

文章编号: 1672-8785(2018)12-0020-04

非视域快速成像系统研究初探

沈天明 尤晓明

(公安部第三研究所, 上海 200031)

摘 要: 非视域 (Non-Line-of-Sight, NLOS) 成像技术可以对被其他物体遮挡住 (如拐角处、烟雾后等) 的隐藏目标进行探测和成像, 因此在机器视觉、安防、医学影像、灾难救援和自动驾驶等领域具有重要的应用价值。该技术通过利用脉冲激光束和时域信号探测器扫描特定表面来实现上述功能。目前 NLOS 技术仍然存在诸多不足之处, 比如扫描时间长、计算时间长等。针对这些情况, 提出了一种凝视型快速探测与重建方法。模拟结果表明, 该方法可探测高反射物体, 并可有效增大视域范围。

关键词: 非视域成像; 单光子雪崩二极管; 滤波反投影

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.12.005

Preliminary Study of Non-Line-of-Sight Imaging System

SHEN Tian-ming, YOU Xiao-ming

(The Third Research Institute of Ministry of Public Security, Shanghai 200031, China)

Abstract: Non-Line-of-Sight (NLOS) imaging can be used to detect and image hidden objects around the corner, behind smoke and so on. It is of important value to many research fields like machine vision, public security, medical imaging, disaster relief and autonomous vehicles. This technology utilizes a pulsed laser and a time-resolved detector to scan and detect a certain surface. At present, NLOS imaging still has some shortcomings such as time-consuming in scanning and computer-reconstruction. To overcome these shortcomings, a rapid staring detection and reconstruction method is proposed. The simulation results show that it can be used to detect highly-scattered objects and widen the field of view effectively.

Key words: non-line-of-sight; single-photon avalanche diode; filtered back projection

0 引言

与传统的光学成像技术不同, 非视域成像技术可以对光线无法直接到达的区域或者看不到的隐藏物体进行成像, 其关键技术在于利用

激光照射中介面进行漫反射, 然后采集经过多次漫反射的光线来重建隐藏物体的形状和表面^[1]。这项技术现在主要应用于机器视觉、安防、医学影像等领域, 并且在防止交通事故

收稿日期: 2018-11-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0800904)

作者简介: 沈天明(1981-), 男, 上海人, 工程师, 主要从事辐射成像技术研究。

E-mail: doc_pie@126.com

和定位灾难救援等方面具有实用价值。

目前, 非视域成像技术主要有以下两种实现方式: 通过激光距离选通进行成像和基于光子探测技术进行成像。其中, 前者可以分为两个阶段: (1) 选通门关闭。激光器发射激光脉冲进行照射。在脉冲到达目标区域并反射进入探测器的这段时间里, 选通门处于关闭状态。(2) 选通门打开。当目标区域反射回来的信号到达探测器时, 选通门打开, 接收信号并对目标区域进行成像, 之后重新关闭选通门^[2]。基于光子探测技术的成像装置利用单光子雪崩二极管(Single-Photon Avalanche Diode, SPAD)获取激光反射信号的飞行时间谱, 以一定的扫描方式探测各个方向上的反射信号, 然后采用计算机反投影重建方法对目标区域进行成像^[3]。

如图 1 所示, 脉冲激光入射到中介反射屏上的 S 点, 发生漫反射后落到目标区域的 O 点上; O 点发生二次反射回到反射屏上的 T 点, 最终散射回准直器而被探测器接收。探测器采用 SPAD 阵列, 可通过长时间累积对目标区域进行成像, 该过程被称为凝视型成像过程。具体重建如下: r_1 和 r_4 的距离为恒定量, 由激光器、探测器相应探测点和屏幕三者之间的距离关系确定; 屏幕到物体间的反射线 SO 和散射点的回波 OT 即 r_2 和 r_3 为变量, 经分析可知反射信号的时间由 r_2 和 r_3 距离之和决定, 由此探测到的信号时间序列通过 S 点和 T 点构成焦点的椭球体投影积分得到^[4]; 然后采用反投影重建算法还原影像, 其计算法复杂性达到 $O(N^5)$ ^[5]。此外还有一种被称为聚焦扫描成像过程, 即采用激光二维扫描装置和分光器进行组合探测, 使得探测的回波与发射的回波路径一致。该过程减少了计算复杂度, 其计算法复杂性减至 $O(N^3 \log N)$, 但仍需要二维激光扫描, 所以较为费时^[6]。

