



DeepL

订阅DeepL Pro以翻译大型文件。

欲了解更多信息, 请访问www.DeepL.com/pro。

瞬时非视线成像

论文

兹

授予博士头衔 (自然博士)。

慕尼黑大学数学与自然科学学院
莱茵弗里德里希-威廉姆斯-波恩大学

冯-乔纳森-克莱

因主持
德国锡根

波恩, 2020年12月

由德国波恩弗里德里希-威廉姆斯大学的数学-自然科学院提供。

1. 古塔赫特。Dr. Matthias Hullin教授
2. 古塔赫特。Wolfgang Heidrich博士教授

晋升之日。15.04. 2021

时间 : 2021年

內容

摘要v

Zusammenfassungvii

鸣谢ix

1 简介1

1.1.....	3
1.2出版物清单	4
1.2.1本论文中的	出版物.....
.	4
1.2.2关于非视线成像的	其他出版物
4	
1.2.3关于瞬态成像的	其他出版物
5	
1.2.4其他出版物.....	6
1.3论文纲要	6

2 背景7

2.1间接视觉的	分类法
.....。	8
2.2	
瞬态成像.....。	9
2.2.1 硬件11	
2.2.2 模拟13	
2.3 瞬时非视线.....	成像13
2.3.1 图像形成	模型14
2.3.2 重建18	
2.3.3 挑战20	

3 相关	工作23
3.1 历史	基础24
3.2 重建的	方法26
3.3 杂项	扩展30
3.4 相关	问题30

4 追踪视线外的物体	
使用二维强度	图像35
4.1 简介35	
4.2 结果38	

目 录

4.3 讨论44	
4.4 方法46	
5 非视距成像	问题
的定量平台	49
5.1 简介49	
5.2 技术现状	50
5.2.1 场景设置：三个	漫反射
50	
5.2.2 空间-时间脉冲响应/	设备51
5.2.3 重建任务和	算法51
5.3 挑战	设计52
5.3.1 基本的场景	几何学52
5.3.2 数据单位和	格式53
5.3.3 瞬态图像	生成54
5.3.4 提交54	
5.4 场景55	
5.4.1 材料55	
5.4.2 几何学	重建55
5.4.3 位置和方向	跟踪56
5.4.4 分类57	
5.4.5 纹理	重建58
5.5 重建的	结果59
5.6 讨论和	展望59
5.A 挑战	设计59
5.A.1 设置的尺寸和	几何形状59
5.B 数据	集61

5.B.1 几何学	重建61
5.B.2 位置和方向	跟踪61
5.B.3 对象	分类62
5.B.4 平面	纹理63
5.C Rendering64	
5.C.1 重要性	取样64
5.D 暂时性的	图像文件65
5.D.1 像素解释	块65
5.D.2 图像属性	块66
5.E 比较	指标66
5.E.1 背面	删减67
5.F 工具67	
5.F.1 图像	查看器68
5.F.2 设置	转换器69
5.F.3 快速背投	整合70
5.F.4 传感器型号/	噪音70
5.G 重建的	结果71
5.G.1 几何学	重建71
5.G.2 位置	跟踪71

目录

6 非视距成像	设置的校准方案
73	
6.1 简介73	
6.2 相关	工作75
6.3 方法76	
6.3.1 图像形成	模型76
6.3.2 校准78	
6.3.3 参数化78	
6.4 方法	评价79
6.4.1 评估	设置79
6.4.2 必要的	测量80
6.4.3 实施和	运行时间84
6.5 实验	结果84
6.5.1 校准	结果85
6.5.2 重建的	结果86
6.6 结论88	
6.A 导入SPAD	数据89
6.A.1 距离	提取89
6.A.2 选择有效的	测量方法90
6.B 对象	重建91
6.C 设置	几何92

6.C.1 摄像机	角度92
6.C.2 受约束的镜像.....	放置93
7 结论和	展望95
7.1 影响、局限性和未来.....	工作95
7.2 闭幕词97	
	图表列表
	99
	表格
	列表
	101
	缩略语
	列表
	103
	书目 105

摘要

视觉也许是人类最重要的感官。但是，尽管它使我们能够近乎即时地了解我们的周围，但它有一个基本的限制。如果一个物体被建筑物或汽车等障碍物遮挡，它就可能被隐藏起来。为了揭示它，需要有寻找角落的技术，而这些技术直到最近才通过计算摄影的使用而变得可用。

在最常见的设置中，激光被用来照亮场景中可见部分的漫反射墙，光线可以从那里向隐藏的物体反弹。从物体上，光线被反射到场景的可见部分的墙上，在那里可以被摄像机检测到。通常情况下，相机是一个瞬时成像相机，它可以在时间上解决光在场景中的传播，当它被同步的激光照亮时。然后，这就可以在反射器壁上记录时间性的光线轮廓。漫反射破坏了光从哪里来的大部分角度信息，但保留了时间上的偏移（由光子的旅行时间造成）。

测量的信号是一个三维的瞬时图像，其中隐藏的物体并不直接可见。然而，它确实编码了关于隐藏物体的信息，可以与基于物理的间接光传输模型一起使用，以尝试重建隐藏物体。这种重建是一项具有挑战性的任务，在今天的系统的局限性中变得很明显。因此，它仍然是一个活跃的研究领域，由于其许多潜在的应用，受到学术界和工业界的高度关注。

在这篇论文中，我们解决了一些主要的局限性，以帮助间接视觉领域推进到可用于产品和技术。我们的解决方案是作为一篇累积性论文提出的，包括三篇经同行评审的出版物。

在第一份出版物中，我们提出了一种用于实时跟踪隐藏物体的新方法。到目前为止，设置依赖于昂贵的硬件并需要漫长的重建时间。我们认为，有时拥有关于目标的位置和运动的实时信息比需要几分钟才能获得的更精确的三维重建更为重要。此外，我们使用的通过合成进行分析的方案是可扩展的，可用于不同类型的硬件，包括非瞬时强度的摄像机，如网络摄像机。

在第二份出版物中，我们为前几年发表的多种重建方法提供了一个比较和评估平台。不同研究小组的成果通常来自不同的硬件、场景、重建目标和设置规模。这使得结果难以比较，例如，当两个相机系统有非常不同的信噪比，或者一个场景有更多的困难时。

困难的。在我们的基准中，我们提供了一个统一的测量数据集，允许在相同的输入数据上运行不同的重建算法，也提供了特定领域的评价指标来比较重建结果。

在第三份出版物中，我们提出了一种灵活的校准算法，不依赖任何额外的硬件。为了估计场景中隐藏部分可能存在的光线相互作用，我们使用了关于场景中直接可见部分的知识。捕捉三维场景的方法已经建立，但对额外硬件的要求将进一步增加间接视觉系统的复杂性。我们的校准方法只需要一个额外的家用级镜子，这使得它特别适合于实验室测试阶段，目前的研究进展大多发生在这个阶段。最后，我们提出了一系列的贡献，这些贡献参与了使间接视觉系统作为未来视觉任务的额外基石的全球努力。

归纳总结

Das Sehen ist die vielleicht wichtigste Sinneswahrnehmung des Menschen. 它使我们在我们的周围环境中感到困惑，并在此基础上产生了一种基本的影响。如果一个物体被其他物体所取代，那么这个物体就不能再被发现了。为了让它变得更加清晰，我们需要有一些技术，这些技术是在计算摄影领域（Computergestützte Fotografie）的基础上开发出来的。

Im üblichen Versuchsaufbau beleuchtet ein Laser eine diffus reflektierende Oberfläche (etwa eine Wand) in dem sichtbaren Teil der Szene。从这里开始，光子就可以在所显示的物体上反射，然后再向Wand方向移动，这样就可以从Kamera上看到它们。通常情况下，我们会使用一个瞬时成像相机，它可以将同步的激光器的光照度在画面上放大。因此，我们可以在反射镜上画出光照图。扩散的Reflektio- nen可以减少Winkelinformationen信息的数量(即光照的范围)，而不同的Flugzeiten和不同的Photonen则会被吸收。

这种信号是一种三维的、瞬时的图像，在这个图像中，我们无法直接了解物体。它包含了关于这个物体的一些信息，这些信息可以通过物理学模型的方式用于重新构建。因此，Rekonstruktion是一项非常重要的工作，在现有系统的局限性中也是非常重要的。因此，它是一个活跃的研究领域，由于它具有巨大的应用潜力，不仅对学术界，而且对工业界都有很大的吸引力。

In dieser Doktorarbeit werden im Rahmen von drei begutachteten Veröffentlichungen einige der wichtchränkungen adressiert und das Forschungsfeld der indirekten Sicht so ein Stück weiter in Richtung Produktreife gerückt。

在最初的版本中，我们提出了一个系统，该系统可以在早期的情况下实现虚拟物体的构建。此前，只有在硬件较差、重建时间较长的情况下，才有可能对虚拟物体进行重新构建。我们认为，在某些情况下，要想知道物体的位置和结构的具体信息，就必须有一个完整的三维重新构建的方案。Außerdem ist unser verwendetes Analyse-durch-Synthese-Verfahren vielseitig erweiterbar and kann with vielen Hardwaretypen angewandt werden, darunter auch nicht-transiente Intensitätskameras such as Webcams.

在第二份报告中，我们为您提供了一份评估表，其中包含了以下内容

在过去的一年里，不同的研究机构的研究结果是不同的。不同的研究小组的成果在不同的硬件、软件和系统上都有不同的体现。这使得它们没有可比性，例如，不同的相机会有不同的光照射度，或者一个镜头更复杂，而另一个镜头则更复杂。我们的基准测试提供了大量的数据，这些数据可用于各种不同的算法，也可用于评估，并可用于核查算法的评估结果。

在第四个版本中，我们提出了新的存储方法，没有任何硬件支持。在重新构建物体的过程中，必须考虑到画面中的几何形状。Diese kann zwar mit etablierten methoden erfasst werden, dazu wird jedoch zusätzlich Messhardware benötigt was den Aufbau indirekter Sichtsysteme weiter verteuerert.我们的“自动化解决方案”为我们的客户提供了更多的便利，并在此基础上为劳动者提供了更多的便利。

我们在这份报告中列出了一系列的研究报告，这些研究报告都是为了在世界范围内建立起一个独立的、用于测量技术的系统而准备的。

鸣谢

如果没有许多人的帮助和支持，这项工作是不可能完成的，这些人不应该不提。

首先，我感谢我的家人和朋友，他们为我提供了一个支持性的环境，使我能够完成这样一个规模的项目。

我在波恩大学的研究是由Matthias Hullin教授指导的，他在计划、指导、反馈和实际帮助方面投入了无数时间。在大多数情况下，我的工作是由法国-德国圣路易研究所（ISL）建立的，这是一个富有成效的合作，由Martin Laurenzis博士发起，他也以同样的努力监督了我在法国的研究。额外的资金由X-Rite数字材料外观主席、德国研究基金会（HU2273/2-1）和欧洲研究理事会（ERC Start Grant ECHO）提供。

我在波恩的许多同事已经成为我的挚友，我与更多的人进行了富有成效的交谈或论文合作。我不敢在他们之间划清界限，而只在此提及正式列出的合著者。

在大多数项目中，我们在ISL进行了实验，除了马丁-劳伦齐斯博士，我还得到了埃马纽埃尔-巴切尔、弗兰克-克里斯特纳赫博士、伊夫-卢茨博士、尼古拉-梅茨格和斯蒂芬-谢尔策的大力支持。

我在KAUST的研究由Wolfgang Heidrich教授和Dominik Michels教授指导，我还与王元昊、傅强博士和Thomas Auzinger博士（来自奥地利IST的远程）一起工作。视觉计算中心提供的KAUST基线资金也涵盖了Shaheen超级计算机的使用，该计算机被用来生成合成数据。

最后，我感谢Andreas Kolb教授和他的小组，他们在锡根大学指导了我的学士和硕士论文，为我的博士学位铺平了道路。

鸣谢

第一章

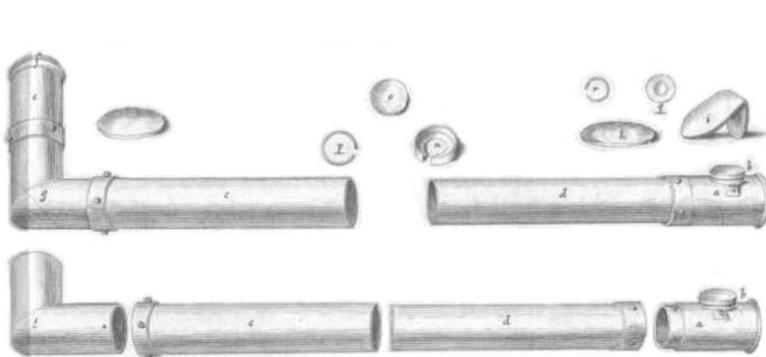
简介

在计算机视觉领域，我们教机器通过光学测量来感知其周围环境。传统的数字摄影仅仅是为了重现二维图像，而计算机视觉则非常强调场景理解和提取更高层次的信息，这些都被用于大量的应用中。三维扫描使机器人能够导航他们的环境，医学成像能够发现骨折和异常组织，物体被增加了条形码或QR标记，以实现快速和可靠的扫描，人工智能算法识别物体和区分人脸，光学制导系统引导导弹，甚至类似科幻小说的技术，如自动驾驶，都主要由计算机视觉实现。

在这篇论文中，我们提出了以非视线（NLA）成像为中心的研究工作。传统的相机系统进行视线成像，图像只包含相机直接可见的场景部分；也就是说，可以通过一条不间断的直线与相机连接的场景点。这导致了三维场景的二维投影，通过这个过程，只有场景中包含的一小部分信息被保留下。位于摄像机视场之外或被其他物体遮挡的一切都不会在图像中看到。

人类的眼睛也有同样的局限性，克服这种局限性的努力可以追溯到8000年前，在现代土耳其的新石器时代定居点发现了已知的最古老的镜子[Eno06]。几千年后，镜子和透镜被用来建造潜望镜（来自希腊语的*Peri*（周围）和*skopein*（看见）），以Nlogo的方式观察物体周围（见图1.1a）。它们在1647年Hevelius的*Selenographia sive lunae descriptio*中被首次描述；然而，他用*Polemoskop*这个词来形容它[Hev47, p. 26]。

虽然潜望镜只能用于观察相对较近（比潜望镜的长度更近）的遮挡物后面的情况，但这一局限性被现代的NLS成像技术所克服。图1.2显示了一个交通场景，由于一栋房子遮挡了视线，司机无法看到骑自行车的人。然而，汽车配备了一个NLG成像系统，该系统将激光束瞄准了第二座房子。光线从那里被反射到场景的隐藏部分（骑自行车的人所在的地方），然后回到墙上，在那里可以被摄像机观察到。值得注意的是，整个系统都是在房子里。



(a)



潜望镜(b)恩培多克勒

图1.1:(a) 潜望镜的各个部分，由约翰内斯-赫维利乌斯在1647年绘制的草图。光线在镜子的引导下通过管子，增加了视线的偏移，从而可以观察物体周围。(公共领域，取自[Hev47])；(b) 希腊哲学家恩培多克勒（约494-约公元前434年），他对视力的本质进行了推理（公共领域，取自[Sta55]）。

汽车，房子作为一个意外的反射器，被视为场景的一部分，而不是成像系统。

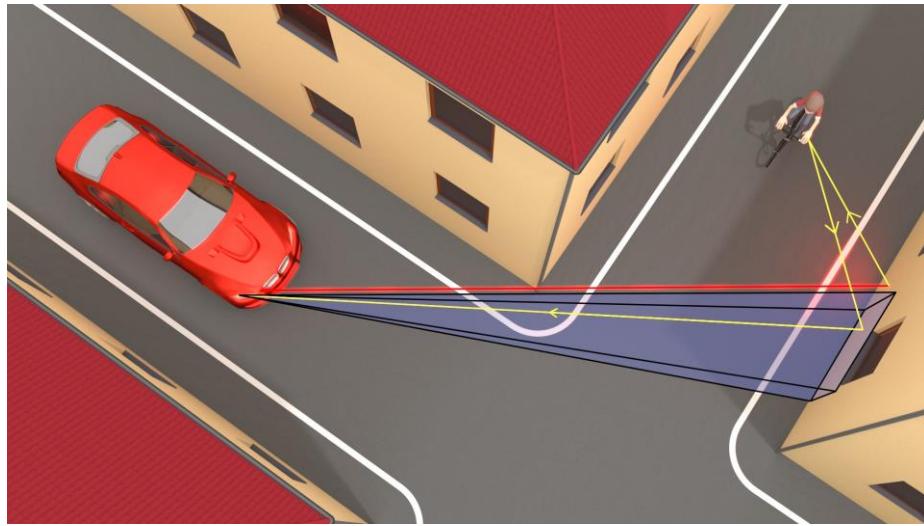
许多NLoS成像系统都是基于瞬时成像，这种技术旨在解决光脉冲在场景中传播的时间延迟。在图1.2中，汽车因此测量了从汽车到房子、骑自行车的人、再到房子、再到汽车的光路长度。当墙面上的不同点被使用时，这个路径长度也会发生变化，隐藏的场景也会根据这些信息被重建。

这种主动成像的方法已经被希腊前苏格拉底哲学家恩培多克勒预示了（见图1.1b）。在他的作品《论自然》（用诗句写成）中，他把眼睛描述为含有火，视觉就是从那里产生的[Bur08, p. 252, 287]。这一理论在Alhazen的《光学之书》中被现代的观点所取代，即光从一个源头走向眼睛[Has21]，但令人惊讶的是，今天仍有许多外行人持有这种观点[Win+02]。在主动成像中，这两个原则被结合起来以扩展传统系统的能力。

本论文中使用的术语NLoS成像，是指试图围绕遮挡物（如潜望镜）进行观察的方法。透过遮挡物观察的方法也存在（例如在医学X射线中），但不在本论文的主要范围内。

NLoS成像领域正在迅速发展，在多个领域的应用中，这种系统将是有益的。随着自动驾驶的出现，如果汽车能够识别出骑自行车的人，并提前启动制动过程，那么在图1.2所描述的场景中的交通安全就会得到提高。在搜索和救援任务中，NLoS成像设备可以用来寻找被困人员并将其救出。同样，在遥感和威胁预防方面也有很多应用。再往下看，利用NLoS成像技术进行内窥镜检查等医疗应用也可能变得可行。

今天，NLoS成像的限制来自于一些主要的挑战。弥漫性



1.1. 贡献

图1.2：非视线范围内的成像。汽车配备了一个激光器（红色）和一个摄像头（蓝色视野）。一面房屋墙被用来将光线反射到场景的隐藏部分（黄色箭头），从而使司机可以“看到”转角处的骑车人。

反射破坏了角度信息，大大削弱了返回信号的强度，反过来又增加了噪音。为了重建任何东西，需要做出强有力的假设，例如假设设置的形状是已知的，隐藏的场景除了物体之外是空的，场景是静态的，材料是已知的，并且整个设置的尺寸是有限的。因此，到目前为止提出的大多数工作更接近于实验室内的概念证明，而不是可用的产品。

1.1 贡献

我们的工作解决了NLoS成像的其中一些主要挑战。

- 特别是在早期，NLoS成像系统往往是缓慢和昂贵的。隐藏物体的实时信息是许多应用的明显要求，如自动驾驶，使用廉价和广泛的组件作为硬件基础有助于广泛使用。在J.Klein等人2016年的文章中，我们提出了一个可以用消费级硬件实时跟踪物体的NLG成像系统[Kle+16]。
- 为了了解NLSO设置的信号特性，合成瞬态渲染是一个非常宝贵的工具。除了判断某种光传输的近似值是否适合给定的应用外，合成效果图也被用作基于机器学习方法的训练数据。

在J.Klein等人2018年的研究中，我们通过一个横向组件扩展了一个基于物理的稳态渲染器，以渲染高度逼真的NLSO图像[Kle+18]。在J.Klein等人2016年的文章中，我们使

用了一个精度较低但速度更快的渲染器来解决逆向问题[Kle+16]。最后，在J.Klein等人的2016年中，我们对瞬态图像进行了深入的分析，以获得对光如何在场景中传播的理解[KLH16]。

- 正在进行的研究导致了大量不同的设置和重建方法。由于新方法通常是在特定研究小组可用的硬件和定制的评估场景上进行评估，直接比较不同小组的重建结果往往是不可能的。因此，我们在J.Klein等人2018年[Kle+18]中提供了一套通用输入数据和评价指标的测试套件。有了这些，来自不同重建算法的结果可以直接比较，并列在一个在线基准中。
- NLoS成像算法通常需要场景的可见部分的几何知识来进行校准。尽管存在广泛的研究和成熟的扫描视线场景的方法，但天真地将这些方法添加到NLAs成像系统中通常需要额外的硬件。因此，在J.Klein等人2020年的研究中，我们开发了一种不需要任何额外硬件的校准方法，可以插入到大量的现有解决方案中[Kle+20]。这种自动校准有助于将系统从实验室环境转移到现实生活中。

1.2 出版物清单

这里我们列出了作者在攻读博士学位期间所发表的所有出版物的清单。

1.2.1 本论文中的出版物

这篇累积性论文的主要部分是由这些经同行评议的第一作者发表的文章形成的。

- Jonathan Klein, Martin Laurenzis, Matthias B. Hullin, and Julian Iseringhausen."A Calibration Scheme for Non-Line-of-Sight Imaging Setups" In:*Optics Express* (2020) [Kle+20]。
- Jonathan Klein, Martin Laurenzis, Dominik L. Michels, and Matthias B. Hullin."A Quantitative Platform for Non-Line-of-Sight Imaging Problems" In:英国机器视觉会议 (BMVC) (2018) [Kle+18]
- Jonathan Klein, Christoph Peters, Jaime Martín, Martin Laurenzis, and Matthias B. Hullin."使用二维强度图像跟踪视线外的物体" 在:《科学报告》 (2016) [Kle+16]。

1.2.2 关于非视线的其他出版物 成像

以下关于NLoS成像的其他出版物要么是合著，要么不是完整的论文或邀请出版物。

- Martin Laurenzis, Jonathan Klein, Emmanuel Bacher, and Stephane Schertzer."Approaches to solve inverse problems for optical sensing around corners" In:*SPIE Security + defense: 新兴安全与防御成像和传感技术IV* (2019) [Lau+19]

1.2. 出版物清单

- Jonathan Klein, Martin Laurenzis, and Matthias B. Hullin."Wenn eine Wand kein Hindernis mehr ist" In: *photonik* (2017) [KLH17]。
- Jonathan Klein, Christoph Peters, Martin Laurenzis, and Matthias B. Hullin."非视线的MoCap" In:*ACM SIGGRAPH新兴技术* (2017) [Kle+17b]
- Martin Laurenzis, Jonathan Klein, and Frank Christnacher."具有先进传感能力的瞬时光成像激光雷达：重建飞行路径中的任意光和转角处的传感" In:*SPIE激光雷达技术与应用* (2017) [LKC17]。
- Martin Laurenzis, Andreas Velten, and Jonathan Klein."双模光学传感：三维成像和看清角落" In:*SPIE光学工程*(2017) [LVK17]
- Jonathan Klein, Martin Laurenzis, and Matthias B. Hullin."用于实时跟踪转角的瞬时光成像" 在:*SPIE电光遥感* (2016) [KLH16]。
- Martin Laurenzis, Frank Christnacher, Jonathan Klein, Matthias B. Hullin, and Andreas Velten."用于非视线视觉的单光子计数研究" In:*SPIE* (2015) [Lau+15a]。
- Martin Laurenzis, Jonathan Klein, Emmanuel Bacher, and Nicolas Metzger."飞行中的光的多重返回单光子计数和短波红外波长的非视线物体的感应" 在:*Optics Letters* (2015) [Lau+15b]。

1.2.3 关于瞬时成像的其他出版物

在瞬态成像的相关领域发表了以下合著的论文。

- Martin Laurenzis, Jonathan Klein, Emmanuel Bacher, Nicolas Metzger, and Frank Christnacher."通过重新激活的成像方法感知和重建任意的飞行中光线路径" In:*SPIE* (2016) [Lau+16]。
- Martin Laurenzis, Jonathan Klein, and Emmanuel Bacher."任意路径飞行的光的成像中的相对论效应" In:*Optics Letters* (2016) [LKB16]。
- 苏树林, 费利克斯-海德, 罗宾-斯旺森, 乔纳森-克莱因, 克拉拉-卡伦伯格, 马蒂亚斯 B.Hullin, and Wolfgang Heidrich."使用原始飞行时间测量的材料分类" In:*IEEE计算机视觉和模式识别会议 (CVPR)* (2016) [Su+16]
- Christoph Peters, Jonathan Klein, Matthias B. Hullin, and Reinhard Klein."解决快速瞬态成像的三角矩问题" 在:*ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH Asia)* (2015)

1.2.4 其他出版物

作为其主要研究重点的延伸，作者还在其他领域发表文章（其中包括 J.Klein 等人，2020 年还没有经过同行评审）。

- Jonathan Klein, Sören Pirk, and Dominik L. Michels."Domain Adaptation with Morphologic Segmentation" In: *arXiv preprint* (2020) [KPM20]。
- Elena Trunz, Sebastian Merzbach, Jonathan Klein, Thomas Schulze, Michael Weinmann, and Reinhard Klein."针织品的逆向程序性建模" In: *IEEE 计算机视觉和模式识别会议 (CVPR)* (2019) [Tru+19]
- Jonathan Klein, Stefan Hartmann, Michael Weinmann, and Dominik L. Michels."使用生成对抗网络的多尺度地形纹理" In: *IEEE 新西兰图像与视觉计算会议 (IVCNZ)* (2017) [Kle+17a]

1.3 论文纲要

本论文的其余部分组织如下。

在第2章中，解释了NLG成像和瞬态成像的理论背景，包括相关的硬件类型、图像形成模型、合成数据生成和基于背投的重建。第三章详细介绍了NolanS成像的历史发展和当前的先进水平，包括对NolanS成像相关问题的讨论。在第四章中，我们介绍了我们使用消费级硬件对隐藏物体进行实时跟踪的方法。在第5章中，我们介绍了我们的NLGoS重建基准，并描述了可用的场景和评估指标。在第6章中，我们介绍了我们对场景的视线部分进行校准的方法，该方法不依赖于任何额外的硬件。最后，第七章讨论了我们的研究在发表后的发展，包括我们的工作已经产生的影响和可能的扩展。

第二章

背景介绍

本章讨论了非视线 (NLoS) 成像的基本思想以及它的理论和实践基础。它首先简要讨论了在更广泛的间接视觉领域的各种其他方法。接下来，介绍了瞬时成像（捕捉光线在场景中的传播）的概念，包括对各种硬件设置的概述。然后，瞬态成像被用作瞬态NLSO成像的基本构件，这也是本论文的重点。

*NLoS成像*一词在整个文献中的使用并不一致，多年来，人们提出了许多变化和替代方案。其中包括（按时间顺序排列）。绕着角落看[Kir+09]，非视线成像[Pan+11]，感应隐藏的物体[Gup+12]，漫反射镜[Hei+14]，和遮挡成像[Kad+16]。然而，NLoS成像已被确定为最流行的一种，因此在本论文中贯穿使用。

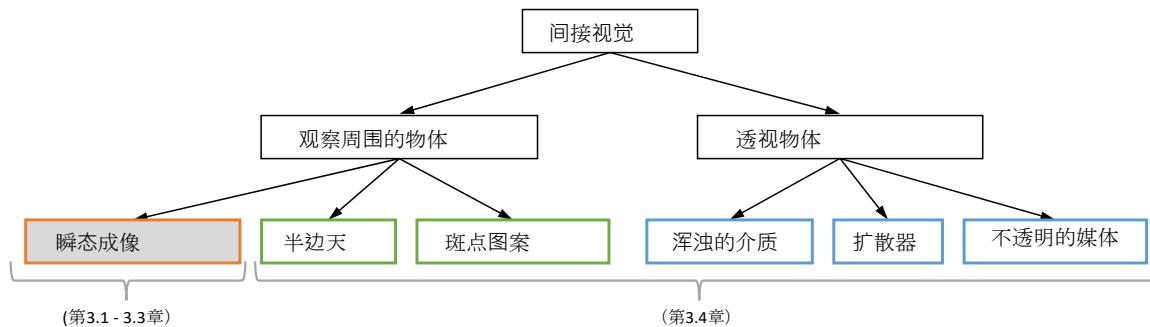


图2.1:间接视觉方法的分类学。本论文主要关注的是基于瞬时成像的物体周围观察。方法的区分遵循不同的维度：测量的时间形状（橙色），测量的空间形状（绿色），以及遮挡物的透明度（蓝色）。

2.1 间接的分类法 视觉

NLoS成像是更大的间接视觉领域的一部分，它涵盖了所有类型的方法来对在某种意义上不直接可见的物体进行成像。在几乎所有的情况下，主动照明（用户控制的光源）被用来实现对测量的更多控制。该领域的分类法如图2.1所示。

当直接视线被阻挡时，可以尝试通过遮挡物或绕过遮挡物进行观察。在第一种情况下，不同类型的遮挡物需要不同类型的重建方法。浑浊的介质，如雾或泥水，会分散主动照明，产生大量的杂散光。虽然有些光可能仍然从相机传到物体上，然后再传回来，但这个信号会被混浊介质的反射噪声所覆盖。Laurenzis等人将其建模为两个信号的叠加，并使用时间门控成像来分离它们[Lau+12]。然而，这种方法需要在混浊介质中的平均自由路径长度很长。

对于像磨砂玻璃这样的扩散体，从物体到相机之间（几乎）不存在自由路径，所有的信号都被扭曲了。如果扩散体相当薄，其失真就类似于漫反射，所有的角度信息都会丢失，但一些空间变化仍然存在。因此，这种情况类似于NLoS成像，在这种情况下，扩散体扮演着中继墙的角色，类似的算法可以用来重建物体（更多细节见第3.4节）。

最后，一些不透明的物体，如煤渣，在非可见的波长（如无线电波）中是透明的，使用适当的波长，通过它们成像成为可能[KM17]。这种方法可能是外行人最熟悉的医学X射线。

对于遮挡物周围的成像，人们已经提出了大量的设置和方法。在大多数设置中，来自隐蔽物体的光学信号通过漫反射器（如图1.2中的房子）反弹到达相机，由于漫反射的性质，它将破坏所有的角度信息（即光线在反射前从哪个方向到达）。

除了一些在纯强度数据上工作的方法（比如我们自己在第四章的工作），失去的角度信息被一些其他类型的信息所取代，这些信息可用于重建。当光源发出相干光时，反射器上形成的斑点图案取决于相对相位差，并编码了可用于重建的场景的几何信息。同样，隐藏场景中的遮挡物使物体只能从反射镜壁的一部分看到，因此测量半影（半影）的多个位置可以提供关于光线来源的线索。因此，使用相干光和在场景中增加遮挡物都会在测量信号中产生额外的空间细节。这两种方法的一些例子将在第3.4节讨论。

最后，最受欢迎的选择和本论文的重点是使用瞬时成像，它为强度测量增加了一个以光速为尺度的额外时间维度。由于光可以从不同距离的许多地方到达反射器上的同一个点，这个时间维度被测量为瞬态直方图，描述了在每个时间点上有多少光到达。虽然空间维度的



这里也使用了信号（因为瞬时直方图在不同的空间测量位置是不同的），空间分辨率通常比基于斑点或基于闭塞的方法低得多。

在本论文的其余部分中, 如果没有特别说明, NLoS成像代表的是使用经纬仪成像的闭塞物周围成像。

2.2 瞬态成像

瞬态成像是一个总称, 指的是测量光到达传感器的时间的各种方法。

由于光速是有限的, 当一个光源被打开时, 一个场景不会立即被照亮。相反, 不同的物体被照亮的顺序是它们与光源的距离, 因为光在场景中旅行。这个过程的时间尺度非常小(大约每30厘米1纳秒), 在正常的成像应用中, 它通常被忽略。然而, 在瞬态成像中, 目标是记录和利用这一效应。

Abramson的工作被普遍认为是第一个瞬态图像, 他用全息图的方法记录了一个被镜子部分反射的波前[Abr78]。最近, Velten等人使用条纹相机和飞秒激光器, 记录了光在塑料瓶中传播的高分辨率视频[Vel+13]。

由于正常的光源(如蜡烛或天花板上的灯)会发出连续的光子流, 对于这些光源来说, 不同的路径长度是无法区分的。因此, 瞬时成像通常依赖于一个与探测器同步的光源, 这两者形成一个单一的主动成像系统。

图2.2显示了两个瞬时图像的例子。在这两个例子中, 光源用一个短脉冲照亮了场景, 并被放置在靠近摄像机的位置, 这使得第二个场景中的汽车投下了一个可见的阴影。然后, 瞬时图像可以被认为是光在场景中传播的一个视频。

在角落场景中, 光线沿着墙壁向角落传播(图2.2c), 这是场景中离摄像机最远的一点。在d) 到f) 中, 墙壁之间的反射是可见的; 由于路径长度较长, 它们有明显的延迟。在g) 和h) 中, 只有高阶反射是可见的, 而且场景中靠近墙壁交叉点的地方表现出某种余晖。这在b) 的直方图中也是可见的, 其中强度的下降比开始时的上升要长得多。

在第二个场景中, 增加了一个复杂的汽车模型, 大大增加了相互反射的数量。值得注意的是, 汽车的影子(在a) 的强度图像中最明显)出现在主波前(在f) 和g) 中看到), 但在h) 的间接反射中没有。

对于光源不与相机重合的场景, 波的表观速度不一定与光速一致, 而是超光速或亚光速[LKB16]。这种视错觉常常使人们对瞬时图像的理解容易产生误解。

Jarabo等人在2017年[Jar+17]中对瞬时图像的最新进展进行了更详尽的处理。

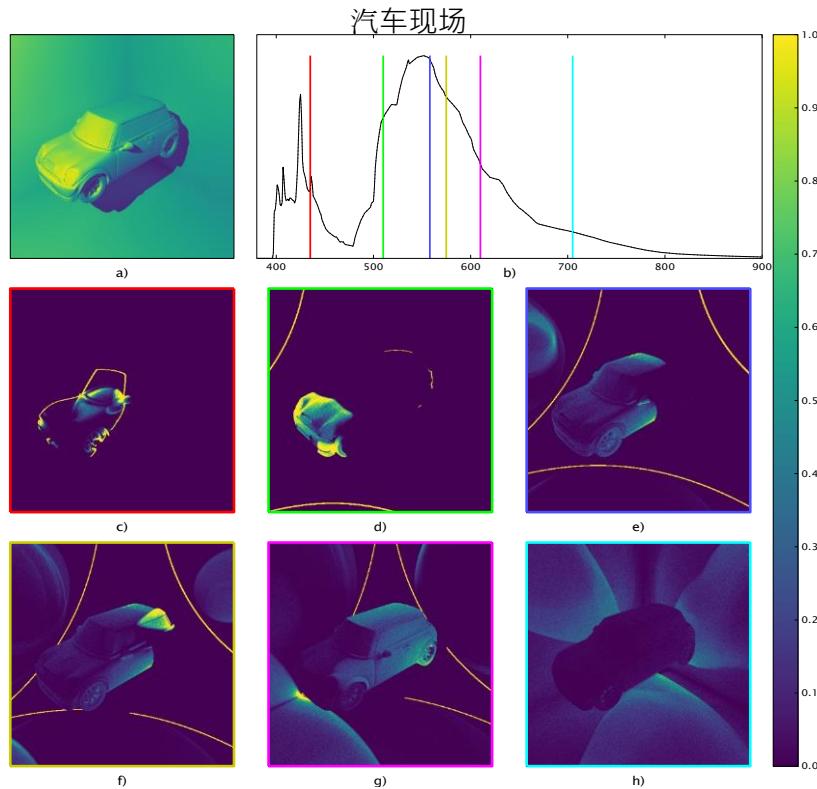
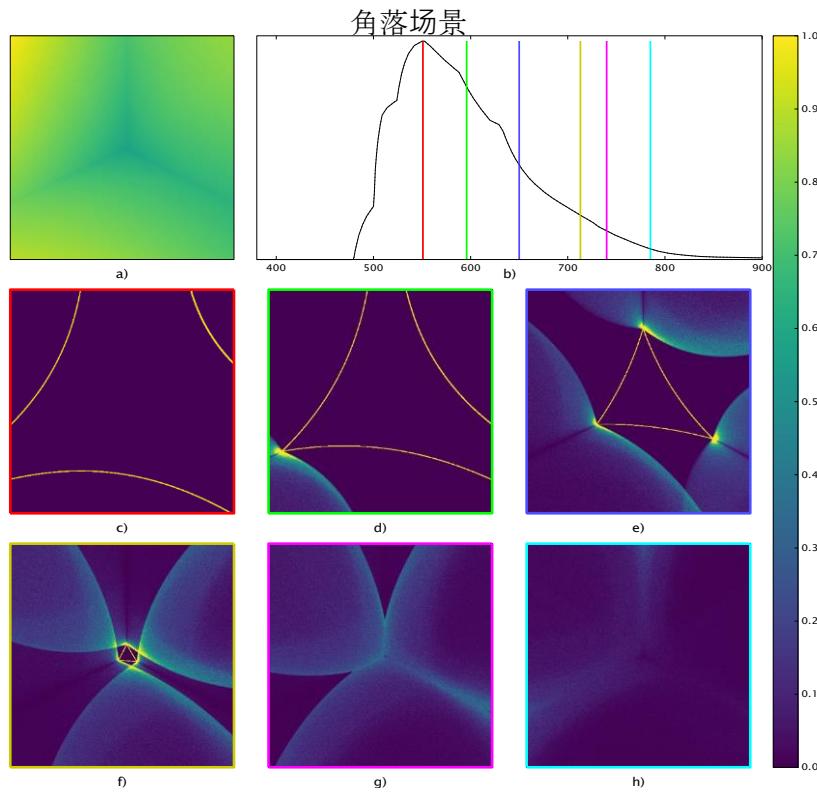


