

基于光子计数的自适应深度成像方法

林 杰 何伟基 叶 凌 方 剑 陈 钱 顾国华

南京理工大学光电技术系, 江苏 南京 210094

摘要 单光子探测器具有高灵敏度和快速响应的特性,但在目标特性未知的情况下,无法直接确定每个像素点所需要的采样积分时间。因此,由于目标表面结构特性和反射率差异,探测器的距离估计值会出现采样不足或是采样饱和的现象。提出一种基于光子计数的自适应快速深度成像方法。该方法利用噪声光子和信号光子的飞行时间的不同特性,改进传统的基于最大似然估计算法的成像模型,自适应决定每个像素点的采样积分时间,并估计其最佳深度信息。实验结果表明,即使在低信噪比条件下,相比于固定采样积分时间成像方法,此算法仍能够更快、更准确重构出目标的深度图像。

关键词 探测器;单光子探测器;自适应成像方法;深度图像;光子计数

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1011001

Photon-Counting Adaptive Depth Imaging Strategy

Lin Jie He Weiji Ye Ling Fang Jian Chen Qian Gu Guohua

Department of Optoelectronic Technology, Nanjing University of Sciences and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract Conventionally, for a direct-detection 3D imaging light detection and ranging (LIDAR) system, it's impossible to directly and accurately determine the pixel-wise signal-acquisition time in the case that the scene properties are unknown. Thus, a time-of-flight depth sensor produces noisy range data due to different scene properties such as surface materials and reflectivity, frequently including either a saturated or severely noisy depth estimated. A photon-counting adaptive depth imaging strategy for 3D imaging LIDAR is presented. By improving the traditional imaging model based on the maximum likelihood estimation algorithm, an appropriate signal-acquisition time is adaptively selected, and then determine an optimal depth for each pixel. Experiment demonstrates that the proposed algorithm can be more quick and more accurate to reconstruct the scene depth images even in the low light-level environment.

Key words detectors; single photon detector; adaptive imaging method; depth image; photon counting

OCIS codes 110.6880; 040.1345; 030.5260; 110.4280

1 引 言

主动式三维成像激光雷达技术,具有广泛的应用范围,包括机器视觉、工业模式设计和军事目标识别与跟踪等^[1-2]。目前,获取目标三维结构和深度信息的方法有主动、被动等多种方式^[3];其中,利用盖革模式雪崩光电二极管^[4]作为探测器的传统主动式三维成像激光雷达系统^[5-6],是通过长时间采样积分生成光子计数直方图的方式,获取目标的三维结构和深度信息,其中三维结构和深度信息分别对应光子计数直方图的幅度和峰值位置。因此,为了准确估计目标的三维结构和深度信息,每个像素点需要探测到 $10^3\sim 10^6$ 个光子;且激光光斑在每个像素点上的采样积分时间是预设固定值。然而,对于未知的复杂目标场景来说,没有任何先验知识确定所需要的采样积分时间;且不同反射率特性的目标所需要的采样积分时间也不相同,即低反射率目标需要较长的采样积分时间,以减小光子探测过程泊松噪声的影响;而高反射率目标需要的采样积分

收稿日期: 2015-04-27; 收到修改稿日期: 2015-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(61271332),中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(30920140112012),高维信息、智能感知与系统教育部重点实验室创新基金项目(JYB201509)

作者简介: 林 杰(1990—),男,硕士研究生,主要从事单光子探测方面的研究。E-mail: 609505361@qq.com

导师简介: 何伟基(1981—),男,博士,副教授,主要从事微光成像器件机理及应用方面研究。

E-mail: hewj@mail.njust.edu.cn(通信联系人)

时间则相对较短。因此,固定采样积分时间的成像方法^[7],在没有任何有关目标先验知识的情况下,要么出现采样不足,要么出现采样饱和的现象,即采样积分时间增加到某一值后,系统估计精度收敛在某一值附近变化,且不依赖至少不明显依赖于采样积分时间。

Shim等^[8]采用混合曝光时间的方法,通过融合不同曝光条件下获取的目标信息,估计每个像素点的最佳深度信息;Kirmani等^[9]利用第一个探测到的回波光光子,结合目标相邻区域具有的空间相关性获取目标的深度图像和反射率图像;在其后续工作中^[10-11],为了适用于面阵探测器,对首光子成像策略做了改进,包括利用在每个像素点处固定发射 N 个脉冲的方法,估计目标的深度图像和反射率图像。

