leger J R. Passive 3D location estimation of non-line-of-sight objects from a scattered thermal infrared light field[J]. *Optics Express*, 2021, 29(26): 43642-43661.
- [21] Lindell D B, Wetzstein G, O'Toole M. Wave-based non-line-of-sight imaging using fast $f-k$ migration[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2019, 38(4): 116.
- [22] Liu X C, Guillén I, La Manna M, et al. Non-line-of-sight imaging using phasor-field virtual wave optics[J]. *Nature*, 2019, 572(7771): 620-623.
- [23] Phong B T. Illumination for computer generated pictures[J]. *Communications of the ACM*, 1975, 18(6): 311-317.
- [24] Torrance K E, Sparrow E M. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1967, 57(9): 1105-1114.

Simulation of Light Scattering and Imaging of Relay Wall in Non-Line-of-Sight Imaging

Fang Yujie^{1,2}, Wang Xia^{1,2*}, Sun Zhibin^{3,4**}, Su Binghua²

¹Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

²Beijing Institute of Technology, Zhuhai, Zhuhai 519000, Guangdong, China;

³National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

⁴University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Objective Applying computational imaging to behind the obstruction or other out-of-sight targets by virtue of relay walls is called non-line-of-sight imaging (NLOS). NLOS technology has great application potential in the fields of medical care, national defense, road safety, and scientific research. It can extend the range of human observation in scenarios where devices or human eyes cannot see. The existing NLOS technologies mainly include transient imaging, range-gated imaging, and passive NLOS imaging. These methods are mostly dedicated for Lambert reflector relay walls, featuring complex system structure, low imaging speed and high cost. However, the common materials in application scenarios are all non-Lambert reflectors. To this end, based on the bidirectional reflection distribution theory on relay wall materials, this paper proposes a material scattering characteristic description method, which realizes light intensity signal tracking and simulation of targets out of sight by configuring different scattering components of the relay wall and conducting massive ray tracing. The simulation work can provide a theoretical basis and experimental basis for the practical application of passive NLOS technologies, and provide a reference for relay wall selection, so it is of practical application significance.

Methods Since there are many kinds of relay walls actually used for NLOS, with quite different scattering characteristics, it is difficult to find a standardized material. Therefore, this paper proposes a material scattering

description model based on the traditional bidirectional reflectance distribution function (BRDF) to define the scattering characteristics by composition. Firstly, it is assumed that the scattering characteristics of relay wall materials are described by a combination of specular reflection, Lambert scattering, and Gaussian scattering, with transmission light and superficial stochastic scattering ignored. Then, different combinations of the scattering components are set separately to image the scattered light spots on relay walls, and the imaging results are evaluated by the standard deviations of the images. Finally, the scattering composition is taken as the independent variable and the standard deviation of the image is taken as the dependent variable, multi-factor analysis of variance is used to quantitatively analyze the impact of the scattering compositions of relay walls on the light signals of targets out of sight.

Results and Discussions In computational imaging of out-of-sight targets by virtue of reflective relay walls, the scattering characteristics of the relay wall and the measured target surface directly affect the imaging results. However, it is difficult to find a relay wall material with standardized scattering characteristics in reality. Therefore, this paper firstly proposes a scattering characteristic description method, namely describing with the composition of specular reflection, Lambert scattering and Gaussian scattering, abstracting the scattering characteristics of materials as scattering components, and simulating the scattering characteristics of different materials through computer simulation. Secondly, by tracking a large number of rays and observing the scattered light spots on the relay walls, it is found that the subjective visual effect of NLOS results is poor when the scattering characteristics of the target and the relay wall are similar. Finally, the images of scattered spots are measured by standard deviation, and a multi-factor analysis of variance is used to analyze the relationship between the scattering composition and the standard deviation of the NLOS image. The experiment suggests that the size of the Gaussian scattering angle has a significant effect on the NLOS imaging quality under low specular reflection composition conditions ($\leq 5\%$).

Conclusions NLOS imaging technology for targets out of sight via relay walls has received wide attention in recent years. This paper proposes a material scattering characteristics description method for non-Lambert scattering relay walls in passive NLOS imaging scenarios and an NLOS simulation method, and analyzes the simulation results by variance analysis. Firstly, based on the material scattering principle, the optical scattering characteristics of some materials in nature are expressed as a combination of diffuse reflection, specular reflection and Gaussian scattering. Secondly, computer simulation is used to simulate the effect of different scattering characteristics of the relay wall and the target surface on the quality of NLOS imaging. Finally, multi-factor analysis of variance suggests a significant effect of Gaussian scattering in the scattering characteristics of the material on the standard deviation of the NLOS images. The proposed analysis method can provide prior knowledge for passive NLOS imaging algorithm under the condition that the scattering characteristics of the relay wall are certain. Besides, it can give an ideal transmission result of the optical signals of an out-of-sight target to compare with the actual result, reconstruct ideal NLOS signals to verify the effectiveness of actual reconstruction algorithm, provide a relay wall material selection scheme for NLOS imaging, and provide an analysis method for passive NLOS imaging conditions.

Key words scattering; computational imaging; optical data processing; imaging analysis