图2.2:a) 场景的强度图像。b) 带有帧标记的场景瞬时直方图。c)-h)直方图中标记的时间的瞬时图像的6帧。(该图先前发表于[KLH16])

2.2.1 硬件设施

有许多硬件平台可用于测量瞬态图像。重要的特征是时间分辨率、捕获速度、外形尺寸、噪音水平和价格。

时间门控摄像机

时间门控相机是一类由脉冲激光和时间门控探测器组成的硬件设置。探测器的快门速度在纳秒级，可以用不同的硬件组件来实现，如克尔电池[Kal+93]，ICCD[BH04]，或EBCCD[Wil+95]。激光器的脉冲长度和探测器的快门决定了系统的时间分辨率。由于光的过滤取决于它的移动距离，这种成像方式通常被称为范围门控成像。

自20世纪60年代以来，人们一直在研究测距门成像[Gil66; SS69]。一个突出的用例是通过浑浊的介质成像（如潜艇在泥水中或汽车在雾中行驶），在这种情况下，测距门可以用来消除漂浮在感兴趣的物体前面的颗粒的杂光。这大大增加了对比度，并可将可见范围扩大2至3倍[LV14]。

在默认操作模式下，记录的图像与其说是时间分辨率，不如说是时间裁剪。但是通过在一系列的测量中扫描门的时间，在一些后处理之后，可以检索到时间分辨率的图像[BH04; And06; LCM07]。

潸然泪下的摄像机

条纹相机在二维图像传感器上记录具有一个空间维度和一个时间维度的图像，方法是在捕捉时间的过程中在传感器上涂抹一条一维线[Ham08]。场景被一个超短的光脉冲所照亮。在相机内部，传入的光子撞击光阴极并释放出电子，这些电子被一个时间变化的电场所偏转，因此早期的电子走向传感器的顶部，晚期的光子走向底部。尽管这个过程只允许捕捉单一的扫描线，但所实现的时间分辨率一般来说比大多数其他系统要高。完整的二维图像可以通过扫过场景的扫描线并结合单个测量结果来记录。然而，这需要仔细的校准，并可能大大增加整个捕获时间，这取决于所需的分辨率。

Streak相机是最早用于NLoS成像的相机[Nai+11; Pan+11; Vel+12]。然而，由于其价格高，操作速度慢，很快就考虑了替代方案。

AMCW激光雷达

振幅调制连续波（AMCW）激光雷达（Light Detection And Ranging）用连续波照亮场景，其振幅按场景的比例调制。在传感器上，传入的光与来自光源的参考调制信号相关联。通过一些后处理，可以确定入射光的相位。

相关飞行时间 (ToF) 传感器 (如光子混合器 (PMD)) 是一种激光雷达技术，它允许廉价的多像素传感器，其像素数高达 40,000，用于依赖性的平行测量 [Sch+97]。它们主要用于范围成像 (如微软 Kinect v2 相机)，因为它们不能直接测量完整的瞬时图像。然而，当不同频率的多个测量值被结合起来时，可以区分出单个路径 [Kad+13; KBC13; Dor+11]，甚至可以得到完整的瞬态图像 [Hei+13; Pet+15]。

尽管已经提出了一些使用AMCW相机的NLoS相关工作 [Hei+14]，但直接测量瞬时图像的困难使它们成为一个有点不受欢迎的选择。然而，作为广泛使用的消费类硬件，它们又小又便宜。

SPAD

单光子雪崩二极管 (SPAD) 包含了单光子引发电子雪崩的光电二极管 [Zap+07]。虽然在概念上与雪崩光电二极管相似，但它们的工作电压高于反向偏置击穿电压。在这种所谓的盖革模式下，二极管的反应不再是线性的，而是指数的，这导致了极高的灵敏度和记录单个光子的能力。在捕捉过程中，场景被来自激光的超短光脉冲照亮，这与像素中的时间计数器同步。计数器在激光被触发时启动，在检测到第一个光子时停止，因此记录了飞行的时间。由于光子仅以一定的概率被检测到，重复测量会产生完整的瞬态直方图。然而，在每次测量中，每个像素只能检测到一个光子，此后在剩余的测量时间内保持沉默。这意味着后来到达的光子会被早期的光子所掩盖，最终导致直方图与实际强度值不成正比 [HGJ17]。通过几十万的帧率，可以在几秒钟内捕获具有合理噪声水平的瞬时图像。

SPADS 通常有单像素传感器 [RGH09]、一维传感器 [BBC17] 或二维传感器 [Bur+14]；然而，它们的分辨率明显低于传统 CCD 传感器。它们首先由 Buttafava 等人使用，很快成为 NLoS 成像的一个流行工具。

如今，单像素的 SPAD 已经便宜到可以在各种消费类硬设备中找到，它们通常被用作接近传感器 [STM20]。

其他硬件

除了瞬时照相机之外，还有其他的硬件设置，可以测量某种形式的时间分辨率数据。AMCW 激光雷达的基本原理是受雷达系统 (RAdio Detection And Ranging) 的启发，该系统在第二次世界大战期间开发，至今仍然是最常见的测距系统之一 [Ric14]。同样，在声纳系统 (SOund NAVigation Ranging) 中，声波被用来测量距离，特别是在衰减较弱的水下情况下 [Uri83]。然而，这些系统测量的是离散脉冲的时间差，而不是连续波之间的相移。

2.2.2 仿真度

合成的瞬态图像可以通过模拟创建。这提供了几个优点，如对场景的精确控制，没有相机噪音（如果没有明确的模型），以及更便宜的成本，因为不需要硬件。

由于瞬态图像是传统强度图像的超集，它们可以用类似的算法进行计算。这种基于物理的渲染算法已经得到了很好的研究，目前正在研究的主要集中在性能改进或特殊情况下。

作为一个突出的例子，路径追踪是一种解决渲染方程的通用渲染算法[Kaj86]，并且很容易通过跟踪路径长度扩展到输出瞬时图像（见2.3.1节）。然而，额外的时间维度带来了一些困难。它不仅增加了输出尺寸，从而线性扩展了所需的样本量，而且也很难直接采样[PVG19]。

瞬态渲染是由A. Smith, Skorupski和Davis首次提出的[SSD08]，随后被其他不同的小组改进[Jar+14; PVG19; SC14]。一些工作还包括模拟相机传感器以产生真实的合成测量[Kel+07; LHK15; MNK13]。

在我们自己的工作中，我们通过一个瞬态组件扩展了*pbrt*（Pharr、Jakob和Humphreys[PJH16]开发的基于物理的射线追踪器），并实施了一个新的重要性采样策略，专门针对NLSO成像设置（见第五章）。

瞬态图像的模拟也可以实现逆向问题的解决。在许多情况下，可以利用设置的受限几何形状来推导出更多的efficient渲染器。例如，如果只有一组非常有限的可能路径，就不需要完全的路径追踪。另外，为了找到一个合适的解决方案，往往不需要完全的照片逼真度，这就可以进一步提高速度。这方面的例子可以在我们自己的工作中看到，见第四章。

2.3 瞬时非视线成像

在这里，我们涵盖了瞬态NLSO成像的基本原理。下一章将讨论过去几年中提出的各种扩展。

Kirmani等人[Kir+09]首次提出了使用中继表面（最常见的是漫反射墙）来反射光线进入和离开隐藏场景的想法，通常被称为3-bounce设置（因为光线被墙、隐藏物体和墙再次反射）。它被描绘在图2.3a中，几乎被普遍用于瞬时NLAs成像。

由于通常假设墙壁是漫射的，角度信息通过反射被破坏。通过使用时间分辨（瞬时）测量，角度信息的缺乏在某种意义上被额外的时间信息所抵消，可以尝试进行重建。

3-bounce设置有几个假设，例如，有许多潜在的光路比图2.3a中描述的要多。在介绍完符号后，我们将讨论如何对NLSO场景中的光传输进行建模，以及如何从瞬时测量中重建隐藏场景。

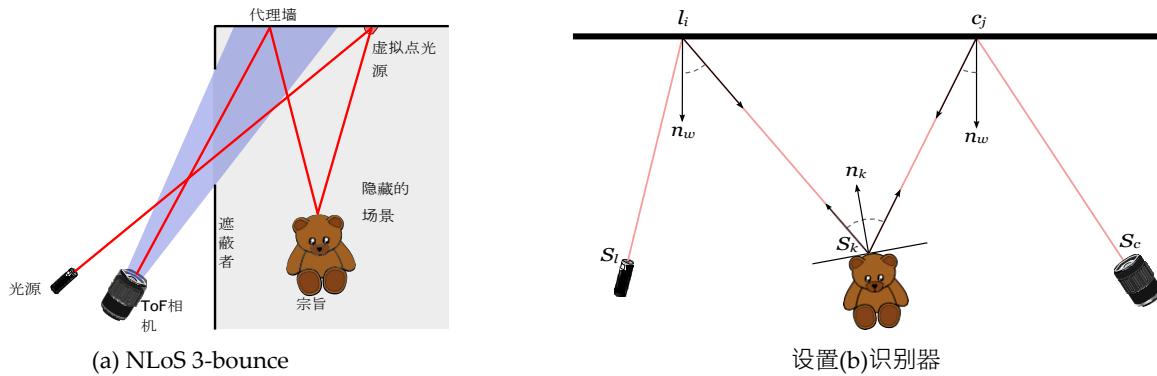


图2.3：a) 光线从激光器到墙壁，被反射到隐藏的场景，从隐藏的物体上反弹，最后被墙壁再次反射到摄像机。
b) 沿着光路的位置和法向量的命名方法。

记号

图2.3b只显示了从光源（通常是激光）到相机的单一光路。

我们用 S_l 和 S_c 来表示激光器和摄像机的物理位置。然后我们把激光点在墙上的位置称为激光点 l ，把单个摄像机像素的投影称为摄像机点 c 。由于单个光路在实践中并不适合于重建[Ped+17]，所以通常使用振镜等工具来用激光扫描墙上的多个点。摄像机也可以同时观察多个位置（如果它包含一个像素阵列），或者对单像素摄像机使用类似的扫描技术。然后我们就有了一整套激光和墙面的点，表示为 l_i L和 c_j C。墙面通常有一个恒定的法线，表示为 n_w ，如果没有，则相应增加索引。隐藏的物体在位置 S 。通常，该物体不是一个单一的点，而是由有限数量的点组成的流形。我们把这些点称为 S_k ，它们的法向量为 n_k 。

根据定义，L和C是可见场景的一部分。考虑到硬件相对于墙的位置的校准，激光和墙之间的距离 S_l l_i ，以及墙和摄像机之间的距离 c_j S_c 可以计算出来，并从瞬时测量中删除。这些内部距离与硬件位置无关，从而简化了后期的重建。由于在这个过程中没有任何信息丢失，默认情况下，所有的测量值都以这种方式进行归一化。

2.3.1 图像形成模型

一般场景中的光传播是一个经过充分研究的课题，其模拟是计算机图形学研究的主要焦点。描述光传输的两种最常见的方法是射线模型和波浪模型。前者计算速度较快，但通用性较差，而且没有建立诸如衍射等效应的模型，而衍射只有在使用波浪模型时才能实现。

对于光线模型，渲染方程[Kaj86]给出了对光线在场景中传播的一个非常普遍的描述。

在下文中，我们将从一般的光照中推导出NLoS图像形成模型。

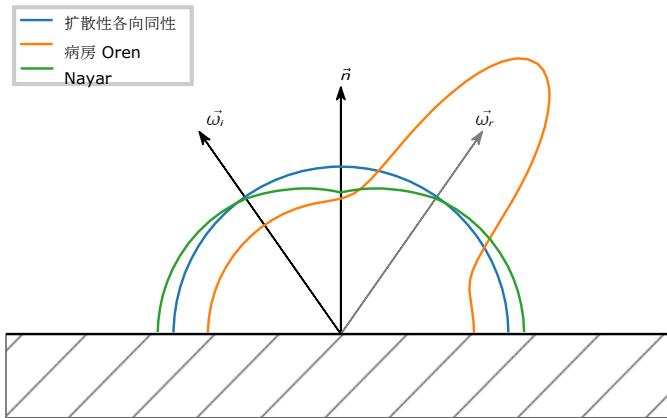


图2.4：对于固定的入射矢量 $\vec{\omega}_i$ 和法线矢量 \vec{n} ，绘制了各种BRDF模型。灰色矢量 $\vec{\omega}_r$ 显示了完全镜面反射的方向。
蓝色。完全漫反射（Lambertian）模型。橙色。各向同性的Ward模型[War92]，具有强烈的镜面反射成分。绿色。Oren-Nayar模型[ON94]，与漫反射BRDF相比，它在平坦的角度上表现出较慢的下降。

传输理论。这不仅给出了一个数学公式来更有效地处理NLSO光传输，而且还使各种假设和近似值变得清晰。光传输模型包括一个局部部分（材料模型）和一个整体部分（由渲染方程描述）。

材料模型

现实世界的材料会影响物体反射光线的方式。在计算机图形学中，这种影响通常由所谓的双向反射分布函数（BRDF）来模拟[PJH16, p.348]。BRDF描述了从入射方向 ω_i 向出射方向 ω_r 反射的光的比例，因此是一个四维函数（每个方向有两个角度）。通常它被表示为 $f(\omega_i, \omega_r)$ 。

存在一些变化，例如，功能也可以取决于位置，或波长，甚至建立次表层散射模型。这些扩展进一步增加了维度的数量，因此更简单的模型更常被使用。

图2.4显示了3种常见的BRDFs的径向图。请注意，在这些图中， ω_i 和 ω_r 位于同一平面内， ω_i 是固定的，这导致这些图是一维的。对于基于物理的BRDFs，如果材料不吸收光（并将其转化为热量）或本身不发射光，那么反射光的总量应该等于入射光的总量。因此，有镜面成分的材料，如图2.4中的Ward BRDF，与完全漫反射的BRDF相比，在镜面亮点以外的方向上反射的光必须更少。

渲染方程

渲染方程描述了场景中的整体光传输。它首先由Ka-jiya[Kaj86]提出（Immel等人[ICG86]也采用了类似的形式），计算辐射度（the radiance）。

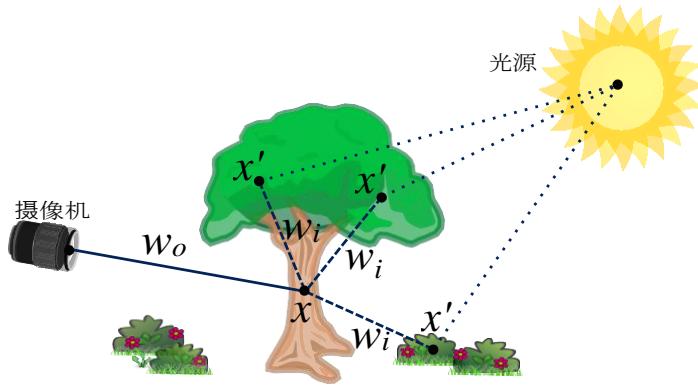


图2.5：渲染方程的说明。由 x 点反射到相机的光线取决于场景中所有其他点 x' 的反射'，而不仅仅是太阳本身。

场景点向某一方向发射或反射的单位投射面积的功率)。

$$L(x, \vec{w}) = L_o(x, \vec{w}_o) + \int_A g(x, x') f_i(x', \vec{w}_i) L(x', \vec{w}_i) \frac{\cos \theta_o - \cos \theta_i dA'}{\|x' - x\|^2} \quad (2.1)$$

这里

- $L_o(x, \vec{w}_o)$ 是 x 点在方向 \vec{w}_o 的出射辐射度。
- L_e 是从表面发出的辐射度。
- L_i 是来自另一个场景点的入射光度。
- x 和 x' 是场景中表面上的点。
- $g(x, x')$ 是模拟 x 和 x' 之间潜在遮挡的几何项'。
- θ 是 x 点的法向量与 \vec{w} 之间的角度，以及
- f_x 是 x 点的BRDF。

图2.5显示了点 x 和 x' 以及方向 \vec{w}_o 和 \vec{w}_i 的作用。在一个局部光照模型中， L_o 只取决于 x 的表面和光源，（例如：太阳）。然而，这忽略了场景中其他部分的影响。在图中，点 x 是在阴凉处，但接受来自其他树叶和附近物体（表示为 x' ）的反射光。这些物体接受来自太阳的直接辐射，但也接受来自场景中其他部分的辐射。一般来说，场景中每一个点的辐射度都取决于场景中的其他每一个点，具有无限的递归性。

几何学术语 g 被用来模拟场景中的遮挡。如果从 x' 不可见， g 为0，否则为1。 x 处的入射光度也取决于与 x' 的距离（反平方定律[PPP93, 第12页]）和表面的相对方向（兰伯特余弦定角[PPP93, 第13页]）。

计算 L_o 的结果是一个无限的递归，对于所有非琐碎的场景都必须进行数值近似计算。像光线追踪和路径追踪这样的算法可以被看作是渲染方程的近似解算器[PJH16, p. 12]。

虽然非常普遍，但渲染方程仍有一些局限性，其中一些是。

- 作为一个射线模型，波的效应，如衍射，并没有被建模。
- 它假定两个表面点之间是自由空间，不包括体积散射[PJH16, p. 671]。
- 它只描述了光的传输而不是成像硬件。因此，模拟实际测量装置的输出需要额外的硬件模型。

NLoS光的传播

作为一般场景的一个子集，NLoS成像场景中的光传输是由渲染方程描述的。然而，在3个弹跳设置的典型假设下，传输模型变得相当受限，这就允许有一个更简单的表述。

图2.3b显示了3个弹跳装置中的一个单一光路。这里，相机位置 S_c 的入射辐射度被计算为

$$L_c \vec{S}_c = L_e S_l \vec{S} l l - \sum_k \cos \vec{s}_k, n_w - f_w \vec{s}_k, \vec{S}_c \\ \cdot \cos \vec{s}_k, n_k - \cos \vec{s}_{kl}, n_k - f_{S_k} \vec{s}_{kl}, \vec{S}^{kc} \\ \cdot \cos \vec{s}_k, n_w - f_w \vec{s}_l, \vec{S}^k \\ \frac{1}{l S_k} \frac{1}{S_k c} \quad (2.2)$$

方程2.2是通过一些假设从方程2.1得出的。

- 只有一个激光点 l 同时被照亮。激光聚焦在 l 上，所有在 S_l 发出的光都在 l 上反射。因此 l 可以被认为是场景中唯一的、点状的光源。
- 由于激光束是聚焦的，距离衰减不适用于 $S_l l$ 。
- 在现实中，相机像素会在投影像素中心 c 周围的一个小区域内进行整合，而像素的读出量将是这个区域的平均值。此外，距离的衰减和投射像素的面积相互抵消，墙面在每个摄像机距离上都有相同的亮度。
- 场景只由反射墙和隐藏的物体组成。物理激光器和摄像机不与光的传播相互作用，而只是充当光源和汇。没有其他墙壁，没有地板，也没有天花板。

- 物体被离散在一组离散点S中。（这将积分变成了一个有限的和）。
- 从l或c不可见的表面点被排除在S之外。
- 物体上没有相互反射（即没有光路 $S_a S_b$ 。要么是因为物体是凸的，要么是因为它们被忽略了。）
- 物体和墙壁之间的距离非常大，因此高阶反射（墙壁物体墙壁）的贡献非常小，可以被忽略。
◆

这些相当强的假设打破了方程2.1的无限递归，对于l和c的每个组合，只留下物体表面的有限总和。如果物体是点状的，只有一条具有唯一长度的路径，可以进行直行位置检测（见2.3.2节）。

对于真实的测量，上述假设都不能完全满足。有时可以通过设计实验来更好地满足它们（例如用黑色材料覆盖场景的地板和后墙，以避免背景散射），有些算法对这些假设的依赖程度较低（例如基于机器学习的方法，见第3.2节），但否则这些差异会使重建结果恶化。

2.3.2 重建

多年来，人们提出了多种多样的NLoS重建方法。在这里，我们讨论了一些理论基础，并回顾了一个简单的重建方法，以建立一些直观的基础，然后在第三章讨论更多的算法和它们的差异。

所有的重建算法都以瞬态图像作为输入，但可以有不同形式的输出。根据输出的参数化，重建了不同类型和数量的细节。图2.6显示了一个包含汽车的场景的例子，它以三种不同的方式表示。体积、高度图和已知形状的物体的刚性变换（位置和方向）。前两种是完全几何重建的不同实例，而后一种则发生在物体跟踪方法中。

不同的参数化有不同数量的自由度（DoF），根据经验，需要确定的自由度越多，重建问题就越难。在实践中，选择往往取决于应用。在traffic场景中，只知道隐藏车辆的位置和速度可能比它的形状更重要，而其他应用，如远程观测，可能需要完整的几何重建来识别物体。参数化还可能包含其他场景属性，如材料。

一些奇特的参数化也被使用，例如Tsai等人将一个已知物体的表面参数化，以增加更精细的表面细节[TSG19]。

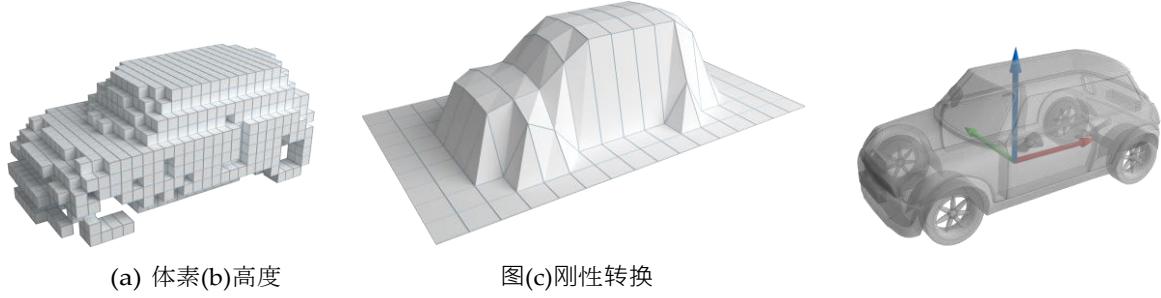


图2.6：用不同的自由度（DoF）进行不同程度的重建。a) 体素网格，>10.000 DoF。（该图先前发表于[KLH16]）

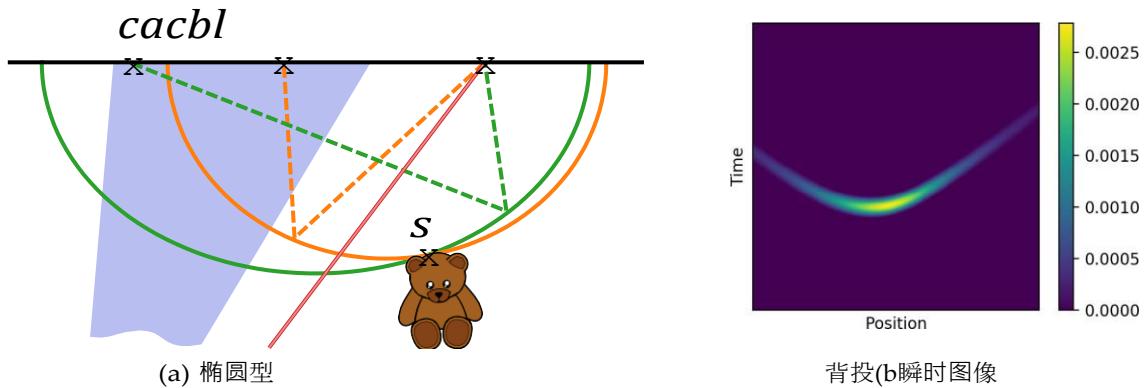


图2.7：背投原理。a) 一条长度在l和c之间的恒定路径的所有可能反射点都位于一个椭圆体上。这个反射点是所有椭圆体的交点。b) NLoS场景的瞬时图像，显示了光线在不同时间从一个反射点到达墙壁的不同部分。有限的分辨率抹去了抛物线的形状。

背面投射

NLoS重建的基线算法是椭圆体背投。该算法最初由Velten等人提出[Vel+13]，在过去的几年中被许多出版物所采用和改进（见第三章）。由于它的简单性，它很适合让人们直观地了解如何将瞬时图像的时间信息用于NLA重建。

其基本原理如图2.7a所示。考虑到来自如图2.3a所示的装置的瞬时测量，每个归一化测量的光 C_i 和 L_j 来自椭圆体上的某处，其焦点是 C_i 和 L_j （因为根据定义，椭圆体是导致相同旅行时间的所有点的集合）。对于一个理想的点状物体和完全精确的测量，C和L的任何组合的椭圆体都相交于同一点，这就是该物体的位置。在实践中，时间和空间分辨率是有限的，对于每个相机点，光到达的时间略有不同，如图2.7b的瞬时图像所示。每个非零像素比对应一个椭圆体，隐藏的场景被离散成一个体素网格，其中每个椭圆体被反推，将它们的贡献相加。通过将所有相应的瞬态图像反投影到同一体素网格中，可以使用多个激光位置。体素网格被解释为一个概率图，物体位于其最大值处。通过对概率图进行阈值处理，也有可能检索出物体的大致几何形状。由于模型没有处理像相互反射或遮挡这样的影响，几何重建的质量是有限的。

2.3.3 挑战

到目前为止，NLoS成像仍然是一项新兴技术，没有可用的终端用户产品。它几乎只在实验室环境中被证明（有一些例外[Sch+20; LWO19]），而且发展被一些内在的挑战所拖累。

- 漫反射会破坏角度信息。然而，这种“限制”正是引发整个研究领域的初衷，因此我们的目标是绕过它（通过寻找不需要角度信息的算法），而不是解除它（通过简单地使用镜子而不是漫反射墙）。
- 由于多次漫反射，光照度非常低。公式2.2显示，如果隐藏的物体与墙的距离为d，则光照强度与d成正比 $^{-4}$ ；明显降低。使用对眼睛安全的红外光，可以在一定程度上增加照明功率，但在实践中，场景的大小仍然是有限的。虽然低光照度不会直接破坏信号，但它们会大大增加噪音，而且还很难从背景光中区分出NLA信号。
- 尽管瞬态成像硬件正变得越来越广泛（甚至智能手机也配备了单SPAD像素[STM20]），但瞬态成像硬件仍然比传统相机更昂贵，更不容易获得，尤其是在需要高时间或空间分辨率时。

2.3. 瞬时非视线成像

- 为了进行重建，必须知道设置的可见部分。这就增加了一定的校准开销，这在传统成像中是不存在的。

第三章

相关工作

NLoS成像研究从一个简单的想法发展成为一个多样化的研究领域。人们一直在努力改善问题的各个维度，如重建质量、捕捉和重建速度、设置限制等等。目前的方法通过改善一个维度而牺牲另一个维度的性能，在这些方面进行折衷，或者它们允许解决一个特殊情况，特别好。

如今，NLG成像领域由大量具有不同程度影响的个人出版物组成。本章旨在简要讨论我们认为最有影响的内容。为了解决各个层面的问题，我们努力将类似的出版物进行分组，并探索每一个出版物的历史发展。此外，选择的重点是使用瞬时图像的NLoS方法（见图2.1）。虽然我们简要地提到了一些不在这个重点范围内的出版物，但在Maeda等人[Mae+19]中可以找到一个更彻底的概述。

NLoS系统尺寸

图3.1显示了描述NLoS系统的各个维度（分为性能特征和实施方面）的概况。性能特征是对实际应用的关注，而实施方面则是对学术发展的描述。

重构的信息 不同的应用需要从场景中获得不同类型的信息。正如第2.3.2节所述，有些信息比其他信息更容易重建。**支持的材料** 重建算法中的图像形成模型决定了哪些材料类型可以被重建。最常见的情况是扩散的物体。

场景的复杂性 所支持的场景复杂性对可能的用例施加了强烈的限制。追踪的一个常见假设是，场景由一个单一的、点状的物体组成。平面场景产生的重建问题比较简单，而部分遮挡（一些场景点只在特定的 c_i 和 l_j 组合中可见）则特别难。

可行性 大多数设置只在小型（房间大小）的室内环境中进行了演示。不受控制的环境（尤其是室外）会产生大量的噪音。

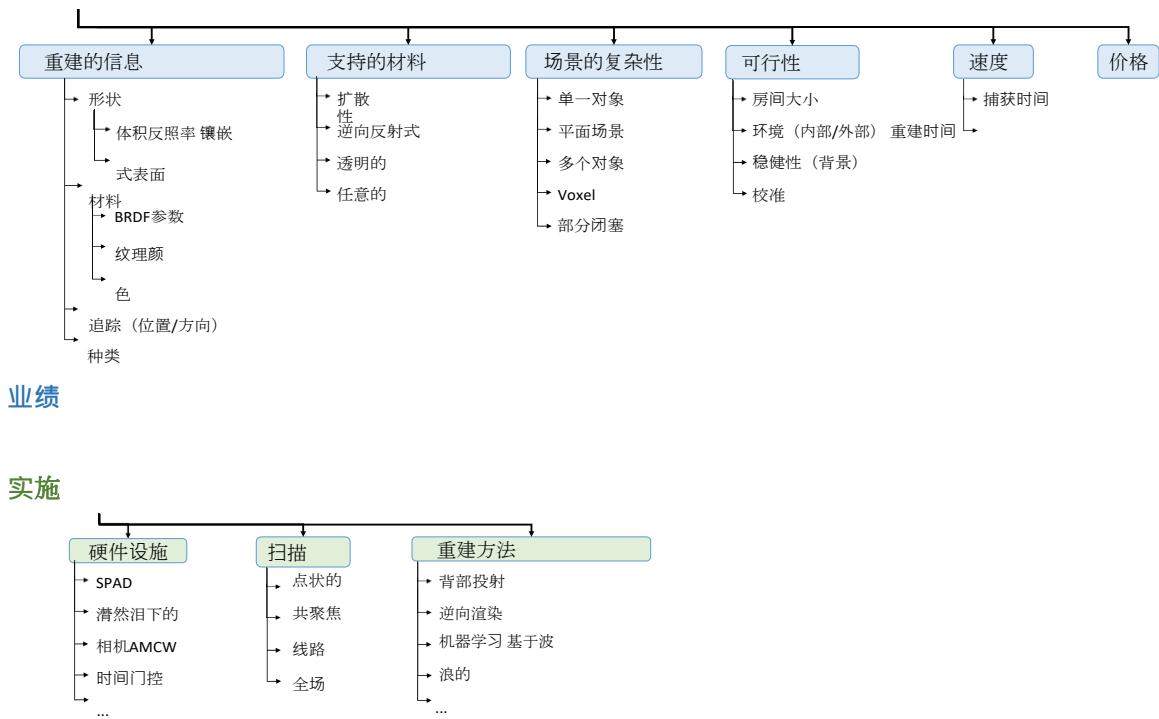


图3.1:不同的维度来分类NLAs成像系统。

从环境光。设置通常也必须针对特定场景进行校准, 使其不太容易携带。

速度 高的测量速度可以捕捉到动态场景, 而高的重建速度可以进行实时观察。

价格 如果使用现成的组件, 设置更适合于消费产品。

硬件 有各种测量瞬态图像的硬件平台可供选择 (见第2.2.1节)。它们在空间和时间分辨率上有很大的不同, 并影响到设置的速度和价格。

扫描 第2.3节中的一般模型将测量描述为相机和激光点的集合。这些可以通过不同的方式进行测量, 其中扫描线或全场测量比单点扫描 (通常使用伽马计) 更节省时间。然而, 后者是共焦测量的一个要求。

重建方法 重建算法提出了一个设置的基本想法, 通常是一个新出版物的主要贡献。

3.1 历史基础

Kirmani等人在2009年首次提出了使用瞬态成像的NLSO成像的想法[Kir+09]。他们从瞬时测量中估计出散射光线到对方的单个斑块的成对距离。在一个扩展中, 这些斑块中的一些可以

从光源和检测器中隐藏起来，这使其成为第一个NLG问题。

Pandharkar等人首先介绍了图2.3a所示的3个弹跳装置，其中有一个明显的区别，即传感装置所在的可见侧和被遮挡墙隔开的隐藏侧，感兴趣的物体就在其中[Pan+11]。

3.1. 历史基础

他们展示了对杂乱环境中移动物体的跟踪（通过拍摄差分图像过滤掉），以及从信号的焦点宽度估计物体的大小。

Naik等人使用已知几何形状的NLoS设置，通过将三维BRDF模型拟合到条纹相机的测量值来估计隐藏物体的材料[Nai+11]。该算法也可以处理具有不同材料的多个斑块。

2012年，Velten等人发表了第一个重建隐藏物体的全部几何形状的方法[Vel+12]。使用3-bounce设置，条纹相机的测量值被反推到一个体素体积中。通过应用空间滤波，几何形状被重新矢量化。尽管这种设置缓慢而昂贵，但重建的细节数量却非常显著，很可能引发了后来的许多研究。

这些早期的方法确立了NLoS成像作为一个活跃的研究领域的想法，也已经涵盖了最常见的要重建的信息类型。物体形状、位置和材料。除了Kirmani等人（使用示波器）之外，所有这些方法都使用了条纹相机，这些相机具有很高的时间分辨率，但一般都很昂贵，而且速度很慢。

捕获硬件种类

存在各种用于瞬时图像的硬件平台（见第2.2.1节），随后在这些平台上移植和评估了NLGoS成像。

Laurenzis等人证明了可以用一个测距门控成像系统来代替条纹相机[LV14]。物理设置和重建算法基本上沿用了Velten等人的方法，同时为后处理步骤引入了一种新的过滤方法。

Heide等人使用了一个基于AMCW激光雷达的设置[Hei+14]。由于它不能测量完整的瞬时直方图，重建是通过解决一个线性方程系统来进行的。隐藏的场景被建模为一个高度场，并采取不同调制频率的多次测量。利用光传播的线性和一些稀疏的先验条件，可以重建隐藏场景。

Buttafava等人是第一个利用单像素SPAD相机的人[But+15]。它被聚焦在反射器壁的中间，而激光则扫描其周围的一个阵列位置。背投影被用作重建算法，并对隐藏物体的反照率的影响进行了评估，这证实了浅色物体反射更多信号并有利于重建的直观假设。

Katz等人提出了第一个不依赖时间分辨率的NLoS重建方法（见第3.4节），然而，它使用了不同的场景设置[Kat+14]。在3-bounce设置上，我们自己的工作中提出的一个方法（见第4章）是第一个完全依靠强度数据的方法。它可以在便宜的硬件上实时运行（因为它不使用瞬时成像），但只执行位置和方向跟踪，而不是完全的三维重建[Kle+16]。它还引入了逆向渲染作为新的重建方法。

共焦设置

虽然在以前的工作中，使用了各种激光点和相机点的模式，但它们都有一个共同的特点，就是对不同的点进行照明和测量。O'Toole et al.

