基于瞬态成像技术的穿透散射介质成像

吴日辉^{1),3)} 代 锋¹⁾ 尹 冬²⁾ 刘烨斌²⁾ 戴琼海²⁾ 张勇东¹⁾ ¹⁾(中国科学院计算技术研究所智能信息处理重点实验室 北京 100190) ²⁾(清华大学自动化系 北京 100084)

³⁾(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 烟、雾、霾、浑浊海水等散射介质对穿过它们的光线有散射作用.在散射环境下,通过成像系统获得的图像 都会有一定程度的退化,为提取场景内的有效信息带来困难.因此,研究穿透散射介质成像,提取有效的场景信息, 对于科学研究和工业应用都有着重要的价值.关于穿透散射介质成像,学术界已经提出了多种模型和算法,大致可 分为主动式方法和被动式方法两类.被动式方法主要以自然光为照明手段,对自然光的传播路径建模,求解相关参 数以获得场景信息,其缺点是不能用于无光或暗光的场景.为此,研究者提出主动式方法,主要包括结构光扫描、主 动偏振光以及时间门等.这些传统的成像方法存在光照不足、需要扫描或需要复杂的成像设备等问题.计算摄像学 领域近年来提出的瞬态成像技术能为解决上述问题提供新的思路,因为瞬态成像技术在传统的成像技术的基础上 增加时间维的信息,使得许多用传统成像技术无法观测的场景属性可以被理解和获取.文中提出一种基于瞬态成 像技术的穿透散射介质成像的方法,将常用于计算机视觉和计算机图形学的单次散射模型扩展为瞬态单次散射模 型,并设计出偏移拍摄法,以重构场景的深度及纹理.该方法能在散射环境中重构毫米级精度的深度图和较清晰的 纹理图.

关键词 散射;计算摄像学;瞬态成像;单次散射模型;偏移拍摄法
中图法分类号 TP391 DOI 号 10.11897/SP. J. 1016.2018.02421

Imaging through Scattering Media Based on Transient Imaging Technique

WU Ri-Hui^{1),3)} DAI Feng¹⁾ YIN Dong²⁾ LIU Ye-Bin² DAI Qiong-Hai²⁾ ZHANG Yong-Dong¹⁾ ¹⁾ (Key Laboratory of Intelligent Information Processing, Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190) ²⁾ (Automation Department, Tsinghua University, Beijing 100084)

³⁾ (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract Scattering media such as smoke, fog, haze and turbid water, scatter the light rays pass through them. This situation lead up to the degradation of image quality to a certain extent and it brings difficulty in acquiring properties of scenes. So, imaging through scattering media to acquire properties of scenes is of great value in scientific research and industrial applications. Many models and algorithms have been proposed on this topic. These methods can be roughly divided into two categories: passive methods and active methods. The passive methods rely on natural light and the models of light transporting in natural environments. In order to acquire useful information of the scenes, solving the related parameters is necessary. While these method are non-applicable to low light or dark environments. Active methods, on the other hand, provide the flexibility in controlling the illumination, which can be used to address the low light problem. Methods such as structured light scanning, active polarized light source and time gating technique are proposed. However, there are limitations of those methods such as, unavailability in dark environment, the need of

收稿日期:2015-11-19;在线出版日期:2016-08-08.本课题得到国家自然科学基金(61327013)、中国科学院科研装备研制项目(YZ201321)、国家优秀青年科学基金项目(61522111)、国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ140517)资助. **吴日辉**,男,1989 年生,博士研究生,主要研究方向为计算摄像学、计算机视觉. E-mail: wurihui@ict. ac. cn. 代 锋,男,1979 年生,博士,副研究员,主要研究方向为视频处理、计算摄像学. **尹** 冬,男,1992 年生,博士研究生,主要研究方向为信号处理.刘烨斌,男,1981 年生,博士,副教授,主要研究方向为基于图像的建模与渲染、无标记运动捕捉和基于视觉的图形学应用. 戴琼海,男,1964 年生,博士,教授,主要研究领域为信号处理、计算摄像学、计算机视觉和图形学. 张勇东,男,1973 年生,博士,研究员,主要研究领域为多媒体处理、计算摄像学.

scanning or complicated devices. Transient imaging technique proposed in computational photography area provides new avenue to solve these problems, for it can be explained and can acquire many scene properties which are unable to be obtained by traditional imaging techniques. In this paper, we propose a new method for seeing through scattering media based on transient imaging technique. A transient single scattering model and the offset acquiring method are proposed to reconstruct the depth map and texture of scenes. Our method can reconstruct depth maps in millimeter and clear texture maps.

Keywords scattering; computational photography; transient imaging; single scattering model; offset acquiring

1 引 言

在自然界中,散射介质(如烟、雾、霾、浑浊的海 水等)广泛存在.当光线穿过这些散射介质时,受到 散射体(介质中的微小颗粒)的影响,光线传播方向 发生改变,即光线发生散射.导致使用基于光强的传 统成像设备获取的图像的质量退化.给获取场景的 有效信息,比如场景深度、物体材质、物体表面纹理 等,带来困难.因此,在科学研究、工业生产、居民生 活、社会安全等多个领域,诸如海底勘探、导航、遥 感、测绘、火灾救援等实际场景,穿透散射介质成像, 获取有用的信息,有着广泛的应用前景和意义.场景 的深度可以让人们判断目标物的形状、大小与距离, 为勘探和救援提供有效的指导.目标物表面纹理的 重建可以让人们分辨目标物的类型,对于指导下一 步的行动,有着重要的意义.因此,场景深度的获取 和目标物表面纹理的重建尤其值得关注.

为实现穿透散射介质成像,计算机视觉的研究 者提出了很多算法和相应的设备,大致可以划分为 两大类:被动式方法^[1-7]和主动式方法^[8-21].被动式 方法主要基于自然光在散射介质中的传播模型,求 解模型中相应的参数以获得场景的属性.相对下文 将提到的主动式方法,被动式方法的优点是操作简 单,而且不需要特殊的复杂设备.一般使用工业相机 或单反相机即可;有的研究者在相机前添加线偏振 片,在不同偏振方向下采集图像即可^[5].被动式方法 的主要缺点是在深海、管道或者夜里等自然光不足 的场景下难以被应用.更重要的是,自然光照随着时 间推移,可能会发生改变,而且这种改变是无法预料 的.在这种情况下,通过被动式方法得到的数据可能 是不准确的.

为解决光照不足的问题,研究者提出了使用人 造光源的方法,我们称之为主动式方法.通常的主动 式方法包括采用结构光^[8-12]、主动偏振光^[13-14]和使 用时间门技术^[15]等.主动式方法的优点是可以为场 景提供不依赖于场景的,稳定且充足的光源,可以更 灵活地应用于科研、工业生产以及生活等场景.主动 式方法目前的缺点是该方法会引入较强的后向散射 光.后向散射光是指,当光源和相机在场景的同一 侧,主动光从光源发出,到达目标场景前,由于散射 而返回相机的那一部分光线.另一方面,主动式方法 通常需要对目标物进行扫描^[8-12],或者需要复杂光路 (共聚焦)^[8,10],或者只能重建粗糙的三维结构^[13-14], 使用的设备复杂且昂贵^[15].上述两大类方法的缺点 极大地制约了散射条件下场景信息如何获取这一问 题的解决,亟需新的成像设备和方法来推进对这一 问题的研究.