本文结合两者的特点提出了一种聚焦凝视型成像过程以应对上述困难, 并通过引入滤波反投影算法来实现 NLOS 重建问题。

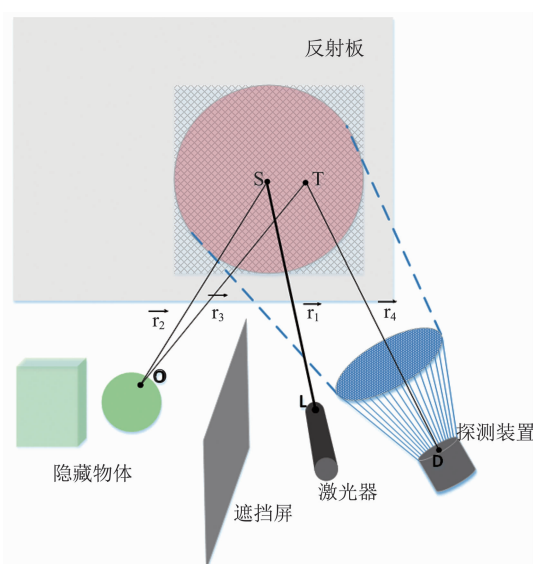


图 1 基于飞行时间谱的成像原理

1 方法

如图 2 所示, 激光器发射的激光经过漫射装置后形成锥形束发射, 然后由分光器将锥形束反射到中介反射板上照射较大区域; 而接收反射回波的路径和发射一致, 通过分光器后聚焦进入阵列探测器; 采用 SPAD 阵列探测二维面的飞行时间谱, 其大小与照射面一致, 而探测器前端的聚焦器采用龙虾眼结构进行汇聚, 所有光束彼此独立不相关。这样的布置无需进行二维扫描, 并且通过分光器保证了探测和照射路径一致。整个重建过程以球面积分进行, 其复杂度比椭球形大大降低。下面介绍具体的重建过程。

首先作一些基本假设以简化过程: 每个界面上仅发生一次散射, 其过程各向同性, 目标区域与反射板之间没有其他干扰因素。令反射板上某个照射点 S 的三维坐标为 $(X, Y, 0)$, 目标探测物体某个点 O 的三维坐标为 (x, y, z) , 探测点接收到的回波信号时间序列 $\sigma(X, Y, t)$ 为

$$\begin{cases} \sigma(X, Y, t) = \iiint_{\Omega} \frac{\gamma(x, y, z)}{r^4} \delta(2r - ct) dx dy dz \\ r = \sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + z^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中, c 为光速; r 为 S 点到 O 点的距离; γ

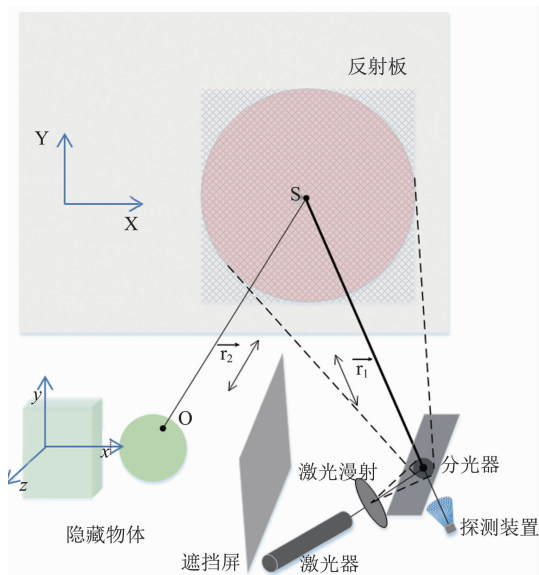


图2 凝视型快速成像系统

为O点反光面的单位散射截面。 $\sigma(X, Y, t)$ 是散射截面在三维空间 Ω 中的积分，而狄拉克函数 δ 只有当 $r=ct/2$ 时非零。通过变量替换 $v=(z)^2$ 和 $\tau=(tc/2)^2$ ，则有 $dz=(v)^{-1/2}dv/2$ 。式(1)的积分形式变为^[6]

$$\tau^{3/2}\sigma(X, Y, \frac{2\sqrt{\tau}}{c}) = \iiint_{\Omega} \frac{\gamma(x, y, \sqrt{v})}{2\sqrt{v}} \times \delta((X-x)^2 + (Y-y)^2 + v - \tau) dx dy dv \quad (2)$$

由式(2)可知，探测信号为散射截面 γ 在 (X, Y, t, x, y, z) 空间中的卷积。为了求解 $\gamma(x, y, z)$ ，采用滤波反投影方法进行运算。首先分别对左右两边进行三维傅里叶变换^[7]：

$$\begin{aligned} FT_{\sigma}(X, Y, \tau) &= F\{h * T_{\gamma}(x, y, \sqrt{v})\} \\ &= HF\{T_{\gamma}(x, y, \sqrt{v})\} \end{aligned} \quad (3)$$

式中， T_{σ} 和 T_{γ} 分别对应于式(2)中探测信号和散射截面的函数。然后引入滤波函数 $G(H)$ ：

$$T_{\gamma}(x, y, \sqrt{v}) = F^{-1}[G(H)]F\{T_{\sigma}(X, Y, \tau)\} \quad (4)$$