针对上述问题,本文提出了一种基于光子计数的自适应快速深度成像方法。所用算法根据噪声光子和信号光子这两类不同权重探测光子的飞行时间所具有的不同特性,分别采取不同的处理策略,通过改进传统的基于最大似然估计算法的成像模型,自适应决定每个像素点的采样积分时间,并估计其最佳深度信息。而且,此算法避免了传统的基于最大似然估计算法的成像模型中生成光子计数直方图的过程。理论分析和实验结果证明,即使在低信噪比条件下,本算法仍能够更快、更准确地重构出目标的深度图像。

2 成像概率模型分析

2.1 概率模型

提出算法的成像系统模型如图1所示,像素点 (i,j) 到探测器的距离记为 $z_{i,j}$,反射率记为 $\alpha_{i,j}$,激光脉冲重复周期记为 T_r ,脉宽为 T_p 。

假设探测过程中,每个探测周期的噪声光子计数恒定不变,记为 $B = (b_\lambda + d)T_r$,其中 b_λ 、 d 分别为背景噪声光子计数率和暗电流噪声光子计数率;目标反射激光脉冲回波的总的信号光子计数记为 $S_{i,j} = \int \alpha_{i,j} s(t - 2z_{i,j}/c) dt$,其中 $s(t)$ 为发射激光脉冲波形,则探测器接收到的总的光子计数率为 $r_{i,j}(t) = \alpha_{i,j} s(t - 2z_{i,j}/c) + (b_\lambda + d)$ 。根据盖革模式单光子探测器的泊松统计过程^[12-13],可推导出单个探测周期中探测器没有响应的概率为

$$P_{0i,j} = \exp\left[-\int_0^{T_r} r_{i,j}(t) dt\right] = \exp(-S_{i,j} - BT_r). \quad (1)$$

假设目标回波均匀分布在单个时间单元 $[t_{i,j}, t_{i,j} + \Delta]$ 内,其中, $t_{i,j}$ 为目标反射激光脉冲回波的信号光子的飞行时间,被标记在宽度为 Δ 的时间单元内。则在该探测周期中探测器探测到信号光子的探测概率和虚警概率分别为

$$P_{Di,j} = \frac{1}{1 - P_{0i,j}} \times \exp\left[-\int_0^{t_{i,j}} r_{i,j}(t) dt\right] \times \exp\left[\int_{t_{i,j}}^{t_{i,j} + \Delta} r_{i,j}(t) dt\right] \approx \frac{S_{i,j}}{S_{i,j} + BT_r}, \quad (2)$$

$$P_{Fi,j} = 1 - \exp(-S_{i,j} - BT_r) - P_{Di,j} \approx \frac{BT_r}{S_{i,j} + BT_r}. \quad (3)$$

传统的基于最大似然估计算法的成像模型是以单个探测光子为最小单元,通过长时间采样累积生成光子计数直方图(更大的光子单元集)的方式,估计目标深度信息;且对信号光子和噪声光子这两类不同权重的探测光子采用同样的处理策略。然而,单个探测光子所携带的信息,往往不足以确定其为噪声光子响应还是信号光子响应。但是,噪声光子的飞行时间在整个探测周期 $[0, T_r]$ 内,服从均匀分布,且相互独立;而目标反射激光脉冲的回波光光子,即信号光子的飞行时间,具有很强的时间相关性,且集中分布在相对较窄的时间区间 $[t_{i,j} - T_p/2, t_{i,j} + T_p/2]$ 内,其中, $T_p \ll T_r$ 。因此,在像素点 (i,j) 的探测过程中,以连续探测到的 n 个相邻光子为单元,其探测时间集记为 $\{t_{i,j}^l\}_{l=1}^n$,利用信号光子间的时间相关性,判定该光子单元是噪声光子响应,还是信号光子响应。该光子单元 $\{t_{i,j}^l\}_{l=1}^n$ 的顺序绝对偏差定义如下

$$|t_{i,j}^1 - t_{i,j}^2|, \dots, |t_{i,j}^{l-1} - t_{i,j}^l|, \dots, |t_{i,j}^{n-1} - t_{i,j}^n|. \quad (4)$$

如果 $f_{\text{ROAD}}(i,j)$ 满足

$$f_{\text{ROAD}}(i,j) = \sum_{l=1}^{n-1} |t_{i,j}^l - t_{i,j}^{l+1}| \leq (n-1)T_p, \quad (5)$$