瞬态成像技术(Transient Imaging Technique) 是计算摄像学领域近年来的一个重大进展,为解决 上述主动式方法存在的问题提供了新的思路.使用 瞬态成像技术求解空气中的场景深度大致的工作流 程如下:使用专门的采集系统以及相应的算法,重构 出足以描述光在场景中的传播过程的超高时间分辨 率的视频,我们称之为瞬态视频.通过对瞬态视频的 分析,可以得到光线的飞行时间.通过光线的飞行时 间即可求解得到空气中目标物的深度.本文将飞行 时间定义为光线从光源出发,被物体表面反射,直到 被接收所经历的总时间.瞬态成像技术具有以下优 点:不需要对场景进行扫描;所用设备相对简单和廉 价^[17-18];现有的瞬态成像技术主要应用在空气场景 中,使用清华大学 Lin 等人^[18]提出的算法,求解的 场景深度可以达到毫米级的精度.

在散射介质中,由于散射现象的存在,现有的瞬态成像技术无法直接获得目标物反射光的飞行时间,即无法用现有方法求解场景的深度.尽管如此, 正如前文所述,瞬态成像技术为我们解决如何穿透 散射介质成像提供了新的思路.通过扩展传统的被 广泛应用于计算机视觉和计算机图形学的单次散射 模型,本文基于瞬态成像技术,提出瞬态单次散射模 型和偏移拍摄法,求解散射场景中目标物反射光的 飞行时间以及物体表面反射光的强度,从而得到目 标物的深度和纹理.

本文第2节将介绍穿透散射介质成像以及瞬态 成像技术的相关工作;第3节提出和解释与本文工 作相关的数学模型;第4节提出重构散射场景中的 目标物深度的偏移拍摄法以及求解目标物纹理的算 法;第5节分析本文的实验结果以及该实验结果和 传统的穿透散射介质成像方法的对比;第6节则从 模型、算法和设备等层面对本文加以总结,并且指出 下一步的研究方向.

本文的主要贡献如下:

(1)将计算机视觉及计算机图形学中常用的单次散射模型从传统的稳态场景推广到瞬态场景;

(2) 基于散射介质中的瞬态成像模型,提出偏移拍摄法,以重建目标物的深度和纹理.

2 相关工作

2.1 穿透散射介质成像问题的研究

目前的穿透散射介质成像方法可大致分为两 类:被动式方法和主动式方法.被动式方法对自然光 的散射过程构建物理模型,用算法高效地修复散射 介质引起的图像质量退化. Oakley 和 Satherley^[1]提 出补偿光线衰减和使用散射的物理模型来提高图像 对比度,优点是他们的模型适用于不均匀的衰减,并 且可以估计大气模型的参数.但该方法的缺点是需 要预先输入场景的几何信息,在实际应用场景中,这 往往是不可行的. Narasimhan 和 Nayar^[2]则提出了 在不同天气条件下各拍摄一张图像的方法.基于天 气条件发生变化,会引起大气的散射系数改变这一 原理,利用大气散射物理模型求解场景的深度边缘 和结构.该方法的优点是操作、设备和算法都比较简 单,其缺点则比较明显:只能用于检测深度发生明显 变化的边缘:需要等待环境的散射系数发生改变,无 法做到实时检测,在场景相对稳定的环境中则失效. Fattal^[3]则假设目标物表面的亮度与大气光强无关, 提出了单张图像去雾的算法,提高图像的对比度并 恢复场景的深度.其优点是拍摄单张图像即可,可以 实现实时求解.但该方法的缺点是不能用于散射较 强的场景.He等人基于暗通道的先验,提出了一种 简单有效的去雾算法,并根据图像的传输图获取场 景的深度^[4].He 等人的方法结果比 Fattal 的更好, 也更简单.但由于大气的散射系数未知,该方法得到 的深度图都是相对深度^[4].Schechner 和 Karpel^[5] 基于一个假设:目标物反射的光线是非偏振的,而介 质散射的光线是部分偏振的,提出了基于偏振的水 下场景深度重构及对比度增强方法.该方法的优点 是只需要旋转置于相机镜头前的线偏振片,在正交 的两个偏振方向上分别拍摄一张图像即可.但是这 一假设并非总是成立的,而是跟场景有关.在下文即 将提到的,Treibitz 和 Schechner^[13-14]提出的主动式 方法中指出,在更一般的情况下,这两个分量都是部 分偏振的.此外,被动式方法还包括基于视频融合的 方法^[6]和基于波长补偿的方法^[7]等等.

为避免被动式方法依赖于自然光,不能用于弱 光或无光的环境,自然光本身随时间推移可能发生 改变等缺点,研究者提出采用结构光、时间门和主动 偏振光等主动式方法.

在结构光技术方面, Narasimhan 和 Nayar 等 人^[9]利用带状强光扫描技术恢复场景深度,并将光 度立体法从空气场景扩展到散射场景中,用来估计 目标物表面的法线、反射率以及散射介质的属性.该 方法假设目标物表面反射光远强于后向散射光. 然 而在散射较强的场景中,这一假设并不成立.由于需 要扫描,拍摄的次数与图像分辨率成正比,而采用本 文中的频率调制方法,需要的拍摄次数是确定的,与 相机分辨率无关. Levoy 等人^[10]将共焦成像方法使 用在大范围场景中,将散射介质当作部分遮挡来处 理,使用镜子阵列(Array of Mirrors)在不同方向扫 描场景.其缺点是光路复杂,系统标定相对困难. Gupta 等人^[11]结合偏振成像和结构光,提出了投射 带状偏振光的方法.这两个方法都可以提高能见度 并且更好地检测目标物,但不能重建三维结构. Ouyang 等人^[12]分析了基于结构光的主动式双目系 统在水下的应用,可以提高图像的对比度,但未能重 建场景的三维结构.

时间门(Time-gating)技术是另一种被广泛应 用的主动式方法.Busck^[15]基于时间门相机拍摄的 一系列二维图像,提出加权平均的求深度算法,可以 在任意成像对比度下重建三维场景.其优点是精度 高;其缺点是时间门技术要求激光脉冲发出后,需要 以100 皮秒(100×10⁻¹² s)量级的延迟来打开相机 的快门,并控制曝光时间为500 皮秒,设备复杂且昂 贵,拍摄次数与目标物的深度成正比.