这样即可还原散射截面的空间分布，而滤波函数采用维纳滤波^[8]：

$$G(H) = \left(\frac{1}{\hat{H}}\right) \frac{\hat{H}^2}{\hat{H}^2 + k} \quad (5)$$

式中， $\hat{H}$ 为三维卷积核的傅里叶函数； k 反比

于系统的信噪比，这里取0.0025。

2 过程模拟与结果讨论

采用 Matlab 软件来实现该成像系统的仿真：构建 32×32 的探测点，曝光时间为1 s。由于反射系数小以及长距离衰减等因素，得到的飞行时间谱很微弱。采用上文描述的滤波反卷积方法可以得到一个二维面的还原图。图3所示为由该矩形面反投影后得到的一个球形曲面。此时还需根据式(2)中的坐标变换来最终还原矩形面。图4则给出了一个完整的探测和重建过程。首先对物体散射光的飞行时间谱进行反投影变换，然后对其进行坐标还原，最终得到包含深度信息的重建图像。通过分析整个过程可知，该成像系统的分辨率由探测器阵列的密度和时间分辨率决定。

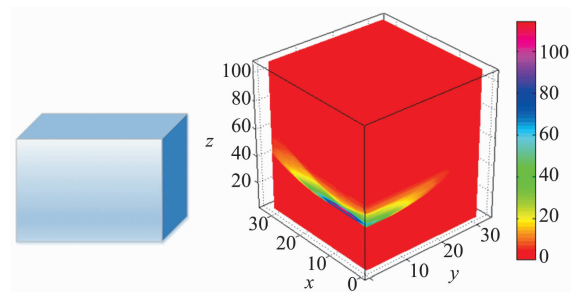


图3 由矩形面反投影为空间中的一个球形曲面

3 结束语

本文提出了一种新的简化了散射路径的聚焦凝视型非视域成像系统。基于 SPAD 阵列，通过一次发射和采样信号可以完成对隐藏物体的成像。一方面减少了整个过程所需的时间，另一方面使得滤波反投影的计算复杂度降低，因此更易实现快速还原被探测体的散射截面分布的目的。下一步的工作将围绕更复杂的被探测物体三维表面继续优化三维滤波反卷积算法。

参考文献

- [1] 王雪峰, 陈兴酥, 苏金善, 等. 非视域成像系统的研究现状与进展 [J]. 红外技术, 2017, 39(1): 8-13.

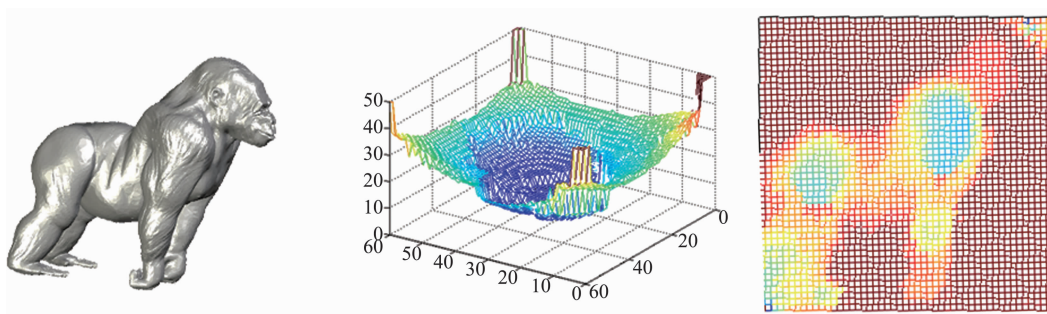


图 4 从左到右分别为被探测物体、墙体面回波的光强三维分布图和经过反投影与坐标变换后的重建图像

- [2] 许凯达, 金伟其, 刘敬, 等. 基于激光距离选通成像的非视域成像应用 [J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(8): 2073–2078.
- [3] Mauro B, Jessica Z, Alberto T, et al. Non-line-of-sight Imaging Using a Time-gated Single Photon Avalanche Diode [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(16): 20997–21011.
- [4] Jin C F, Xie J H, Zhang S Q, et al. Reconstruction of Multiple Non-line-of-sight Objects Using Back Projection Based on Ellipsoid Mode Decomposition [J]. *arXiv*:1805.04518, 2018.
- [5] Buttafava M. Non-line-of-sight Imaging Using a Time-gated Single Photon Avalanche Diode [J]. *Opt Express*, 2015, **23**: 20997–21011.
- [6] O'Toole M, Lindell D B, Wetzstein G. Confocal Non-line-of-sight Imaging Based on the Light-cone Transform [J]. *Nature*, 2018, **555**: 338–341.
- [7] 曹嘉豪, 李春来, 金健, 等. 超分辨率重建算法在热红外图像中的应用 [J]. *红外*, 2016, **37**(5): 27–32.
- [8] Wiener Norbert. Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series [M]. New York: John Wiley & Sons, 1949.