则记该光子单元的整体飞行时间为

$$T_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n t_{ij}^l, \quad (6)$$

且判定 T_{ij} 为信号光子响应。由 $\{t_{ij}^l\}_{l=1}^n \sim B(n, P_{Dij})$, 结合(2)式和(3)式可以推导出该光子单元为信号光子响应的探测概率和虚警概率分别为

$$P_{D_{Ai,j}} = \prod_{l=1}^n P_{Di,j}, \quad (7)$$

$$P_{F_{Ai,j}} = \sum_{k=1}^n \binom{n}{k} P_{Di,j}^{n-k} P_{Fi,j}^k = \frac{1}{(BT_r + S_{ij})^n} \sum_{k=1}^n (BT_r)^k S_{ij}^{n-k} = \frac{BT_r}{BT_r + S_{ij}} \times \frac{1}{(BT_r + S_{ij})^{n-1}} \sum_{k=0}^{n-1} (BT_r)^k S_{ij}^{n-1-k} =$$

$$P_{Fi,j} \times \left(1 - \frac{1}{(BT_r + S_{ij})^{n-1}} \sum_{k=1}^{n-2} k (BT_r)^k S_{ij}^{n-2-k} \right) < P_{Fi,j} \quad (8)$$

由(8)式可知,此算法降低了虚警概率。且此算法对判定为噪声光子响应和信号光子响应这两类不同权重的探测光子,分别采取不同的处理策略,忽略第一类权重光子,仅对第二类权重光子 $\{T_{ij}\}$ 处理,则探测器接受到的光子的响应时间 $T_{ij} \in [t_{ij} - T_p/2, t_{ij} + T_p/2]$ 。由此可知,信号光子的飞行时间的方差为 T_p^2 , 即其估计精度受激光脉宽的影响。因此,选取初始探测到的被判定为信号光子 T_{ij} 为标准,记为 T_{ij}^c , 对后续探测到的回波光子的飞行时间,进行顺序检测,并利用后续探测到的被判定为信号光子的飞行时间对该标准实时更新,

$$|t_{ij} - T_{ij}^c| \leq T_p, \quad (9)$$

$$T_{ij}^c = \frac{1}{K+1} \sum_{j=1}^K (T_{ij}^c + t_{ij}), \quad (10)$$

式中 K 为阈值,表示每个像素点采集到的信号光子集大小。若 t_{ij} 满足(9)式,则判定为信号光子。(10)式表明,随着 K 值增大,标准 T_{ij}^c 为信号光子响应的概率逐渐增大,且 $K \rightarrow +\infty$ 时, T_{ij}^c 趋近目标的真实值。因此,后续选取的信号光子可信度越来越高,即后续探测到的被判定为信号光子的飞行时间集中分布在更小的时间区间内,其区间宽度 $T_{pA} \leq T_p$ 。记采集到的光子集为 $\{T_{ij}^l\}_{l=1}^K$, 则所用算法的深度估计值为