无论是结构光方法,还是时间门技术,都需要拍



摄多张图片.为减少拍摄次数,Treibitz和 Schechner 等人基于目标物与散射介质偏振度(DOP)不相等 的假设,分离场景的反射分量和散射分量^[12-13].具体 方法是在相机和光源前添加偏振片,并旋转光源(或 相机)前的偏振片,分别在相机采集到最强和最弱光 强的条件下各拍摄一张图片(这两个条件下,偏振片 的偏振方向是正交的).他们还提出相应的重建算法 以分离目标物的反射光和介质的后向散射光,增强 图像对比度,重建三维结构.但该方法只能重建目标 物粗糙的三维结构,而且必须采集无穷远海域的散 射强度,不适用于散射介质深度有限的场景,也不适 用于场景中散射介质深度不是无穷大的情况.

本文提出的方法,属于主动式方法.虽然也需要 多次拍摄,但拍摄次数与场景的内容和深度无关,不 同于结构光方法和时间门技术,与主动偏振光方法 相比,不需要获取无穷远处的散射强度,

2.2 瞬态成像技术的相关研究

从信号处理的角度看,场景是一个系统,光源发出的光线是输入信号,进入传感器的光线是输出信号.我们称这样的系统为场景光系统,这是一个动态系统,其响应可以分为稳态响应和瞬态响应两个阶段.由于光速非常快,场景的瞬态响应时间非常短,例如3米范围的场景只需要大约10纳秒(10×10⁻⁹s)就能够达到稳态.因此,我们日常生活中所观察到的以及用普通相机拍摄的图像和视频都是场景的稳态响应,我们称这些传统的成像技术为稳态成像技术. 而瞬态成像技术则需要捕捉或重构光线的传播过程,获得时间维的信息,得到超高时间分辨率的瞬态视频.瞬态成像技术不仅在艺术,教育,科学领域有应用的潜力,在工业成像,分析材料特性,医疗成像, 重建亚表面成分等领域也前景广阔.

下面介绍两种主流的瞬态成像技术:基于飞 秒激光器(Femtosecond Laser)和条纹相机(Streak Camera)的时域采集技术^[16];基于 PMD(Photonic Mixer Devices)的多频率和多相位调制的频域采集 技术^[17-18].采集系统如图 1 所示.

MIT 的 Velten 等人采用飞秒激光器和条纹相 机设计了时间分辨率达 1.85 皮秒(1.85×10⁻¹² s) 的瞬态成像系统^[16],如图 1(a)所示.该系统通过飞 秒激光器对场景进行脉冲照射,然后使用条纹相机 进行图像捕捉.由于每次脉冲照射场景时,只有少量 光子到达条纹相机,为提高信噪比,这套系统采用周 期短时脉冲多次照射场景,然后将采集的结果进行



(a) 基于条纹相机的瞬态成像系统^[16]



(b) 基于PMD的瞬态成像系统^[17]图 1 瞬态成像采集系统

累加.另一方面,为了解决传感器的传输带宽有限的问题,条纹相机每次采集只获得一条水平线的图像; 为了采集二维空间图像,需要采用步进电机控制一 对扫描镜,改变水平线的垂直位置,最终获得 xyt 三 维图像.这种成像系统的优点是精度高,直接观察光 线传播的物理过程,其结果也更可靠.缺点则是不仅 价格昂贵(飞砂激光器和高速条纹相机价值数十万 美元),而且体积庞大、过于敏感、操作复杂、采集速 度慢,必须在没有外界光干扰的环境中进行.因此, 只能用于室内桌面场景的瞬态成像.

为了降低成本和系统复杂性,提高采集速度,摆 脱暗室环境的限制,消除瞬态成像技术从实验室到 实际应用之间的障碍, Heide 和 Hullin 等人[17] 设计 了基于 PMD 的采集系统,将 PMD 从单频率扩展到 多频率,如图1(b)所示.这一系统首先通过不同频 率和相位调制之后的激光照射场景,通过同步的 PMD 设备进行采集,对于每个频率和相位都得到一 幅 PMD 的结果图.从 PMD 结果图到瞬态图像是一 个求解欠定线性方程组的问题.为了从采集的图像 集中重构光线传播的过程,他们引入时空一致性约 束,并通过正则化方法优化求解,最终实现瞬态成 像.这一采集系统的成本约为一千美元左右,与基于 飞秒激光器和条纹相机的采集系统相比,成本低,采 集时间快,而且无需暗室环境.但 Heide 等人提出的 求解算法时间复杂度和空间复杂度都较高.清华大 学 Lin 等人^[18]发现该采集系统本质上是采集场景 的频率响应,并以此为理论基础提出基于傅里叶变换的频域瞬态成像框架,代替正则化方法,大大降低了重构的时间复杂度和空间复杂度.Lin等人的算法主要包括3个过程:采集过程,用多频率 PMD 采集一组图像;修正过程,去除图像集中的干扰;重构过程,对图像集进行傅里叶逆变换,并对丢失的频谱进行补偿.

本文基于 PMD 采集系统及 Lin 等人提出的算法,将瞬态成像技术应用到散射场景,实现穿透散射介质的成像,以获取目标物的深度及纹理.

3 模 型

本节主要介绍本文所使用的数学模型.我们先 在 3.1 节介绍在计算机视觉和计算机图形学中常用 的单次散射模型^[19],我们称之为稳态单次散射模 型.接着在 3.2 节将该模型推广为瞬态条件下的单 次散射模型,我们称之为瞬态单次散射模型.然后在 3.3 节,描述现有的基于多频率 PMD 的瞬态成像技 术重构的结果与瞬态单次散射模型之间的关系,为 第4节的重构算法做理论准备.

3.1 稳态单次散射模型

光线的散射是指光线在传播过程中受到微小颗粒的影响偏离原方向而分散传播的现象^[20-21].散射现象按照光线在进入相机前发生散射的次数可分为单次散射和多次散射^[21].顾名思义,单次散射指光线在散射介质中最多被散射一次,如图2所示.随后沿直线传播,离开散射介质,进入相机;多次散射则是指光线在传播过程中可能多次碰撞微粒才进入相机,如图2所示.在散射较弱的场景中,单次散射模型占主导,多次散射可以被忽略^[22].为了使实验易于操作和分析,研究者往往假设散射介质是各向同性且光线在介质中传播只发生单次散射^[23].