是第一个引入所谓的共焦设置的人，在每次测量中，激光和相机的点总是相同的[OLW18]。使用分光器将照相机和激光器的视线方向结合起来，用振镜扫描反射器壁上的各种位置。这也证明了同轴设置这一术语的合理性，其重点在于两个路径都是对齐的，然而共焦仍然是后来文献中更流行的描述。激光点和照相机点的重合简化了图像形成模型，因为图2.7a中的椭圆变成了圆，这就把正向运算变成了卷积。这允许使用基于解卷积的重建，与传统的背投相比，速度更快，更稳健，因为它提供了一个封闭式的解决方案。然而，它提出了一些新的限制条件，如需要平面反射器墙和不能考虑到光的非反射性成分。

Heide等人通过增加闭塞（由可见度项建模）和表面法线[Hei+19]，扩展了共焦设置的图像形成模型。然后，通过解决一个多凸优化问题进行重建，这在计算上比其他方法更昂贵，但可以重建更复杂的场景。

共焦设置是很难测量的，因为它们包含一个强烈的主反射（墙上的激光点在相机像素的视场内）。这就导致了曝光过度，主要信号（弱了几个数量级）很容易丢失。一个常见的方法是将两个点稍稍散焦，以避免捕捉到主要反射。这违反了模型的假设，但在实践中，它的影响是可以忽略的。

3.2 重建的方法

背部投射

背投影算法已经在计算机成像方面得到了广泛的研究[KS88, 第8章]，并由Pandharkar等人[Pan+11]首次引入到NLoS成像。尽管现在已经有了更好的几何重建算法，但在假设场景主要由单一的点状物体组成的情况下，它仍然是一种易于实现和稳健的物体跟踪算法（见2.3.2节）。因此，它被用于许多出版物中，这些出版物侧重于以各种方式扩展NLGS成像的基本思想。Laurenzis等人介绍了第一个使用时间门控硬件的设置[LV14]，Gariepy等人演示了从地板而不是墙壁上的反射来跟踪人[Gar+16]，Chan等人演示了使用望远镜的远距离跟踪[Cha+17b]。

Velten等人[VRB11]首次展示了用于全几何重建的背投技术。O. Gupta等人试验了基于CoSaMP的重建[NT09]，尽管只报告了合成数据的明显改进[Gup+12]。Buttafava等人证明了SPAD测量是背投影的合适输入，Arellano等人开发了一个efficient，基于GPU的背投影实现[AGJ17]。La Manna等人将背投嵌入一个迭代方案中[La +18]。在每个迭代中，一个前向渲染算子被用来比较当前的背投结果和测量结果，并使用加法或乘法模式将差异传播到重建中。在收敛时，结果与正向渲染的结果一致。

算子。对于线性光传输算子（这只有在强假设下才是真的。

例如，没有遮挡），这种方法是代数重建技术的一个实例[GBH70]，存在关于收敛的声明。作者报告了在合成数据上的改进结果，但在测量数据上的结果却不太令人信服，作者指出这可能是由于前向模型的缺陷造成的。

Ahn等人通过证明在某些成像几何学的假设下，NLSO测量-ment算子的Gram是一个卷积算子[Ahn+19]，得出了滤波背投方法的正式理由。通过他们的数学框架，作者随后推导出一个优化的去卷积核，提供更好的重建质量。

概念上类似于背投的是Tsai等人[Tsa+17]描述的空间雕刻算法。在这里，只有第一个返回的光子被用来识别重建体积中保证没有几何体的区域，而不是标记可能被占领的区域。这种方法可能更加稳健，因为它与任何振幅无关，然而，恢复具有负曲率的区域或场景中部分被遮挡的部分的细节是不可能的。

逆向渲染

在逆向渲染中，传统的（正向）渲染算法被用在一个数值优化循环中来解决逆向问题：从渲染的图像中检索场景参数（见图4.1）。虽然解决单个逆向问题的计算成本很高，因为它需要对正向模型进行多次评估，但它仍然是一种广泛使用的方法，因为它可以解决那些没有逆向分析解的问题。在NLoS成像中，场景参数的初始猜测可以通过评估前向模型（通常来自经典的计算机图形研究）并将其与真实场景的测量结果进行比较来完善。两者之间的差异由一个目标函数来衡量，然后通过梯度下降等算法将其最小化。由于适当的正向模型已经存在，或者可以从现有的模型中推导出来，逆向渲染是一个通用的工具，很容易被用于许多重建目标。

Naik等人通过将低维BRDF模型拟合到隐藏的表面上，首次将反渲染技术应用于NLAs成像[Nai+11]。

在我们自己的工作中（见第4章），我们开发了一个专门的、基于补丁的前向渲染器，其速度足以对隐藏物体进行实时跟踪[Kle+16]。该算法还可以重建方向，甚至可以用来对各种形状的物体进行分类，但需要一些关于隐藏物体的地面真实知识。

Iseringhausen等人展示了使用逆向渲染的高维几何重建[IH20]。他们使用了一个类似的但经过扩展的渲染器，该渲染器结合了基于三维高斯核的等值面的几何模型，将闭塞问题考虑在内。虽然一次重建可能需要一天多的时间，但该方法被证明比其他许多方法对噪声的稳定性要好得多。

Tsai等人甚至重建了更多的表面细节，但由于问题的高度非凸性，需要一个已经接近真实几何的初始化[TSG19]。他们建议使用不同的方法来检索这个初始化（并使用Tsai等人的空间雕刻算法[Tsa+17]进行演示），然后继续优化

在网格上的单个三角形顶点。虽然速度也很慢，但这种方法产生了迄今为止所展示的最高数量的表面细节。

在我们自己的工作中（见第6章），我们通过提出一个基于场景中多个镜子的镜面反射的校准方案[Kle+20]来解决校准设置的可见部分的问题（这是许多方法的前提条件）。镜面反射极大地简化了图像形成模型，这使得自动区分和校准结果在几分钟内就可以完成，即使是使用未优化的代码。

机器学习

一些出版物探讨了基于机器学习的重建的可行性，主要是以神经网络的形式。给予足够的例子，一个合适的结构的网络可以被训练来自动找到NLSO测量和各种输出参数之间的映射，从低维的位置跟踪到高维的几何重建。不需要明确地建立光传输或相机噪声特性的模型，也不需要校准设置的可见部分，因为所有这些都可以由网络来学习。然而，明确的前向模型对于合成训练数据的生成仍然是必要的，因为不完整的训练数据会导致过度拟合，并缺乏对新环境的概括。

Caramazza等人是第一个使用神经网络来区分不同的人和他们在隐藏体积中的位置（从一小组离散的可能性中）[Car+18]。虽然输出是低维的，而且网络只在单一的设置几何上进行了训练，但这证明了机器学习适用于NLSO成像问题。

Chen等人用神经网络从非瞬时测量中重建了一个隐藏场景的二维视图[Che+19]。只使用强度数据是机器学习力量的一个很好的例子，因为在没有时间维度的情况下重建这么高的信息量之前还没有被证明。

Chopite等人的工作进入了一个类似的方向，尽管他们使用了瞬时信号并重建了一个场景的深度图，而不是反照率图[Cho+20]。

到目前为止，基于机器学习的方法还没有被证明可以对arbitrary新设置起作用。相反，明确的重建方法可以很容易地校准到新的设置，而且它们的重建质量在某种意义上取决于校准质量。然而，在基于机器学习的方法中，对原始设置的微小推导会产生不可预见的影响，这就需要对这类系统进行非常彻底的评估。

基于波浪的

虽然背投可以被认为是利用了射线光学，但类似的算法也可以用波浪方程来制定。这是地震学领域的一种成熟的方法，声波被用来测量地球表面的反射率[Sto78]。基本的数学公式与NLSO成像的公式相似。

Reza等人是第一个采用这种方法的人[Rez+19]。反射器平面上的每一个点都被模拟成一个复数相位，由惠更斯的类似积分来计算入射光。这些相位是虚拟的，这意味着它们的频率是相同大小的

作为隐藏的场景（厘米或米），而不是在光的实际波长（纳米或微米）的尺度上。

Liu等人提出了一种基于这一理论框架的几何重建算法[Liu+19]。与经典的背投相比，它揭示了明显更多的细节，对噪声更稳定，同时具有相同的计算复杂性。

Lindell等人采用了一种基于波的重建方法，即地震学领域的 f - k 迁移[LWO19]。它提供了一个闭合形式的解决方案，并且比滤波背投更容易实现。在最初的表述中，它需要一个共焦扫描设置，然而作者也提出了一个扩展，将非共焦测量转换为基于正常移动校正的共焦测量[Yil01]，这也源于地震学界。尽管预处理是近似的，但在实践中结果是令人信服的。

总的来说，基于波浪的NLoS模型是迄今提出的最有前途的重建方法之一，并提供高质量和重建速度。

其他

其他不完全适合上述任何类别的重建方法也被提出。

Heide等人将隐藏场景建模为一个没有遮挡的漫反射高度场[Hei+14]。有了这些假设，光传输可以被建模为一个线性方程组，可以用乘法的交替方向法(ADMM)和稀疏性优先权来解决。

Kadambi等人从既定的天线信号处理方法中获得了灵感[Kad+16]。反射器墙被看作是一个虚拟的天线阵列（其中每个观察点是一个天线位置，对入射光线进行全向测量），无线电源定位算法被用于重建。在此基础上，还进行了可恢复性分析。

Pediredla等人将隐藏的房间建模为一组平面[Ped+17]。由于没有关于平面反射信号的分析解决方案，所以使用蒙特卡洛抽样预先计算了可能的平面能指的字典。有了这个，重建就变成了一个选择组成房间的最佳拟合平面的组合问题。这种方法可以扩展到一个已知的隐藏

对象集（如分类任务），但字典的离散性使它不适合一般的连续场景。作为Tsai等人[TSG19]的空间雕刻算法的扩展（见背投的讨论），Xin等人[Xin+19]提出了一种叫做Fermat flow的重建技术，它是基于Fermat原理[Sta72]。他们的关键观察是，隐藏场景中的点，如果不是在物体的边界上，就是对某个相机和激光点造成镜面反射，就会造成瞬时图像的不连续，可以用纯粹的几何推理进行重建。Tsai等人的工作的第一个返回的光子是这些所谓的费马点的一个子集。由于费马流不会使利用强度信息，它可以重建具有任意BRDFs的物体。

Scheiner等人[Sch+20]使用频率为76 GHz - 81 GHz的多普勒雷达（对应于约5毫米的波长）。由于漫反射发生在波长范围内的表面细节上，这使得许多日常物体，如建筑物、汽车、和其他物体，都会发生漫反射。

护栏变成了镜面反射器。通过单独测量反射器的几何形状，可以明确地计算出镜面反射，对隐藏物体的感应就有效地转变为视线成像问题。由于多普勒雷达，只有移动的物体才能被捕获。在他们的工作中，他们还执行了一个基于机器学习的细化步骤，对通过标准雷达成像技术重建的物体进行分类并预测轨迹。

3.3 杂项扩展

虽然大多数出版物的主要重点在于开发改进的重建方法，但也做了一些工作，将NLGoS成像从实验室设置转移到更现实的场景中。

由于隐蔽房间的墙壁可能是杂乱无章的或其他不适合反射的地方，Gariepy等人建议用地板反射信号来代替[Gar+16]。La Manna等人提议使用第二个SPAD阵列来实时测量作为反射器的窗帘的运动[La +20]。这种方法允许使用具有复杂和动态形状的几乎任意的物体作为反射器。

由于NLoS在遥感应用中具有潜在的利益，Chan等人展示了一个大距离的传感设置，即使用望远镜从超过50米的距离观察一个隐藏场景[Cha+17b]。

同样，Metzler等人通过一个钥匙孔将激光和SPAD成像仪聚焦在一个潜在的长距离上，这就提出了一个挑战，即在反射器壁上只有一个共焦观测点可用[MLW19]。对于移动物体，可以使用期望最大化算法联合检索形状和轨迹。

隐藏场景模型通常由一些感兴趣的物体和来自房间几何的背景信号组成。后者通常被认为是噪声源，并被过滤掉或忽略。Pediredla等人明确地将这种背景信号建模为一组数学平面，并试图对其进行重建[Ped+17]。

通常情况下，使用单一波长进行测量，导致单色的重新构建。正如Musarra等人和Chen等人[Mus+19 ; Che+19]所证明的那样，通过使用多个波长，可以重构颜色信息。

Lindell等人[LWK19]使用声波进行NLoS重建。由于波浪方程对电磁波和声波是相同的，在经过一些特定领域的调整后，共焦光锥的形成[OLW18]可以被用于重建。

3.4 相关问题

正如图2.1中的分类法所概述的那样，有一些问题与瞬时NLGoS成像密切相关。

局部闭塞

一些工作没有依靠经典的3个弹跳设置（如图2.3a所示），而是尝试从部分闭塞中进行NLGs重建。这些设置通常使用意外的光照

3.4. 相关问题

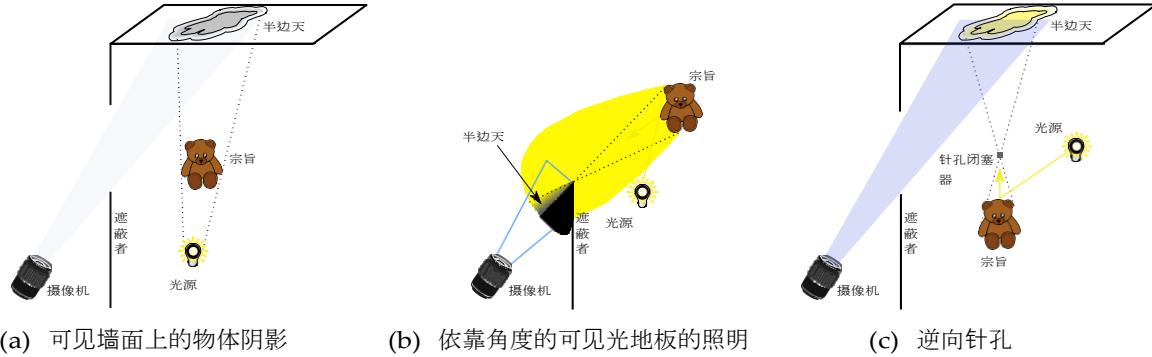


图3.2：基于闭塞的NLAs成像的不同设置。(a)隐藏物体的阴影投射到可见的墙上。(b)由隐藏物体反射的光照亮了可见的地板。强度随墙壁的遮挡程度而变化。(c)来自隐藏物体的光线不受阻碍地到达墙壁，除非它来自单一方向。在传统的针孔中，只有来自某个方向的光才能到达墙壁。

这意味着可以利用场景中已经存在的光源，而不是需要一个精确控制的光源，这是测量系统的一部分。

图3.2显示了基于闭塞的设置的概况。Baradad等人观察一个物体及其阴影来重建隐藏场景的四维光场[Bar+18]。后来，Yedidia等人扩展了这种方法，不再依赖对形状的了解[Yed+19]（图3.2a）。

Bouman等人分析了从一个物体反射到靠近角落的地板上的光线（图3.2b）[Bou+17]。然后，地板对每个角度的物体的一维投影进行编码。如果隐藏的物体是移动的，那么来自场景其他部分的贡献可以被过滤掉，照明的静态部分被收集并从重建测量中减去。Seidel等人对这一方法进行了扩展，他们使用了具有非均质图案（如瓷砖或条纹）的地板，这也允许重建静态物体[Sei+19]。

Saunders等人在隐藏场景中使用了一个小的遮挡器，将部分阴影投射到反射器墙上（图3.2c）[SMG19]。遮挡器实现了反针孔的功能，它不是过滤来自单一方向的光线，而是除了来自单一方向的所有光线都能通过。与针孔相机类似，较小的遮挡器会导致较高的分辨率，但墙面的对比度会降低。

由于这些设置在概念上与经典的3-bounce设置不同，所以很难将基于瞬态成像的方法与基于闭塞的方法进行比较。然而，Thram- poulidis等人使用了包括闭塞物的3-bounce设置，并研究了可以从闭塞物或时间信息中重建多少东西[Thr+18]。

斑点图案

当相干光从一个漫射物体上反射时，会形成高频斑点图案。粗糙的表面会导致波长范围内的相位偏移，从而使

通过建设性和破坏性干扰来确定强度。斑点图案是准随机的，因为众多小的表面变化不能在实践中被模拟。然而，这些图案仍然编码了反射前的入射光信息，这些信息可以通过各种方式进行解码，以进行无序重建。

Feng等人和Freund等人首先描述并验证了所谓的记忆效应，该效应描述了当波穿过散射介质时，关于大尺度空间变化的信息被保留下来，而更精细的变化则会丢失[Fen+88；FR88]。

Katz等人在这一原理的基础上，重建了一个拐角处的二维图像[Kat+14]。

即使隐藏的场景是由非相干光照亮的，基于斑点的方法也可以通过利用空间光调制器来进行波前整形[KSS12]。

由于其高频率，斑点图案对小运动非常敏感，可用于精确跟踪小物体，如手指手势[Smi+17]。如果这些图案被反射到NLoS设置中的墙上，同样的技术可以用于跟踪转角处[SOG18]。

斑点图案也被用于无透镜成像。由于没有电子电路的速度足以直接测量进入的可见光的相位（只能捕捉到波的强度），所以很大一部分信息会丢失。相位检索算法可用于首先重建相位，随后重建完整的图像[She+15；JEH15]。在NLoS设置中，反射墙作为一个无镜头的成像器，其信号由实际的相机记录。

最近，基于机器学习的技术被应用于斑点模式。为准随机编码的斑点图像找到一个匹配的解码器函数很适合数据驱动的算法，可以用来对数字或人的姿势进行分类[Lei+19]。Metzler等人从频谱估计理论中推导出一个噪声模型，并将其与神经网络相结合，用于从噪声数据中进行稳健的相位检索[Met+20]。这允许从隐藏场景中鲁棒地检索二维图像。

斑点成像也可以与瞬时重建技术相结合。Boger-Lombard和Katz从斑点模式中重建旅行时间，并使用标准的背投法进行NLSO重建[BK19]。

透过闭塞器看问题

透过物体观察不仅是一个在应用上与观察物体周围密切相关的问题，而且还与它共享一些技术和算法方法。如图2.1所示，各种方法可以按照它们能看穿的遮挡物的类型进行分类。

对于浑浊的介质，如雾、泥水或雨雪，小颗粒通过散射或吸收降低了介质的透明度，这给恶劣天气下的驾驶或水下成像等应用带来了严重问题。通常情况下，颗粒被认为是随机的、未知的，并通过分布函数进行建模。（一个罕见的反例是在Iseringhausen等人那里发现的，透明表面上的雨滴被单独估计，它们的几何形状被用来通过光线追踪重建它后面的场景的光场）。

由于一些光子仍然在没有任何（或很少）粒子相互作用的情况下到达摄像机，重建场景就成了一个过滤掉直接信号的问题。

3.4. 相关问题

噪声[Wan+91; Bus05; Lau+12]。对于时间分辨率的测量（如在范围门控成像中），直接信号总是比被粒子反射的同源光有更短的旅行时间。然而，被物体前面的粒子反射的光可能与直接来自物体的光具有相同的路径长度；因此，可以被时间门过滤掉的噪声量有一个上限。

Bijelic等人通过多传感器燃料解决了在恶劣天气下的成像问题[Bij+20]。来自立体相机、门控相机、雷达、激光雷达和FIR相机的测量结果被送入一个神经网络，该网络被训练成在每种情况下使用最可靠的数据来提取场景特征。

对于更高的粒子密度，介质变成了一个漫反射器，基本上没有光子可以在没有粒子相互作用的情况下穿过它。这个问题与使用漫反射器在遮挡物周围成像密切相关，各种提议的解决方案都在这两方面得到了证明[KSS12; Kat+14; Kad+16; Xin+19]。通过漫反射体成像大多依赖于瞬态成像[Sat+17; LW20]或斑点成像[Ber+12]。

Han等人通过比较近红外波和太赫兹波，评估了电磁波的频率是如何影响通过扩散体进行传感的对比度的[HCZ00]。作为这个想法的延伸，通过使用与遮挡物互动较少的波长，甚至可以通过完全不透明的（可见光范围内）物体来探测物体。WiFi辐射（2.4 GHz - 5 GHz）可以相对无阻地穿过许多类型的墙壁和其他障碍物。然而，由于许多房间大小的物体相对于波长来说是光滑的（其中5GHz对应的波长约为6厘米），反射主要是镜面反射，接收反射信号成为一个挑战（这种效果在雷达领域的隐形轰炸机隐形中广为人知[McC08]）。Karanam等人使用两架无人机来测量隐藏在一圈煤渣中的场景的信号[KM17]。通过围绕场景飞行，可以捕捉到镜面反射。Adib等人从一个位置跟踪人类穿过墙壁[AK13 ; Adi+15]。在运动过程中的不同时间，来自不同身体部位的镜面反射显示出来，并可以在后处理步骤中进行合并。

第四章

追踪视线外的物体 使用二维强度图像

本章作为同行评议的论文发表在《科学报告》杂志上，由自然出版集团在2016年[Kle+16]。

作者位于无法到达的区域的物体是各种重要应用中反复出现的挑战。最近的工作表明，使用简单的和昂贵的光学设置，间接漫射光反射可以用来重建物体和角落周围的二维（2D）模式。在这里，我们展示了可以使用更简单的手段，即一个标准的二维摄像机和一个激光指示器来实时跟踪被遮挡的物体。我们的方法从根本上不同于以前的解决方案，它以一种分析-合成的方式来处理问题。通过反复模拟光线在场景中的传输，我们确定了最符合测量强度分布的物体参数集。我们通过实验证明，这种方法能够实时跟踪未知物体的平移，以及已知物体的平移和方向。

4.1 简介

数字图像传感器的广泛使用，加上先进的计算方法，催生了新的成像技术，实现了看似不可能的任务。一个特别吸引人的结果是使用超高速飞行时间测量[Abr78; VRB11]对直接视线以外的物体进行成像[Vel+12; Hei+14; LV14; Gar+16]。能够像使用镜子一样使用任意的墙壁，可以在许多能见度有限的传感场景中提供关键的优势，比如内窥镜成像、汽车安全、工业检查和搜救行动。

在所提出的对被遮挡物体进行成像的技术中，有些要求物体对结构化[Sen+05]或窄带[SEL11; KSS12; Kat+14]直接可见。

使用二维强度图像

光源。其他人则采用电磁波谱中的其他区域，即遮挡者是透明的[Sum+11; AK13; Adi+15]。我们采用了一个更为困难的假设，即物体既不在光源也不在相机的直接视线内（图4.1），它只能通过漫反射墙被照亮或间接观察[Vel+12; Hei+14; LV14; But+15; Gar+16]。所有观察到的光线至少经历了三次漫反射（墙、物体、墙），重建未知物体是一个不理想的反问题。迄今为止，大多数报告的解决方法都使用了计算机断层扫描中的背投方案[PSV09]，其中成像器采取的每个强度测量都对可能的散射位置流形进行投票。这种明确的重构方案在计算上是很容易的，原则上是实时的[Gar+16]，并且可以用特定问题的过滤器来扩展[Vel+12; Kad+16]。然而，它假定了超快时间分辨的光学脉冲响应的可用性，其捕获仍然构成一个重大的技术挑战。文献中提出的技术包括基于全息技术的直接时间采样[Abr78; Abr83; QM85]、条纹成像器[VRB11]、门控图像增强器[LV14]、串行时间编码放大显微镜[GTJ09]、单光子雪崩二极管[Gar+15]，以及使用多频率锁定测量的间接计算方法[Hei+13; Kad+13; Pet+15]。相比之下，*隐式*方法以特定问题的成本函数来说明重建任务，该函数衡量场景假设与观测数据和附加模型先验的一致性。问题的解决方案被定义为使成本最小化的函数参数。在迄今为止报道的唯一这样的方法中[Hei+14]，作者用计算昂贵的稀疏性先验对最小二乘数据项进行了正则化，这使得重建拐角处的未知物体不需要超快的光源和检测器。

在这里，我们介绍了一种实时检测和跟踪视线外物体的隐性技术。使用常规可用的硬件（二维摄像头、激光笔）进行成像，落在墙上的间接光的分布是我们的主要信息来源。这种光经历了多次反射；因此，观察到的强度分布在空间细节上很低。我们的方法结合了一个三跳间接光传输的模拟器和重建任务的简化表述[Gar+16; Kad+16]。我们不是要重建一个未知物体的几何形状，而是假设目标物体是刚性的，其形状和材料是已知的和/或不相关的。翻译和旋转是唯一剩下的自由度，现在可以通过最小化最小的能量函数来找到，迫使场景假设与捕获的强度图像一致。

我们的主要贡献有三方面。我们建议使用光传输模拟来处理间接视觉任务，即通过合成分析。通过使用合成测量，我们量化了物体运动对观察到的强度分布的影响，并预测在哪些条件下这种影响足以被发现。最后，我们演示并评估了一个跟踪系统的硬件实现。我们的见解并不局限于单纯的强度成像，我们相信它们将使非视线传感更接近于实际应用。

4.1. 简介

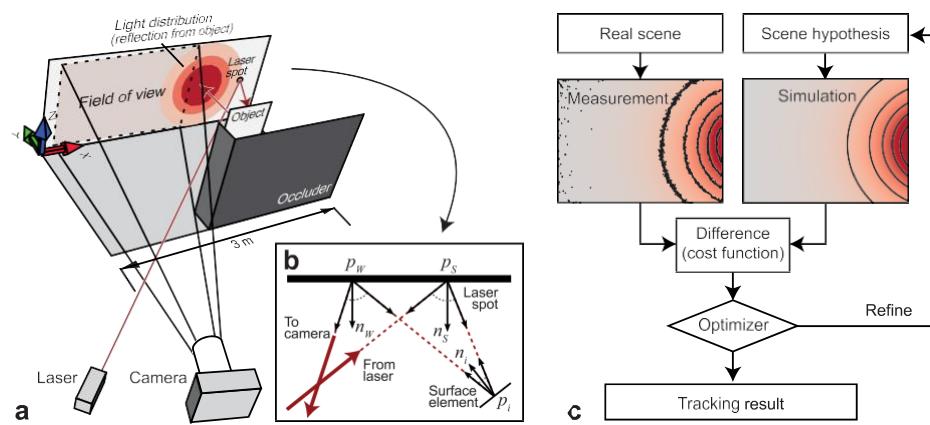


图4.1:**a**, 我们的实验设置遵循了先前工作中报告的最常见的安排, 除了它没有使用飞行时间技术。一台摄像机观察着一面白墙的一部分。在相机视野的右边, 一个准直激光器照亮了一个点, 将光反射到未知物体上。照相机观察到的光线分布是三次漫射光反弹 (墙-物体-墙) 加上环境贡献的结果。**b**, 单个表面元素的三次反弹反射的几何图形。考虑到一个物体的形状、位置和方向 ("场景假设"), 我们模拟光的传输, 以预测这个物体在墙上产生的分布。通过将这一分布与摄像机实际观察到的分布进行比较, 并改进参数以使差异最小化, 就可以估计出物体的运动。

4.2 结果

光传输模拟（综合）。 这项工作的中心是一个用于三蹦子光传输的efficient ren-derer。能够以极快的速度模拟间接照明对整个系统的性能至关重要，因为每个物体追踪步骤都需要多次模拟运行。像所有先前的工作一样，我们假设墙壁是平面的，而且是已知的，激光点的位置也是已知的。物体被表示为Lambertian表面元素（Surfels）的集合，每个元素的特征是其位置、方向和面积。当物体被移动或旋转时，它的所有surfels都会发生相同的刚性变换。我们用场景参数 p 来表示这种转换，对于纯平移来说，它是一个三维矢量，对于平移和旋转来说，它是一个六维矢量。一个给定的相机像素所接收到的辐照度是通过对反射到冲浪板上的光进行求和来计算的。反过来，各个贡献是独立获得的，如方法一节中所详述的，通过计算从激光点通过surfel到像素所观察到的墙上的位置的辐射传递。请注意，通过遵循这个程序，就像所有先前的工作一样，我们忽略了自闭、环境光的遮挡和相互反射。为了更好地获得由像素值向量 $\mathbf{S}(p)$ 表示的全帧图像，我们对模拟进行了并行化处理，在显卡上的一个单独线程中计算每个像素。渲染时间大约与像素数和冲浪点数成线性关系。在NVIDIA GeForce GTX 780显卡上，一个中等复杂的物体（500个冲浪点）在160 128像素的分辨率下的反应，渲染时间为3.57毫秒。

为了估计由运动或形状变化引起的强度分布变化的大小，我们用这个模拟进行了一个数字实验。在这个实验中，我们在一堵2米2的墙上采用了正面平行的视角，一个小的平面物体（一个10厘米10厘米的白色正方形）位于离墙50厘米处。物体和激光点都在墙的中心，但没有呈现在图像中。图4.2显示了这样得到的模拟响应。通过改变物体的位置，我们得到了不同的图像，这些图像可以被解释为与场景参数 p 的组成部分有关的部分导数。所有方向的平移和围绕X和Z轴的旋转对信号的影响比其他变化更强烈。由于差异达到整体强度的几个百分点，这些变化足够大，可以用带有8-12位A/D转换器的标准数码相机来检测。

实验设置。我们的实验从以前的工作[Vel+12；Hei+14；But+15；Gar+16；Kad+16]中得到启发；实验装置简图见图4.1a。在这里，由于实际情况的限制，合成实验中的一些理想化的假设不得不被放宽。特别是，只有强度模式的非峰值部分可以被观察到。为了保护相机不受激光点的影响，避免饱和和镜头闪光，我们不得不把激光点放在视场之外。墙壁和物体表面的实际反射率分布并不完全是朗伯式的，而且场景中还存在着模拟中没有考虑到的额外的光发射器和反射器。为了获得一个

4.2. 结果

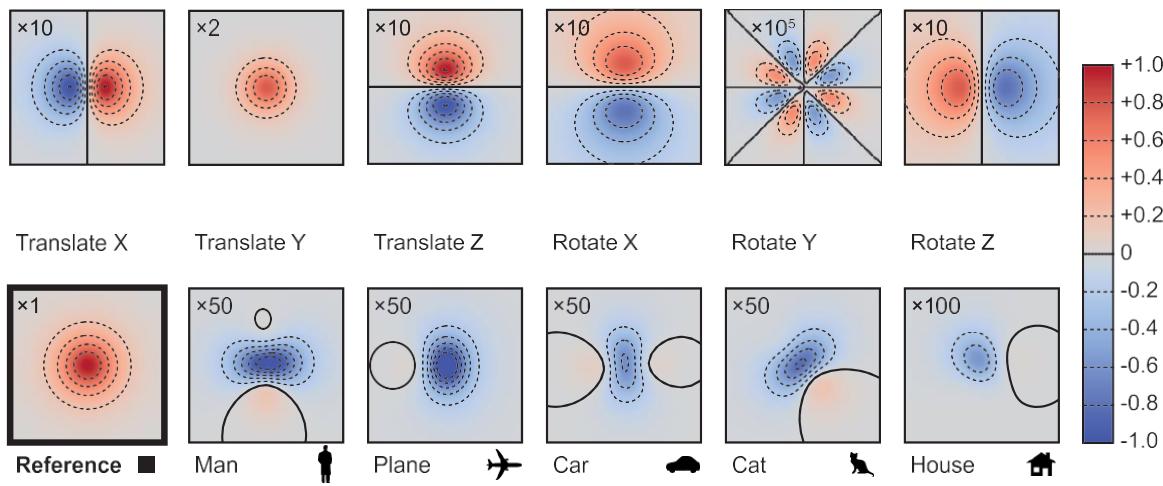


图4.2：强度差异图像。为了研究物体位置和方向的变化对在墙上观察到的强度分布的影响，我们进行了一个简化的合成实验，以2米2的墙为正视图，激光点和物体相对于墙的中心。参考分布（左下）是由一个10厘米10厘米的正方形物体产生的，位于离墙50厘米的地方。通过将物体围绕X、Y和Z轴平移（2.5厘米）和旋转（ 7.5° ）得到的六幅差异图像（上排），说明了信号的分布和各自变化的幅度。底部一行显示的图像直观地显示了由形状变化引起的差异。为了便于显示，每个差异图像都被放大了指定的系数（2到100,000），这也反映了效果的相对重要性。翻译和旋转（除了绕Y轴）导致信号每厘米或每角度大约变化1%。物体形状的变化导致了大约1-2%的峰值差异，而围绕Y轴的旋转的影响则小得多。

在测量的图像**M**中只包含来自激光的光，我们采取了在有激光照明和没有激光照明的情况下拍摄的图像之差。此外，我们减去了含有背景反射光的校准测量值**B**。所用设备的规格，以及对数据预处理步骤的更详细的介绍，可以在方法部分找到。

追踪算法（分析）。有了手头的光传输模拟，并给定一个从物体散射到墙上的光的测量值，我们将跟踪任务表述为一个非线性最小化问题。假设**M**和**S** (p) 是分别编码测量的物体项的像素值和在变换参数或场景假设 p 下由模拟预测的像素值的向量。我们通过最小化成本函数寻找能使**M**和**S** (p) 达到最佳一致的参数 p

$$f(p) = \|\mathbf{M} - \gamma(\mathbf{M}, \mathbf{S}(p)) - \mathbf{S}(p)\|_2^2 \quad , \text{ 其中 } \gamma(a, b) = \frac{a^T - b}{\|b\|_2^2} \quad .(4.1)$$

$\gamma(a, b)$ 因子将 b 投射到 a ，使距离 a 和 b 最小化²。通过将这一因素纳入我们的目标，我们将场景参数 p 的恢复与测量和模拟之间的任何未知全局缩放脱钩，这些参数由表面反照率、相机灵敏度和激光功率等引起。为了解决这个非线性的、非凸的、严重超定的问题，我们使用 Levenberg-Marquardt 算法 [Mar63]，该算法在 Ceres 库 [AMO15] 中实现。衍生物是通过数字分化计算的。当跟踪六个自由度（平移和旋转）时，评估 f 的值和梯度共需要七次模拟运行，或者在我们的系统上需要 25 毫秒的计算时间。

追踪结果。为了评估该方法，我们进行了一系列的实验，在图4.4和4.5中进行了分析。所有实验中使用的物理对象是一个由胶合板切割而成的汽车轮廓，并涂有白色墙漆，如图4.3a所示。虽然我们的设置能够处理任意的三维物体（只要凸性假设是合理的），但由于制造和处理的原因，这种形状是二维的。

对于一个给定的输入图像**M**和物体形状，方程4.1中的成本函数 $f(p)$ 取决于被跟踪的三到六个自由度。图4.3b显示了在所有其他参数固定的情况下，XY 平面上的平移函数的一个切片。尽管全局最小值位于一个拉长的、弯曲的谷底，但只需要 Levenberg-Marquardt 算法的四到五次迭代，就可以从跟踪体积中的一个随机位置收敛。在实时应用中，由于位置和旋转可能随时间缓慢变化，通过使用最新的跟踪结果来初始化下一帧的解决方案，优化工作可以减少到每帧两到三次迭代。

在**实验1**中，我们保持物体的方向不变。我们在 60 厘米、50 厘米、60 厘米的工作范围内，手动将物体放置在不同的已知位置，并在每个位置记录 100 个相机帧。这些帧在环境光的数量（电源闪烁）和光子噪声方面有所不同。对于每一帧，我们将估计的位置初始化为以跟踪体积为中心的立方体（30 厘米）³ 中的一个随机起点，并通过最小化成本函数（公式4.1）完善位置估计。成本函数

4.2. 结果

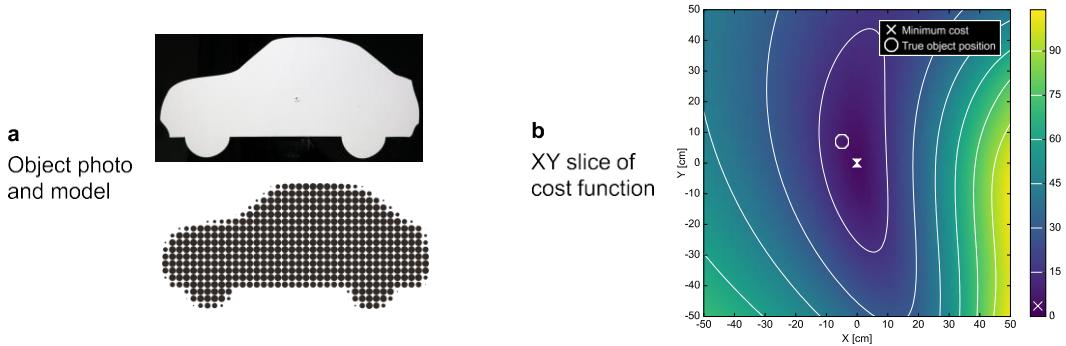


图4.3:**a**, 从白色胶合板上切割下来的物体的照片, 以及它作为表面元素 (surfels) 的表示。请注意, 虽然我们用一个平面物体来演示, 但我们的方法也能处理三维物体。**b**, 用于位置跟踪的成本函数的XY切片, 以全局最小值为中心。在一个完美的图像形成模型和没有噪声的情况下, 最小值 (用十字标记) 和物体的测量位置 (用圆圈标记) 应该正好重合在 $f(p) = 0$ 的函数值上。在实际情况下, 重建的位置与真实的位置有几厘米的偏差, 最小值是一个小的正值。

结果显示在图4.4a中。从这个实验中, 我们发现位置跟踪是可重复的, 而且对噪声是稳健的, 每个位置估计的标准偏差都在厘米以下。在沿X、Y和Z轴运动时, 与地面真实情况的均方根距离分别为4.8厘米、2.9厘米和2.4厘米。这种小的系统偏差可能是由图像形成模型的一个已知缺陷造成的, 它没有考虑到物体对环境光的遮挡。

在**实验2**中, 我们将物体保持在一个 (大致) 固定的位置, 并使用一个在所有关节上都有测角器的平移-倾斜-滚动三脚架将其围绕三个坐标轴旋转30°的范围。同样, 在每个设置中, 我们记录了100个帧, 这些帧主要在噪声模式上有所不同。我们遵循与第一次实验相同的程序, 只是这一次我们对所有六个自由度 (位置和方向) 进行了联合优化。结果显示在图4.4 (b) 中。正如预期的那样, 尽管每个角度的平均重建结果保持稳定, 但旋转角度的追踪比平移参数的不确定性更高。我们发现增加的不确定性有两个主要来源: 自由度的增加和X平移与Z旋转之间以及Z平移与X旋转之间的成对模糊性 (图4.2)。我们回顾一下, 在合成实验中, Y轴旋转的影响很小; 在这里, 系统跟踪围绕Y轴的旋转与其他轴一样有力。这个意外的积极结果可能是由于汽车物体的强烈不对称形状造成的。

到目前为止, 我们假设物体的形状是已知的。由于这一要求不能总是被满足, 我们在**实验3**中放弃了这一要求。利用第一个实验中已经捕捉到的汽车物体的数据, 我们使用一个单一的定向表面元素而不是详细的物体模型来进行光传输模拟。除了这种简化, 我们遵循与实验1完全相同的程序来跟踪现在未知物体的位置。结果显示在图4.5 (a) 中。尽管有一个系统性的转变是由