图 2 单次散射与多次散射示意图

为描述散射介质中的单次散射现象,Nishita 等 人^[19]提出了一个衰减模型,即单次散射模型,该模 型被广泛应用于计算机视觉^[9,11]和计算机图形 学^[22-24].在该模型中,相机接收到的光线由单次散射 光和目标物表面反射光两部分组成.如图 3 所示,相 机沿 OS 方向观测,光源在 L 处,取 OS 上一点 A, 设 OA=x,LA=y.在散射介质中,由于光强随着光 线在散射介质中传播的距离呈指数衰减,而点光源 发出的光在单位面积上的强度随距离呈平方衰减, 故 A 点沿 OS 方向长度为 dx 的一小段散射介质对 观测点接收到光强的贡献值为^[19]

$$dE_{s} = \frac{I\beta P(\theta) e^{-\beta(x+y)}}{y^{2}} dx \qquad (1)$$

其中,*I* 是点光源的光强,由球体表面积公式可知, *I*/ y^2 表示若没有散射介质(即不存在指数衰减项时) *A* 处的光强.在散射介质中,光强随距离呈指数 衰减,衰减项为 e^{- $\beta(x+y)}.<math>\beta$ 称为散射系数,描述散 射介质的属性,用于表示散射的强弱. θ 则是入射 光与散射光的夹角,称为散射角. $P(\theta)$ 用于描述各 个方向的散射光的强度,亦称为相函数(Phase Function)^[9,22-24],是一个无量纲的参数,并且大小介 于0到1之间.对于各向同性的介质,取 $P(\theta) = 1/4\pi$.因而</sup>

$$dE_s = \frac{I\beta e^{-\beta(x+y)}}{4\pi y^2} dx$$
 (2)

假定目标物的表面是朗伯特表面(Lambertian Surface),即反射光强度仅与入射光强度、物体表面 反射率两者有关,而与入射方向和出射方向无关.则 目标物表面反射光的强度是^[19]

$$E_{R} = \frac{I_{\rho} e^{-\beta(d_{1}+d_{2})}}{d_{2}^{2}}$$
(3)

其中,ρ是目标物表面的点 S 的反射率, e^{-β(d₁+d₂)}代 表了在散射介质中光强的衰减项, d²2代表了点光源 单位面积光强与距离的平方成反比.



图 3 观测点的光强示意图

于是,观测点在该方向接收到的光强为

$$E = \int_{0}^{d_1} dE_s + E_R \tag{4}$$

值得注意的是,传统相机接收的光线是在(相对 光速而言)较长一段时间内的积分,我们把这种成像 机制称为稳态成像.稳态条件下的单次散射模型因 此通常表示为沿着观察方向到达相机的一系列光线 的积分.观察到的是沿该方向所有的散射光和目标 物表面反射光的总和.也就是说,对于稳态成像,光 速被视为无穷大.在下文中,我们将光线在散射场景 中的传播过程理解为时间的函数,提出适用于瞬态 成像技术的单次散射模型,我们称之为瞬态单次散 射模型.

3.2 瞬态单次散射模型

本小节将上述的稳态单次散射模型推广为瞬态 单次散射模型,用来对散射环境下的瞬态像素建模. 一个瞬态像素定义为一个光强序列,指的是 PMD 传感器面阵上同一像素在不同时刻接收到的光信号 强度所组成的序列^[17].我们将从下文得知,瞬态单 次散射模型中包含了散射介质的散射系数,目标物 的深度以及纹理信息.根据这个模型以及第4节、 第5节提出的方法,则可以求解目标物的深度和纹 理.由于求解过程是逐个像素求解的,为方便起见, 本文余下部分的讨论针对瞬态像素.

将单次散射模型从稳态推广到瞬态、就是将 式(4)左边的光强 E 推广为散射环境下的瞬态像素 S(t);将式(4)右边第1项推广为S(t)的散射分量, 它们是一系列光强值,可以表示为时间的函数 $S_s(t)$; 将式(4)右边第2项推广为S(t)的反射分量 $S_R(t)$, $S_R(t)理想情况下是一个冲激函数.其中t表示光线$ 的飞行时间(其定义见引言的第4段).当飞行时间为t时,光线进入散射介质的深度记为<math>x(t),如图4 所示.此时, $S_s(t)$ 和 $S_R(t)$ 都与光线传播距离的平 方成反比,与x(t)成负指数关系.



图 4 散射介质中的瞬态单次散射模型示意图

不失一般性,我们假定光线在进入散射介质前 须在空气中传播一段距离,在本研究工作中,我们使 用点光源.假设出射光的方向与 PMD 传感器面阵 上的像素的观察方向是一致的,如图 4 所示.由于在 实际的实验场景中,光源和 PMD 传感器的空间位 置很接近,所以这个假设是成立的,这也是很多常见 的主动光成像系统所采用的假设之一^[25-26].

基于上述假设,而光线传播距离与x(t)相差一 个偏移量 $ct_0/2$,故飞行时间为t的光线传播距离为 $ct_0/2+x(t)$,如图 4 所示.其中,c为光速, t_0 为被介 质边缘后向散射的光线的飞行时间, t_R 为目标物表 面反射光的飞行时间.实线表示目标物表面反射的 光线,虚线表示被散射介质一次散射即进入相机的 光线.

S(t)的示意图如图 5 所示. 当光线在散射介质 中传播时,仅发生单次散射,光强随 x(t)呈指数衰 减,与光线传播距离 $ct_0/2 + x(t)$ 的平方成反比. 另 一方面,由于散射分量只在光线进入散射介质后, 到达目标物表面之前存在,所以散射分量包含一个 示性函数. 若给定飞行时间 t,则 $S_s(t)$ 表达式为 式(5). 同理, $S_R(t)$ 的表达式为式(6),由于反射只发 生在光线到达目标物表面的时刻,故分量须乘以一 个冲激函数.



散射分量的表达式为 $S_{S}(t) = \frac{I\beta e^{-2\beta r(t)}}{4\pi (ct_{0}/2 + x(t))^{2}} 1_{t \in [t_{0}, t_{R}]}, t \in [t_{0}, t_{R}]$ (5)

反射分量的表达式为

$$S_{R}(t) = \frac{I\rho e^{-2\beta x(t_{R})}}{(ct_{0}/2 + x(t_{R}))^{2}} \delta(t - t_{R})$$
(6)

其中,式(5)中的 $1_{t \in [t_0, t_R)}$ 为示性函数(Indicator Function),在 $t \in [t_0, t_R)$ 范围内取值为 1,其他范围 取值为 0.式(6)中的 δ 表示冲激函数,在 $t = t_R$ 处取 值为 1,其他范围取值为 0.合并式(5)及式(6)则可 得到散射环境下的瞬态像素,即式(7).该式即是瞬 态单次散射模型.本文把该模型作为现有瞬态成像 技术的关于外界环境的先验知识,描述光线在散射 介质中传播的瞬态过程,作为求解目标物深度和纹 理的理论基础.

$$S(t) = \frac{I\beta e^{-2\beta x(t)}}{4\pi (ct_0/2 + x(t))^2} 1_{t \in [t_0, t_R)} + \frac{I\rho e^{-2\beta x(t_R)}}{(ct_0/2 + x(t_R))^2} \delta(t - t_R)$$
(7)

值得注意的是,由于我们假设在介质中只发生 单次散射,而且出射光的方向与相机上像素的观察 方向是一致的,所以被相机接收到的散射光是到达 目标物之前被后向散射的光线,其飞行时间 t 介于 t₀和 t_R之间.飞行时间与发生散射的深度具有一一 对应关系,即飞行时间为 t 的光线进入散射介质中 的深度为

$$x(t) = \frac{c}{2n} (t - t_0)$$
 (8)

其中,式(8)中的n表示散射介质的折射率,c为光速, $t \in [t_0, t_R]$.

3.3 含先验的瞬态像素

现有的瞬态成像技术的本质是重构瞬态像素然 后组合成瞬态视频,用于描述光线的传播过程,以及 光线与环境相互作用的过程.为重构瞬态像素,基于 PMD 的瞬态成像采集系统将 PMD 应用于多频工 作状态. Heide 和 Hullin 等人把重构瞬态像素问题 理解为一个求解欠定线性方程组的问题.而 Lin 等 人[18] 发现该设备在多个频率下采集的数据,是瞬态 像素的傅里叶变换后得到的频域信号的子集. Lin 等人是通过对 PMD 的测量值做傅里叶逆变换来重 构瞬态像素.从频域上看,由于无法穷尽频域上的所 有频率,所以相应地,在时域上,重构结果是实际的 瞬态像素与一个核函数的卷积,记核函数为 k(t). Heide 等人和 Lin 等人重构的结果是等价的,且对成 像的环境均不做假设,记他们的重构结果为 y(t). 而 本文引入了瞬态单次散射模型作为环境的先验知 识.由此可知在散射环境下,y(t)的表达式如式(9):

$$y(t) = S(t) \times k(t)$$
(9)

4 深度及纹理获取

如 3.2 节所述,用现有的瞬态成像算法重构只 能得到 y(t).本文先用 Lin 等人的算法得到 y(t), 再根据 y(t)求解目标物的深度 $x(t_R)$ 和纹理 ρ . 但 是,从式(7)、(9)可知,由于 k(t)的表达式和 β 未知, 通过卷积得到 S(t),再求解 $x(t_R)$ 和 ρ 的方法是不 可行的.另一方面,因为 S(t)是超越方程,难以直接 求解 β . 本节提出偏移拍摄法来,通过轻微挪动目标物, 两次重构 y(t),利用重构的差异得到 $x(t_R)$ 和 ρ .从 4.2节的推导可以看出,重构结果包含 k(t)的一阶 导数和二阶导数.尽管 k(t)的表达式未知,但可以 通过标定得到 k(t)对应于不同飞行时间的值,再用 其一阶差分和二阶差分来近似.本文首先在 4.1节 介绍卷积核函数 k(t)的标定过程,接下来在 4.2节 提出偏移拍摄法,引入与目标物深度一一对应的参 数 $\hat{\beta}$,以求解 $x(t_R)$.得到 $x(t_R)$ 之后,则可以通过最 小二乘法求解 ρ .

4.1 标定卷积核函数 k(t)

如 3.3 节所述,卷积核函数 k(t)是由现有的 瞬态成像采集系统及瞬态视频重构算法引入的.由 式(9)知,若场景对光脉冲的响应为单位冲激函数, 用 Lin 等人的算法重构的 y(t)则等于 k(t).为此, 我们需要构造响应为冲激函数的场景.正如 Heide 等人在文献[17]中指出,空气中的物体表面对光脉 冲的响应为冲激函数.本文在空气中拍摄漫反射物 体,并重构 y(t),则这些 y(t)为 k(t)与一系列幅值 不等的冲击函数的乘积.为消除随机误差,多个像素 对应的 y(t)归一化后求平均,即可得到 k(t).

4.2 偏移拍摄法求解深度

用Lin 等人提出的方法重建的 y(t)与目标物的 位置有关,亦即与目标物表面的反射光的飞行时间 t_R 有关,此时 y(t)用二元函数表示,如式(10):

$$y(t,t_{R}) = \left[\frac{I\beta e^{-2\beta x(t)}}{4\pi (ct_{0}/2 + x(t))^{2}} 1_{t \in [t_{0},t_{R})} + \frac{I\rho e^{-2\beta x(t_{R})}}{(ct_{0}/2 + x(t_{R}))^{2}} \delta(t - t_{R})\right] \times k(t) (10)$$

设 $t_{R1} < t_{R2}$,则

$$y(t,t_{R_{1}}) - y(t,t_{R_{2}}) = \left[\frac{I\rho e^{-2\beta x(t_{R_{1}})}}{(ct_{0}/2 + x(t_{R_{1}}))^{2}} \delta(t - t_{R_{1}}) - \frac{I\rho e^{-2\beta x(t_{R_{2}})}}{(ct_{0}/2 + x(t_{R_{2}}))^{2}} \delta(t - t_{R_{2}}) + \frac{I\beta e^{-2\beta x(t_{R_{2}})}}{4\pi (ct_{0}/2 + x(t))^{2}} \mathbf{1}_{t \in (t_{R_{1}}, t_{R_{2}})}\right] \times k(t) \quad (11)$$

采集设备和重构算法决定了 $y(t,t_R)$ 是有界函数,故 $y(t,t_{R1}) - y(t,t_{R2})$ 也是有界函数.而 k(t)是 连续函数,则必然可以找到一个参数 $\hat{\beta}$ 使得 $y(t,t_{R1}) - y(t,t_{R2}) = \frac{I_{\rho}e^{-2\hat{\beta}x(t_{R1})}}{(ct_0/2 + x(t_{R1}))^2}k(t-t_{R1}) - \frac{I_{\rho}e^{-2\hat{\beta}x(t_{R2})}}{(ct_0/2 + x(t_{R2}))^2}k(t-t_{R2})$ (12)

对于不同的 t_{R1}和 t_{R2},式(11)的第 3 项不等,所

以 $\hat{\beta}$ 和深度是一一对应的.如此一来,只要求得 $\hat{\beta}$,则可以求得深度.

定义

$$F(t_R) = \frac{I\rho e^{-2\beta x(t_R)}}{(ct_0/2 + x(t_R))^2} k(t - t_R)$$
(13)

当 *t*_{R1}与 *t*_{R1}相差不大时,应用泰勒公式,舍弃二阶以上的项,得到

$$y(t, t_{R1}) - y(t, t_{R2}) = F(t_{R1}) - F(t_{R2})$$

$$\approx (t_{R1} - t_{R2})F'(t_{R1})$$

$$= (t_{R1} - t_{R2}) \frac{I\rho e^{-2\hat{\beta}x(t_{R1})}}{(ct_0/2 + x(t_{R1}))^2} \cdot \left[\frac{c}{n} \left(\hat{\beta} + \frac{1}{ct_0/2 + x(t_{R1})}\right)k(t - t_{R1}) + k'(t - t_{R1})\right]$$
(14)

再把上式最右边中括号内的式子看作关于 t 的函数,定义

$$G(t) = (t_{R1} - t_{R2}) \frac{I\rho e^{-2\hat{\beta}x(t_{R1})}}{(ct_0/2 + x(t_{R1}))^2} \cdot \left[\frac{c}{n} \left(\hat{\beta} + \frac{1}{ct_0/2 + x(t_{R1})} \right) k(t - t_{R1}) \right]$$

$$k'(t - t_{R1}) \right]$$
(15)

G(t)是一个单峰的函数,其峰值点导数为 0,设 $G(t_m)$ 为峰值点,则 $G'(t_m) = 0$

$$\frac{c}{n} \left(\hat{\beta} + \frac{1}{ct_0/2 + x(t_{R_1})} \right) k'(t_m - t_{R_1}) + k''(t_m - t_{R_1}) = 0$$
(16)

根据式(14),通过式(16)求解得到的 $\hat{\beta}$ 是一个近似值,即

$$\hat{\beta} \approx -\frac{nk''(t_m - t_{R1})}{ck'(t_m - t_{R1})} - \frac{1}{ct_0/2 + x(t_{R1})} \quad (17)$$

根据泰勒公式,偏移的距离 $x(t_{R1}) - x(t_{R2})$ 过 大会造成式(14)舍弃的高阶项太大,近似不再成立. 若偏移距离过小,则 $y(t,t_{R1}) - y(t,t_{R2})$ 的幅值过 小,受随机噪声和系统噪声的影响,无法得到相应的 近似值 $\hat{\beta}$.