使用二维强度图像

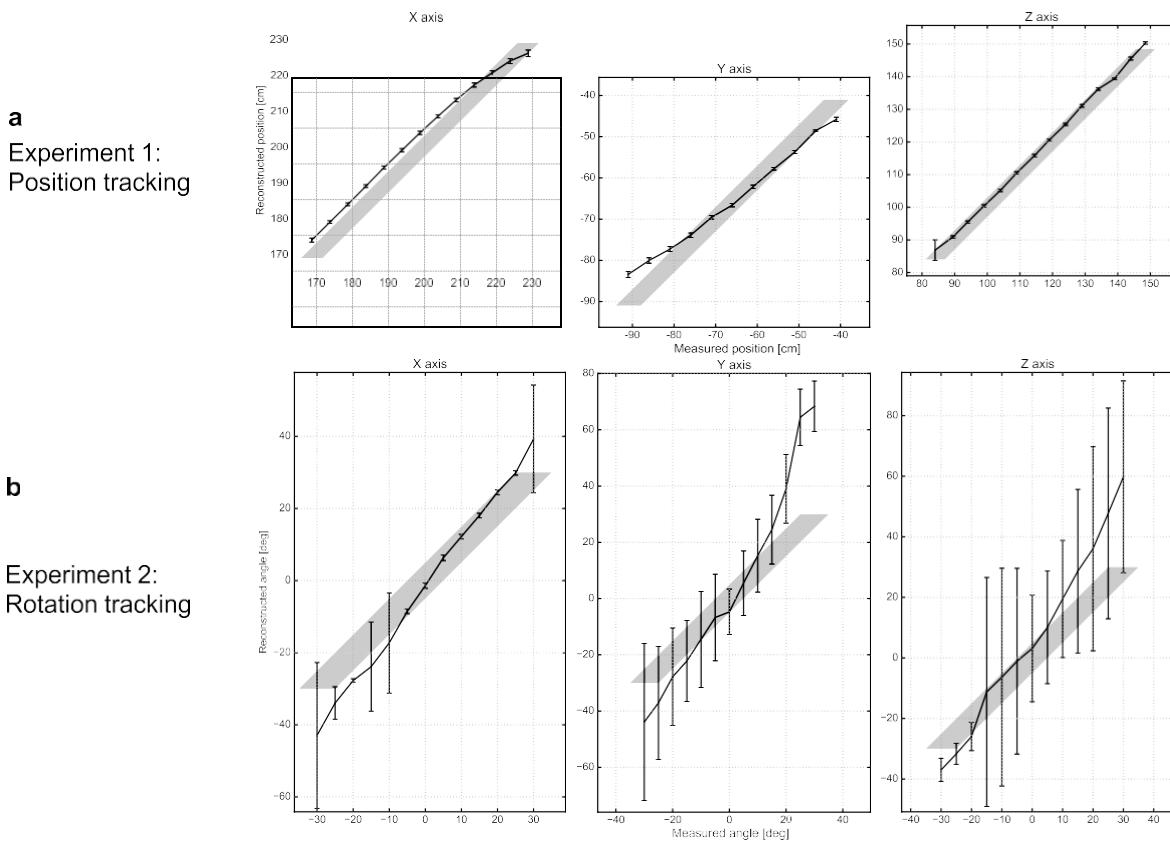
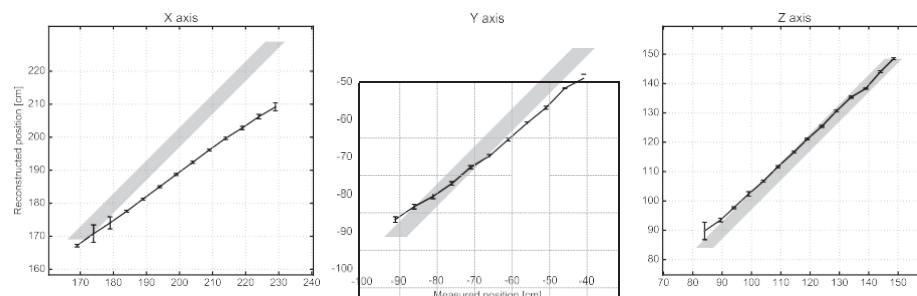


图4.4:a, 三次追踪的结果, 物体沿X、Y和Z轴平移 (实验1)。我们在每个位置记录了100张输入图像, 并对每个输入图像独立地重建物体位置。图形和误差条显示了恢复的位置的平均值和标准偏差。灰色阴影区域是真实位置的置信范围, 它是用卷尺确定的。从100张输入图像中, 我们共同重建了平移和旋转。显示的是恢复的旋转角度的平均值和标准偏差。较高的不确定性反映了一个事实, 即一般来说旋转对信号的影响较小, 以及平移和旋转运动之间的模糊性 (也见图4.2)。

4.2. 结果

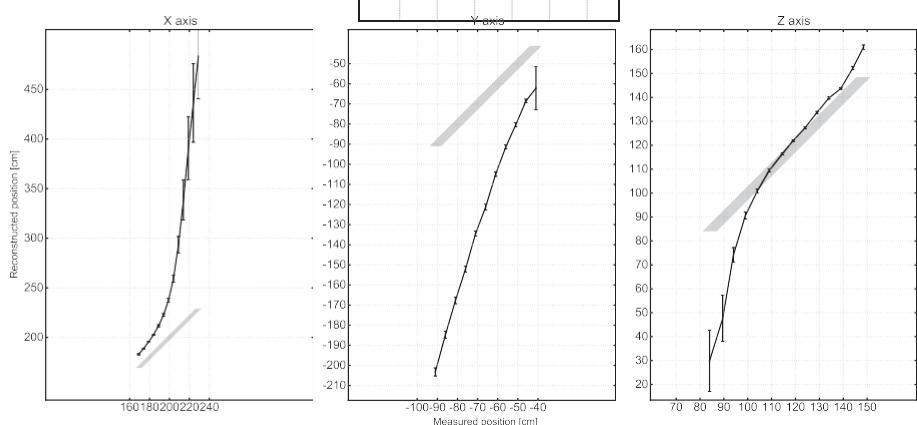
a

Experiment 3:
Unknown object



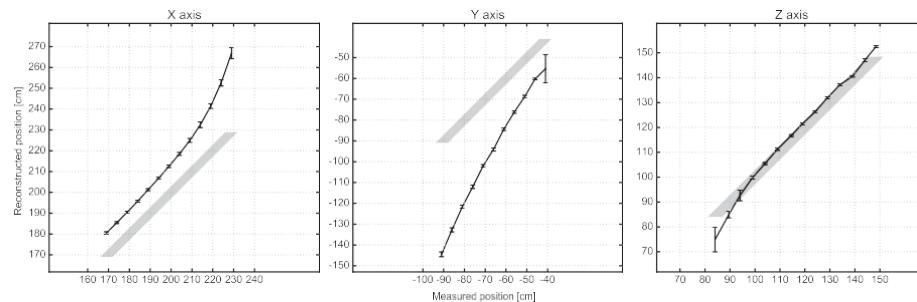
b

Experiment 4:
Unknown room



c

Experiment 4:
Unknown room,
linear correction



a, 实验3的结果：与实验1一样的位置跟踪，但没有关于物体形状的知识。**b, 实验4的结果：**如实验1的位置跟踪，但没有减去预先校准的房间响应。估计的绝对位置大大偏离了地面真实位置（阴影区域）。**c, 减去线性拟合：**大大减少了跟踪误差，即使在没有背景测量的情况下，跟踪任务也是可行的。在所有情况下，标准偏差（误差条）仍然很小，表明位置的变化仍然可以被有力地检测出来。

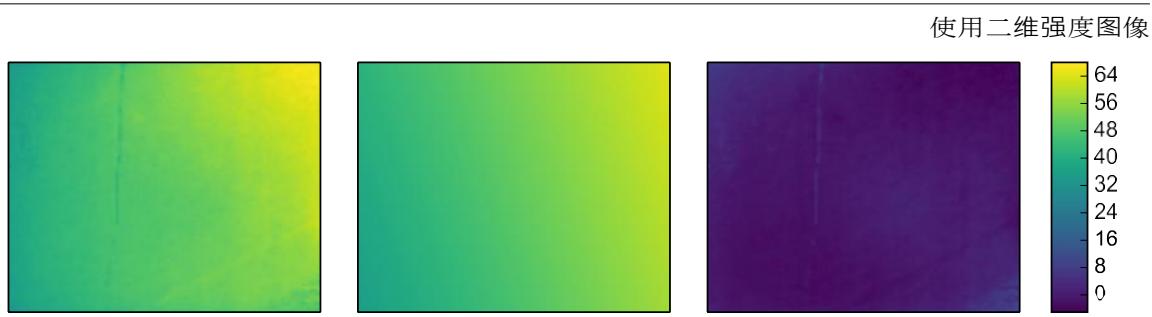


图4.6:用一个线性模型来逼近背景项。从左到右，在任意单位：通过校准得到的背景项**B** 线性近似的B。

B 减去线性成分后的残余背景项。

使用简化的物体模型，位置恢复对噪声仍然是稳健的，相对运动仍然被可靠地检测到。

对测量的背景项**B**的需要会阻碍我们迄今为止所追求的方法的实际适用性。在实验4中，我们取消了这个要求。在没有任何补偿的情况下省略该项，跟踪性能明显下降（图4.5(b)）。然而，我们观察到，由远处散射引起的背景图像通常是平滑的，并由图像坐标 u 和 v 中的线性函数 $g(u, v) = au + bv + c$ 很好地近似（图4.6）。我们扩展了跟踪算法，将这种线性模型适合于输入图像**M**和**S** (p)，并在评估成本函数之前减去线性部分（公式4.1）。这个简单的预处理步骤大大减少了跟踪结果的偏差，即使在未知的房间里也能对物体运动进行稳健的跟踪（图4.5 (c)）。

本文的补充视频显示了使用所述设置的两个实时跟踪会话（会话1：仅翻译；会话2：翻译和旋转）。隐藏场景的实时视图显示在跟踪软件的输出旁边。在这些跟踪会话中，会话1的平均重建率为每秒10.2帧（受限于我们的相机-激光装置的最大捕获率），会话2的平均重建率为每秒3.7帧（受限于计算）。二维汽车模型由502个冲浪点表示；单个跟踪步骤所需的总计算时间，仅平移时为72.9毫秒，平移和旋转时为226.1毫秒。

4.3 讨论

这项工作的核心发现是，无需使用飞行时间技术就可以解决跟踪转角处的物体这一流行的挑战。通过制定一个基于简单图像形成模型的优化问题，我们展示了仅使用激光笔作为光源的二维图像的准度量物体跟踪。在一个房间大小的场景中，我们的技术实现了亚厘米级的重复性，这使它与最新的基于飞行时间的技术[Kad+16; Gar+16]相媲美。然而，由于我们的技术不依赖于任何形式的时间分辨率测量，它具有独特的特性，可以扩展到非常小的场景（低至衍射极限）以及大场景（提供足够的激光功率）。我们注意到，通过综合分析的方法是接

4.3. 讨论

它并不局限于纯粹的强度成像，也可能形成对其他传感方式的宝贵补充。例如，对光传输模型的简单扩展将使其能够适应飞行时间或相位成像。

综合分析范式的一个关键特征是其透明度。将虚拟实验（模拟）与真实实验放在一起，可以对传感问题进行严格的定量分析。例如，使用差异图像，我们调查了参数变化对信号的影响，并预测了厘米级运动的可探测性。同样的机制也可用于获得关于场景模型中额外未知因素的鲁棒性估计，如非漫反射物体或额外物体的预设。有了这些选择，我们的方法与现有的非视线传感技术相比具有明显的优势。

我们的技术的实时性由四个主要因素决定：摄像机的捕获率（受曝光时间和读出带宽的限制），计算系统的性能，模型的离散化为冲浪点，以及提供给模型的翻译和旋转自由度的数量。其他因素，特别是物体和房间是否已知的问题，在这方面是不相关的。

我们发现我们的技术的分辨率和可重复性有四个主要限制因素。首先，场景和光传输模型的缺陷会带来系统性的偏差。我们示范性地展示了额外的启发式预处理步骤是如何减轻这种偏差的。在系统误差排除了定量跟踪的使用场景中，较简单的传感任务，如物体运动的检测，仍有可能。其次，对额外参数的跟踪，如旋转、非刚性物体或多个物体位置，对图像噪声很敏感。采用先进的过滤技术或多帧平均将进一步提高跟踪质量。此外，某些应用将需要仔细选择提供给模型的自由度。第三，就像所有先前的工作一样，我们假设了关于接收未知物体散射光的墙壁的几何形状和角度再反射分布的知识。由于最近在移动测绘方面的进展[Pue+13]，高度详细的几何和反照率纹理数据对于许多应用场景来说已经广泛可用；如果没有，可以使用现有的视线传感方法来恢复。最后，我们的跟踪结果是局部参数搜索（Levenberg-Marquardt）的结果，因此不能保证是成本函数（公式4.1）的全球最优。尽管我们在实践中从未遇到过收敛问题，但有些情况下可能需要结合全局和局部优化策略。

能够在直接视线之外进行感应的前景可以使许多应用领域受益。到目前为止，现有方法的部署一直受到实际限制的阻碍，如长的捕获时间和设备成本。正如我们在这里所展示的那样，如果问题能够减少到少量的自由度，这些限制原则上是可以克服的。这种缩小的模型的首批应用之一可能是在城市交通安全方面，在那里车辆和行人的运动被限制在地平面上。从我们的结果推断，我们相信更详细的前向模型和精确的模拟技术可以成为对非视线传感问题的深刻洞察力的来源，并最终使第一个真正实用的解决方案能够在拐角处寻找。

4.4 方法

光传输模拟。间接照明的精确模拟在计算上很昂贵，可能需要几个小时才能完成。通过假设所有的光都经历了精确的三次反射，我们实现了整体计算复杂性的降低，即在像素数和表面数 n 的范围内。每个相机像素观察到一个辐射值 L ，从墙上的一个点离开， p_W ，反过来，它又接收到物体表面反射的光线。索引 $i \in \{1 \dots n\}$ 的冲浪板所贡献的部分是三个反射项的乘积，每个反射事件一个；以及从辐射传输[CG14; Gor+84]知道的几何视图因子。

$$L_i := \begin{aligned} & \rho_0 - f_{\{s,i\}}(p_L - p_S, p_i - p_S) && (\text{激光点}) \\ & - \frac{(n_S \cdot (p_i - p_S)) - (n_i \cdot (p_S - p_i))}{\|p_S - p_i\|_2^2} - f_i(p_S - p_i, p_W - p_i) \cdot A_i && (i^{\text{th}} \text{ surfel}) \\ & - \frac{(n_i \cdot (p_W - p_i)) - (n_W \cdot (p_i - p_W))}{\|p_i - p_W\|_2^2} f && (p_i - p_W, p_C - p_W) \quad (\text{墙}) \end{aligned} \quad (4.2)$$

其中操作员

$$v \bullet w := \begin{cases} \frac{v^T \cdot w}{\|v\|_2 \cdot \|w\|_2} & \text{如果 } v^T \cdot w > 0 \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

表示Lambert余弦定律中使用的归一化和钳制的点积。方程4.2中的每一行都是三种表面相互作用中的一种。 n_S, n_i 和 n_W 是激光点、surface和墙上的观察点的法向量， $f_{\{s,i,W\}}(\omega_{\text{in}}, \omega_{\text{out}})$ 是相应的双向反射分布函数(BRDF)的数值。构成BRDF参数的入射和出射方向向量 ω_{in} 和 ω_{out} 由场景几何学给出。特别是，矢量 p_L, p_S, p_i, p_W 和 p_C 依次代表：激光源、墙上的激光点、 i^{th} 表面、墙上的观察点和摄像机(投影中心)的位置。 A_i 是 i^{th} surfel的面积， ρ_0 是一个常数，包含了激光功率和镜头及传感器的光efficiencies。这个因素被成本函数方程4.1中的投影所抵消，所以我们在模拟中把它设置为 $\rho_0 = 1$ 。总的像素值是通过对所有冲浪点的等式4.2进行简单计算。

$$L_{\text{total}} := \sum_{i=1}^n L_i \quad (4.3)$$

这种求和方法忽略了表面之间的相互阴影或相互反射，这种方法对于平面或大部分凸面物体来说是合理的。由于缺乏测量的材料BRDFs，我们进一步假设所有表面都是漫反射(Lambertian)，这样 $f_{\{s,i,W\}} := \text{const} = 1$ ，再次利用成本函数(公式4.1)在这种全局缩放因子下是不变的。如果说有的话，更精确的BRDF模型以及物体和墙面纹理可以忽略不计的计算成本包括在内。

捕获设备。我们的图像源是Xenics Xeva-1.7-320相机，在近红外范围(900纳米-1,700纳米)敏感，分辨率为 320×256 像素，14比特

每个像素。我们使用的曝光时间为20毫秒。激光源（1.550纳米的1瓦）是一个SemiNex 4PN-108型光纤耦合激光二极管，由Analog Technologies ATLS4A201D激光二极管驱动器驱动，并配备了一个USB接口触发输入。在光纤的输出端，我们将准直光束送入一个带有吸收壁的窄管，以减少杂散光。

一台配有NVIDIA GeForce GTX 780 GPU、32GB内存和Intel Core i7-4930K CPU的台式电脑控制这些设备并进行重建。

测量程序和图像预处理。在使用供应商的工具校准了相机的增益因子和固定模式的噪声后，我们假设所有的像素都有相同的线性响应。在进一步处理之前，所有的图像都被降格为一半的分辨率（160 128像素）。由于漫反射，除了噪声之外，~~不包含任何高空间频率的信息~~。因此，适度的下采样是提高后期重建性能的一个安全途径。

照相机测量的图像由几个贡献组成，每个贡献由一个像素向量代表：非来自激光的环境光，**A**；由场景中存在的静态背景物体散射的激光，**B**；以及由动态物体散射的激光，**O**。所有测量的图像都进一步受到噪声的影响，主要来源是光子计数噪声和与信号无关的读取噪声。我们假设场景至少在连续捕获的短时间间隔内保持静止。进一步假设物体的空间范围很小，物体对**A**和**B**的阴影，以及物体反射的环境光都可以忽略不计。通过打开和关闭激光器，以及插入和移除物体，所述的这种设置可以捕捉到这些光线贡献的以下组合。

激光关闭（0），物体不存在（0）： $\mathbf{I}_{00} = \mathbf{A} + \text{噪音}$

激光打开（1），物体不存在（0）： $\mathbf{I}_{10} = \mathbf{A}$

+ **B** + 噪音 激光关闭（0），物体存在（1）：

$$\mathbf{I}_{01} = \mathbf{A} + \text{噪音}$$

激光开启（1），物体存在（1）： $\mathbf{I}_{11} = \mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{O} + \text{噪音}$

重建算法的输入图像，**M**，是在有激光照明和无激光照明的情况下快速连续拍摄的图像的差异。此外，我们还减去了含有背景反射光的校准测量。

$$\mathbf{M} := \mathbf{I}_{11} - \mathbf{I}_{01} - \mathbf{B} \approx \mathbf{O} + \text{噪音}, \quad (4.4)$$

两幅输入图像的加减会使噪音大小增加一个系数，即

关于 $\bar{\mathbf{B}}$ 。背景估计值 $\bar{\mathbf{B}}$ 是在去除物体的情况下捕获的，通过记录

有激光照明和无激光照明的差异图像。我们平均了 $n = 300$ 张这样的差异图像，以减少背景估计中的噪音。

$$\bar{\mathbf{B}} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (\mathbf{I}_{11}^{(i)} - \mathbf{I}_{00}^{(i)}) \approx \mathbf{B} \quad (4.5)$$



第五章

非视距成像问题的定量平台

本章作为同行评议的论文发表在英国机器视觉会议上。

在2018年[Kle+18]。

作者们发现最近涌现大量的关于非视线外成像的工作 [Kle+18], 和大多数报告的结果依赖于截然不同的测量设置和算法, 因此很难甚至不可能进行定量比较。在本文中, 我们重点关注一类重要的方法, 即那些旨在从时间分辨的光学脉冲响应中重建场景属性的方法。我们介绍了一系列的参考数据和质量指标, 这些数据和指标是为最常见的使用情况量身定做的, 我们还定义了重建的挑战, 我们希望这些挑战能有助于未来方法的发展和评估。

5.1 简介

对直接视线以外的物体进行成像的挑战在许多应用中都具有巨大的潜在意义, 多年来一直吸引着科学家、工程师和普通公众。最近, 计算传感方法的引入使研究人员能够 "在角落里寻找", 并给这个主题带来了新的动力[Kir+09; Vel+12]。许多已发表的工作旨在从间接光反射的时间分辨测量中恢复各种场景属性 (房间几何、物体形状和位置、材料)。然而, 使用不同的空间和时间分辨率的不同测量设置, 以及缺乏标准的目标和地面实况, 使得我们很难在所使用的重建算法之间进行有意义的比较, 为未来的传感设计得出建议, 并预测这些设计在真实世界条件下的性能。事实上, 时至今日, 人们仍然不知道理论上和实践上的差异是什么。非视线 (NLoS) 成像的实际限制是。

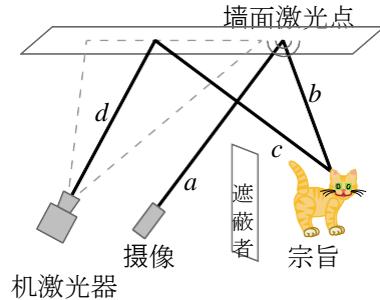


图5.1：在最常见的NLoS重建的情况下，光所走过的路径（激光-墙-物体-墙-摄像机）由四段 $a-d$ 组成，由三个漫反射连接。

在此，我们迈出了填补这一空白的第一步，提出了一个定量的基础，旨在促进基于飞行时间数据的非视线重建方法的发展、特性和比较。我们的努力有三个方面，包括以下主要贡献。

- 一个有注释的合成时间分辨场景反应的数据库，以独立于硬件的方式反映了常见的重建任务。
- 制定特定任务的误差指标，以确定重建结果的基准，以及
- 支持性的软件基础设施，即一个代码库和一个在线服务，它承载了一些基准和盲目重建挑战。

我们希望这个定量平台将有助于巩固现有的研究工作，帮助开发未来的重建技术，并作为遵守和记录良好科学实践的工具为社区服务。

5.2 艺术的现状

我们认为旨在通过使用遮挡者变得透明的电磁波来规避遮挡问题的工作，如无线电波 [Adi+15; AK13; FC99]，或者利用光的相干特性，使用干涉测量法或斑点相关法重建物体 [Kat+14]，都不在本文的讨论范围。相反，我们把重点放在那些依靠几何光学和经典辐射传输的方法上。在下文中，我们提供了这些作品的设备和设置、场景布局和重建算法的概述，并在本节的最后试图将最相关的内容统一到我们的定量框架中。

5.2.1 场景设置：三个漫反射

位于照相机或结构光源的直接视线内的物体可以通过直接观察或用投影仪探测来成像 [Sen+05]。“绕着角落看”的挑战是指目标既不能直接被照亮也不能被观察，而其他物体（反射器）的反射是

5.2. 艺术的现状

是唯一剩下的信息来源。¹ 这些反射体的光泽度对它们传递的信息量有很大的影响（见[Kad+16]对这个交易空间的详细分析）。一个表面越像镜子，它就越能被用来琐碎地观察被遮挡的区域；在尺度的另一端是漫反射表面，它在反射时完全破坏了光的方向性。

这导致了一个典型的场景安排，它在之前的大多数作品中都很突出[AGJ17; But+15; Car+17; Cha+17a; Gar+16; Hei+14; Kad+16; Kir+09; Kle+16; LV14; Ped+17; Shr+16; Vel+12; War+16; Tsa+17; Hei+18]，如图5.1所示。未知目标位于一堵平面墙（或地板）的前面，并被遮挡住，无法直接观察。用准直光源（激光）照亮墙上的一个点，将这个点变成一个小面积光源，照亮目标。目标接收到的一部分光反过来又散射到墙上，从那里反射到准直的探测器或其他成像设备。最终，探测器接收到的光的总路径由四条直线段组成，由三次反弹连接。解释这一设置的一个常见方法是假设捕获装置和墙壁的几何形状是已知的。类似于把激光点当作一个虚拟的区域光源，检测器像素所观察到的墙面点可以被解释为一个虚拟的全向检测器[Kad+16]。只考虑这些虚拟设备之间的2段光路会导致时间轴的转换，Velten等人称之为非扭曲[Vel+13]。

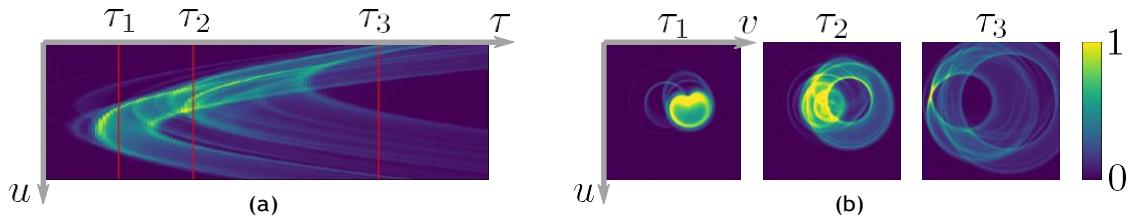
5.2.2 空间-时间脉冲响应/设备

由于无法获得直接的视线，因此需要关于未知目标的其他信息来源。通常，超快的光源和时间分辨探测器被用来探测场景的时间脉冲响应。这通常会导致一个瞬时图像 $\mathbf{I}(u, v, \tau)$ 的概念，其中 u 和 v 是通常的图像坐标， τ 是光的旅行时间（图5.2）。我们请读者参考最近关于这个一般主题的调查[Jar+17]。用于该目的的器件包括快速光电二极管[Kir+09]、条纹管[Vel+12]、门控图像增强器[LV14]和雪崩光电探测器[But+15; Cha+17a; Gar+16; Ped+17; Hei+18]。尽管按照常理，高空间分辨率需要高时间分辨率的测量设备，但其他研究人员也证明了在某些任务中使用较慢的发射器和传感器。例如，振幅调制连续波（AMCW）飞行时间设置[Hei+14; Kad+16; Shr+16]，甚至完全不调制的强度图像[Kle+16]。

5.2.3 重建任务和算法

文献中报道的非视线传感解决方案在自由度的数量上有很大的不同，从物体检测、识别和跟踪[Cha+17a; Kad+16; Kir+09; Kle+16; Shr+16]到房间形状的描述[Ped+17]再到全三维形状的复原[But+15; Hei+14; Vel+12; Hei+18]。这也重新反映在所提出的各种算法中，我们确定了两类主要的方法。第一类的目的是用一个或多或少复杂的方法来解释观察到的信号。

¹这也排除了像Jin等人[Jin+14]所描述的设置，即采用针孔对隐藏场景进行间接成像。



第5章。非视距成像问题的定量平台

图5.2：如图5.1所示，一个物体反射到墙上的未扭曲的瞬时图像 $\mathbf{I}(u, v, \tau)$ 的切片。 $u \tau$ 切片(a)类似于条纹图像，而 $u v$ 切片(b)可以解释为光的飞行视频帧。(为了显示，范围已归一化)。

正向模型。例如，研究人员提出了基于定向表面斑块的辐射传输模拟[Kir+09; Kle+16; Ped+17]，导出了线性化光传输张量[Hei+14; Hei+18]，并利用额外的几何约束来表达光传输为光锥的卷积[OLW18]。因此，重建场景 \mathbf{s} 的问题通常采用测量图像和模拟图像之间差异的正则化最小化的形式。

第二类重建算法是基于背投原理，时空响应中的强度值为重建体积内可行的物体位置“投票”。对于每个给定的样本，这些位置的流形在空间中形成一个椭圆体[Vel+13]。

我们不知道任何系统的调查，以确定哪种方法最适合于特定的重建问题。对于背投技术，La Manna等人比较了不同的风味（加法/乘法背投）以及不同的迭代和过滤策略[La +17]。

5.3 挑战设计

在最高层次上，我们的挑战中所涉及的非视线重建问题是：给定瞬时图像 $\mathbf{I}(u, v, \tau)$ ，场景 \mathbf{s} 是什么？这里， \mathbf{s} 可以代表任何感兴趣的场景属性，比如物体或房间的形状、物体类别、物体的位置和方向、材料反射率、纹理等等。在这一节中，我们的目的是将以前讨论的工作统一到我们提出的评估基准中。

5.3.1 基本的场景几何学

种类繁多的设置使我们很难直接比较现有的方法，因此需要进行统一。我们提出了一个新的、简约的设置，它只包括以前设置中常见的关键元素，如图5.3所示。我们的场景只包括一个光源、一个反射光线的物体和接受反射的墙壁。目前所有的场景都只包含一个物体，一些例子可以在图5.5a中看到。

值得注意的是，这种设置不包括实际的遮挡者，或者一般来说，不包括围绕墙壁和物体的场景。在以前的出版物中，我们通常认为，这些

5.3. 挑战设计

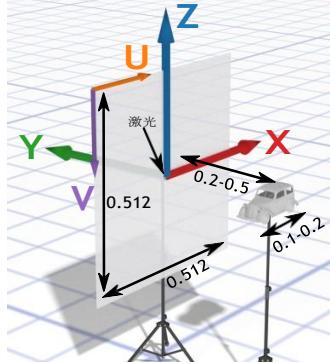


图5.3:我们统一的场景几何。

元素不通过遮挡或反射与光传输相互作用，因此它们的存在通常被忽略了。

该装置包括一个单一的激光点，它位于墙壁的中心，形成坐标系的原点。一个观察点阵列对到达墙壁的反向散射进行采样。由于光传输的互惠性，我们的数据也可用于假设有一个观察点和多个照明点的方法。我们不包括有多个观察点和多个照明点的最一般的（五维）情况，因为捕捉和存储这样的数据在实践中是难以做到的。需要这种更一般的瞬时图像的尝试（如[OLW18]）只使用其中的某个子集，但目前还没有就具体子集达成协议。当一个新的标准出现时，我们的数据库将被相应地更新。

场景物体被放置在墙前的体积内的不同位置，使其在X/Z平面上的投影总是完全位于墙内。这个星座可以被认为是重建的甜蜜点，尽管在实践中，将激光点放在探测器的视场内会使设置更容易出现镜头闪光。

几乎所有以前的工作都假设是完全扩散的材料，这就是为什么我们基准中的大多数物体也是完全扩散的。为了探究扩散假设的极限，一些物体使用了基于GGX模型[Wal+07]的闪亮金属材料。由于材料重建不是这个第一次迭代中的基准的一部分，所以提供了所有的材料参数。

5.3.2 数据单位和格式

我们的图像形成模型不包含任何非线性因素，因此设置的实际规模是不相关的。图5.3所示的尺寸是通过对文献中发现的设置比例的广泛分析得出的（见补充）。用光路长度来表示时间维度，可以使我们对空间维度和飞行时间使用相同的任意单位。

除了[Kle+16]以外，所有考虑到的硬件平台都使用时间分辨数据进行重建，但数据格式取决于所使用的硬件。我们提供通用格式的原始瞬态数据，可以转换为任何类型的硬件格式（包括[Kle+16]中使用的强度图像，通过对时间维度的积分）。一个瞬态图像的例子可以在图5.2中看到。

我们所有的数据都是经过时间解包的（图5.1中的路径段 a 和 d 被移除），但是我们提供了一个转换工具，在这个工具中可以指定相机和激光的位置。该工具对解包进行了反转，包括对反射镜壁进行裁剪和透视变换。通过各种噪声源对数据进行额外的破坏也是可能的（详见补充说明）。我们鼓励参赛者使用这些工具为他们的设置制作真实的原始数据（包括传感器响应、额外的镜头变形、转换为相机数据格式以及其他效果）。这些数据的结果反映了它们在现实设置中的表现，但不是比赛的一部分，因为不同的设置使它们没有可比性。

5.3.3 瞬态图像生成

我们从两个方面来说明使用合成渲染而不是真实测量的原因：首先，每个硬件都有自己的局限性，没有任何设置可以直接捕获实际的瞬时光传输。其次，评估需要地面真实数据。构建和测量一个真实的场景将不可避免地引入某些错误，也会妨碍使用图5.3中所示的最小化设置。因此，合成渲染图既能提供高质量的瞬态图像，又能提供高质量的地面真实数据。

作为渲染工具，我们扩展了pb_rt-v3 [PJH16]，这是一个最先进的、多用途的全局照明渲染器，特别注重物理精度，通过追踪路径长度和编写三维瞬态输出。得到的图像的正确性得到了验证，具体如下。我们假设未经修改的pb_rt-v3计算的强度图像是物理上准确的，因为它明确的设计目标之一就是物理上的准确性，它已经存在了很多年，它的开放源代码已经被全世界数百名科学家研究过。我们在时域上整合了瞬态图像，并成功地将其与同一场景的强度渲染进行了充分的比较，这意味着每个瞬态像素都有正确的光总量。我们通过渲染具有尖锐时间响应的测试场景来检查正确的时间分布，其时间偏移很容易测量。最后，通过在启用和禁用重要性采样的情况下渲染同一场景，使其几乎完全收敛并比较结果，成功验证了重要性采样。

用全局照明渲染无噪声的图像在计算上是很昂贵的，而瞬时图像的额外第三维度大大加强了这个问题。这些图像的空间分辨率为256×256像素，时间分辨率为1600。

关于数据格式和渲染器实现的详细描述，我们参考了
补充材料。

5.3.4 提交

我们重建基准的数据集可通过网络前端<https://nlos.cs.uni-bonn.de/>。该系统的功能受到现有产品的启发，特别是已知的双视角和多视角立体重建挑战。除了瞬时数据集，用户还可以下载一个SDK，其中包括数据处理、误差度量和基线重建算法，即椭圆体反投影的功能。

5.4. 场景

用户可以创建一个匿名账户来上传他们的重建，并让他们与地面真相进行评分。分数有时间戳，可以提交到排行榜上（以匿名或非匿名的形式），在那里与其他参赛者的分数进行比较。

5.4 场景

我们提出了一组挑战，每个挑战都是针对非视线成像中的一个具体问题，并为其评估引入了适当的指标。所有场景的完整列表可在补充文件中找到。

除了这里提出的四个挑战，我们的平台对未来的扩展是开放的，包括材料重建[24]、非刚性姿态估计（如跟踪有关节的人类运动）和有许多详细物体的复杂场景。

5.4.1 材料

我们的数据集包含有两种不同材料的模型。非视线成像文献通常假设隐藏场景是完全漫射的。因此，我们对大多数物体使用漫反射材料（反照率为0.8）。为了反映现实世界的情况，我们在数据库中加入了大约25%的由非漫反射材料制成的物体，即pbrt的默认金属材料，它实现了Walter等人的GGX模型[Wal+07]。材料参数 $k=3.63$ 和 $\eta=0.216$ 代表波长为650nm的铜。它们在整个基准中保持不变。虽然这种额外的变化并不适合在挑战中包括材料参数的重建，但它探测了不同的重建算法对不同材料的处理能力，或者它们受漫反射世界这一无效假设的影响有多大。

5.4.2 几何学重建

这一挑战的目标是通过单一的瞬态图像重建物体的几何形状，如图5.4a所示。为此，提供了16种不同复杂度的物体类型。

为了评估结果，必须对地面真实网格和重建的网格进行比较。存在多种经典的网格比较指标，采用表面距离和曲率的测量[RR96; SZL92]或体积[LT98]。两个网格之间的全局比较可以使用基于Hausdorff距离的误差度量来实现[KLS96]。然而，并不存在唯一最佳度量，适当的选择取决于具体的场景。

由于我们处理的是不透明的物体，因此反射光不带有任何关于其内部的信息，应用表面度量是一个自然的选择。更确切地说，我们选择比较三角形网格，因为它们是一种广泛使用的、易于处理的表面表示。我们定义我们的度量如下。让 $M \subset \mathbb{R}^3$ 是一个由其三角化 $T \subset \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3$ 描述的网格。考虑一个三角形 $t := (\mathbf{v}^t, \mathbf{v}^t, \mathbf{v}^t) \in T$ 它的角顶点 \mathbf{v}^t 。它的中心由 $\mathbf{c}^t = (\mathbf{v}^t + \mathbf{v}^t + \mathbf{v}^t)/3$ 给出，其面积由

$$0 \quad 1 \quad 2 \\ i_0 \quad i_1 \quad i_2$$

$A^t = \|(\mathbf{v}^t_1 \cdot \mathbf{v}^t) \times (\mathbf{v}^t - \mathbf{v}^t_2)\|/2$ 其中 $\|\cdot\|$ 表示欧氏规范。不对称的从一个三角形网格 M_0 到另一个三角形网格 M_1 的距离由以下公式给出

$$d(M_0, M_1) = \overline{\min_{t_0 \in M_0} \max_{t_1 \in M_1} \|\mathbf{c}^0 - \mathbf{c}^1\|} \quad (5.1)$$

与 $A^{M_0} = \sum_{t \in M_0} A^{t_0}$, 而对称距离由 $\sum_{t \in M_0} A^{t_0}$

$$D(M_0, M_1) = \max(d(M_0, M_1), d(M_1, M_0)). \quad (5.2)$$

本质上，每个表面积的平均距离被计算出来。作为地面真实网格和重建的网格，我们同时存储距离 $d(,)$ 和 $d(,)$ ，因为它们代表不同的质量指标。例如，如果只有一个 R_B 被正确重建， $d(R_B, G_R) = 0$ ，而当重建包含整个体积时， $d(G_R, R_B) = 0$ 。这个度量的其他属性是。

- 由于面积加权，处理的中立性：网格的每一部分都具有相同的重要性，像细分这样的标准操作都得到了适当的处理。
- 对不完整和过度完整的鲁棒性：如果 M_0 ， M_1 的多余部分~~没有~~有很好的匹配，从而增加 $d(M_0, M_1)$ 。同样地 M_0 是由 $D(M_0, M_1)$ 处理的。远离 M_1 格的多余的几何体会受到更强的惩罚。

反射信号主要包含关于物体正面的信息。因此，在评估中也只考虑物体的正面，过滤掉远离墙壁的三角形。

一些提议的算法重建了占有率或概率体积。这种体量表示可以通过SDK中提供的Marching Cubes[LC87]的实现转换为三角形网格。我们鼓励担心三角测量质量的参赛者使用不同的实现。

5.4.3 位置和方向跟踪

在物体追踪中，目标是重建每一帧物体的位置和方向，从而形成一个完整的轨迹重建，见图5.4c。为此，提供了具有已知和未知几何形状的不同物体。

对于每个物体有四种不同的动画轨迹：i) 物体沿三个主轴移动，ii) 物体围绕三个主轴旋转，iii) 物体沿复杂路径移动，以及iv) 物体沿复杂路径移动并采用其方向。对于每个物体，都使用单独的路径。

为了保持数据库的可管理性，动画轨道被限制在40帧以内，每一帧由一个位置（物体的质心）和一个方向组成。两个路径 P 和 P' ， $P = (\mathbf{p}_0, \mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_{n-1})^\top$ ， $\mathbf{p}_i = (p^x, p^y, p^z) \in \mathbb{R}^3$ ，比较如下

iii

计算均方根（RMS）误差。

$$\|\mathbf{P} - \mathbf{P}'\|_{\text{pos}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}'_i\|^2} \quad (5.3)$$

5.4. 场景

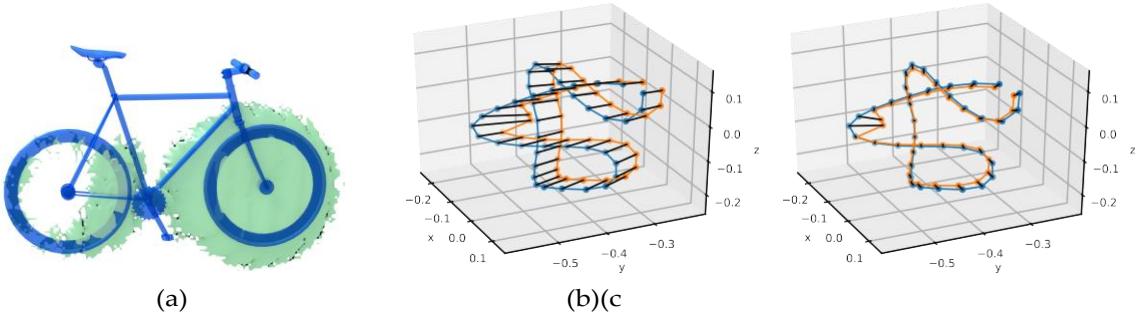


图5.4:(a):示范性的几何学重建。自行车物体的基本形状（蓝色）在重建中是可以识别的（绿色），但是像马鞍、踏板和车把这样的细节却没有。(b-c):轨迹重建。(b):地面真实轨迹显示为蓝色，重建后的轨迹显示为橙色。(c):在减去一个恒定的偏移量后，除了两个异常值外，轨迹都很接近了。

由于这个指标会对异常值进行惩罚，因此鼓励参赛者采用适当的异常值检测和去除，例如，将结果与邻近的时间段进行比较。此外，计算出的物体质心可能有偏差，所以要计算出 P 和 P' 之间的最小二乘最优常数偏移 x' 。

对于评估，最小路径距离 $S = (\frac{\|\mathbf{P} - \mathbf{P}'_{pos}\|}{\|\mathbf{P}\|}) / \|\mathbf{x}\|$ ，偏移量 \mathbf{x} 的长度和完整性（重建的帧数除以总数）。帧数）进行评估。

方向是以类似的方式处理的：给定方向 \mathbf{q} 和 \mathbf{q}' ，在四元数表示中，差值由单位四元数点积公制来计算。

$$\|\mathbf{q} - \mathbf{q}'\|_{quat} = 1 - |\langle \mathbf{q}, \mathbf{q}' \rangle| \in [0, 1].$$

其中， $|\langle \cdot, \cdot \rangle|$ 表示四元数的四个分量之间点积的绝对值[Huy09]。定义物体的原始方向并不像将其原点定义为质量中心那样简单。因此，每个动画的第一帧的初始方向是给定的，因此只对 n_1 帧进行评估。有了这个度量，方向重建的准确性被评估为类似于路径距离，包括完整度的得分。

5.4.4 种类

分类挑战的目标是准确地确定一个物体的类型。为此，我们提供了一个由11个已知模型组成的分类数据集，见图5.5a。每个模型在通常体积内的不同位置和方向上被渲染。我们的目标是决定在每个场景中显示哪一个物体。这个挑战预计是最容易的，因为可能的输出范围非常有限。

分类结果在混淆矩阵中使用精度和召回率的谐波平均值 (F_1 score) 进行评估。一般来说，使用的是模糊分类；做硬分类的算法因此将其权重限制在0和1。

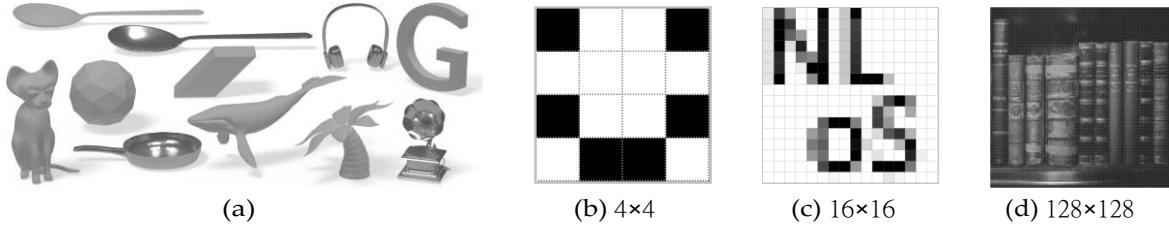


图5.5：a) 分类数据集。b-d) 纹理重建挑战中的实例纹理。这些纹理具有不同的分辨率和不同的颜色深度。

5.4.5 纹理重建

对于纹理重建的挑战，一个已知的平面几何图形被设置在与反射器平行的指定位置。它有不同的纹理，必须要进行重建。它们被分成三类，分辨率和颜色深度不断增加（4 4像素的黑白，~~16 16像素的5灰度值~~，~~128 128像素的256灰度值~~）。图5.5中可以看到不同类别的例子。

非视线纹理重建有一些独特的特点，在定义比较指标时需要考虑到。虽然到目前为止还没有出版物直接解决纹理重建的问题，但有一些出版物重建了平面字母，这个问题在性质上是相似的。基于这些结果，我们期望重建的纹理能比高频细节更好地覆盖低频内容。因此，我们提出了一种多尺度的方法，独立比较不同的频段。

给定一个 $n \times n$ 像素的纹理 $\mathbf{T} [0, 1]^{\mathbb{C}^{n \times n}}$ ，其中 n 是 2 的幂，我们通过迭代模糊和降低 \mathbf{T} 的取样来计算拉普拉斯金字塔，并将步骤之间的差异存储在各个金字塔层[BA87]。这实质上是将图像分解为不同的频率成分。

让 $\mathbf{T}_n, \mathbf{T}_{n/2}, \dots, \mathbf{T}_1$ 分别为 $\mathbf{T}'_n, \mathbf{T}'_{n/2}, \dots, \mathbf{T}'_1$ 表示各个金字塔层。
每层之间的差异是通过应用 Frobenius norm $\|\cdot\|_F$ 到的方式计算的。
纹理差异 $\mathbf{T}_n - \mathbf{T}'_n$ 并将结果归一化为 n^2 。这允许质量

在不同的尺度上进行测量，例如，取每像素平均差异平方的平方根。

$$\frac{\|\mathbf{T}_n - \mathbf{T}'_n\|^2}{(n/2)^2} = \frac{\|\mathbf{T}_{n/2} - \mathbf{T}'_{n/2}\|^2 / (n/2)^2}{(n/2)^2}, \dots, \frac{\|\mathbf{T}_1 - \mathbf{T}'_1\|^2}{(n/2)^2} \quad (5.4)$$

在每个量表的这些质量指标旁边，其（统一加权的）平方平均值

$$\|\mathbf{T} - \mathbf{T}'\|_{\text{图像}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{\log_2(n)} \|\mathbf{T}_{on/2^i} - \mathbf{T}'_{on/2^i}\|^2 / (n/2^i)^2}{\log_2(n) + 1}} \quad (5.5)$$

被用作质量指标。

5.5 重建的结果

除了Arellano等人[AGJ17]外，没有重建代码，使得比较具有挑战性。因此，我们用事实上的标准重建方法--椭圆体反投影来作为我们的重建挑战的种子，使用[AGJ17]的实现。它的通用性和普遍性（以及缺乏通用的替代方法）使得背投成为当前和未来工作的自然基线。虽然该方法本身只能用于几何重建，但我们实现了对位置跟踪的直接扩展（其中物体位置被定义为重建体积的质心）。我们设想也可以开发适应其他挑战的方法，但认为这超出了本基准的范围。

图5.4显示了几何重建和物体跟踪的结果。
每个场景的确切数字可在补充材料中找到。

5.6 讨论和展望

在本文中，我们为非视线成像的第一个重建基准引入了方法和数据基础。到目前为止，该领域的研究类似于一个孤立的数据点的集合，其中大多数有希望和鼓舞人心的结果，但没有与其他工作的有力联系。当然，考虑到任务、规模和设备的多样性，像我们这样的数据库所能提供的必须是一种妥协。尽管如此，我们希望这项工作可以作为一个种子，继续努力在过去和未来的工作之间建立量化的联系，从而进一步统一这个领域。

随着研究的进展，我们计划用新的重建问题和现实数据（例如需要选手过滤掉的场景背景的散射光）不断地更新数据库。我们也希望更多的研究人员愿意分享他们的重建代码，以便建立一个开源的重建算法库。

该数据库、提交系统和所有其他材料都可在我们的网站上找到，网址是
<https://nlos.cs.uni-bonn.de/>。

补充材料

本文件包含非视线成像问题的定量平台的补充信息。各部分内容自成一体，不一定要按顺序阅读。

5.A 挑战设计

5.A.1 设置尺寸和几何形状

我们的设置使用任意的单位，但尽管如此，我们还是要决定各个部分的比例。由于以前发表

的工作中的设置差别很大（见表5.1）。

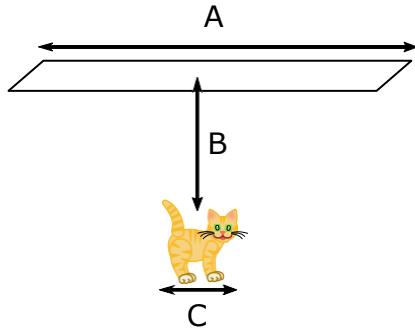


图5.6：我们根据反射器的比例（A）、与物体的距离（B）和物体的大小（C）对现有设置进行分类。

我们专注于三个主要数量。反射器的大小，物体和反射器之间的距离以及物体本身的大小（见图5.6）。

我们通过取各个数值的几何平均值来选择设置的大小（如图5.3所示），并应用一些人工调整（例如，特别是difficult比例的权重较小，如果对它们的报告结果不如平均值）。设置的其他有趣的数量是它的时间分辨率 T ，以及在测量常规过程中被照亮（ N_i ）和被观察（ N_o ）的直接可见场景位置的数量和分布。它们也显示在表5.1中。我们把时间分辨率定在条纹相机[Vel+12]的分辨率上，因为它们提供了最高的分辨率，并使用一个单一的照明点和一个规则的观察网格。

点。

表5.1：文献中报告的各种设置的主要规格：时间分辨率 T （直方图二进制大小或点扩散函数，以较大者为准）；观察（ N_o ）和照明（ N_i ）位置的数量；如图5.6所示的场景尺寸A、B和C；以及这些尺寸的比率。所有的数值都是近似的；括号里的数值是本文作者根据各自作品中提供的信息估算的。标有AMCW或的条目分别表示振幅调制相关传感器和稳态强度成像器。

∞

参考文献	T [ps]	N_o	N_i	A [cm]	B [cm]	C [cm]	A/B	B/C
。								
[Kir+09]	250	1	1	(2.5)	(4.3)	(3)	0.6	1.4
[Nai+11]	1.6	(672×512)	> 1	25	(15)	(1-1.5)	1.6	12
[Vel+12]	15	672	> 1	40×25	25	1.5×8.2	1.4	5
[Hei+14]	AMCW	160×120	1	200	150	(80)	1.3	1.8
[但是+15]	30	1	185	100×80	150	40	0.6	3.8
[Kad+16]	AMCW	176×144	1	200×100	100	4	1.5	25
[Kle+16]	∞	320×240	1	130	(60)	80×30	2.1	1.2
[Gar+16]	110	32×32	1	15×30	45	30×10	0.5	2.6
[Cha+17a]	64	3	1	30	50	15×15	0.6	3.3

5.B 数据集

所有的数据集都使用图5.3所示的场景安排进行渲染。数据以瞬时图像 $\mathbf{I}(u, v, \tau)$ 的形式提供，其中图像坐标 $(u, v) [0, 1, ..., 255]^2$ ，在X-Z平面上大小为0.002的方形墙元素（像素）²， τ 维度从 $\tau=0$ 开始被离散为1600个大小为 $d\tau=0.001$ 的仓（ τ 是路径长度的量度，必须除以光速才能检索到旅行时间）。瞬态图像的交换格式在第5.D节中规定，时间维度的范围和离散化在每个数据集中都有规定。

5.B.1 几何学重建

我们认为几何重建是最重要的挑战，因为它不仅是以前大多数工作的重点，也是自由度最高的最普遍的问题。在大多数情况下，一旦一个完整的几何场景模型被重建，诸如物体位置或类别等衍生信息就可以比从原始瞬态图像中更容易地从三维几何中获得。

我们将我们的测试场景分成几类，以测试解算器的不同能力。每个场景都包含一个必须被重建的物体。我们定义了五类物体。

Cat.1 二维形状。该类别包含垂直于墙面有一定厚度的二维物体。该类别与纹理重建挑战密切相关（第5.B.4节）。

猫。2 简单的几何形状。具有简单数学描述的物体，没有额外的表面细节。

猫。3 简单物体。来自现实世界的日常物品，几何细节有限。这个类别的物体不容易被前一个类别的形状所近似。

Cat.4 复杂物体。具有复杂形状的高度非凸面物体，但没有精细的表面细节。

种类。5 Diffcult 物体。具有薄型元件、精细结构和复杂拓扑结构（如许多孔）的物体。

表5.2列出了所有的数据集。为了促进重建技术的发展和完善，一些数据集提供了.obj格式的地真实几何图形；对于所有其他数据集，真实几何图形仍然是未知的。

5.B.2 位置和方向跟踪

在跟踪方面，使用了三个不同的刚性物体：一个球体、一个戈壁雕像和一架飞机（见表5.3）。对于每个物体，总共有四个挑战。

表5.2：几何重建挑战的对象及其类别。

类别	数据集名称	材料	提供的地面真相
1	信K	弥漫性	是
1	信件Q	弥漫性	不
2	盒子	弥漫性	是
2	锥体	弥漫性	不
3	斯坦福兔子	弥漫性	是
3	犹他州茶壶	弥漫性	是
3	斧头	弥漫性	不
3	锤子	弥漫性	不
3	杯子	镜面	不
4	斯坦福龙	镜面	是
4	恐龙	弥漫性	不
4	飞龙	弥漫性	不
4	室内植物	弥漫性	不
5	椅子	弥漫性	不
5	自行车	镜面	不
5	温室	镜面	不

1. 沿着三个主要轴线运动而不旋转。
2. 在一个固定的位置沿三个主轴旋转。
3. 沿着一个复杂的路径运动，具有恒定的方向和
4. 在改变方向的同时沿着复杂的路径运动。

由于其对称性，球体数据集中不包括涉及旋转的挑战。每个物体和挑战的路径都是不同的，例如，魔像沿着一条恒定方向的路径移动，而沿着另一条方向和平移的组合路径移动。

物体原点位于每个物体的质量中心。这样，对于理想的场景重建来说，物体的位置是唯一定义的，然而我们确实期望在现实场景中的位置有一定的偏差。因此，我们认为残差 RMS 是最重要的指标。

每条路径形成一个循环，包含40帧。轴的运动和静态旋转由30帧组成，每个轴有10帧。围绕轴的运动和旋转被设计成易于重建，并使系统性错误和遗漏的帧明显。

鹅卵石的确切几何形状是以.obj文件的形式给出的，可以用来改进重建（例如，通过将其拟合到每一帧的部分几何重建中）。飞机的形状没有被揭示，以测试对未知物体的跟踪。

5.B.3 对象分类

物体分类任务的目标是将瞬时图像分配给11个物体几何形状中的一个，如表5.4所列，并在主

文件的图4a中显示。所有

表5.3:物体追踪数据集的概述。

数据集名称	材料	形状已知	职务	旋转
球体轴线的位置 (SphereAxesPos)	弥漫性	是	是	不
球状路径的位置 (SpherePathPos)	弥漫性	是	是	不
谷神庙轴线位置 (GolemPathRot)	弥漫性	是	是	不
谷神庙轴心旋转	弥漫性	是	不	是
棋盘式路径	弥漫性	是	是	不
恶魔之路 (GolemPathRot)	弥漫性	是	是	是
飞机轴的位置	镜面	不	是	不
飞机轴旋转	镜面	不	不	是
飞机路径的位置	镜面	不	是	不
飞机路径旋转	镜面	不	是	是

表5.4:物体分类数据集的概述。

数据集	名称材料
	脂
	Icospherediffuse
	信格迪弗斯
	平行四边形漫反射
	扩散性计划
	散的
	鲸鱼的
唱片公司	
	耳机specular
	泛指的
	勺子Specularspecular

对象的形状是以.obj文件形式给出的，应该用来进行分类。

物体被缩放为相等的表面积，以防止根据物体的大小，即反射光的数量进行分类。然而，这种方法不一定是完美的，因为非常紧凑或凹陷的物体在按其表面积缩放时显得更小。

5.B.4 平面纹理

在这个挑战中，一个范围为 $(x, z) [0.1, 0.1]^2$ 的纹理平面目标放在 $y = 0.3$ 的激光点前面（见图5.7），是重建的对象。纹理由维度为 $n \times n$ 的灰度图像表示，它可以调节表面的反照率（漫反射）。纹理内的每个值 $\rho_{s,t}$ ，覆盖一个大小为 $(0.2/n, 0.2/n)^2$ 的正方形区域，其数值范围为 $[0, 1]$ 。我们提供了各种数据集，这些数据集具有不同分辨率的黑白和灰度纹理（表5.5）。

对于评估，支持任意分辨率的结果。如果重建的 T 具有与参照物相同的分辨率，就可以采用

相同的分解步骤。否则，在分解之前，它将被缩放到最接近的2次方。如果金字塔的

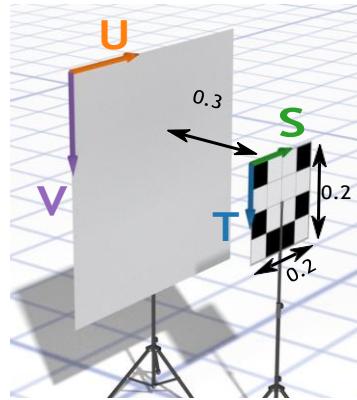


图5.7：纹理重建设置。

表5.5：纹理重建数据集的概述。

数据集		名称	Resolution	Pixel深度
字符	4×4		{0, 1}	
数字	4×4		{0, 1}	
字母	4×4		{0, 1}	
笑脸	4×4		{0, 1}	
宅	16×16		{0, 0.25, 0.5, 0.75, 1}	
Number 16×16			{0, 0.25, 0.5, 0.75, 1}	
模式	16×16		{0, 0.25, 0.5, 0.75, 1}	
Text 16×16			{0, 0.25, 0.5, 0.75, 1}	
书籍	128×128		[0, 1]	
音乐会	128×128		[0, 1]	
风扇	128×128		[0, 1]	
工业	128×128		[0, 1]	

重建包含更多的层（即它有更高的输入分辨率），最高的层被丢弃；如果它包含更少的层，缺失的层被填上零（因为它不包含任何关于高频率的信息）。因此，参考方案中的重建是首选。

5.C 渲染图

我们使用pbrt-v3的修改版[PJH16]来渲染瞬态图像。

5.C.1 重要性抽样

我们场景中的瞬时图像只包含间接反射的光线，如果不特别注意，会使渲染效果非常差。从墙壁向光源方向取样是徒劳的，因为激光点只照亮物体，而不是墙壁。对墙面上的半球进行

取样是不可取的，因为大多数感兴趣的物体只覆盖了半球上的一个小的实体角度，因此不太可能被击中。

5.D. 暂时性的图像文件

为了提高这种光传输情况下的性能，我们实施了一个自定义的重要性采样，它在很大程度上受到pbrt-v3中已经实现的区域光源采样的启发。物体的三角形被存储在一个特殊的列表中，墙壁和物体的三角形都被贴上特定的标志。在路径追踪过程中，每当光线击中墙壁时，我们可以直接向物体的方向取样，因为墙壁只能接收从物体反射的光线。这些样本需要通过考虑物体三角形的面积、角度和距离进行归一化处理，以确保采样的预期值正确。

我们的测试表明，这种定制的重要性抽样比天真的抽样多出两到三个数量级。通过消除零辐射路径，物理上的正确性得到了保留，例如，物体表面的相互反射就没有被这种优化所触及。

5.D 暂时性的图像文件

截至本文撰写时，还没有一个标准的格式来存储瞬时图像。诉诸标准图像格式似乎是一个典型的、有吸引力的选择，因为有合适的I/O库存在；然而，这样的文件必须伴随着数据集的单独元数据，而且大多数图像格式都僵化地坚持笛卡尔的像素排列。自定义格式也被提出，例如Arellano等人的.float和.lasers文件[AGJ17]，这种格式需要数以千计的单独文件来存储我们数据库中的单一数据集，而且目前的形式不足以涵盖新的捕获几何形状，如O'Toole等人的共焦设置[OLW18]。因此，我们提出了一种新的格式，它结构紧凑（每个数据集只有一个文件），易于读写，同时又足够灵活，以满足新兴研究方向的需要。在这里，我们对文件格式做了一个高层次的概述。详细的实施指南将作为SDK的一部分。

一个瞬时图像文件由4个块组成。文件头包含一般信息和其余各块的大小。像素数据块包含一个瞬态像素的线性阵列。像素解释块是每个像素的照明和观察点的精确表示。最后，图像属性块包含任意的、JSON编码的图像元数据。

对于像素解释和图像属性块，我们做了一些值得注意的设计选择，我们将在下面讨论。

5.D.1 像素解释块

传统上，反射器上的一个点被照亮，而反射器上的一个规则的网格点被观察。由于光传输的互惠性，这种情况可以被逆转。

例如，如Buttafava等人[But+15]所做。一般来说，可以使用多个照明点和观察点（可能是也可能不是以规则的网格排列），在[OLW18]的极端情况下，每个像素都使用一个独特的照明和观察点。

为了支持所有这些情况，并且仍然能够对我们的数据进行精确的表示，观察点和照明点可以以不同的模式存储。模式0是最通用的

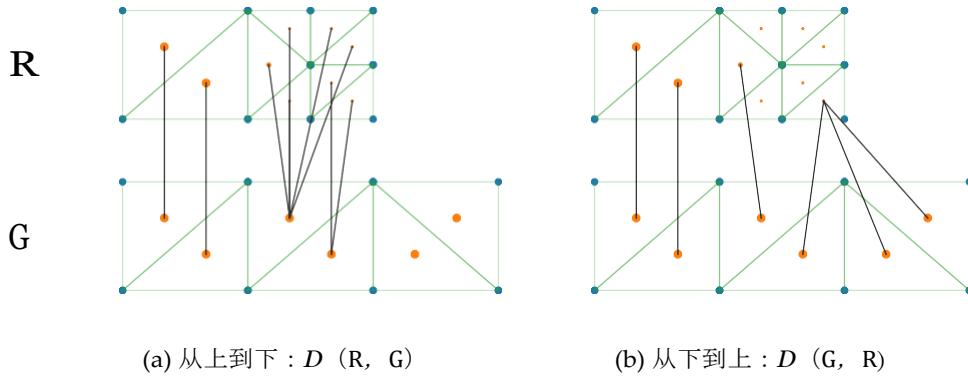


图5.8：我们的表面比较度量的对应选择说明。对于源的每个三角形，都会选择目标的最接近的三角形。下面的对象是地面真实几何图形G，而上面的对象是重建的R。

一个，不需要观察点或照明点的结构。它们被单独存储在每个像素上，然而这引入了一定的开销（如果每个像素由大量的bins组成，这就变得不可选择）。SDK提供了一个从其他更专业的模式0的上变频器。

模式1假定有一个单一的照明点和一个有规律的观察点网格，因此瞬时图像有一个有意义的x和y分辨率。观察点的位置由网格属性和它们在线性像素数据阵列中的位置隐含地存储（就像光栅图形格式中的情况一样）。模式2是对等的情况，观察点和照明点的角色是相反的。

5.D.2 图像属性块

图像元数据被广泛用于存储额外的信息，如用于拍摄图像的相机设置。在Transient图像文件中，它们以UTF-8编码的JSON字符串的形式存储在文件的最后。指定了一些标准字段，但用户可以自由添加他们自己的字段。

这种方法有多种优势。元数据可以使用二进制兼容的文本编辑器进行读写，所有字段都是可选的，可以很容易地添加新的属性，而且由于JSON引擎的广泛使用，读者和写作者可以快速实现。

/decoders.

5.E 比较指标

图5.8显示了在评估不对称网格到网格的距离时如何选择最接近的点（根据公式5.2）。重建（顶部）错过了已知存在于地面实况网格（底部）的右侧三分之一的表面，^R_G它在中间部分有更精细的细分。在从重建到地面实况的距离中，这导致在中间部分有更多的连接，而不是左边

的部分。

表5.6：快速背投重建（M1）、地面实测网格（M2）和Catmull-Clark细分一级后的同一网格（M3）的不对称重建误差。在黑体字中，从地面实景到测试几何体的距离 $d(\text{,})$ 衡量重建表面的不完整性。按照设计意图，这个距离测量对重构的敏感度（第三行）明显低于对实际缺失几何的敏感度（第一行和第二行）。

比较	$d(R, G)$	$d(G, R)$
$R = M1, G = M25$	$255 \cdot 10^{-3}$	$1.819 \cdot 10^{-2}$
$R = M1, G = M35$	$132 \cdot 10^{-3}$	$1.813 \cdot 10^{-2}$
$r = m3, g = m24$	$729 \cdot 10^{-4}$	$6.438 \cdot 10^{-5}$

这些连接有的比较短，有的比较长，但它们的平均数与等分镶嵌的情况下大致相同。由于它们是按三角形面积加权的，中间部分的总成本并没有因为额外的连接而明显增加。总的来说，成本与最左边的几何体部分很相似。

的右边部分 $\vec{A}\vec{A}$ 是缺失 \vec{A} 的 。在从原始到重建的距离 ($d(\text{,})$)
 G_R , 这导致了更长的连接，从而增加了成本。

此外，网格的错位增加了所有连接的长度和
因此，总体距离。

物体的镶嵌对比较结果有一定的影响；然而，这种影响是很小的。为了避免镶嵌的偏差，所有使用的模型的镶嵌都比最大的预期重建分辨率更细。此外，如果需要，三角形的琐碎细分可以进一步减少这种偏差，并且不需要再次渲染或重建场景。

在表5.6中，我们比较了改变镶嵌法所带来的重建误差和最先进的重建误差。

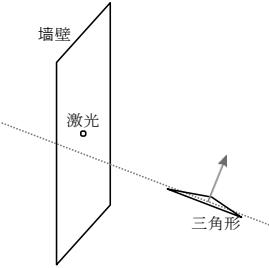
5.E.1 背面删除

在正常情况下，不能指望物体的背面能被很好地重建，因为通常几乎没有信息会到达墙壁。因此，在评估网格距离之前，面向远离反射器的三角形被丢弃。

图5.9显示了一个三角形的例子，它的方向远离反射器，但仍能从激光点看到。我们使用激光点的可见性作为剔除标准，而不是只检查面的法线是否指向远离反射器的地方。这仍然不总是正确的，因为全局照明也可以让被剔除的三角形的光线到达反射器（同样，朝向反射器的三角形也可以被完全遮挡），但是考虑到所有这些影响是不可能以一种简单和透明的方式实现的。

5.F 工具

我们提供各种工具来处理瞬时图像。其核心是用于各种编程语言的加载器和写入器，包括 C++、Python 和 Matlab。一起



第5章。非视距成像问题的定量平台

图5.9: 剔除背面的面。面向远离激光点 $(x, y, z) = (0, 0, 0)$ 的三角形被从比较中删除。所有其他的都被保留，甚至那些法向量指向正Z方向的（远离墙壁）。

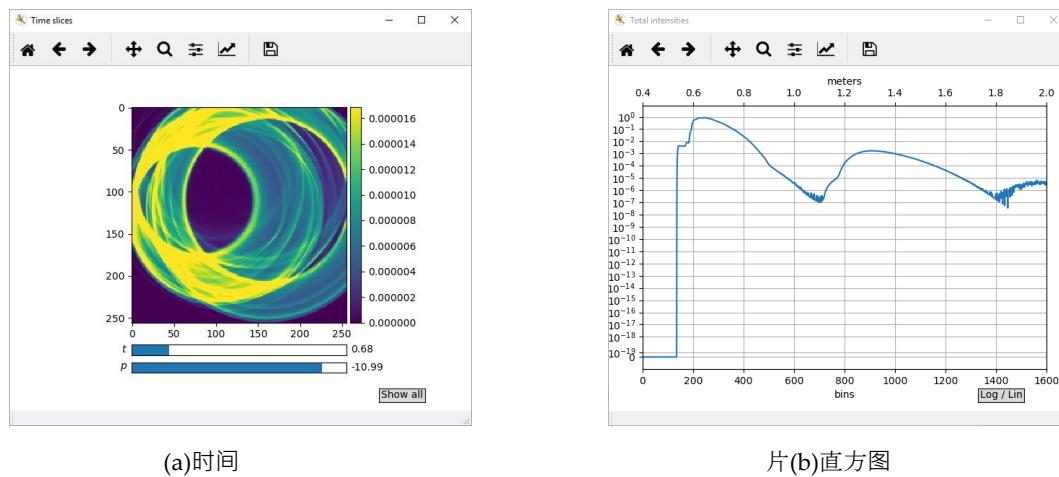
表5.7：快速背投重建结果。 a) 几何重建。两者中较大的数字（用粗体标出）是参考和重建的对称距离（见公式5.2）。 b) 位置跟踪。从左到右各列。RMS距离（见公式5.3），偏移长度，减去偏移后的RMS残差，轨迹的完整性（恢复的帧的百分比）。

(a)(b)				
场景	$d(R, G)$	$d(G, R)$	场景	RMS距离。 。
				偏移量
斧头	0.00376	0.00645	戈尔姆斧头	0.0238
自行车	0.00675	0.00916	戈林之路	0.0685
椅子	0.00429	0.0137	球体轴线	0.0488
锥体	0.0129	0.00867	球体路径	0.0535
立方体	0.0743	0.00686	平面轴	0.0269
杯子	0.00809	0.0283	平面路径	0.05
迪诺	0.00500	0.0172		
蜻蜓点水	0.0128	0.00453		
温室	0.0133	0.0200		
锤子	0.0108	0.00876		
室内植物	0.00438	0.0162		
K-Letter	0.0200	0.00734		
Q-Letter	0.00625	0.00631		
斯坦福兔子	0.00356	0.0155		
斯坦福龙	0.00359	0.0202		
犹他州茶壶	0.00341	0.0362		

与文件格式描述，它们应该允许我们的数据集在其他框架中快速整合。

5.F.1 图像查看器

我们提供了一个基于Python和Matplotlib的瞬态图像的简单查看器。用户可以滚动浏览时间并调整强度比例。第二个视图显示了在空间域上整合的瞬时图像。由此产生的直方图说明了在什么时间有多少光到达，可以用线性和对数的尺度。查看器如图5.10所示。



(a)时间

片(b)直方图

图5.10：我们的查看器显示了瞬态图像的时间切片和直方图。

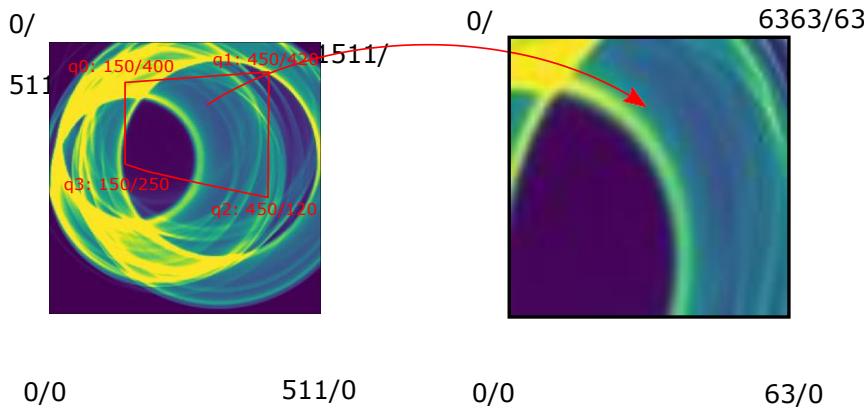


图5.11：相机转换器使用由四个点对定义的同构图来重新取样瞬时图像。

5.F.2 设置转换器

在现实世界中看到的许多设置都有不同的照明和观察几何形状。虽然激光点位置的改变需要重新渲染场景，但其他相机的位置和投影可以被适应，以使结果更具可比性。为此，我们提供了一个重采样工具，将瞬态图像转换为不同的相机位置。

如图5.11所示，重采样的核心是一个同构图。用户在新旧图像中找出四个点对，并从中计算出同构图。将其应用到图像上，共同对图像进行裁剪、转换和重新缩放。用户还可以指定摄像机和激光器的位置作为三维坐标，用于计算每个输出像素的时间偏移。另外，输出图像的时间窗口可以被改变。对于重新取样，使用了一个米切尔-奈特拉瓦利滤波器，其空间和时间滤波的大小都是可定制的。如果没有指定尺寸，则从同构图中计算出合理的滤波器尺寸。

该工具是用C++编写的，没有外部依赖性。它是作为命令行工具实现的，因此可以在批处理中整合。

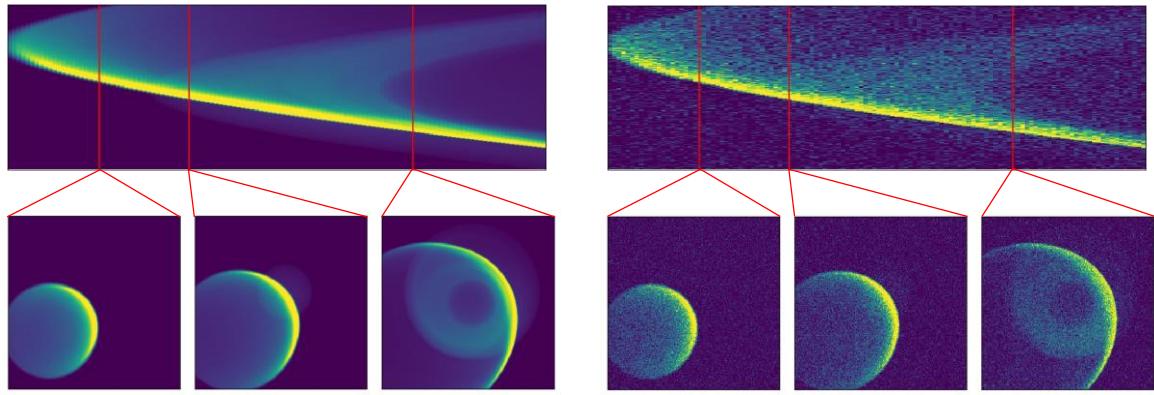


图5.12：应用噪声模型SPAD之前（左）和之后（右）的Hammer场景的瞬态图像。

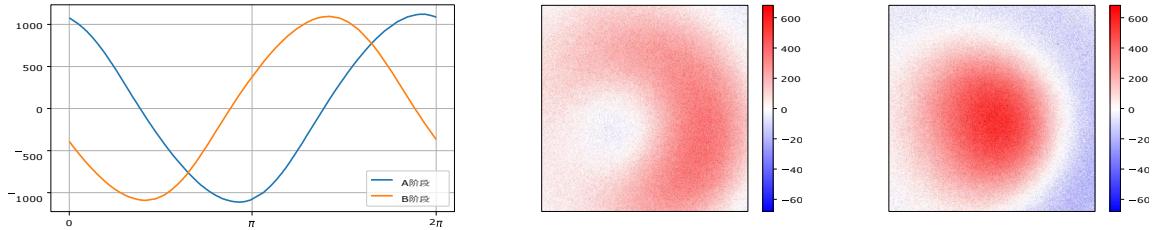


图5.13：Hammer场景的合成AMCW测量。左图：*PMDTec CamBoard nano* AMCW相机测量的解调功能。中间/右边。使用传感器模型计算的两个相位图像（ 0° 和 90° ）。

5.F.3 快速的背投整合

所有用于导出瞬时图像到Arellano等人[AGJ17]的快速背投解算器的脚本都可以在我们的网站上找到。这使得用户可以建立一个完整的重建管道，并重新评估论文中的所有结果。

5.F.4 传感器型号/噪音

这套脚本和工具包含两个噪声传感器模型，以反映两种重要类型设备的特征行为。AMCW，一个相关ToF传感器的简单模型（4抽头近正弦调制的相关飞行时间测量，带有斯凯拉姆分布的射出噪声）和SPAD，一个带有泊松分布的射出噪声和暗计数的单光子计数器。图5.12显示了在标准设置下应用SPAD模型之前和之后的示例数据集。图5.13显示了通过AMCW传感器模型看到的同一场景的图像。



图5.14：斯坦福龙的重建。地面真相的几何图形显示为蓝色，而重建的几何图形为绿色。

5.G 重建的结果

我们的评价指标旨在通过将不同的重建算法的整体性能重新归纳为一个单一的数字（如表5.7所示），使其具有可比性。然而，这些误差项来自于算法的各种特性，研究这些特性是很有意义的，因为它们增加了对算法行为的理解，并指出了可能的改进。因此，我们现在讨论本文中使用的背投例子的一些特征。应该指出的是，我们并没有调整参数以达到最高的精度。相反，这些例子是为了说明重建算法的典型行为。

5.G.1 几何学重建

图5.14显示了斯坦福龙模型的重建。重建主要由与墙面平行的平面斑块组成，这是非常典型的，几乎在所有的重建中都能看到。在背投后使用的Laplacian滤镜有利于隔离平面结构的表面，因此在处理弯曲或不与墙面对齐的表面时很吃力。由此产生的重建往往是不完整的、低细节的，而且它们具有独特的 "煎饼云" 外观。

5.G.2 位置跟踪

我们天真的跟踪位置实现首先重建物体的几何形状，然后使用其质心作为物体位置。因此，它非常容易受到不完整的几何学重建的影响。

图5.15显示了AirplaneAxesPos数据集的两帧，其中飞机沿X轴移动。这两种重建都是不完整的，并且有利于靠近激光点的几何形状，而激光点位于这两个位置之间。当计算质心时，物体的运动因此显得比实际要小（见图5.16）。一个更复杂的算法可以意识到这一缺陷，并尝试将给定的物体几何形状装入其重建中，以确定平面的哪一部分被重建了。