因为式(12)中的 I_{ρ} 是由光源和目标物决定,是 与深度、散射介质无关的常数,再结合式(12)与式 (17),可知 t_{R1} , t_{R2} 及 $\hat{\beta}$ 决定了曲线 $y(t,t_{R1}) - y(t,$ t_{R2})的形状,而且一组 t_{R1} , t_{R2} , $\hat{\beta}$ 与一条曲线的形状 是——对应的.基于这一特征,本文提出偏移拍摄 法.偏移拍摄法需要拍摄两次,第1次拍摄后将目标 物往远离相机的方向轻微挪动(实验中挪动距离约为 5mm,即 $x(t_{R2})$ 与 $x(t_{R1})$ 的距离为5mm),再拍摄第 2次.拍摄示意图如图 6 所示,粗实线和粗虚线分别 表示移动前后的目标物,带箭头的实线和带箭头的 点划线分别表示被移动前的目标物和移动后的目标 物表面反射的光线,介于粗实线和粗虚线之间的带 箭头的虚线则表示散射光.



图 6 偏移拍摄法示意图

拍摄完成后,重构 $y(t,t_{R1})$ 和 $y(t,t_{R2})$,接着相 减得 $y(t,t_{R1}) - y(t,t_{R2})$,由于 $I\rho$ 与场景深度无关, 即曲线的幅值与目标物的深度无关,对曲线归一化, 此时的曲线记为 f(t).

由于场景范围有限,在该范围内遍历 t_{R1} ,并求 出相应的 t_{R2} 及 $\hat{\beta}(x(t_{R2}) = x(t_{R1})$ 的距离已知,亦即 $t_{R2} = t_{R1}$ 的差已知; $\hat{\beta}$ 由式(17)可得).利用式(12),构 造一系列相减后的曲线.归一化后,从中找出与 f(t)误差的平方和最小的曲线.此时相应的 $x(t_{R1})$ 则为 所求深度.

4.3 偏移距离对偏移拍摄法的影响

偏移拍摄法隐含一个假设:移动目标物前后,要 保证相减的 y(t)来自同一相机像素,使得相机拍摄 的场景保持不变.目标物移动前后,其边缘的偏差最 大,只要保证边缘的偏差不超过一个像素,即可认为 场景是不变的.为简化描述,我们将成像区域用一维 的线表示,该描述与二维的情形是等价的.如图7所 示,假设目标物占据相机的整个视野,其中水平的虚 线与粗实线分别表示物体移动前后相机的成像区 域,两个方框内的空间区域各映射到一个像素.目标 物移动前后,同一区域对应同一像素.L表示目标物 移动前离相机的距离,ΔL表示偏移距离.

由相似三角形的知识知,粗实线和粗虚线长度 之差与粗实线长度的比值为



图 7 偏移距离对偏移拍摄法的影响示意图

$$\frac{\Delta L}{L + \Delta L} \tag{18}$$

只要这一比值小于两个像素与一行(列)像素宽度(长度)的比值即可.设传感器平面的像素数目为 MN,则须满足

$$\frac{\Delta L}{L + \Delta L} < \frac{2}{\max\{M, N\}}$$
(19)

解得

$$\Delta L < \frac{2L}{\max\{M,N\} - 2} \tag{20}$$

另一方面,若偏移的距离过小,相机同一像素对 应的两个 y(t)峰值出现的时间过于接近,相减后得 到的曲线的峰值过小,此时受系统噪声和随机噪声 的影响,很难找到正确的峰值点.

4.4 纹理求解

从 4.2 节的方法得到目标物反射光的飞行时间 后 t_{R1},用最小二乘法即可得到纹理 ρ.

注意到式(5)、(6)的散射分量 $S_s(t)$ 和反射分量 $S_R(t)$ 形式上的相似性,两者比值的大小决定于 纹理 ρ .下面我们定义两个函数,把 y(t)表示成这两 个函数的线性组合.

定义

$$f_{s}(t) = \frac{\beta e^{-2\beta r(t)}}{4\pi (ct_{0}/2 + x(t))^{2}} \mathbf{1}_{t \in [t_{0}, t_{R})} * k(t)$$
(21)

$$f_R(t) = \frac{e^{-2\mu x(t_R)}}{(ct_0/2 + x(t_R))^2} k(t - t_R)$$
(22)

则 y(t)是 $f_s(t)$ 和 $f_R(t)$ 的线性组合

$$V(t) = I f_S(t) + I \rho f_R(t)$$
(23)

将 $f_s(t), f_R(t), y(t)$ 离散化,并表示成矩阵相乘形式,得

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} f_{S}(t_{1}) & \cdots & f_{S}(t_{N}) \\ f_{R}(t_{1}) & \cdots & f_{R}(t_{N}) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(24)

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_1(t_1) & \cdots & y_1(t_N) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(25)

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} I \\ I\rho \end{bmatrix}$$
(26)

由最小二乘法得

$$\begin{bmatrix} I \\ I\rho \end{bmatrix} = (\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{Y}$$
(27)

$$\rho = I \rho / I \tag{28}$$

注意到等式(21)及(22)中 β 的真值虽然未知, 但其作为 $f_s(t), f_R(t)$ 的一部分,不直接参与运算. 已知飞行时间 t_{R_1} 后,用最小二乘法则可以得到纹理 ρ 图.

5 实验结果

本文实验使用大小为 60×35×35 cm 的水箱, 装水约 60L,水中混入散射介质(牛奶).相机和光源 置于水箱外,距离约 2 cm. 相机和光源采用同文 献[17-18]的设备.

5.1 标定卷积核函数 k(t)

卷积核函数的测量如图 8 所示,我们把一块平板置于离光源和数据采集设备约 50 cm 处,作为测量 k(t)的目标物.平板表面用白色幕布覆盖,使其接近理想的朗伯特表面.用 Lin 等人提出的算法重构得到由多个瞬态像素 y(t)组成的瞬态视频.归一化这些 y(t),并将其在时间轴上平移,使其峰值点在时间轴上对齐,结果如图 10 所示.图中所有的y(t)的形状几乎是一样的,此时的 y(t)等于 k(t).为消除随机误差,我们用这些 y(t)的均值(即图中的实线)表示卷积核函数 k(t).横坐标为时间,单位为 0.01 ns.其中 N_TRP(Normalized Transient Pixel)表示归一化的 y(t),Kernel表示卷积核函数.