图5.15：重建的几何体在位置跟踪中使用。地面真实的几何图形显示为蓝色，而重构的几何图形为绿色。在不同的帧中，平面的不同部分被重建，导致了位置重建中的误差。

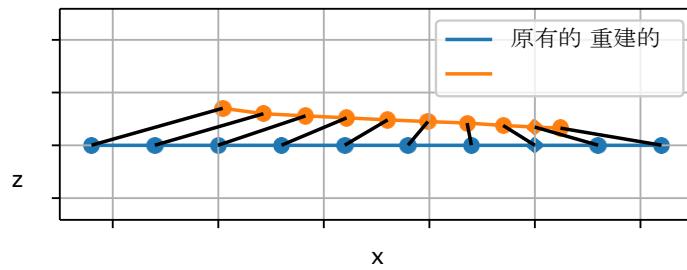


图5.16：重建的飞机沿X轴运动的轨迹。除了Z方向的偏移外，重建的路径太短。

第六章

非视距成像装置的校准方案

本章作为同行评议的论文发表在《光学快报》杂志上，由2020年的光学学会[Kle+20]。

作者是Jonathan Klein, Martin Laurenzis, Matthias Bühler, and Julian Seeger。该技术从墙壁上的间接光反射中重建或跟踪被遮挡的物体。虽然在计算机视觉应用中，相机的直视是常规的校准，但到目前为止，非直视设备的校准依赖于对最重要的尺寸（设备位置、墙壁位置和方向等）的手动测量。在本文中，我们提出了一种校准基于飞行时间的非视线图像系统的方法，该方法依靠镜子作为已知目标。一个粗略确定的初始化被完善，以优化时空一致性。我们的系统具有足够的通用性，适用于各种传感场景，从单源/探测器通过扫描排列到大规模阵列。它对不良的初始化是稳健的，实现的精度与相机系统的深度分辨率成正比。

6.1 简介

在直接视线之外 "看到 "的能力不仅形成了一个引人入胜的学术问题，而且在未来也有可能的应用，从紧急情况下，对危险和受害者的情况了解是关键，到科学场景下，支持这种技术的微型望远镜可以揭示隐藏的结构。

近年来产生了许多技术，通过记录时间分辨的光学脉冲响应来感知位于 "角落 "的物体，其中从直接可见的墙壁上反弹的光线进入场景的遮挡部分，从而收集关于隐藏物体的信息；见图6.1a的示意图。可用的操作模式[Vel+12; Kir+09; Hei+19; OLW18; Gar+15; IH20]不仅支持物体探测

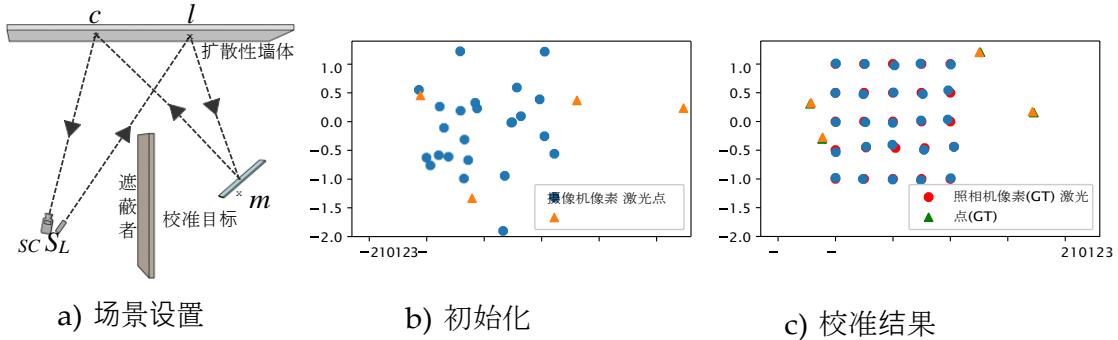


图6.1:(a) 我们提出了一种新的方法，利用瞬态成像硬件对三弹非视线设置进行几何校准。光从激光器 S_L 到位于漫反射器壁上的激光点 l 。从那里，它被反射到一个校准目标 m ，然后返回到一个投影相机像素 c ，最后到达相机 S_C 。我们使用不同位置和方向的镜面平面镜的多个图像来校准设置，类似于经典的二维相机校准程序。我们不依赖于校准目标上的已知特征，而是使用从激光到相机的全部路径的飞行时间来解决单个激光点的位置 l 和投影相机的像素 c 。(b) 优化问题是非凸的，但初始化要求非常低（例如眼球）。(c) 即使在存在飞行时间噪声的情况下，我们的方法也能重建设置的几何形状，并达到非常高的精度。地面真实值（以红色和绿色显示）在重建中几乎不可见。

隐蔽场景的组成部分的跟踪，但扩展到三维形状和纹理的全面重建。一般来说，我们假设整个设置的几何形状是已知的，只有隐藏的物体要被重建。这意味着在捕捉之前必须先进行人工校准。设备和物体的位置和距离必须以较高的精度进行测量，这是一项繁琐的工作，往往会导致不精确的结果。

在这里，我们提出了一个自动系统，用于校准非视线传感装置的几何形状。我们的方案不需要任何额外的硬件，只需要一个普通的、作为校准目标的平面镜。与传统的相机校准一样，目标在不同的位置和方向上被记录。由于校准方案不依赖于目标的纹理，并且由于只使用了时间起始点（而不是完整的飞行时间直方图），我们的校准方案可以用于所有类型的超快传感器，包括单像素传感方案[Mus+19]、随机散射的测量位置[But+15]以及低分辨率成像器，甚至相关的飞行时间传感器[Hei+14]。此外，特定任务的约束条件（例如，限制在扫描线上的像素位置）也很容易集成到该方法中。

我们的校准方案需要一个初始化，以热启动非线性优化问题。然而，与费力的测量相比，我们只依赖于对设置的几何形状的粗略估计。只要初始解粗略地反映了场景几何的偏差，该方法即使在飞行时间噪声的存在下也是稳健的。

使用一个实验测量装置，我们证明了我们的方案不仅是

它不仅能高精度地恢复相关参数，而且还能改善使用该装置的数据获得的非视线（NLoS）重建的结果。

6.2 相关工作

在过去的十年中，产生了大量关于非视线传感的工作，即通过光在直接可见的代理物体上发生间接漫射来估计隐藏在直接视野中的目标。虽然各种研究路线都在探索使用稳态测量以扩展直接视线[KSS12; Kle+16; Bou+17; Thr+18; Sei+19; Che+19]，但大多数工作仍然集中在使用时间分辨测量（瞬时图像）。

Jarabo等人的调查提供了一个关于瞬态成像的良好概述[Jar+17]。半成品包括从瞬态测量中恢复低参数的几何和反射模型[Kir+09; Nai+11]，以及首次重建明显的形状[Vel+12]。从那时起，大量的努力被投入到解锁新型传感器技术和用于瞬时成像的干涉测量设置[Hei+13; Gar+15; Gki+15]，同时改进事实上的标准重建技术--椭圆误差反推的性能[Vel+12; LV14; AGJ17]。最近对非视线重建问题的补充包括引入共焦捕获设置[OLW18]，以及试图将该问题投向从波光学和地震层析学借来的范式[Liu+19; LWO19]。虽然这些工作大多依赖于隐藏目标的体积表征，但其他研究人员也探索了替代的、表面驱动的表征[Ped+17; IH20; TSG19]。这些模型通常导致解决方案与基于物理的光传输前向模拟的一致性得到改善，它们也自然地表达了像表面反射率（BRDFs）或自我排斥的效果。用这种基于表面的特征来“指导”重建的体积表示是可能的，但会大大增加实施工作和计算成本[Hei+14; Hei+19]。最近，也有一些工作将机器学习算法引入NLoS重建[Cho+20; Met+20; Che+19; Car+18]。

虽然出版物中经常省略关于设置校准的细节，并且只假定设置的测量值是已知的，但报告的校准方法可以分为几类。代替完全手工测量（例如[Gar+15; Kle+16]），通过专用校准硬件扩展设置是一种常见的方法。Buttafava等人使用一个网络摄像头来估计可见激光点的三维位置，但网络摄像头本身是使用点状图案进行手动校准的[But+15]。La Manna等人展示了使用移动窗帘作为中继面的NLAs重建，该中继面被一个额外的SPAD相机扫描以实现实时校准[La +20]。同轴设置（激光点的位置总是与当前相机的像素位置重合）通常使用精确的星光仪，提供精确的角度信息。再加上测量第一次反射的飞行时间的能力，可以直接计算出当前观测点的位置[OLW18; LWO19]。基于斑点相关的方法（例如[KSS12 ; Met+20]）从反射器壁上的斑点图案的非瞬时测量中重建场景，因此不依赖于几何校准。

与瞬态方法相同的方式。基于机器学习的方法，在静态设置上进行训练，隐含地学习了设置的几何形状，本质上是无校准的[Car+18; Cho+20]。然而，这样的训练网络不能被转移到新的设置上。

6.3 方法

非视线设置可以被看作是一个高维函数，它将设置的几何形状、隐藏的物体、各种部件的反射特性、背景信号、相机的传感器模型等参数映射到测量中。我们区分了辐射参数（管理正在传输的光量）和时空参数（管理飞行时间）。第一个抽象步骤放弃了相机和激光器的特殊性，将测量结果描述为瞬时直方图，即到达每个传感器像素的光的时间分辨（在皮秒到纳秒范围内）强度。通常情况下，所有参与的反射函数（BRDF）都被假定为Lambertian（有明显的例外，如NLoS BRDF重建[Nai+11]或逆反射物体[OLW18]），并且场景被设置为最小化来自背景的反射。在这些假设下，只有场景的几何形状和隐藏物体是未知的。

有了可用的场景几何测量值，就可以采用通过合成分析的方法来重建隐藏的几何形状 [IH20 ; Kle+16]。可以用类似的方式尝试设置校准。考虑到一个已知的隐藏物体（即位置、形状、大小和计算光传输所需的反射特性等信息是已知的），设置是由测量的瞬态数据推断出来的。隐藏的物体可以自由选择（例如，对于漫射物体，可以使用[Kle+16]中提出的图像形成模型），但我们建议使用简单的平面镜，就像常见的家用物品一样。正如我们将在下文中表明的那样，这种选择大大简化了图像形成模型。这就导致了一个更容易解决的优化问题（与一般的漫反射物体相比），由于其隐性约束，对其初始化的要求要弱得多。我们的方法联合优化了设置的几何形状和镜子的位置，这使得设置校准的初始化只需要很少的人工测量（可以在降低精度的情况下进行，只获得一个粗略的估计）。

镜子可以放置在场景的可见部分和隐藏部分。因此，对隐藏部分的访问不是严格要求的，但是如果可以访问的话，它可以导致更强大的校准。

6.3.1 图像形成模型

图6.1a给出了一个NLoS校准设置的示意图：传感器/激光光源设置在左侧，与镜子校准目标之间有一个遮挡物。我们分别用 S_C 和 S_L 来表示相机和激光器的物理位置。由于它们通常是相互靠近的，我们定义速记符号 $S = \{S_C, S_L\}$ 。在经典的三弹设置中，信号从一个平面墙面上反射出来。我们用 $c \in C$ 表示这面墙上的摄像机像素，用 $l \in L$ 表示（潜在的多个）激光点。

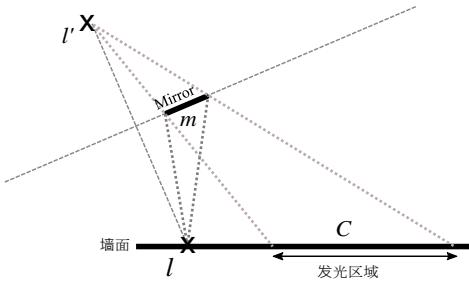


图6.2：为了评估光路 $\vec{l} \rightarrow \vec{m} \rightarrow \vec{c}$ ，我们使用一个相似关系。激光光斑 l 照亮墙壁，就像它被反射到镜面上一样，形成一个虚拟光斑 l' 。

无论像素是在一个固定的网格上（如二维图像传感器），还是在一条线上（如条纹相机），或者是在墙上任意放置（如单像素探测器的扫描），都是很重要的，因为有些情况下允许专门的参数化，可以改善校准（见6.3.3节）。由于Helmholtz的相互性，在下面的讨论中， L 和 C 的作用总是可以互换的。大多数常见的NLoS设置都假定所有的 L 和 C 都位于同一个平面上，对于平面墙来说就是这样。然而，我们的方法也适用于一般的三维点，这使我们能够涵盖各种各样的NLAs设置，如弯曲的墙，或粗糙的墙（以硬件的时间分辨率为尺度）。

隐藏的物体通常有一个复杂的形状，因此必须考虑到相互反射。相比之下，我们用作校准目标的镜子上的镜面反射只允许有一条唯一的光路 $\vec{l} \rightarrow \vec{m} \rightarrow \vec{c}$ ，连接激光点、镜子和投影像素。与经典的瞬态渲染相比，这意味着不需要对物体表面进行整合，这就可以实现快速和无噪音的计算。我们的瞬态直方图只包含一个单一的、尖锐的峰值。我们假设这些峰值可以在一个特定的硬件预校准步骤中被检索出来，该步骤可以处理背景辐射或高阶反弹等影响（见附录6.A.1）。

一个完整的测量由一系列的路径组成 $P_{i,j,k} = S_L \vec{l}_i \vec{m}_j \vec{c}_k$?
 S_C （在不明确的情况下我们省略指数）。我们假设这些路径是单独测量的（即只使用一个镜子，每次只照亮一个激光点）。

每条路径都有一个飞行时间和一个强度的特征。强度取决于漫射墙的BRDF和它的法线矢量，而飞行时间则与两者无关。对于我们的校准，我们只依赖于飞行时间。因此，我们既不需要假设也不需要估计任何BRDFs或墙体法线（然而，墙体的表面法线可以用重建的激光点和摄像机像素的三维位置来估计）。

对于飞行时间的计算，我们需要计算一个路径的长度 $S_L \vec{l} \rightarrow \vec{m} \vec{c} S_C$ 。注意， m 是一个平面，而 S_L 、 S_C 、 \vec{l} 和 \vec{c} 是点。由于镜面反射的镜面性约束，在 m 上存在一个唯一的点 m^r ，光在这个点上被反射。子路径 $\vec{l} \rightarrow \vec{m}^r \rightarrow \vec{c}$ 的长度等于路径长度 $\vec{l} \rightarrow \vec{c}$ ，其中 \vec{l}' 是 m 上镜像的点 \vec{l} （见图6.2）。

镜像平面以黑森法线形式表示为法向量 n 和标量

偏移量 d 。然后

$$l' = l - 2(n - l + d)n \quad (6.1)$$

而总的路径长度是所有路径段的总和。

$$f(S, l, c, m) = \|l - S_L\| + \|c - l'\| + \|S_C - c\|. \quad (6.2)$$

虽然数学上的平面是无限的，但真实的镜子通常不是。如果 m^r 不在物理镜面上， c 将不会收到任何信号（见图6.2）。在这种情况下，可以简单地将该路径从优化中删除（见第6.3.2节）。

6.3.2 校准

我们通过最小化来自真实设置的飞行时间测量值 t 和根据当前设置的估计值计算的飞行时间值之间的时间差异来优化我们的场景设置模型。如果使用所有可能的光路，总共有 $\#L \#M \#C$ 的测量值。我们解决

$$\arg \min_{\substack{S, L, C, M \\ l \in L \\ c \in C \\ m \in M}} \|f(S, l, c, m) - t_{l, c, m}\|^2. \quad (6.3)$$

使用标准梯度下降算法（BFGS [TQ04]）。

校准只有在整个设置的刚性转换中才是唯一的，因为刚性转换不会改变任何路径长度。因此，我们可以将相机位置 S_C 定义为坐标系的原点，并确定所有其他相对于它的点。一般来说，我们认为相机位置 S_C 和激光位置 S_L 之间的偏移是硬件设置的一个已知特征。相对于到墙的距离， S_C 和 S_L 之间的偏移通常很小。在这些情况下，从任何 c 或 l 看 S_C 和 S_L 之间的角度都是微不足道的，主导因素是硬件到墙的总距离。

初始化将在第6.4节进一步讨论。由于紧凑的图像形成模型，自动分化可用于梯度计算。

6.3.3 参数化

在方程6.3中，我们有 $l, c \in \mathbb{R}^3$ 和 $m \in \mathbb{R}^4$ （用Hesse法线形式表示）。从这个一般情况出发，可以得出专门的参数化 $g : p \mapsto (S, L, C, M)$ 。我们为常见的特殊情况实施了两个这样的参数化。一个合适的参数化可以减少优化的自由度（使其更快、更稳健），并对解决方案实施某些约束。

平面墙

目前大多数的非视线重建方法都是假设平面墙（有例外，如[LWO19; La +20]）。在定义了两个基向量和一个原点后，平面墙上的每个点都可以用 $(u, v) \in \mathbb{R}^2$ 来描述。由于校准只在刚性变换下是唯一的，我们可以把墙面定义为 X/Z 平面。那么墙面上唯一剩下的参数就是对原点 S 的偏移。

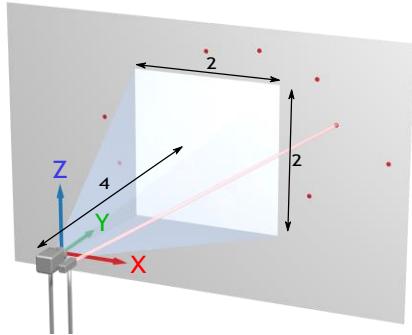


图6.3：用于合成评估的设置。照相机和激光器位于原点，红点标志着激光点的位置。在相机和墙壁之间共放置了40个面向墙壁的镜子（此处未显示）。

常规网格

在二维相机传感器上，各个像素通常被安排在一个固定的网格上。这个网格沿着视线方向被投射到场景中，导致投射的像素的相对位置之间的强烈约束。在平面墙体的情况下，这种投影可以通过一个同构图来完全描述，该同构图将图像传感器的同质二维坐标映射到墙上的二维坐标。由于二维传感器通常包含数百或数千个像素，自由度减少到9个常数（8个同系物加上1个墙面的距离）是非常重要的。

这个参数化可以通过指定一个投射到墙上的传感器图案而得到进一步的概括。图6.10显示了一个图案的例子，其中一些死的像素已经被屏蔽掉了。这样的图案被认为是给定的，不是校准过程的一部分。

6.4 方法评估

一个设置的特点是有许多不同的参数，其中有些参数比其他参数更容易改变。固定参数包括那些由硬件定义的参数，例如，图像传感器的分辨率（相机像素的数量）和飞行时间信息的准确性。灵活的参数包括激光位置的数量、镜子位置的数量和初始化的质量。了解这些参数如何影响校准过程，以便在实际应用中选择最佳值是很重要的。

6.4.1 评估设置

我们的标准评估设置（如图6.3所示）包括25个相机像素（按5x5网格排列），8个激光点位置和40个镜子位置。在评估过程中，会使用不同数量的激光和镜子位置。墙上的相机视域是 2×2 个单位，距离相机和激光器4个单位。激光点的位置

镜子放在墙的前面，围绕着视锥体排列。我们在大部分评估中使用了默认的平面墙的情况。为了模仿真实的校准情况，我们对地面真实的几何图形施加不同程度的噪声，以类似于测量的不确定性。这种扰动的数据然后被用作优化过程的初始化，这有助于我们评估成功估计正确的几何形状所需的精度水平。特别是，我们将测量噪声应用于设置的几何形状，使用

- 标准偏差为 σ 的高斯噪声到像素和激光点位置。
- 用标准偏差为 $\sigma/4$ 的高斯噪声来镜像法线，并对其进行重新规范。
- 和标准偏差为 σ 的高斯噪声对镜面的偏移。

应该注意的是，位置的噪声水平是以距离为单位测量的，而法向量的噪声水平是以度为单位测量的，这使得它们无法比较。这里使用 $\sigma/4$ 的系数，因为在这种设置下，两者的干扰相似。

同样地，不同级别的高斯噪声被应用于参考飞行时间值

t.图6.1显示了地面真实值以及一个初始化的例子，其中应用了标准偏差为 $\sigma=0.5$ 的空间噪声。在这个噪声水平上，没有多少原始结构被保留下来。

我们通过各个部件之间的均方根误差来描述校准的质量。镜子的位置不被认为是校准结果的一部分，因此不在度量范围内。对于两个设置 $P = \{S_1, l \in L_1, c \in C_1\}$ 和 $Q = \{S_2, l \in L_2, c \in C_2\}$ (例如，一个地面真实设置和一个校准结果)，我们计算出

$$\text{RMS}(P, Q) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|P_i - Q_i\|_2^2} \quad (6.4)$$

如前所述，被校准的装置可能在不同的坐标系中，天真地应用方程6.4会导致很高的误差，即使是实际的好结果。因此，我们使用Kabsch算法[Kab76]来确定一个最佳的刚性转换，将设置转换到一个参考上，之后RMS变得有意义。由于RMS误差与初始化噪声 σ 具有相同的单位，两者可以直接建立起关系。例如，图6.1中的例子使用了4个镜像位置，应用了标准偏差为0.02的飞行时间噪声。它实现的重建误差为0.042个场景单位。

6.4.2 必要的测量

对于一个稳健的优化，输入和输出维度之间的比率是一个重要的衡量标准。优化问题的输入维数是由测量量（即使用的路径）定义的，而输出维数则取决于参数化。对于完全连接的情况（包括激光器、镜子和摄像机之间所有可能的连接），有 $\#L \#M \#C$ 的测量值（其中 $\#$ 表示一个集合中的元素数，例如 $\#M$ 是镜子的数量）。输出的尺寸是。

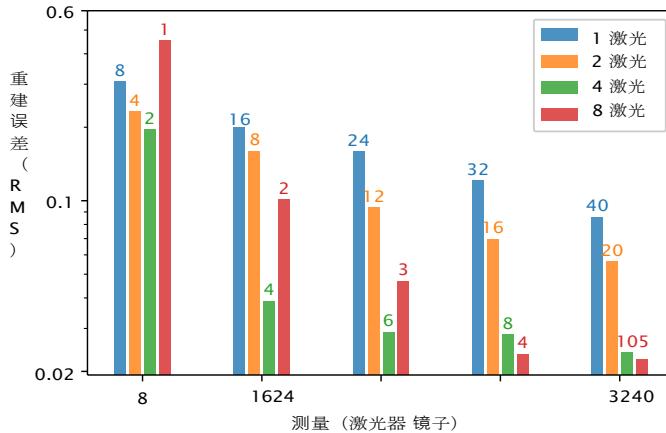


图6.4:校准性能取决于测量的总数。每个数据点显示的是100次单独优化的平均值。条形图上方的数字显示该数据点使用的镜子数量。

- 默认： $3 - \#C + 3 - \#L + 4 - \#M$ 。
- 平面： $2 - \#C + 2 - \#L + 4 - \#M + 1$ 。
- 网格： $2 - \#L + 4 - \#M + 9$ 。

平面参数化使用墙体平面上的二维点，但将墙体距离作为额外的维度。同样，网格参数化也不依赖于摄像机像素的数量，相反，它总是有9个额外的维度（8个用于同构图，1个用于墙面距离）。

在图6.4中，我们比较了总的测量次数和重建误差。为了分析激光器和镜子位置的不同组合的性能，我们用不同的组合实现相同的测量次数。所有的优化都使用平面参数化，并以噪声水平 $\sigma[0, 0.5]$ 和飞行时间噪声水平0.02进行初始化。

结果表明，仅仅是测量次数并不能说明问题的结构，同样的测量次数可能导致严重不同的误差，这取决于激光器和镜子之间的比例。正如预期的那样，当使用更多的测量值时，重建的效果会得到改善。更有趣的是，拥有与镜子位置差不多的激光位置也是有益的。激光器和镜子位置之间的比例越极端（在总测量数量不变的情况下），结果就越差。这与以下事实有关，即对于同等数量的激光器和镜子位置，优化中的可用测量和变量数量之间的比率是最大的。对于实际应用，重建误差应该接近或低于相机的深度分辨率。我们的结论是，使用至少4个激光器的32个测量值是准确重建的一个下限。

图6.5显示了与图6.4相同的数据集，但这次是根据其对初始化误差的依赖性来解码的。我们发现，在宽松的范围内，初始化

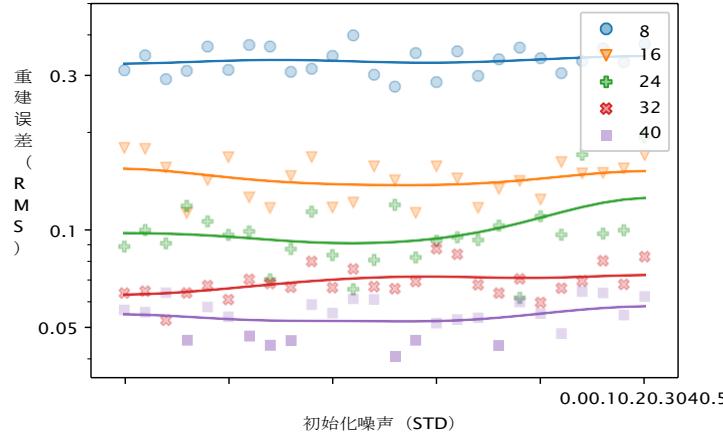


图6.5:不同程度的初始化噪声的重建误差。数据与图6.4所示相同，对所有激光/镜面组合的特定测量次数进行平均（用不同颜色/标记表示）。

对优化的收敛性没有影响；有效值误差主要取决于所涉及的测量数量。

图6.6显示了允许初始化误差的极限。即使是高值，一些优化运行仍然收敛到正确的结果，但没有保证，不能认为是安全的初始化。在接近1个单位的某个阈值之前，重建误差的分布强烈地以低RMSE为中心，表明有一个准确的结果（注意对数刻度）。一旦越过这个阈值，优化就不再收敛，表现出质量的突然下降。

我们可以将这些见解转移到实际设置的校准方面，形成一个重要的规则。我们不能依赖任意的初始化值，而确实需要对几何形状有一个粗略的了解。然而，即使是一个粗略的估计，也很难产生一个非常精确的校准，甚至可能不需要使用测量带和尺子。

图6.7显示了依赖于飞行时间噪声和参数化的重建误差。为了生成数据，具有5个镜面和6个激光位置的标准设置被初始化为0到0.5之间的随机噪声值。我们发现，飞行时间数据的不确定性和重建误差之间有一个近似的线性关系。

默认参数化支持任意形状的墙，如图6.8所示的弧形墙。

我们的主要分析结果是，对于少量的测量，存在一个广泛的安全初始化区域。为了获得最佳结果，应该使用等量的激光点和镜子，在场景中平均分布（但不是对称的，这将产生一些测量值的相等）。如果一个设置只使用单一的相机像素或单一的激光位置来重建物体，可以通过增加额外的相机/激光位置来改善校准结果，随后放弃这些额外点的校准结果。

关于设置几何的影响的其他评估可以在附录6.C中找到。

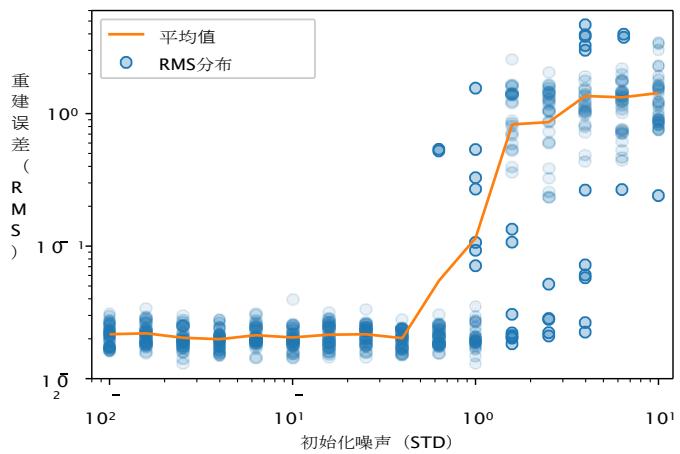


图6.6：取决于初始化噪声的重建成功率。飞行时间噪声被固定为0.02。单个优化结果的蓝色分布比橙色的平均值给出了更好的直觉--结果在噪声增加时分成两个不同的群组。请注意，两个坐标轴都是对数尺度的。

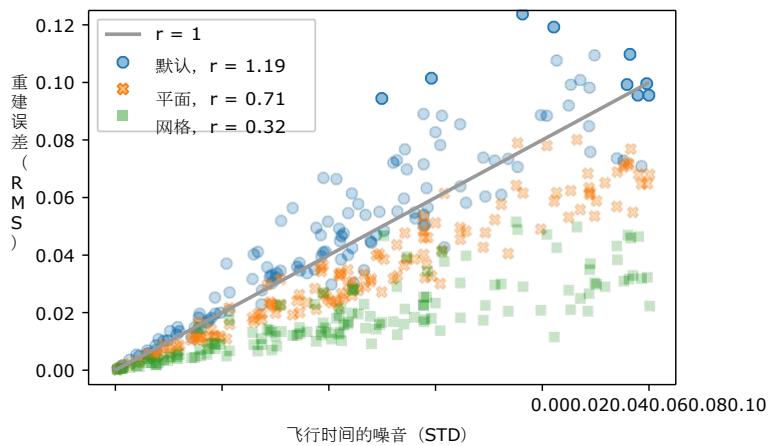


图6.7：取决于飞行时间噪声和参数化的校准误差。 r 值显示了每个参数化的线性拟合的斜率。

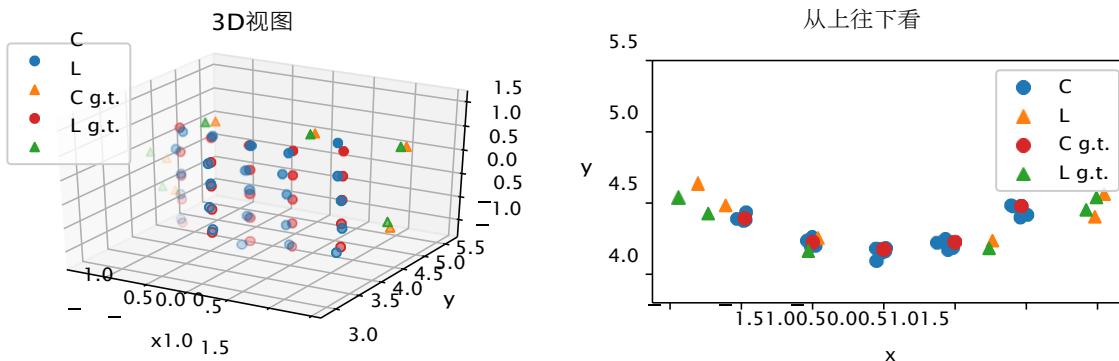


图6.8：弧形墙的校准实例。设置包括6个激光器和6个镜子，初始化噪声为0.5，飞行时间噪声为0.1。校准的有效值误差是0.099。

6.4.3 实施和运行时间

在我们的原型中，方程6.3完全由Python实现，方程6.3的优化使用scipy.optimize包中的BFGS算法进行，梯度由autograd计算。在典型的设置中，优化工作在桌面硬件上运行约2分钟，代码未经优化。

对于具有大量激光和相机位置的大型校准问题，如果使用平面或网格参数化，未知数的数量可以大大减少。对于这种高度超定的问题，大量的连接（激光镜相机路径）可以作为优化问题的附加方程被省略，以提高性能。

6.5 实验结果

我们评估了我们的校准程序在NLoS实验中的表现，并排除了校准对NLoS重建的影响。除了测量数据外，我们还使用了噪音较小的合成飞行时间数据，在相同的设置几何上重复评估，以模拟额外的捕获硬件。

该设置如图6.9所示。它总共使用了7个不同的激光点和7个镜子位置（如6.4.2节所述，这个比例是efficient），以及26 29个相机像素。这些像素被安排在一个有规律的布局中，这样就可以使用网格参数化。反射器墙距离相机6.6米，墙上的视野为1.35米×1.35米。69.5厘米 × 54厘米。镜子的尺寸为80厘米×100厘米。

用于评估的地面真实设置的几何形状是通过手动测量每个镜子、激光点、摄像机视锥角的位置，以及用卷尺测量隐藏物体的位置获得的。房子的形状是由制造它的SVG文件给出的。

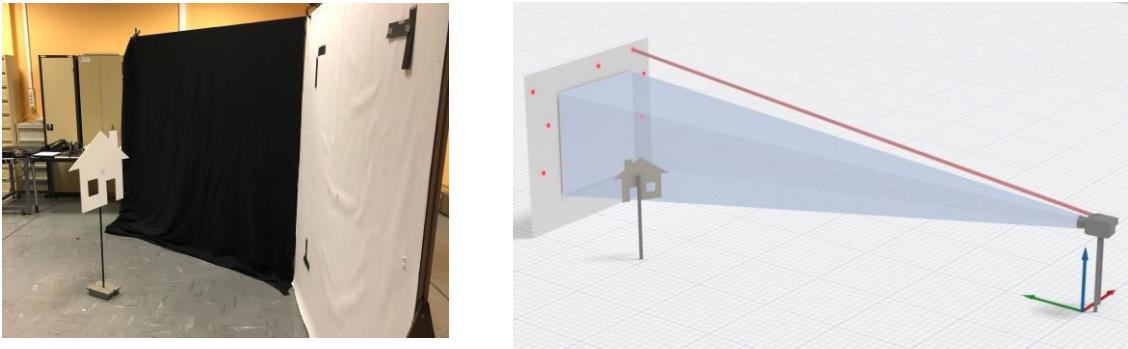


图6.9：我们的实验装置的照片和示意图。重建的目标是相机视场外的一个房子形状。墙上的红点显示了所使用的7个激光点的位置。

6.5.1 校准结果

我们的硬件设置包括一个普林斯顿光波公司的InGaAs盖革模式雪崩光电二极管相机和一个Keopsys的脉冲掺铒光纤激光器。该相机的空间分辨率为32×32个像素；然而，一些像素是有缺陷的，这使得有效分辨率降低到26×29个像素。时间窗宽度为250ps（光速为7.495cm），每次测量由200,000个单独的二进制帧组成，在大约4秒内捕获。激光器发出的光的波长为1.55微米，脉冲长度为500ps。通过对主峰进行高斯函数拟合，将从相机中检索到的瞬时直方图转换为离散的飞行时间值（见附录6.A.1）。房子的形状是由涂有白色油漆的胶合板制成的。

我们用墙上的移动标记来测量摄像机的视场，并在摄像机的实时图像中观察它（投射到墙上的像素大小为4.2厘米×4.2厘米）。近红外激光的7个光点位置是用红外探测卡测量的。我们估计，这些测量结果的准确度可达1-2厘米，在解释校准结果时应考虑到这一点。照相机和激光器之间的信号偏移（导致飞行时间偏移）是通过在设置前面的几个已知距离处放置一个平面校准目标来校准的。一个家用级的镜子被安装在一个三脚架上，我们将其放置在场景中的7个不同位置。镜子平面的初始化是通过测量三脚架在地面上的位置，并假设平面法线朝向摄像机和激光点的几何平均值。尽管只是一个粗略的估计，但这种方法被证明是非常有效的。

测量也会受到散射的影响（例如，当激光点靠近视锥或激光束穿过视锥并击中空气中的微小颗粒时），导致无效的数值。由于我们提出的方法使用灵活的 $\overrightarrow{l} \rightarrow m \rightarrow c$ 路径列表，我们可以自动检测并从优化中删除无效的路径（关于检测的细节见附录6.A.2）。

图6.10显示了校准结果。我们评估了一系列不同的初始化噪声值（见6.4.1节），即10、20、35和50厘米。对于每个噪声水平，显示了两个不同的初始化。请注意，由于使用了网格参数化，噪声被应用于视域的角落而不是单个像素（因为它们的布局

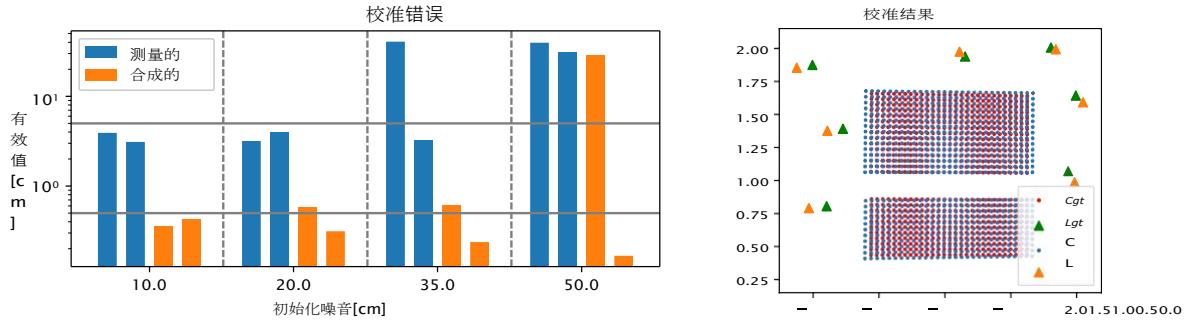


图6.10：实验装置上的校准质量。左图：RMS是根据公式6.4计算的。对于每个噪声水平，创建两个初始化，由测量和合成飞行时间数据的评估所共享。灰线表示0.5厘米和5厘米的误差。右图。在初始化噪声为35厘米的情况下，典型的校准结果和飞行时间测量数据上的测量位置之间的比较。RMS是3.27厘米。一些有死亡像素的行和列被移除，导致可见的差距。

是由传感器模式给出的）。在实际应用中，最坏的情况（ $\sigma=50$ 厘米）将对应于仅凭比例感和没有任何测量设备获得的粗略初始化。

正如在前面的评估中所看到的，校准通常要么收敛到一个好的解决方案，要么根本没有。对于成功的校准，我们在这个设置上实现了3-4厘米的典型有效值误差。考虑到该装置的时间分辨率较差，这些结果与我们在第6.4节中的发现一致。

除了测量的飞行时间数据，我们还使用了代表更先进硬件设置的合成数据。该数据是使用与逆向优化中相同的模型创建的。我们使用相同的条件，包括删除相同的像素和使用与真实测量相同的连接子集。我们对飞行时间数据施加噪声，如第6.4节所述， $\sigma=0.5$ 厘米。结果显示在图6.10中。正如预期的那样，由于噪声水平明显较低，校准结果比测量数据要好大约一个数量级。

6.5.2 重建的结果

对于物体重建，我们使用Liu等人[Liu+19]中描述的相位-场背投算法。由于分辨率、噪声水平和一般强度等属性在测量数据和合成数据之间是不同的，重建参数必须单独进行微调（在图6.11中，每一行的参数是不同的，但在一行中是恒定的）。关于重建参数的细节可在附录6.B中找到。

用于重建的合成飞行时间数据不能用与合成校准相同的方法来计算，因为现在的场景包含了一个漫反射物体。因此，我们使用Iseringhausen等人提出的瞬态渲染器[IH20]，它可以计算出所需的瞬态直方图。我们将分档设置为0.5厘米，与合成校准的飞行时间噪声相似。此外，我们在瞬态直方图中加入了射击噪声。

6.5. 实验结果

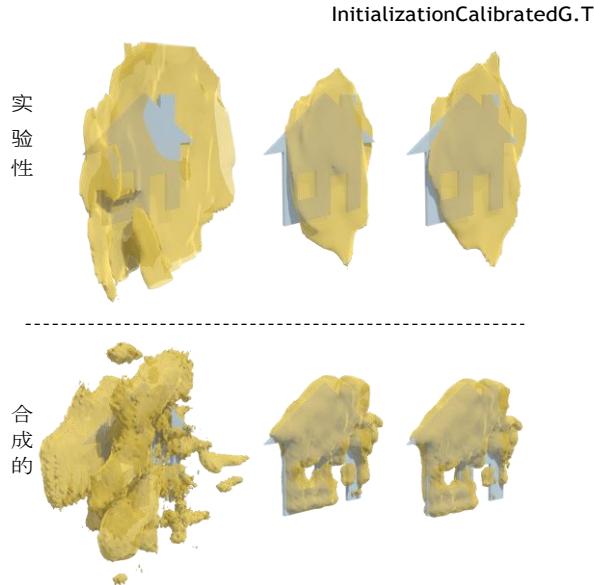


图6.11：从不同设置中获得的物体重建。初始化：用噪声水平 $\sigma=10\text{cm}$ 扰动的地面实况设置，校准：通过提出的校准方法获得的设置，G.T.：地面实况/测量设置。请注意，在这两种情况下，校准后的重建与地面实况重建非常相似，这意味着校准是成功的。

使用泊松分布的ient直方图（其中最大的瞬时像素强度为1500左右）。

为了进行定量评估，我们使用Klein等人[Kle+18]介绍的NLoS网格距离指标。它计算了重建的精度（从重建的每一点到参考的最小距离）和完整性（从参考的每一点到重建的最小距离）。请注意，在这个度量中，由参考表面上的一个点组成的重建将有完美的精度，但完整性得分很差，而由所有可能的点组成的重建将有完美的完整性，但精度得分很差。因此，在某种意义上，这两个分数之间存在着权衡，这就是为什么最大的分数被作为综合分数。

结果显示在图6.12中，而图6.11显示了作为定性比较的重建渲染。我们只评估具有10厘米初始化噪声的校准，因为所有收敛的校准基本上具有相同的质量（见图6.10）。在这种情况下，初始设置（校准前）可以被解释为先前测量的设置几何，通过校准得到改善，而不是粗略的初始化（这显然不适合任何重建），用于首次设置几何的估计。

我们提出以下意见。

- 正如预期的那样，合成案例中较高的时间分辨率和较低的噪声水平导致了重建结果的显著改善。
- 即使对于在重建的形状中不容易识别房屋形状的实验数据，来自校准设置的形状看起来比来自手工测量（地面真实）设置的形状更相似。

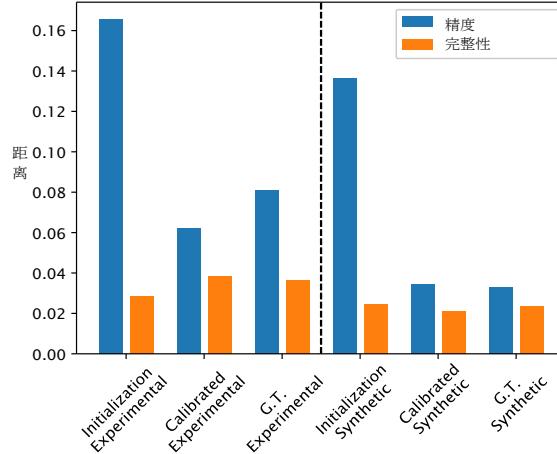


图6.12：从不同设置中获得的重建和参考之间的双向距离。 初始化：用噪声水平 $\sigma=10\text{cm}$ 扰动的地面实况设置， 校准：通过提出的校准方法得到的设置， G.T.：地面实况/测量设置。 数值越小越好， 综合得分是两者最大值（这里总是指精度）。校准后，综合距离明显降低。

初始化设置。这表明，即使在房屋形状不能被正确重建的情况下，校准本身也能很好地工作。

- 因此，设置校准对噪声的敏感度比物体重建要低。
- 在实验数据上，经过校准的设置实际上导致了比手工测量的地面真实设置稍好的重建。如第6.5.1节所述，测量设置有一些不确定因素，可以通过校准来纠正（类似于初始设置的改进），但改进也接近于一般的噪声水平。

6.6 总结

我们提出的非视线设置校准方法被证明能够稳健地优化真实世界的设置。尽管这是一个非凸问题，我们表明在全局最小值周围存在一个慷慨的收敛盆地，这导致对初始化的低要求。虽然完全任意的初始化是不充分的，但不一定依靠使用测量带和尺子的粗略估计是充分的，以获得良好的结果。此外，应使用大致相同数量的激光点和镜子位置。实现的精度取决于设置的深度分辨率，但设置的具体参数化可用于强制约束和提高精度。由于镜面目标导致信号中的单一尖峰，我们不依赖于硬件能够记录完整的瞬态直方图。这使得我们的方法适用于各种硬件，包括振幅调制的连续波激光雷达。我们的方法

6.A. 导入SPAD数据

校准非平面墙的能力可以使非视线成像应用在日常情况下得以实现。

在未来的工作中，我们的方法可以有多种扩展方式。当多个镜子同时被放置在场景中，而不是被逐一测量时，测量的峰值和物理镜子之间的映射成为额外的优化问题。解决了这个问题，就可以更快地进行校验。

尽管校准问题可以被重新表述和扩展以更好地支持同轴设置，但这可能不值得努力，因为同轴设置一般来说更容易校准（见第6.2节）。

此外，作为校准目标的镜子可以增加一个校准图案，然后投射到墙上。这将允许捕获额外的信息，可能用于改善结果。同样，包括路径的强度也可以对墙面的法线制定额外的约束。

补充材料

6.A 导入SPAD数据

由于我们提出的方法纯粹是在飞行时间数据上工作，每个硬件设置都需要一个预处理步骤，将传感器数据转换为飞行时间的数值。在下文中，我们将在第5节中详细介绍用于评估的硬件的这个过程。

6.A.1 距离提取

对于我们的测量，我们使用PrincetonLightwave公司的InGaAs盖革模式雪崩相机，其中每个像素包含一个计数器，当检测到第一个光子时就停止。通过改变二极管的电压，可以控制光子检测的概率，并且可以记录完整的瞬态直方图。由于早期光子的存在降低了后期光子的检测概率，这些直方图并不直接对应于光强度。然而，由于我们的方法只使用飞行时间值而不使用强度值，这种影响可以被安全地忽略。

像素计数器与激光脉冲同步，但设置的具体特征，如两个设备之间的电缆长度，需要进行偏移校准。我们通过在设置前的3个已知位置放置一个平坦的校准目标，并将线性函数的偏移量（梯度通过bin宽度已知）与测量值进行拟合。图6.13显示了一个像素直方图的例子。由于激光点与相机视锥的距离很近，直方图包含了镜头闪光的伪影，在墙与设置的距离上表现为一个峰值。直方图中的第二个峰值是由镜子反射的光，即我们的实际信号。峰值形状因脉冲持续时间而变宽的激光。

为了以子仓的分辨率提取返回的位置，我们对数据进行了高斯函数拟合。尽管有这样的程序，整体的准确性仍然受到摄像机噪声的限制。我们采用了一个迭代方案，使用Python软件包scipy.optimize定位峰值，并从数据中减去，以便在下一次迭代中找到额外的峰值。

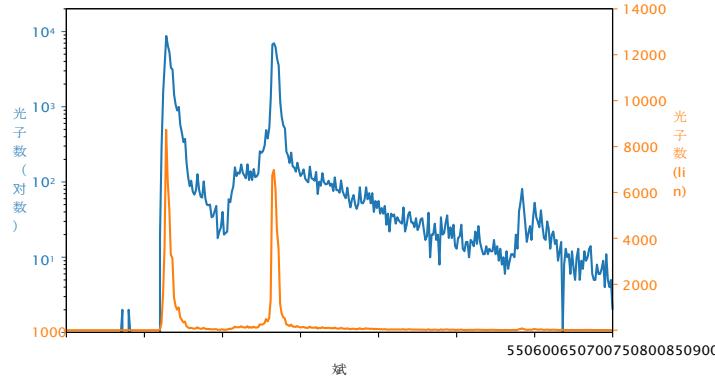


图6.13：由单个相机像素记录的直方图。两个标度都显示了相同的数据。两个峰值在线性尺度（橙色）中非常明显。场景中的散射在主峰之后产生了一些背景噪声，这在对数尺度（蓝色）中是可见的。

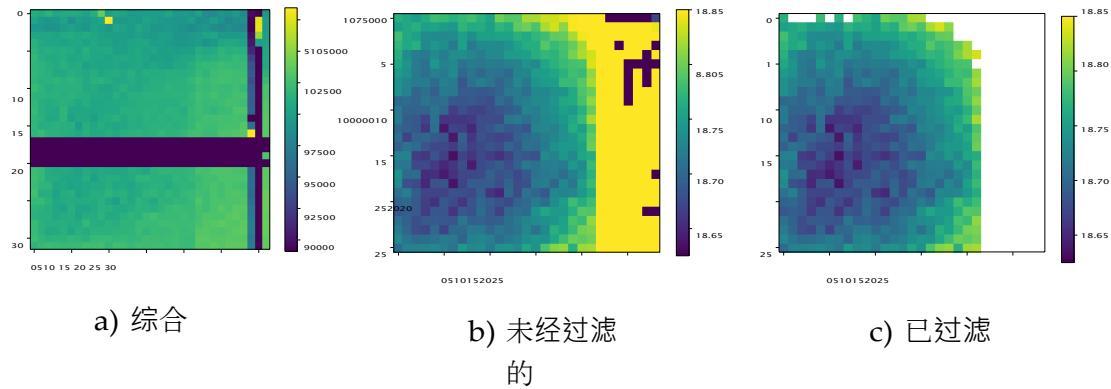


图6.14：(a)一个随时间变化而整合的SPAD测量。中下部的一些行和右边的一些列包含无效的数据，应该被删除。(b) 无效的行和列被删除（因此空间范围减少到~~29~~ 26个像素），但有些像素仍然是无效的。(c) 筛选后的结果。

最后，通过应用在偏移校准中确定的线性映射，将峰位的小数仓号码转换为飞行时间值。

不幸的是，我们的传感器中的一些行和列被破坏了，包含了无效的值。图6.14a显示了相机的原始图像，随着时间的推移而整合。在进一步处理之前，死的行和列被移除。除了中间的死行，前两行也被移除，因为它们各包含一个无效的像素。这导致了图10中的主文件中看到的像素掩码。

6.A.2 选择有效的测量方法

除了死像素外，大多数测量都包含额外的无效像素。最常见的原因是，镜子的反射没有覆盖整个相机的视域。因此，我们为每次测量计算一个有效的像素掩码，并拒绝每个被标记为无效的像素。

峰值检测首先找到最高的峰值，所以峰值是按时间排序的

延迟。第一个峰值是直接反射，而第二个峰值是我们的实际信号，后来被用于校准。有效像素是指满足以下所有条件的所有像素。

- 峰值的相对振幅不应相差20%以上。由于同一测量的像素的绝对强度可能会有很大的变化，所以对绝对峰值振幅的标准不太稳健。
- 信号峰值最多只有20个bin宽。如果信号中没有明显的两个峰值，拟合可以返回一个极宽的退化峰。
- 第一个峰值大约在墙的距离上（620分）。我们期待着墙的直接反射，从而验证它。注意，这个测试与我们的硬件设置有关，而不是校准方法本身。校准时不需要知道墙的位置。
- 第二个峰值应该与第一个峰值有一个最小的距离（15个bin）。这可以确保检测到两个实际不同的峰值。

这些标准是相当保守的，但可以有力地消除任何异常值。图6.14显示了在一次测量中的结果，镜面反射只覆盖了视锥的左边部分。遮罩成功地除去了右边的所有无效像素，然而左上方的一些可能是好的像素也被除去了。由于我们的目标只是重建整个传感器的投影，而不是单个像素的位置，所以这些孔对最终结果没有明显的影响。

6.B 物体重建

我们在第6.5.2节中使用Liu等人[Liu+19]的相位场虚拟波光学算法来重建隐藏物体。物体重建的参数尽可能地保持相似，然而不同的数据源需要改变一些参数。

由于实验数据的时间分辨率较低，使用了较低的波数，在不去除真正的几何特征的情况下，平滑了一些噪音伪影（实验：3，合成：11）。同样，由于强度值不同，使用不同的阈值来将密度云转换为表面（实验：0.5，合成：0.05）。

在SPAD传感器中，早期到达的光子会对后期到达的光子的检测产生阴影。对于第一峰很强的像素直方图（见图6.13），第二峰会比较低，即使到达的光子数量相同。由于只有距离而不是强度被用于校准，这种影响可以被忽略，然而对于背投来说，将第二峰的强度归一化以平衡像素的重要性是有利的。由于在我们的设置中，所有的像素都受到了相当均匀的照明，所以一个简单的归一化方法可以产生良好的效果。

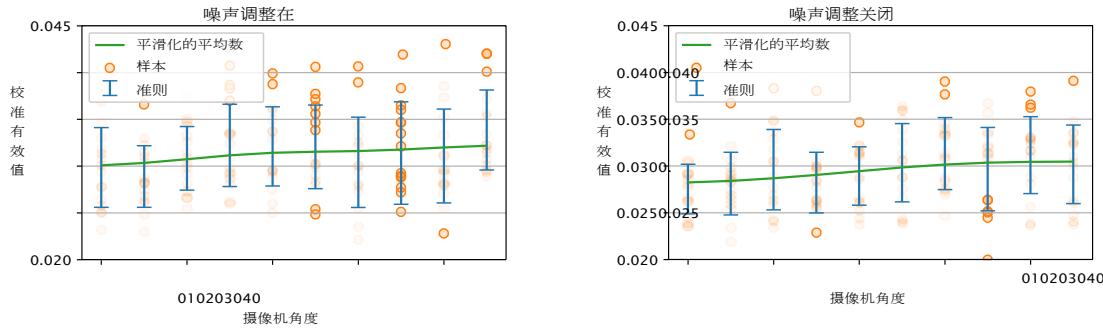


图6.15：校准误差与相机和反射器壁之间的角度有关。左图：飞行时间的噪声被调整到像素大小。右图。所有像素都有相同的平均噪声。

6.C 设置几何形状

在下文中，我们将分析设置的几何形状对校准成功的影响。由于在最一般的情况下，每个激光器位置、摄像机像素和镜子都增加了3个自由度，它们的位置的影响很难详尽评估。相反，我们评估了两个特别有趣的情况，相机和墙壁之间的角度的影响，以及将镜子放置在场景的可见部分的限制。

6.C.1 摄像机角度

我们使用第6.4.1节所述的合成设置，进一步分析摄像机相对于反射器墙的角度的影响。

摄像机的位置围绕Z轴旋转，旋转原点是反射镜墙的中心（见图6.3），角度在 0° （视图方向与墙面的法线，如图6.3）和右 45° 之间。在每一步中，相机的方向是使中心像素始终面向旋转中心。

墙上的投影像素图案被这种旋转所扭曲。右侧的像素被挤压在一起，而左侧的像素则被拉开。这不仅改变了像素的中心位置，而且也改变了它们的投影面积。为了说明这一点，第6.4.1节中的硬件不可知模型被一个像素模型所扩展，该模型根据像素的大小来调整飞行时间的噪声。这个噪声比例被设定为投影中心像素到摄像机的距离和其他每个投影像素到摄像机的距离之间的相对差异。在实践中，这意味着在 45° 的情况下，最分散的像素的飞行时间噪声的比例约为1.41，而最拥挤的像素的飞行时间噪声的比例约为0.82。

在这次评估中，使用了0.05的飞行时间噪声和0.2的初始化噪声。此外，该装置还使用了8个激光器和5个镜子以及平面参数化。

结果显示在图6.15中。对于10个步骤中的每一个步骤，都校准了16个随机实例。我们发现相机旋转产生的失真会使结果略微恶化，然而这种影响似乎几乎可以忽略不计。当关闭噪声比例时，结果有类似的模式，但总体上有较低的均方根误差（即使没有旋转，投影中心像素也是最接近摄像机的，因此总体噪声比例 >1 ）。

6.C. 设置几何形状

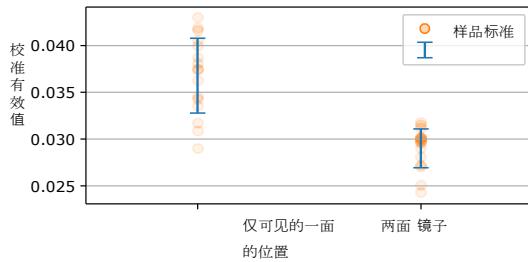


图6.16：镜子放置在场景的可见部分和镜子放置在场景的可见和隐藏部分的校准结果。在这两种情况下都使用了6面镜子。

因此，RMS的轻微下降主要是由扭曲的像素中心造成的，而不仅仅是像素面积增加带来的额外噪声。

6.C.2 受限的镜子放置

在实验室外的使用场景中，隐藏的场景可能无法访问。因此，我们对只在场景的可见部分（这里定义为在图6.3的坐标系中具有正X分量）设置镜子和自由放置镜子的设置进行了比较。

该设置是基于第6.4.1节的合成设置。飞行时间噪声被设置为0.05，初始化噪声为0.2。使用8个激光位置和6个镜子；在自由镜子放置的情况下，3个放在场景的隐藏部分，3个放在场景的可见部分。摄像机旋转30°（如第6.C.1节所述），这在场景中存在遮挡物时通常是需要的。对于这两种情况，用不同的初始化进行了16次校准。

结果显示在图6.16中。我们发现，在这个设置中，如果只有场景的可见部分可以用来放置镜子，那么产生的校准误差会高出25%左右。我们的结论是，自由放置镜子是一个优势，但不是我们的方法发挥作用的必要条件。

第七章

结论和展望

近年来，大量的出版物表明，NLoS成像已经发展成为一个全球关注的广泛研究领域。第三章的概述只涵盖了其中的一小部分，预计未来会有更多的出版物出现。显然，NLoS成像是一个充满活力的话题，业界对此有很多期待。我们自己对该领域的影响总结如下。

在第四章中，我们开发了一种新颖的重建方法，首次允许廉价的实时物体跟踪。这也是第一个不依赖瞬时图像的NLGs重建算法，我们引入了通过合成分析作为重建模式。在第五章中，我们提出了一个针对NLGoS成像问题的基准，包括参考数据集和特定领域的评价指标。有了这些，现有的众多方法就有了可比性，基准结果可以帮助为新设计的产品选择正确的算法。在第6章中，我们提出了一种通用的校准方法，可以在新的环境中更快地建立起NLAs成像系统，并使其不再受制于实验室。它适用于大量的设置，并且不需要额外的硬件。

7.1 影响、局限性和未来工作

在开展这项工作的这几年里，NLGOS成像领域取得了很大的进展和拓宽。因此，我们现在从技术现状的角度对我们每篇出版物的影响、局限性和未来工作做一个简要的概述。

我们基于分析合成的物体跟踪的主要局限性是场景模型过于模拟，如果启用方向重建，稳定性会降低，需要进行校准，而且缺乏强大的收敛保证。

校准的需要是其他大多数出版物所共有的，但我们后来的工作已经解决了这个问题。虽然由于论文长度的限制，已发表的论文中的评估只显示了强度相机的结果，但跟踪框架在很大程度上是与硬件无关的，也可以处理瞬时输入数据。这就要求前向渲染器输出时间曲线，这些时间曲线可以和强度值一起计算，而且计算开销很小。在开发过程中，我们利用这一点，成功地

在我们的实验室里用AMCW激光雷达进行物体跟踪。时间维度可以作为额外的优化约束，这在原则上有利于重建质量，但总的来说，强度相机的更高的分辨率和更好的信噪比导致了更好的结果。对于较新的瞬时成像硬件来说，情况可能不是这样的，此外，我们的校准方法可以很容易地应用于使用它们的装置。

关于场景模型，我们小组发表了一篇后续论文[IH20]。它在前向模型中包括了闭塞，并使用了一种先进的基于高斯-等值面的运算时间化方法，该方法能够进行全三维重建，并且对噪声特别稳健。

与大多数数值优化问题一样，保证找到最优解是非常难实现的。此外，NLoS可重构性的唯一性还没有以数学上的严格方式得到证明（即存在一个将场景描述映射到给定光传输模型的测量的注入函数）。面向远离中继墙的表面通常被认为是不可重构的，然而这对于涉及高阶反射的光传输模型来说可能不成立。已经有一些关于打破对称性所需的测量类型的研究[Ped+17]和一些关于可重构性的一般（尽管不是数学上的严格）考虑[LBV19]，但仍然需要进一步研究。

我们的基准的主要限制是，它目前的参考数据集不包括共焦瞬态图像。正如第3.1节中所讨论的，在我们的基准发布后，这种测量方式变得越来越流行。由于一些重建算法依赖于共焦测量，它们不能在我们目前的数据集上进行评估。

开发该基准的最大挑战之一是不同设置和扫描模式的统一。为了进行有意义的比较，不同的重构算法应该在相同的输入数据上运行。这就阻止了对大量扫描模式的支持，因为这本身就会把评估结果分成许多子类别。然而，考虑到共焦扫描的普及，为两种不同的扫描模式提供合成效果图将是非常合理的，并能对大多数现有的方法进行比较。

此外，该数据集应扩展到包括更复杂的场景，以考虑到较新的重建算法的改进能力。添加背景信号或其他类型的噪声将提供评估不同方法的实验室外性能的手段。同样，应该包括更复杂的材料，因为在目前的状态下，只有一种非漫射材料可用。这些场景也只包含一个物体，这大大降低了场景中的相互反射量。与额外的扫描模式相比，扩大场景的种类不会导致评估的分裂，而是有助于估计所有算法的稳健性。

另一个问题是缺乏对已发表方法的开源实现。因此，创建一个社区驱动的资源库是有益的，它可以在一个统一的框架内实现各种算法，并使它们可以在未来的研究中重复使用。

鉴于这种限制，我们的基准还不能作为最新工作性能的参考。尽管如此，所提供的数据集已被证明是对社区的宝贵贡献，并被用于Lindell等人2019年[LWO19]等出版物中。同样的

7.2.闭幕词

对评价指标来说是真实的[Kle+20]。

我们的校准方法的主要限制是场景中需要的镜子数量，以及在较小的程度上，需要一个粗糙的初始化。

有多种方法可以对其进行大幅改进。到目前为止，在优化过程中只考虑了时间值。将峰值的强度值作为一个额外的约束条件，将导致一个更好的条件优化问题，并可能改善结果。这些强度值将主要取决于镜子的距离（通过反平方律），这已经被时间测量所测量，以及反射器壁和镜子之间的角度（通过朗伯的余弦律），这增加了有价值的额外信息。

此外，有可能同时在场景中放置多个镜子，而不是进行连续测量。这将导致一个额外的组合问题，即决定哪些峰值来自于哪个镜子，因为现在每次测量都会出现多个峰值。然而，镜子的总数仍然很低，而且已经存在一个粗略的初始化。

最后，用专门的跟踪图案（如ChArUco Corners[Gar+14]）来增强镜面，将导致这些图案被投射到中继墙。如果使用全场图像传感器，标记物的特征可以在测量中被检测出来，这将揭示每个像素在镜面上的反射位置。由于这种投影是一种低维的同位素，因此只需要为此检测很少的特征，这可以使这种方法甚至适用于今天的瞬时成像硬件的相对低分辨率。当投影是已知的，镜子的位置可以用简单的几何推理直接确定。有了已知的镜子位置，优化就更有约束性，可以更稳健更快速地解决。那么我们的方法也极有可能在更少的镜子位置下工作，甚至对相机和激光点的初始化要求也更少（而镜子位置则根本不需要初始化）。

7.2 闭幕词

在这篇论文中，我们提出了一些对NLSO成像的贡献。我们把重点放在解决实际问题上，我们的工作已经在其他小组的出版物中得到了发展。NLoS成像仍然是一项新兴技术，我们很高兴看到未来的研究和由此产生的商业产品的发布将取得的进展。

图表列表

1.1	潜望
镜和恩培多克勒
.....	2
1.2非视线成像.....。	3
2.1间接视觉方法的 分类.....	7
2.2 两个场景.....	的
瞬时图像10	
2.3 3次弹跳的.....	设置
14	
2.4 各种BRDF	模型
15	
2.5 渲染方程的说明16	
2.6 不同级别的重建，自由度 不一19	大小
2.7 背投原理/NLoS场景	的瞬
时图像19	
3.1 对NLoS成像系统进行.....	分类
的不同维度24	
3.2 基于闭塞的NLoS.....	成像
的不同设置.....	31
4.1 追踪	拐角
处的物体.....	37
4.2 强度差异.....	图像
39	
4.3 用于	跟踪
的物体模型和成本函数.....	41

4.5 追踪一个未知的物体，或在一个未知的.....	房间
里	43

4.6 用线性.....	模型
--------------	----

5.1 最常见的NLoS.....	重建
情况	50

5.2 未扭曲的瞬态.....	图像
的切片	52

5.3 我们统一的场景几何学.....	53
---------------------	----

5.4 示范性的几何重建/轨迹重建	57
-------------------------	----

5.5 分类数据集/来自纹理重建挑战的纹理. 58	
---------------------------	--

5.7 纹理重建.....	设置
64	

5.8 为我们的表面比较	指标
选择对应关系的说明	66

5.9 剔除背面的.....	面孔
68	

5.10 我们的查看器显示了瞬时	图像
的时间切片和柱状图.....	69

5.11 摄像机转换器使用由四个点对定义的同构图来重新取样瞬时图像。	69
--	----

5.12 应用前（左）和后（右）的Hammer场景的瞬时图像	
噪声模型SPAD70	

数字列表

5.13 锤子场景	的合成
AMCW测量值70	

5.14 重建斯坦福	龙71
------------------	-----

5.15 在位置	跟踪过
程中使用的重构几何图形	72

5.16 重建的飞机沿X轴运动的轨迹	.72
--------------------	-----

6.1 我们提出了一种新的方法，用于三蹦子的几何校准。	
使用瞬态成像硬件的	非视线设
置74	

6.2 为了评估光路	$\rightarrow lm^r \rightarrow c$, 我们使用一个相似性	关系77
------------	--	------

6.3 用于合成		评价的
装置		79

6.4 校准性能取决于		测量的
总次数		81

6.5	不同程度的初始化	噪声的重建误差	82
6.6	重构成功与否取决于初始化噪声83	
6.7	取决于飞行时间噪声和校准误差	参数化 83	
6.8	弧形	墙的校准实例	84
6.9	我们的实验	装置的照片和示意图	85
6.10	实验	装置的校准质量	86
6.11	从不同	设置获得的物体重建	87
6.12	从不同设置中	获得的重建和参考之间的双向距离88	
6.13	单个相机	像素记录的直方图	90
6.14	SPAD	测量90	
6.15	相对于相机和墙之间的角度的校准误差	反射器92	
6.16	镜面放置限制在可见部分的校准结果 场景和镜子放置在	场景的可见部分和隐藏部分	93

表格列表

5.1	文献中报道的各种设置的主要规格.....	60
5.2	几何重建.....	挑战的对象及其类别
	。62	
5.3	物体追踪数据.....	集的概述。
	63	
5.4	物体分类数据.....	集的概述
	。63	
5.5	纹理重建数据.....	集的概述
	。64	
5.6	快速背投重建、地面真实网格和同一网格经过一级Catmull-Clark后的不对称重 建误差	分部67
5.7	快速背投重建.....	结果68

缩略语列表

ADMM 交替方向的乘法。

AMCW 振幅调制的连续波。 **BRDF** 双向反射率分布函数

。 **DoF** 自由度。

激光雷达 的光探测和测距。

NLoS 非视线。

PMD 光子混合器设备。

雷达 RAdio Detection And Ranging.

RMS 均方根。

Sonar SOund NAVigation

Ranging. **SPAD** 单光子雪崩二极管。 表

面元素。

ToF 飞行时间。

书目

- [Abr78] Nils Abramson."通过全息技术进行飞行中的光记录"。在。*Optics Letters* 3.4 (Oct. 1978), pp. 121-123. doi: 10.1364/OL.3.000121。网址：<http://ol.osa.org/abstract.cfm?URI=ol-3-4-121>。光学学会 (OSA) (引自第9、35、36页)。
- [Abr83] Nils Abramson."飞行中的光记录：超快现象的高速全息运动照片"。在。*应用光学* 22.2 (1983)，第215-232页。光学学会 (OSA) (见第36页)。
- [Adi+15] Fadel Adib, Chen-Yu Hsu, Hongzi Mao, Dina Katabi, and Frédo Durand."通过墙壁捕捉人的身影"。In:*ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH Asia)* 34.6 (Oct. 2015), 219:1-219:13. issn: 0730-0301. doi: 10.1145/2816795.2818072.ACM (引自第33、36、50页)。
- [AGJ17] Victor Arellano, Diego Gutierrez, and Adrian Jarabo."非视线重建的快速背投"。在。*Optics Express* 25.10 (May 2017), pp. 11574-11583. doi: 10.1364/OE.25.011574. 光学学会 (OSA) (引自第26、51、59、65、70、75页)。
- [Ahn+19] Byeongjoo Ahn, Akshat Dave, Ashok Veeraraghavan, Ioannis Gkioulekas, and Aswin C. Sankaranarayanan."一般非视线成像算子的卷积近似"。In:*IEEE国际计算机视觉会议 (ICCV)* (2019年) (引自第27页)。
- [AK13] Fadel Adib和Dina Katabi。"用WiFi看穿墙壁！"在。*SIGCOMM Comput.通信 Rev.* 43.4 (Aug. 2013), pp: 10.1145/2534169.2486039.ACM (引自第33、36、50页)。
- [AMO15] Sameer Agarwal, Keir Mierle, and Others [sic].*Ceres Solver*. <http://ceres-solver.org>.2015 (引自第40页)。
- [And06] Pierre Andersson."使用射程门控激光雷达图像的长距离三维成像"。在。*SPIE光学工程* (2006年3月)。DOI : 10.1117/1.2183668。国际光学和光子学学会 (SPIE) (引自第11页)。
- [BA87] Peter J. Burt和Edward H. Adelson。"计算机视觉读物。Issues, Problems, Principles, and Paradigms"。In: ed. by Martin A. Fischler and Oscar Firschein.美国加州旧金山：Morgan Kaufmann出版公司，1987年。拉普拉斯

金字塔作为一个紧凑的图像代码，第671-679页，ISBN:

- 0-934613-33-8. url: http://dl.acm.org/citation.cfm?id=33517_33571
(引自第58页)。
- [Bar+18] Manel Baradad, Vickie Ye, Adam B. Yedidia, Frédo Durand, William T. Freeman, Gregory W. Wornell, and Antonio Torralba."从阴影中推断光场"。In:*IEEE计算机视觉和模式识别会议 (CVPR)* (2018) (引自第31页)。
- [BBC17] Samuel Burri, Claudio Bruschini, and Edoardo Charbon."LinoSPAD : 一个具有64个基于FPGA的TDC模块的复合线性SPAD相机系统, 用于多功能50ps分辨率的时间分辨成像"。在。*Instruments* (2017). doi: 10.3390/instruments1010006 (cit. on p. 12).
- [Ber+12] Jacopo Bertolotti, Elbert G. van Putten, Christian Blum, Ad Lagendijk, Willem L.Vos, and Allard P. Mosk."通过不透明散射层的非侵入性成像"。在。*自然* (2012)。DOI: 10.1038/nature11578 (引自第33页)。
- [BH04] Jens Busck和Henning Heiselberg。"门控观测和高精度三维激光雷达"。在。*Applied Optics* 43 (2004). doi: 10.1364/AO.43.004705.光学学会 (OSA) (引自第11页)。
- [Bij+20] Mario Bijelic, Tobias Gruber, Fahim Mannan, Florian Kraus, Werner Ritter, Klaus Dietmayer, and Felix Heide."看透雾气而不看雾气。在不可见的恶劣天气下的深度多模态传感器融合"。In:*IEEE计算机视觉和模式识别会议 (CVPR)* (2020) (见第33页)。
- [BK19] Jeremy Boger-Lombard 和 Ori Katz."用于非视线定位的无源光学飞行时间"。In:*Nature Communications* (2019). doi: 10.1038/s41467-019-11279-6 (cit. on p. 32).
- [Bou+17] Katherine L. Bouman, Vickie Ye, Adam B. Yedidia, Frédo Durand, Gregory W. Wornell, Antonio Torralba, and William T. Freeman."把角落变成相机。原则和方法"。In:*IEEE计算机视觉和模式识别会议 (CVPR)* (2017), 第2270-2278页 (引用第31、75页)。
- [Bur+14] Samuel Burri, Yuki Maruyama, Xavier Michalet, Francesco Regazzoni, Claudio Bruschini, and Edoardo Charbon."高电阻门控SPAD图像传感器的结构和应用"。在。doi: 10.1364/OE.22.017573.光学学会 (OSA) (引自第12页)。
- [Bur08] John Burnet.*Early Greek Philosophy*.伦敦。Adam and Charles Black, 1908 (见第2页)。
- [Bus05] Jens Busck."使用门控观察激光雷达的水下3-D光学成像"。在。*SPIE Optical Engineering* (2005). doi: 10.1117/1.2127895 (cit. on p. 33).
- [But+15] Mauro Buttafava, Jessica Zeman, Alberto Tosi, Kevin Eliceiri, and Andreas Velten."使用时间门控单光子雪崩二极管的非视线成像"。在。*Optics Express*

书目

23.16 (2015), pp.20997-21011.光学学会 (OSA) (引自第12、25、26、36、38
、51、60、65、74、75页)。

- [Car+17] Piergiorgio Caramazza, Alessandro Boccolini, Daniel Buschek, Matthias B. Hullin, Catherine Higham, Robert Henderson, Roderick Murray-Smith, and Daniele Faccio."用单像素、单光子探测器对隐藏在视野之外的人进行神经网络识别"。in: *arXiv preprint* (2017). arXiv: 1709.07244 (cit. on p. 51).
- [Car+18] Piergiorgio Caramazza, Alessandro Boccolini, Daniel Buschek, Matthias B. Hullin, Catherine F. Higham, Robert Henderson, Roderick Murray-Smith, and Daniele Faccio."用单像素、单光子探测器对隐藏在视野之外的人进行神经网络识别"。In: *Scientific Reports* (Aug. 2018). doi: 10.1038/s41598-018-30390-0 (cit. on pp. 28, 75, 76).
- [ÇG14] Y.A. Çengel and A. J. Ghajar. 传热和传质。 *Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill Education, 2014. ISBN: 9789814595278 (cit. on p. 46).
- [Cha+17a] Susan Chan, R. E. Warburton, G. Gariepy, Y. Altmann, S. McLaughlin, J. Leach, and D. Faccio."用单像素探测器快速跟踪隐藏物体"。在。 *Electronics Letters* 53.15 (July 2017), pp. 1005-1008. issn: 0013-5194. doi: 10.1049/el.2017.0993.工程和技术学会（引自第51、60页）。
- [Cha+17b] Susan Chan, Ryan E. Warburton, Genevieve Gariepy, Jonathan Leach, and Daniele Faccio."非视线范围内的人的追踪"。在。 *Optics Express* 25.9 (May 2017), pp. 10109-10117. doi: 10.1364/OE.25.010109.该光学学会 (OSA)（引自第26、30页）。
- [Che+19] Wenzheng Chen, Simon Daneau, Fahim Mannan, and Felix Heide."稳态非视线成像"。In: *IEEE 计算机视觉和模式识别会议 (CVPR)* (2019年6月)（引用第28、30、75页）。
- [Cho+20] Javier Grau Chopite, Matthias B. Hullin, Michael Wand, and Julian Iseringhausen."深度非视线重建"。In: arXiv: 2001.09067 [cs.CV] (cit. on pp. 28, 75, 76).
- [Dor+11] A. A. Dorrrington, J. P. Godbaz, M. J. Cree, A. D. Payne, and L. V. Streeter."从商业测距仪的多路径和散射干扰中分离真实的测距结果"。In: *SPIE 三维成像、交互和测量* 7864 (2011)，第37-46页。Doi: 10.1117/12.876586 (引用第12页)。
- [Eno06] Jay M. Enoch."镜子的历史可以追溯到8000年前"。在。 *验光和视觉科学* 83.10 (2006), 第775-781页。美国验光学会（引自第1页）。
- [FC99] David D. Ferris Jr. 和 Nicholas C. Currie. *当前用于穿墙监视 (TWS) 的技术调查*。1999. doi: 10.1117/12.336988 (cit. on p. 50).
- [Fen+88] Shechao Feng, Charles Kane, Patrick A. Lee, and A. Douglas Stone."相干波在无序介质中传输的相关性和波动性"。在。 *Physical Review Letters* 61.7 (Aug. 1988) (cit. on p. 32).