图 8 卷积核函数测量装置 1

2018 年

为验证卷积核函数的形状与场景无关,本文通 过拍摄一个有明显深度变化物体来获得个卷积核函 数.拍摄场景和核函数分别如图 9 和图 11 所示.



图 9 卷积核函数测量装置 2

两个场景下求得的核函数的对比图如图 12 所示."Kernel 1"与"Kernel 2"分别表示平板场景和物体场景得到的核函数.两者的相关系数为 0.9989. 可见 *k*(*t*)的形状,仅由系统决定的,与场景无关,这支持了 3.3 节的理论.在实际操作中,我们使用 图 10 中的核函数.





图 12 不同切录于时候函数时/

5.2 深度及纹理获取

为重构目标物的深度及纹理,将一个玩具熊置 于水箱中作目标物,如图 13 所示.由4.3节的讨论 知,偏移距离不能过大或过小.本实验取 L 为 65 cm, ΔL 为 0.5 cm,满足不等式(20).为保证偏移距离为 约 0.5 cm,第 1 次拍摄时,将玩具熊放置在水箱后 壁(图中白色幕布处)附近,使玩具底座边缘距离 水箱后壁约 0.5 cm,第 2 次拍摄时,令玩具熊底座 边缘紧贴水箱后壁.我们在水箱中装入体积大约 为 60 L 的自来水,然后分别混入 5 ml、10 ml 和 15 ml 牛奶作为散射介质,并在这 3 种散射强度下重构目 标物的深度及纹理.实验结果如图 14、图 15 及图 16 所示.



图 13 实验装置



图 15 真实场景及实验结果图(10 ml)

计 算 机 学 报



图 16

为量化实验结果,在加入牛奶之前,我们在清水 中获取目标物深度及纹理的真实值,深度的单位为 厘米(cm),纹理由强度值表示,无量纲.为获取真实 值,我们使用 Lin 等人^[18]提出的方法.

为验证本文方法的可用性,本文的偏移拍摄法 需要与传统方法作对比.对比实验方面,我们选取 He 等人^[4]的方法.由于需要在同一视角获取相同的 场景,我们用瞬态成像技术采集设备输出的强度图, 作为去散射前的图像,记为 I,作为 He 等人方法的 输入.

在 60L 自来水中混入 5 ml 牛奶时,实验结果如 图 14 所示.其中,子图(a)、(b)分别表示深度真实值 以及用本文提出的偏移拍摄法求解得到的深度图. 其中深度为绝对值,单位为mm(毫米).玩具部分的 深度接近真实值.由于背景部分没有被移动,得到的 背景深度和纹理并不准确.为了使目标物可见,我们 将背景设置与真实值一致,将背景设定为一个固定 值并不影响我们验证方法的正确性.

为量化偏移拍摄法重构的深度与目标物深度真 实值的差异,我们在深度图中选取同一行同一列像 素来比较,如子图(b)的白色直线所示.比较结果如

子图(g)和(h)所示,其中 GT 和 Re 分别表示真实 值和重构值.重构结果与真实值之差为毫米级别,在 某些区域,结果与真实值比较吻合.

图 14 的子图(c)是使用 He 等人的方法处理含 散射的图像 I(如子图(i)所示)所得的深度图.由于 玩具熊的颜色与散射介质的颜色(白色)相近,正如 He 等人在论文中提出那样,这种场景下 He 等人的 算法结果是不理想的.而本文提出的方法,对场景的 颜色和材质没有任何假设,在这种场景下是可用的. 另一方面,即使是比较理想的场景,由于 He 等人的 方法并不求解散射系数,所以重构的深度是相对值, 而本文的方法可以得到深度的绝对值.

图 14 的子图(d)、(e)、(f)为纹理图,分别为用 Lin 等人的方法得到的真实纹理、本文的方法求解 的纹理图以及 He 等人的方法求解的纹理图. 由于 测量值的幅值与光强成正比,没有对应的物理单位, 所以我们对纹理图的强度进行了归一化.从子图 (d)、(e)、(f)可以看出,重构后的纹理对比度略低于 真实值,略高于使用 He 的方法得到的结果. 为量化 纹理图与真实值的差异,我们计算了它们与真实值 的 PSNR (Peak Signal to Noise Ratio,峰值信噪

比).结果如表1所示,本文的方法的 PSNR 高于 He 的方法.两者的 PSNR 都高于去散射之前的图像.

表 1 纹理图 PSNR 比较结果

	真值与本文方法	真值与 He 的方法	真值与图像 I
$5 \mathrm{ml}$	33.7287	33.3627	28.3040
$10\mathrm{ml}$	33.6716	32.1867	27.7807
15 ml	34.4065	32.2238	28.5783

在 60L 自来水中混入 10ml 牛奶时,结果如图 15 所示. 从子图(b)可以看出重构的深度图准确度不 如混入 5ml 牛奶时的情况,比如玩具熊额头的小颗 粒不如前者清晰. 但从子图(g)、(h)看出,局部深度 的准确度与 5ml 的情况相差不远.

从图 15 的子图(e)、(f)看,混入 10 ml 牛奶时重 建的纹理图比 5 ml 的情况整体相对模糊. He 等人 的算法重构的深度图也比图 14 中略差. 但从表 1 可 以看到,本文方法、He 等人的方法与真值的 PSNR 都高于去散射前的图像,其中本文方法略高. 重构后 的纹理图相比去散射前的图像轮廓更清晰.

在 60L 自来水中混入 15 ml 牛奶时,结果如图 16 所示.此时本文的偏移拍摄法重建的深度图只得到 一个轮廓,深度值偏离真实值较远,偏差大于前面两 种情况.这有两部分原因,一是因为介质的散射较 强,到达物体表面光线比例较小,系统噪声的比例增 大.二是在真实的物理过程中,随着散射强度增大, 多次散射比例增大,用单次散射模型逼近真实物理 过程的准确度下降.He 等人的算法重建的深度图 几乎不可见,纹理图与本文方法一样,也比较模糊. *PSNR* 值都低于 5 ml 和 10 ml 的两种情况.

6 结束语

本文将传统计算机视觉和图形学的单次散射模型从稳态推广到瞬态.从模型到算法,提出了一整套利用瞬态成像技术进行穿透散射介质成像的方案. 该方案可应用于散射环境中,获得目标物的较精确的深度图和纹理图.

在模型层面,单次散射模型被广泛应用于穿透 散射介质成像问题的研究中.但由于其忽略了多次 散射的影响,难以精确描述散射介质的性质,特别是 当浓度较大时.所以,一个可能的后续工作是使用更 为精确的散射模型,或者绕开散射分量的模型,先分 离反射分量与散射分量,再根据反射分量重构深 度图.