- [FR88] Isaac Freund和Michael Rosenbluh。"无序介质中光波传播的记忆效应"。In:*Physical Review Letters* 61.20 (Nov. 1988) (cit. on p. 32).
- [Gar+14] S. Garrido-Jurado, R. Muñoz-Salinas, F. J. Madrid-Cuevas, and M. J. Marín-Jiménez."自动生成和检测闭塞情况下的高度可靠的靶标"。In: 模式识别47.6 (2014), pp.
- [Gar+15] Genevieve Gariepy, N. Krstajic, R. Henderson, C. Li, R. R. Thomson, G. S. Buller, B. Heshmat, R. Raskar, J. Leach, and D. Faccio。"单光子感光飞行成像"。在。*Nature Communications* 6 (2015) (cit. on pp. 36, 73, 75).
- [Gar+16] Genevieve Gariepy, Francesco Tonolini, Robert Henderson, Jonathan Leach, and Daniele Faccio."对隐藏在视野之外的移动物体的检测和跟踪"。在。*Nature Photonics* 10.1 (2016) (cit. on pp. 26, 30, 35, 36, 38, 44, 51, 60).
- [GBH70] Richard Gordon, Rober Bender, and Gabor T. Herman."用于三维电子显微镜和X射线摄影的代数重构技术 (ART)"。在。doi: 10.1016/ 0022-5193(70)90109-8 (cit. on p. 27).
- [Gil66] Lester F. Gillespie."表观照度是门控激光夜视系统中范围的一个函数"。在。doi: 10.1364/JOSA.56.000883 (cit. on p. 11).
- [Gki+15] Ioannis Gkioulekas, Anat Levin, Frédéric Durand, and Todd Zickler."使用干涉仪的微米级光传输分解"。In:*ACM Transactions on Graphics* 34.4 (July 2015), 37:1-37:14. issn: 0730-0301. doi: 10.1145 / 2766928 (cit. on p. 75).
- [Gor+84] Cindy M. Goral, Kenneth E. Torrance, Donald P. Greenberg, and Bennett Battaile."光在漫反射表面之间的相互作用的建模"。在。*ACM SIGGRAPH Computer Graphics* 18.3 (Jan. 1984), pp.213-222.issn: 0097-8930. doi: 10.1145/964965.808601 (cit. on p. 46).
- [GTJ09] K. Goda, K. K. Tsia, and B. Jalali。"用于实时观察快速动态现象的序列时间编码放大成像"。在。*自然*458.7242 (2009) , 第1145-1149页 (见第36页)。
- [Gup+12] Otkrist Gupta, Thomas Willwacher, Andreas Velten, Ashok Veeraraghavan, and Ramesh Raskar."利用漫反射重建隐藏的三维形状"。In:Doi: 10.1364/ OE.20.019096.光学学会 (OSA) (引自第7、26页)。
- [Ham08] Hamamatsu. *Streak Cameras* 指南。2008. url: https://web.archive.org/web/20201129004529/https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/sys/SHSS0006E_STREAK.pdf (cit. on p. 11).
- [Has21] 哈桑-伊本-海赛姆.光学之书 (*Kitāb al-Manāzir*)。1011-1021年 (见第2页)。

- [HCZ00] P. Y. Han, G. C. Cho, and X.-C. 张。"生物组织的时域透射与太赫兹脉冲"。在。*Optics Letters* 25.4 (2000) (cit. on p. 33).
- [Hei+13] Felix Heide, Matthias B. Hullin, James Gregson, and Wolfgang Heidrich."使用光子混合器设备的低预算瞬时成像"。In:*ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH)* 32.4 (2013), 45:1-45:10 (cit. on pp. 12, 36, 75).
- [Hei+14] Felix Heide, Lei Xiao, Wolfgang Heidrich, and Matthias B. Hullin."Diffuse Mirrors: 使用廉价的飞行时间传感器从漫反射间接照明中进行三维重建"。In:*IEEE 计算机视觉和模式识别会议 (CVPR)* (2014) (引自第7、12、25、29、35、36、38、51、52、60、74页。75).
- [Hei+18] Felix Heide, Matthew O'Toole, Kai Zhang, David B. Lindell, Steven Diamond, and Gordon Wetzstein."使用部分遮挡物和表面规范的非视线成像"。In:*ACM Transactions on Graphics* abs/1711.07134 (2018). arXiv: 1711.07134 (cit. on pp. 51, 52).
- [Hei+19] Felix Heide, Matthew O'Toole, Kai Zang, David B. Lindell, Steven Diamond, and Gordon Wetzstein."使用部分遮挡物和表面规范的非视线成像"。In:*ACM Transactions on Graphics* 38.3 (May 2019). issn: 0730-0301. doi: 10.1145/3269977 (cit. on pp. 26, 73, 75).
- [Hev47] Johannes Hevelius.*Selenographia sive lunae descriptio*.Gedani: Hünefeld, 1647. doi: 10.3931/e-rara-238 (cit. on pp. 1, 2).
- [HGJ17] Quercus Hernandez, Diego Gutierrez, and Adrian Jarabo."用于瞬态成像的单光子雪崩二极管传感器的计算模型"。在：*arXiv 预印本* (2017)。arXiv : 1703.02635 (见第12页)。
- [Huy09] Du Q. Huynh."三维旋转的度量。比较和分析"。In:*Journal of Mathematical Imaging and Vision* 35.2 (2009), pp. 155-164. doi: 10.1007/s10851-009-0161-2 (cit. on p. 57).
- [ICG86] David S. Immel, Michael F. Cohen, and Donald P. Greenberg."用于非漫反射环境的辐射性方法"。在。*Association for Computing Machinery* 20.4 (1986) (cit. on p. 15).
- [IH20] Julian Iseringhausen 和 Matthias B. Hullin。"使用 Efficient Transient Rendering 的非视线重建"。In:*ACM Transactions on Graphics (TOG)* 39.1 (2020) (cit. on pp. 27, 73, 75, 76, 86, 96).
- [Ise+17] Julian Iseringhausen, Bastian Goldlücke, Nina Pesheva, Stanimir Iliev, Alexander Wender, Martin Fuchs, and Matthias B. Hullin."通过喷涂光学技术的4D成像"。在。*ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH)* 36.4 (2017). doi: 10.1145/3072959.3073589 (cit. on p. 32).
- [Jar+14] Adrian Jarabo, Julio Marco, Adolfo Mu noz, Raul Buisan, Wojciech Jarosz, and

Diego Gutierrez."瞬态渲染的框架"。In:*ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH Asia)* 33.6 (2014), p. 177 (cit. on p. 13).

- [Jar+17] Adrian Jarabo, Belen Masia, Julio Marco, and Diego Gutierrez."瞬时成像的最新进展。计算机图形和视觉的视角"。In:视觉信息学1.1 (2017) , 第65-79页。issn : 2468-502X。DOI : 10.1016/j.visinf.2017.01.008 (引用第9、51、75页)。
- [JEH15] Kishore Jaganathan, Yonina Eldar, and Babak Hassibi."相位检索。近期发展概述"。载于 : arXiv 预印本 (2015年10月) (引用于第32页)。
- [Jin+14] Chenfei Jin, Zitong Song, Siqi Zhang, Jianhua Zhai, and Yuan Zhao."用三种激光散射看穿小孔"。In:Optics Letters (2014年11月)。光学学会 (OSA) (引自第51页)。
- [Kab76] Wolfgang Kabsch."连接两组向量的最佳旋转的解决方案"。在:Acta Crystallographica Section A: Crystal Physics, Diffraction, Theoretical and General Crystallography 32.5 (1976), pp.922-923 (cit. on p. 80)。
- [Kad+13] Achuta Kadambi, Refael Whyte, Ayush Bhandari, Lee Streeter, Christopher Barsi, Adrian Dorrrington, and Ramesh Raskar."编码的飞行时间相机 : 稀疏去卷积解决多径干扰和恢复时间的pro-文件"。In:ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH Asia) 32.6 (2013), p. 167 (cit. on pp. 12, 36).
- [Kad+16] Achuta Kadambi, Hang Zhao, Boxin Shi, and Ramesh Raskar."Occluded Imaging with Time-of-Flight Sensors".In:ACM Transactions on Graphics 35.2 (Mar. 2016), 15:1-15:12. issn: 0730-0301. doi: 10.1145/2836164 (cit. on pp. 7, 29, 33, 36, 38, 44, 51, 60).
- [Kaj86] James T. Kajiya."Rendering Equation".In:Association for Computing Machinery 20.4 (1986) (cit. on pp. 13-15).
- [Kal+93] L. L. Kalpaxis, L. M. Wang, P. Galland, X. Liang, P. P. Ho, and R. R. Alfano."通过时间门控光学断层扫描对隐藏在高散射介质中的物体进行三维时间图像重建"。在。Optics Letters 18.20 (1993). doi: 10.1364/OL.18.001691.光学学会 (OSA) (引自第11页)。
- [Kat+14] Ori Katz, Pierre Heidmann, Mathias Fink, and Sylvain Gigan."通过散射层和转角处的斑点相关的非侵入性单次成像"。在。Nature Photonics 8.10 (2014), pp. 784-790 (cit. on pp. 25, 32, 33, 35, 50).
- [KBC13] Ahmed Kirmani, Arrigo Benedetti, and Philip A. Chou."SPUMIC: Simultaneous Phase Unwrapping and Multipath Interference Cancellation in Time-of Flight Cameras using Spectral Methods".In:IEEE 国际多媒体与博览会 (ICME) (2013年7月) (引自第12页)。
- [Kel+07] Maik Keller, Jens Orthmann, Andreas Kolb, and Valerij Peters."A Simulation Framework for Time-Of-Flight Sensors".In:International Symposium on Signals, Circuits and Systems 1 (2007), pp.1-4 (cit. on p. 13).

- [Kir+09] Ahmed Kirmani, T. Hutchison, J. Davis, and R. Raskar."使用瞬态成像技术环顾角落"。在。*IEEE国际计算机视觉会议 (ICCV)* (2009) , 第159-166页 (引自第7、13、24、25、49、51、52页。60, 73, 75).
- [Kle+16] Jonathan Klein, Christoph Peters, Jaime Martín, Martin Laurenzis, and Matthias B. Hullin."使用二维强度图像跟踪视线外的物体"。在。*Scientific Reports* 6.32491 (Aug. 2016). doi: 10.1038/srep32491.自然出版集团 (引自第3、4、25、27、35、51-53、60、75、76页)。
- [Kle+17a] Jonathan Klein, Stefan Hartmann, Michael Weinmann, and Dominik L. Michels."使用生成对抗网络的多尺度地形纹理"。In:*IEEE 新西兰图像和视觉计算会议 (IVCNZ)* (2017) (引自第6页)。
- [Kle+17b] Jonathan Klein, Christoph Peters, Martin Laurenzis, and Matthias B. Hullin."非视线的MoCap"。In:*ACM SIGGRAPH 新兴技术* (2017) (引自第5页)。
- [Kle+18] Jonathan Klein, Martin Laurenzis, Dominik L. Michels, and Matthias B. Hullin."非视线成像问题的定量平台"。In:*英国机器视觉会议 (BMVC)* (2018)。网址：<https://nlos.cs.uni-bonn.de/paper> (引自第3、4、49、87页)。
- [Kle+20] Jonathan Klein, Martin Laurenzis, Matthias B. Hullin, and Julian Iseringhausen."A Calibration Scheme for Non-Line-of-Sight Imaging Setups".In:*Optics Express* (2020). doi: 10.1364/OE.398647. 光学学会 (OSA) (引自第4、28、73、97页)。
- [KLH16] Jonathan Klein, Martin Laurenzis, and Matthias B. Hullin."用于实时跟踪转角的瞬时成像"。In:*SPIE 电光遥感* 9988 (2016) (引用第3、5、10、19页)。
- [KLH17] Jonathan Klein, Martin Laurenzis, and Matthias B. Hullin."Wenn eine Wand kein Hindernis mehr ist". In: *photonik* (May 2017). url: <http://www.photonik.de/wenn-eine-wand-kein-hindernis-mehr-ist/150/21005/350453> (cit. on p. 5).
- [KLS96] Reinhard Klein, Gunther Liebich, and Wolfgang Straßer."错误控制下的网格缩小"。In:*IEEE 可视化会议* (1996) , 第311-318页 (见第55页)。
- [KM17] C. R. Karanam和Y. Mostofi。"使用WiFi的无人驾驶飞行器的3D穿墙成像"。在。*IEEE 传感器网络信息处理会议 (IPSN)* (2017) , 第131-142页 (见第8、33页)。
- [KPM20] Jonathan Klein, Sören Pirk, and Dominik L. Michels."Domain Adaptation with Morphologic Segmentation".*arXiv*: 2006.09322 (cit. on p. 6).
- [KS88] Avinash C. Kak和Malcolm Slaney.《计算机断层成像的原理》。IEEE Press, 1988. ISBN: 978-0898714944. url: <http://www.slaney.org/pct/pct-toc.html> (cit. on p. 26).

- [KSS12] Ori Katz, Eran Small, and Yaron Silberberg."用散射非相干光实时观察拐角和穿过薄的浊层"。在。*自然光子学* 6.8 (2012) , 第549-553页 (见第32, 33, 35, 75页)。
- [La +17] Marco La Manna, Fiona Kine, Eric Breitbach, Jonathan Jackson, and Andreas Velten. 用于非视线成像的误差背投算法。Tech. rep.TR1850 。<http://digital.library.wisc.edu/1793/76968>。威斯康星大学麦迪逊分校, 2017年(引自第52页)。
- [La +18] Marco La Manna, F. Kine, E. Breitbach, J. Jackson, T. Sultan, and Andreas Velten."非视线成像的误差背投算法"。In:*IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* (2018), pp. 1-1. issn: 0162-8828. doi: 10.1109/TPAMI.2018.2843363 (cit. on p. 26).
- [La +20] Marco La Manna, Ji-Hyun Nam, Syed Azer Reza, and Andreas Velten."使用动态中继面的非视线成像"。在。*Optics Express* 28.4 (Feb. 2020), pp. 5331-5339. doi: 10.1364/OE.383586. 光学学会(OSA) (引自第30、75、78页)。
- [Lau+12] Martin Laurenzis, Frank Christnacher, David Monnin, and Thomas Scholz."散射环境中射程门控成像的调查"。在。*SPIE光学工程* (2012年5月)。DOI: 10.1117/1.OE.51.6.061303 (引自第8、33页)。
- [Lau+15a] Martin Laurenzis, Frank Christnacher, Jonathan Klein, Matthias B. Hullin, and Andreas Velten."非视线范围内的单光子计数研究"。在。*SPIE* 9492 (2015), 94920K-94920K-8. doi: 10.1117/12.2179559 (cit. on p. 5).
- [Lau+15b] Martin Laurenzis, Jonathan Klein, Emmanuel Bacher, and Nicolas Metzger."飞行中的光的多回程单光子计数和短波红外波长的非视线物体的感应"。在。*Optics Letters* 40.20 (Oct. 2015), pp. 4815-4818. doi: 10.1364/OL.40.004815.光学学会(OSA) (引自第5页)。
- [Lau+16] Martin Laurenzis, Jonathan Klein, Emmanuel Bacher, Nicolas Metzger, and Frank Christnacher."通过相对论成像方法感知和重建任意的飞行中的光路"。In:*SPIE* (2016) (cit. on p. 5).
- [Lau+19] Martin Laurenzis, Jonathan Klein, Emmanuel Bacher, and Stephane Schertzer."解决拐角处光学传感逆向问题的方法"。在。*SPIE安全+防御。新兴成像和传感技术用于安全和防御IV* (2019) (见第4页)。
- [LBV19] Xiaochun Liu, Sebastian Bauer, and Andreas Velten."非视线测量中的特征可见性分析"。In:*IEEE计算机视觉和模式识别会议(CVPR)* (2019年) (引用第96页)。
- [LC87] William Lorensen和Harvey Cline。"Marching Cubes:一个高分辨率的三维表面构造算法"。In:*ACM SIGGRAPH计算机图形* (1987) , 第163-169页。

- [LCM07] Martin Laurenzis, Frank Christnacher, and David Monnin."长距离三维主动成像与超分辨率深度绘图"。在。*Optics Letters* 32 (2007). doi: 10.1364/OL.32.003146. 光学学会 (OSA) (引自第11页)。
- [Lei+19] Xin Lei, Liangyu He, Yixuan Tan, Ken Xingze Wang, Xinggang Wang, Yihan Du, Shanhui Fan, and Zongfu Yu."利用光学相干的无视线直接识别物体"。In:*IEEE 计算机视觉和模式识别会议 (CVPR)* (2019年) (引自第32页)。
- [LHK15] Martin Lambers, Stefan Hoberg, and Andreas Kolb."用于评估芯片布局变化的飞行时间传感器的模拟"。在。*IEEE Sensors Journal* (Mar. 2015). doi: 10.1109/JSEN.2015.2409816 (cit. on p. 13).
- [Liu+19] Xiaochun Liu, Ibón Guillén, Marco La Manna, Ji Hyun Nam, Syed Azer Reza, Toan Huu Le, Adrian Jarabo, Diego Gutierrez, and Andreas Velten."使用相位场虚拟波光学技术的非视线成像"。在。*Nature* 572.7771 (2019), pp. 620-623 (cit. on pp. 29, 75, 86, 91).
- [LKB16] Martin Laurenzis, Jonathan Klein, and Emmanuel Bacher."任意路径飞行的光成像中的相对论效应"。在。*Optics Letters* 41.9 (May 2016), pp.2001-2004.光学学会 (OSA) (引自第5、9页)。
- [LKC17] Martin Laurenzis, Jonathan Klein, and Frank Christnacher."具有先进传感能力的瞬时光成像激光雷达：重建飞行路径中的arbitrary光和转角处的传感"。In:*SPIE 激光雷达技术与应用* (2017年5月)。DOI : 10.1117/12.2261961 (引用第5页)。
- [LT98] Peter Lindstrom 和 Greg Turk。"快速和内存Efficient Polygonal Simplification"。In:*IEEE 可视化会议。VIS '98* (1998), pp. 279-286 (cit. on p. 55).
- [LV14] Martin Laurenzis 和 Andreas Velten."散射光子的非视线激光门控观察"。In:*SPIE 光学工程* 53.2 (2014) , 第 023102- 023102 页。Doi: 10.1117/1.OE.53.2.023102 (cit. on pp. 11, 25, 26, 35, 36, 51, 75).
- [LVK17] Martin Laurenzis, Andreas Velten, and Jonathan Klein."双模式光学传感：三维成像和看到角落"。In:*SPIE Optical Engineering* (2017) (cit. on p. 5).
- [LW20] David B. Lindell 和 Gordon Wetzstein。"基于共焦漫射断层成像的通过散射介质的三维成像"。在。Doi: 10.1038/s41467-020-18346-3 (cit. on p. 33).
- [LWK19] David B. Lindell, Gordon Wetzstein, and Vladlen Koltun."声学非视线成像"。In:*IEEE 计算机视觉和模式识别会议 (CVPR)* (2019年) (引用第30页)。
- [LWO19] David B. Lindell, Gordon Wetzstein, and Matthew O'Toole."使用快速f-k迁移的基于波的非视线成像"。In:*ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH)* 38.4 (2019), p. 116 (cit. on pp. 20, 29, 75, 78, 96).

- [Mae+19] Tomohiro Maeda, Guy Satat, Tristan Swedish, Lagnojita Sinha, and Ramesh Raskar."拐角处成像的最新进展"。载于：*arXiv 预印本* (2019) (引自第23页)。
- [Mar63] Donald W. Marquardt."An algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters".In:431-441. doi: 10.1137/0111030 (cit. on p. 40).
- [McC08] M. W. McCall."电磁学：从共变到隐身"。In:*Applications of Mathematics in Engineering and Economics, American Institute of Physics (AIP)* 1067.1 (Nov. 2008). doi: 10.1063/1.3030822 (cit. on p. 33).
- [Met+20] Christopher A. Metzler, Felix Heide, Prasana Rangarajan, Muralidhar Madabhushi Balaji, Aparna Viswanath, Ashok Veeraraghavan, and Richard G. Baraniuk."深度反向相关成像：走向实时高分辨率非视线成像"。在。*Optica* (2020). doi: 10.1364/OPTICA.374026 (cit. on pp. 32, 75).
- [MLW19] Christopher A. Metzler, David B. Lindell, and Gordon Wetzstein."钥匙孔成像。非视线成像和沿单一光路的长距离移动物体的跟踪"。载于：*arXiv 预印本* (2019) (引自第30页)。
- [MNK13] S. Meister, R. Nair, and D. Kondermann."使用全局照明的飞行时间传感器的模拟"。在。*Vision, Modeling & Visualization* (2013) (cit. on p. 13).
- [Mus+19] Gabriella Musarra, Ashley Lyons, Enrico Conca, Yoann Altmann, Frederica Villa, F. Zappa, Miles John Padgett, and D. Faccio。"用单像素相机进行非视距三维成像"。在。*Physical Review Applied* 12 (1 July 2019), p. 011002. doi: 10.1103/PhysRevApplied.12.011002 (cit. 在第30、74页)。
- [Nai+11] N.Naik, S. Zhao, A. Velten, R. Raskar, and K. Bala。"使用多路散射和飞行时间成像的单视图反射率捕获"。In:*ACM Transactions on Graphics* 30.6 (2011), p. 171 (cit. on pp. 11, 25, 27, 60, 75, 76).
- [NT09] D.Needell and J. A. Tropp."CoSaMP：不完整和不准确样本的迭代信号恢复"。In:DOI: 10.1016/j.acha.2008.07.002 (cit. on p. 26).
- [OLW18] Matthew O'Toole, David B. Lindell, and Gordon Wetzstein."基于光锥变换的共焦非视线成像"。在。*自然*555.25489 (2018)，第338-341页。DOI : 10.1038/nature25489 (引用第25、26、30、52、53页。65, 73, 75, 76).
- [ON94] Michael Oren and Shree K. Nayar。"兰伯特反射率模型的泛化"。In:*ACM SIGGRAPH 计算机图形*。SIGGRAPH '94 (1994), pp. 239-246. doi: 10.1145/192161.192213 (cit. on p. 15).

- [Pan+11] R. Pandharkar, A. Velten, A. Bardagjy, E. Lawson, M. Bawendi, and R. Raskar."在杂乱的环境中估计移动的非视线物体的运动和大小"。In:*IEEE 计算机视觉和模式识别会议 (CVPR)* (2011年6月) , 第265-272页。ISBN : 1063-6919。5995465 (引自第7、11、24、26页)。
- [Ped+17] Adithya Kumar Pediredla, Mauro Buttafava, Alberto Tosi, Oliver Cossairt, and Ashok Veeraraghavan."利用光子回波重建房间。一个基于平面的模型和重建算法, 用于寻找角落"。In:*IEEE 国际计算摄影会议 (ICCP)* (2017) , 第1-12页 (引用第14、29、30、51、52、75、96页)。
- [Pet+15] Christoph Peters, Jonathan Klein, Matthias B. Hullin, and Reinhard Klein."解决快速瞬态成像的三角矩问题"。在。*ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH Asia)* 34.6 (Nov. 2015), 220:1- 220:11. doi: 10.1145/2816795.2818103 (cit. on pp. 5, 12, 36).
- [PJH16] M. Pharr, W. Jakob, and G. Humphreys. 基于物理的渲染。从理论到实现。第三版。Elsevier Science, 2016. ISBN: 978-0- 12800-709-9. url: <http://www.pbr-book.org/> (cit. on pp. 13, 15, 17, 54, 64)。
- [PPP93] Frank L. Pedrotti, Leno M. Pedrotti, and Leno S. Pedrotti. 光学入门。第三版。皮尔逊, 1993年 (引自第16页)。
- [PSV09] Xiaochuan Pan, Emil Y. Sidky, and Michael Vannier."为什么商业CT扫描仪仍然采用传统的过滤式背投进行图像重构?"在:*Inverse Problems* 25.12 (2009), p. 123009 (cit. on p. 36).
- [Pue+13] I. Puente, H. González-Jorge, J. Martínez-Sánchez, and P. Arias。"移动制图和测量技术回顾"。在。*Measurement* 46.7 (2013), pp. 2127-2145. issn: 0263-2241.2013.03.006 (cit. on p. 45).
- [PVG19] Adithya Kumar Pediredla, Ashok Veeraraghavan, and Ioannis Gkioulekas."Ellipsoidal Path Connections for Time-Gated Rendering"。In:*ACM Transactions on Graphics (TOG)* 38.4 (July 2019). issn: 0730-0301. doi: 10.1145/3306346.3323016 (cit. on p. 13).
- [QM85] Franco Quercioli 和 Giuseppe Molesini。"飞行中的白光全息"。在。*应用光学*24.20 (1985年10月) , 第3406-3415页。光学学会 (OSA) (见第36页)。
- [Rez+19] Syed Azer Reza, Marco La Manna, Sebastian Bauer, and Andreas Velten."Phasor场波。一个类似于惠更斯的光传输模型, 用于非视线图像的应用"。In:doi: 10.1364/OE.27.029380 (cit. on p. 28).
- [RGH09] Justin A. Richardson, Lindsay A. Grant, and Robert K. Henderson."与标准的纳米级CMOS技术兼容的低暗计数单光子雪崩二极管结构"。In:*International Image Sensor Work- shop (IISW)* (2009) (cit. on p. 12).

- [Ric14] Mark A. Richards. 拉达德信号处理的基本原理.2.版。麦格劳-希尔教育, 2014 (引自第12页)。
- [RR96] Rémi Ronfard 和 Jarek Rossignac. "三角多面体的全范围逼近"。 In: *Computer Graphics Forum* 15 (1996), pp. 67-76 (cit. on p. 55).
- [Sat+17] Guy Satat, Matthew Tancik, Otkrist Gupta, Barmak Heshmat, and Ramesh Raskar. "通过散射媒体的物体分类与时间分辨测量的深度学习"。在。 *Optics Express* 25.15 (July 2017). doi: 10.1364/OE.25.017466 (cit. on p. 33).
- [SC14] Malcolm Slaney 和 Philip A. Chou. *Time of Flight Tracer*. Tech. rep. 微软研究院, 2014年11月。url: <https://www.microsoft.com/en-us/research/publication/time-of-flight-tracer/> (cit. on p. 13).
- [Sch+20] Nicolas Scheiner, Florian Kraus, Fangyin Wei, Buu Phan, Fahim Mannan, Nils Appenrodt, Werner Ritter, Jürgen Dickmann, Klaus Dietmayer, Bernhard Sick, and Felix Heide. "绕过街角看风景。使用多普勒雷达在野外进行非视线探测和跟踪"。 In: *IEEE 计算机视觉和模式识别会议 (CVPR)* (2020年) (见第20、29页)。
- [Sch+97] Rudolf Schwarte, Zhanping Xu, Horst-Guenther Heinol, Joachim Olk, Ruediger Klein, Bernd Buxbaum, Helmut Fischer, and Juergen Schulte. "新的电-光混合和相关传感器：光子混合器装置 (PMD) 的设施和应用"。在。 *SPIE Sensors, Sensor Systems, and Sensor Data Processing* (1997). doi: 10.1117/12.287751 (cit. on p. 12).
- [Sei+19] S. W. Seidel, Y. Ma, J. Murray-Bruce, C. Saunders, W. T. Freeman, C. C. Yu, and V. K. Goyal。 "角落遮蔽器计算潜望镜。从一张照片估计一个隐藏的场景"。 In: *IEEE 国际计算摄影会议 (ICCP)* (2019年5月), 第1-9页, DOI : 10.1109/ICCPHOT.2019.8747342 (引自第31、75页)。
- [SEL11] Ove Steinvall, Magnus Elmqvist, and Håkan Larsson. "使用主动成像技术看到拐角处"。在。 *SPIE* 8186 (2011), pp. 818605-818605-17. doi: 10.1117/12.893605 (cit. on p. 35).
- [Sen+05] Pradeep Sen, Billy Chen, Gaurav Garg, Stephen R. Marschner, Mark Horowitz, Marc Levoy, and Hendrik Lensch. "双重摄影"。 In: 24.3 (2005), pp. 745-755 (cit. on pp. 35, 50).
- [She+15] Y. Shechtman, Y. C. Eldar, O. Cohen, H. N. Chapman, J. Miao, and M. Segev. "相位检索与光学成像的应用。A contemporary overview". In: *IEEE 信号处理杂志* 32.3 (2015), 第87-109页。DOI : 10.1109/MSP.2014.2352673 (引用第32页)。
- [Shr+16] S. Shrestha, F. Heide, W. Heidrich, and G. Wetzstein. "多相机飞行时间系统的计算成像"。 In: *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH)* (2016) (cit. on p. 51).

[SMG19] Charles Saunders, John Murray-Bruce, and Vivek K. Goyal."用普通数码相机计算潜望镜"。In:*自然*》（2019年）（见第31页）。

- [Smi+17] Brandon M. Smith, Pratham Desai, Vishal Agarwal, and Mohit Gupta."CoLux:使用斑点成像的多目标三维微动分析"。在。*ACM图形交易 (SIGGRAPH) 36.4* (2017年7月)。Doi: 10.1145 / 3072959.3073607 (引自第32页)。
- [SOG18] Brandon M. Smith, Matthew O'Toole, and Mohit Gupta."使用斑点成像跟踪视线外的物体"。在。*IEEE计算机视觉和模式识别会议 (CVPR)* (2018) (引自第32页)。
- [SS69]H. Steingold和R. E. Strauch。"主动夜视系统中的背散射效应"。在。*应用光学* (1969年)。DOI: 10.1364/AO.8.000147.光学学会 (OSA) (引自第11页)。
- [SSD08] Adam Smith, James Skorupski, and James Davis.*Transient Rendering*.Tech. rep.ucsc-so-08-26.加州大学圣克鲁兹分校工程学院, 2008年 (引用第13页)。
- [Sta55]托马斯-斯坦利。*The history of philosophy*.1655年 (引自第2页)。
- [Sta72]Orestes Stavroudis.*射线、波前和焦距的光学*。Elsevier, 1972 (见第29页)。
- [STM20] 意法半导体公司。意法半导体推出了新一代高性能接近和测距传感器, 基于*FlightSense™ 飞行时间 (ToF) 技术*。<https://web.archive.org/web/20201016134352/><https://www.st.com/en/imaging-and-photonics-solutions/proximity-sensors.html>。2020年 (见第12、20页)。
- [Sto78]R.H. Stolt."通过傅里叶变换进行迁移"。In:*Geophysics* 43.1 (1978), pp. 23-48. doi: 10.1190/1.1440826 (cit. on p. 28).
- [Su+16] Shuochen Su, Felix Heide, Robin Swanson, Jonathan Klein, Clara Callenberg, Matthias B. Hullin, and Wolfgang Heidrich."使用原始飞行时间测量的材料分类"。In:*IEEE计算机视觉和模式识别会议 (CVPR)* (2016) (引自第5页)。
- [Sum+11] A. Sume, M. Gustafsson, M. Herberthson, A. Janis, S. Nilsson, J. Rahm, and A. Orbom."角落后面移动目标的雷达探测"。在。*Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 49.6 (June 2011), pp.2259-2267. issn: 0196-2892. doi: 10.1109/TGRS.2010.2096471 (cit. on p. 36).
- [SZL92] William J. Schroeder, Jonathan A. Zarge, and William E. Lorensen."三角形网格的分解"。In:*ACM SIGGRAPH 计算机图形*26.2 (1992年7月), 第65-70页。
- [Thr+18] Christos Thrampoulidis, Gal Shulkin, Feihu Xu, William T. Freeman, Jeffrey H. Shapiro, Antonio Torralba, Franco N. C. Wong, and Gregory W. Wornell."在非视线主动成像中利用遮挡"。In:*IEEE Trans- actions on Computational Imaging* 4.3 (2018), pp. 419-431 (cit. on pp. 31, 75).
- [TQ04]H.W. Tang and X. Z. Qin."优化的实用方法"。载于。*大连理工大学出版*

社, 大连 (2004) , 第138-149页 (引自第78页) 。

- [Tru+19] Elena Trunz, Sebastian Merzbach, Jonathan Klein, Thomas Schulze, Michael Weinmann, and Reinhard Klein."针织品的逆向程序化建模"。In:*IEEE 计算机视觉和模式识别会议 (CVPR)* (2019)。CVPR口述, 第8630-8639页 (引自第6页)。
- [Tsa+17] Chia-Yin Tsai, Kiriakos N. Kutulakos, Srinivasa G. Narasimhan, and Aswin C.Sankaranarayanan."非视线成像的第一回程光子的几何学"。In:*IEEE 计算机视觉和模式识别会议 (CVPR)* (2017) (引自第27、51页)。
- [TSG19] Chia-Yin Tsai, Aswin C. Sankaranarayanan, and Ioannis Gkioulekas."Beyond Volumetric Albedo-A Surface Optimization Framework for Non-Line-Of-Sight Imaging"。In:*IEEE 计算机视觉和模式识别会议 (CVPR)* (2019年), 第1545-1555页 (引用第18、27、29、75页)。
- [Uri83] Robert J. Urick. 水下声音的原理。3.版。McGraw-Hill Education, 1983 (cit. on p. 12).
- [Vel+12] Andreas Velten, T. Willwacher, Otkrist Gupta, A. Veeraraghavan, M. G. Bawendi, and R. Raskar."使用超高速飞行时间成像恢复转角处的三维形状"。In:*Nature Communications* 3 (2012), p. 745 (cit. on pp. 11, 25, 35, 36, 38, 49, 51, 60, 73, 75).
- [Vel+13] Andreas Velten, Di Wu, Adrian Jarabo, Belen Masia, Christopher Barsi, Chinmaya Joshi, Everett Lawson, Moungi Bawendi, Diego Gutierrez, and Ramesh Raskar."女性摄影。捕捉和可视化光的传播"。In:*ACM Transactions on Graphics* 32.4 (July 2013), 44:1-44:8. issn: 0730-0301. doi: 10.1145/2461912.2461928 (cit. on pp. 9, 20, 51, 52).
- [VRB11] Andreas Velten, Ramesh Raskar, and Moungi Bawendi."用于飞行时间成像的皮秒相机"。In:*成像与应用光学* (2011), IMB4.DOI : 10.1364/ISA.2011.IMB4.美国光学学会 (OSA) (引用第26、35、36页)。
- [Wal+07] Bruce Walter, Stephen R. Marschner, Hongsong Li, and Kenneth E. Torrance."通过粗糙表面的折射的微面模型"。In:*Eurographics Rendering Symposium* (2007) (cit. on pp. 53, 55).
- [Wan+91] L. Wang, P. P. Ho, C. Liu, G. Zhang, and R. R. Alfano."使用超快速光学克尔门通过散射墙的弹道二维成像"。在。科学 253 (1991年6月), 第769-771页。ISBN : 1095-9203。253. 5021.769 (见第33页)。
- [War+16] Ryan E. Warburton, Susan Chan, Genevieve Gariepy, Yoann Altmann, Steve McLaughlin, Jonathan Leach, and Daniele Faccio."用单像素检测器实时跟踪隐藏的物体"。In:*Imaging and Applied Optics 2016* (2016), IT4E.2. doi: 10.1364/ISA.2016.IT4E.2.光学学会 (OSA) (引自第51页)。
- [War92] Gregory J. Ward."测量和建模各向异性的反射"。In:*ACM SIGGRAPH 计算机图形*

26.2 (1992年7月), 第265-272页。issn : 0097-8930.doi :
10.1145/142920.134078 (引用第15页)。

- [Wil+95] George M. Williams Jr., Alice L. Reinheimer, C. Bruce Johnson, K. D. Wheeler, Norm D. Wodecki, Verle W. Aebi, and Kenneth A. Costello."背照式和电子炸弹式CCD低光照度成像系统性能"。In:*SPIE 光电探测器、照相机和系统*2551（1995年9月）。Doi: 10.1117/12.218632（引自第11页）。
- [Win+02] Gerald A. Winer, Jane E. Cottrell, Virginia Gregg, Jody S. 福尼尔, 和洛里 A.比卡。"从根本上误解了视觉感知。成年人对视觉发射的信念"。在。*美国心理学家*》（2002）。DOI: 10 .1037 //0003 - 066x.57.6-7.417 (cit. on p. 2).
- [Xin+19] Shumian Xin, Sotiris Nousias, Kiriakos N. Kutulakos, Aswin C. Sankaranarayanan, Srinivasa G. Narasimhan, and Ioannis Gkioulekas."非视线形状重建的费马路径理论"。In:*IEEE 计算机视觉和模式识别会议 (CVPR)* （2019年6月）（引用第29、33页）。
- [Yed+19] Adam B. Yedidia, Manel Baradad, Christos Thrampoulidis, William T. Freeman, and Gregory W. Wornell."使用未知的遮挡物来恢复隐藏的场景"。In:*IEEE 计算机视觉和模式识别会议 (CVPR)* （2019年）（引用第31页）。
- [Yil01] Öz Yilmaz.*Seismic Data Analysis: 地震数据的处理、反演和解释*. Society of Exploration Geophysicists, 2001. ISBN: 9781560801580. doi: 10.1190/1.9781560801580 (cit. on p. 29).
- [Zap+07] F. Zappa, S. Tisa, A. Tosi, and S. Cova。 "单光子雪崩二极管阵列的原理和特点"。在。*Sensors and Actuators A: Physical* 140 (Oct. 2007). doi: 10.1016/j.sna.2007.06.021 (cit. on p. 12).