在算法层面,文中所提出的偏移拍摄法利用等

效参数 β,绕开了直接求解散射系数的难题. 该算法 框架有可能适用于更加复杂的模型,下一步工作可 以考虑更复杂的散射模型.

在器件层面,由于无法将设备置于水下,本文在 实验中提出的方法采取了移动物体的折中策略.若 要应用于自然场景(如海底),则无法移动目标物,只 能移动相机.下一步工作可以考虑将光源和相机置 于密闭容器中,则有望应用于水下自然场景.

参考文献

- Oakley J P, Satherley B L. Improving image quality in poor visibility conditions using a physical model for contrast degradation. IEEE Transactions on Image Processing, 1998, 7(2): 167-179
- [2] Narasimhan S G, Nayar S K. Contrast restoration of weather degraded images. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(6): 713-724
- [3] Fattal R. Single image dehazing. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 72
- [4] He K, Sun J, Tang X. Single image haze removal using dark channel prior. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341-2353
- [5] Schechner Y Y, Karpel N. Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2005, 30(3): 570-587
- [6] Ancuti C, Ancuti C O, Haber T, Bekaert P. Enhancing underwater images and videos by fusion//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Providence, Rhode Island, USA, 2012; 81-88
- [7] Chiang J Y, Chen Y. Underwater image enhancement by wavelength compensation and dehazing. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(4): 1756-1769
- [8] Kocak D M, Caimi F M. The current art of underwater imaging—With a glimpse of the past and vision of the future. Marine Technology Society Journal, 2005, 39(3): 5-26
- [9] Narasimhan S G, Nayar S K, Sun B, et al. Structured light in scattering media//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Las Vegas, USA, 2005: 420-427
- [10] Levoy M, Chen B, Vaish V, et al. Synthetic aperture confocal imaging. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 825-834
- [11] Gupta M, Narasimhan S G, Schechner Y Y. On controlling light transport in poor visibility environments//Proceedings of the IEEE Computer Vision and Pattern Recognition. Anchorage, USA, 2008: 1-8
- [12] Ouyang B, Dalgleish F, Negahdaripour S, Vuorenkoski A. Experimental study of underwater stereo via pattern projection. IEEE Oceans, 2012: 1-7

- [13] Treibitz T, Schechner Y Y. Instant 3Descatter//Proceedings of the IEEE Computer Vision and Pattern Recognition. New York, USA, 2006, 2: 1861-1868
- [14] Treibitz T, Schechner Y Y. Active polarization descattering. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2009, 31(3): 385-399
- [15] Busck J. Underwater 3-D optical imaging with a gated viewing laser radar. Optical Engineering, 2005, 44 (11): 116001-116001
- [16] Velten A, Wu D, Jarabo A, et al., Femto-photography: Capturing and visualizing the propagation of light. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(4): 44
- [17] Heide F, Hullin M B, Gregson J, Heidrich W. Low-budget transient imaging using photonic mixer devices. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(4): 45
- [18] Lin J, Liu Y, Hullin M B, Dai Q. Fourier analysis on transient imaging with a multifrequency time-of-flight camera// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Columbus, USA, 2014: 3230-3237
- [19] Nishita T, Miyawaki Y, Nakamae E. Shading model for atmospheric scattering considering luminous intensity distribution of light sources. ACM Transactions on Graphics, 1987, 21(4): 303-310



WU Ri-Hui, born in 1989, Ph. D. candidate. His research interests include computational photography and computer vision.

DAI Feng, born in 1979, Ph. D., associate professor. His research interests include video processing and computational photo-graphy.

YIN Dong, born in 1992, Ph. D. candidate. His research

Background

Imaging through scattering media such as fog, haze, smoke and muddy water is a very challenging image enhancement and scene reconstruction problem. There are many important applications such as exploration of wreckages and mines in the sea. In the past few decades there have been lots of works tackling with this problem from different angles. On one hand, computer vision researchers proposed new imaging systems using active illuminations such as structured light, active polarization, and combining with algorithms to improve the visibility and contrast, and sometimes recovering the depth and surface properties of the targets. On the other

- [20] Bohren C F, Huffman D R. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. UK: Cambridge University Press, 2004
- [21] Chandrasekhar S. Radiative Transfer. Oxford, UK: Clarendon Press, 1950
- [22] Narasimhan S G, Gupta M, Donner C, et al. Acquiring scattering properties of participating media by dilution. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(3): 1003-1012
- [23] Sun B, Ramamoorthi R, Narasimhan S G, Nayar S K. A practical analytic single scattering model for real time rendering. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 1040-1049
- [24] Mukaigawa Y, Yagi Y, Raskar R. Analysis of light transport in scattering media//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco, USA, 2010: 153-160
- [25] Shim H, Lee S. Recovering translucent object using a single time-of-flight depth camera. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2015, 26(5): 841-854
- [26] Bhandari A, Kadambi A, Whyte R, et al. Resolving multipath interference in time-of-flight imaging via modulation frequency diversity and sparse regularization. Optics Letters, 2014, 39(6): 1705-1708

interest is signal processing.

LIU Ye-Bin, born in 1981, Ph. D., associate professor. His research interests include image-based modeling and rendering, markerless motion capture and vision based graphics applications.

DAI Qiong Hai, born in 1964, Ph. D., professor. His research interests include signal processing, computational photography, computer vision, and computer graphics.

ZHANG Yong-Dong, born in 1973, Ph. D., professor. His research interests include multimedia processing and computational photography.

hand, computer graphics researchers had proposed methods to understand light propagating in dense scattering media for rendering applications. The so-called single scattering model is used widely in computer vision and computer graphics to handle this problem. However, most of these methods utilize only the steady response of the light on the scene, which assume that the speed of light is infinite and the integral of light is measured. Scanning is needed or attenuation based method (active polarization) could only get a rough 3D structure.

Recently, the concept of transient image was introduced

to describe the optical impulse response of a scene at an extremely high temporal resolution before its distribution in the scene achieves a global equilibrium, allowing new properties of scenes to be observed and interpreted. Transient imaging analysis light transports in the time domain using streak camera or in the frequency domain using a converted Photonic Mixer Device (PMD) sensor with a modulated illumination. Lin et al. proposed an algorithm based on Fourier analysis enable PMD to set up with transient imaging and reconstruct depth map of opaque surfaces. Heide et al. demonstrated that, this system could be used for imaging in scattering media combining with sparse convolutional coding. However, this method needs to learn a sparse coding dictionary.

In this paper, we propose the using of such time-of-

flight sensors for transient imaging in scattering media to recover depth map and texture of target objects hidden behind. We extended the single scattering model from a steady state to a transient state. And an offset acquiring method is proposed to reconstruct the depth map of target objects. After the travel time of the reflection light is gotten, the depth of the corresponding object surface point is obtained. Through curve fitting, the texture of object can be achieved. Eventually results are reconstructed.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (61327013 and 61522111), the Instrument Developing Project of the Chinese Academy of Sciences, Grant No. YZ201321, and the National Key Foundation for Exploring Scientific Instrument No. 2013YQ140517.

n, sing c