$$\bar{z}_{ij}^A = \frac{c}{2} \sum_{l=1}^K p^l T_{ij}^l / K, \quad (11)$$

式中 p^l 为对应光子 T_{ij}^l 的权值,表示其可信度。由于在每个像素点处采集到的光子计数 K 均为信号光子,其飞

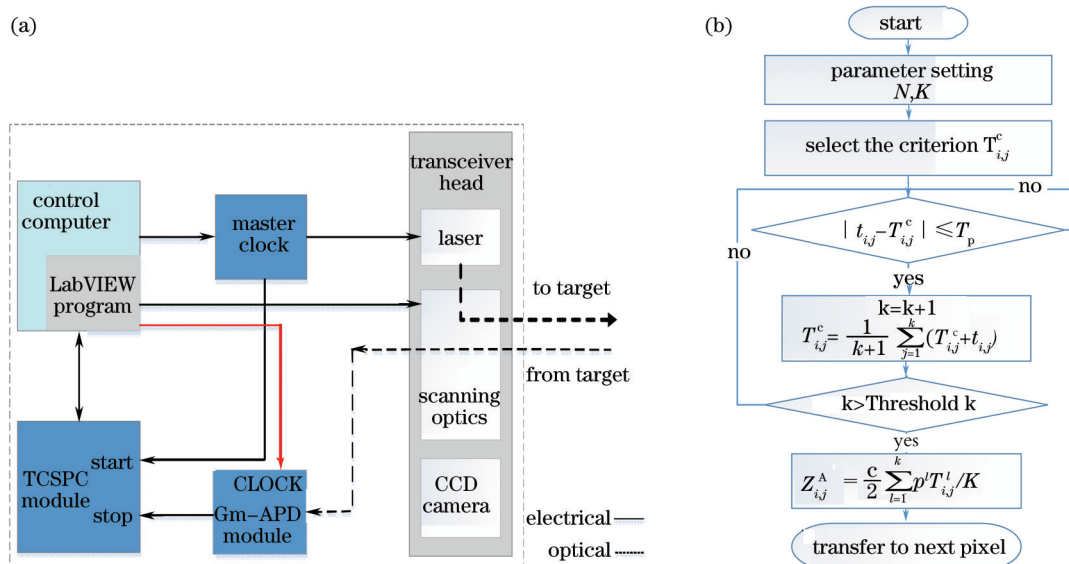


图1 算法原理。(a)自适应成像系统原理框图;(b)算法流程图

Fig.1 Working principle. (a) Schematic diagram of adaptive imaging system; (b) flow chart of adopted algorithm

行时间 $T_{i,j} \in [t_{i,j} - T_{pA}/2, t_{i,j} + T_{pA}/2]$, 飞行时间方差为 T_{pA}^2 , 因此, 算法距离估计精度较为稳定, 不随噪声和目标反射率变化, 其距离估计精度在区间 $(0, cT_{pA}^2/2]$, 当 $K=1$ 时, 取得距离精度估计上限 $cT_{pA}^2/2$, 由(9)~(11)式分析可知, 在激光脉冲宽度一定时, 算法估计精度随阈值 K 增大而单调递减。

2.2 信噪比分析

发射激光脉冲近似高斯波形^[14],

$$P_e(t) = \frac{E_l}{\tau_c \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\tau_c^2}\right), \quad (12)$$

式中 E_l 为发射激光脉冲能量。那么, 在存在背景噪声情况下, 探测器接收到的目标反射激光脉冲回波波形为

$$P_r(t) = \frac{E_l T_a^2 T_o \eta_D \rho_r}{\tau_r \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2\tau_r^2} \left(t - \frac{2R}{c}\right)^2\right] + P_{bg} + P_{dark}, \quad (13)$$

式中 T_a 为大气传输系数, T_o 为接收系统的光学传输系数, η_D 为探测器的量子效率, ρ_r 为目标反射率, P_{bg} 为背景噪声项, P_{dark} 为暗电流噪声项。由于所用算法在数据获取阶段实时排除噪声光子响应, 只保留信号光子进行后续处理, 因此, 探测器接收到的目标回波为

$$P_{rA}(t) = \frac{E_l T_a^2 T_o \eta_D \rho_r}{\tau_r \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2\tau_r^2} \left(t - \frac{2R}{c}\right)^2\right]. \quad (14)$$

信噪比(SNR)是成像系统的一项重要性能指标, 定义为^[15]

$$f_{SNR} = \frac{\rho_D^2 \langle P_r \rangle^2}{\langle \sigma_n \rangle^2} = \frac{\rho_D^2 \langle P_{rA} \rangle^2}{2eB(\rho_D \langle P_r \rangle) + \rho_D(P_{bg} + P_{dark}) + 4KTB/R_{TH}}, \quad (15)$$

式中 ρ_D 为探测器响应率, $\langle P_r \rangle$ 为 $P_r(t)$ 的有效值, $\langle \sigma_n \rangle$ 为系统总的噪声均方根。由于排除了噪声光子, 因此, 系统的总的噪声为

$$\langle \sigma_{nA} \rangle^2 = 2eB(\rho_D \langle P_{rA} \rangle) + 4KTB/R_{TH}, \quad (16)$$

由此可知, 得到的信噪比为

$$f_{SNR}^{our} = \frac{\rho_D^2 \langle P_{rA} \rangle^2}{\langle \sigma_{nA} \rangle^2} = \frac{\rho_D^2 \langle P_{rA} \rangle^2}{2eB(\rho_D \langle P_{rA} \rangle) + 4KTB/R_{TH}}. \quad (17)$$

对比(15)式和(17)式可知, 本算法提高了信噪比。

3 实验结果

实验系统如图2(a)示, 激光光源波长为 830 nm, 激光脉冲重复周期 $T_r = 400$ ns, 脉宽 T_p 为 270 ps 左右, 探测器时间为 50 ps 左右, 通过偏转振镜扫描成像 256×256 个像素点, 系统详细描述见文献[16](系与本人同一个实验室); 图2(b)为实验选取的目标场景, 包括几个不同表面特性的目标, 均靠墙放置, 距离探测器 20 m 左右。其中区域1(墙)和区域2(表面覆盖黑布的纸箱)分别为高反射率和低反射率细节部分。

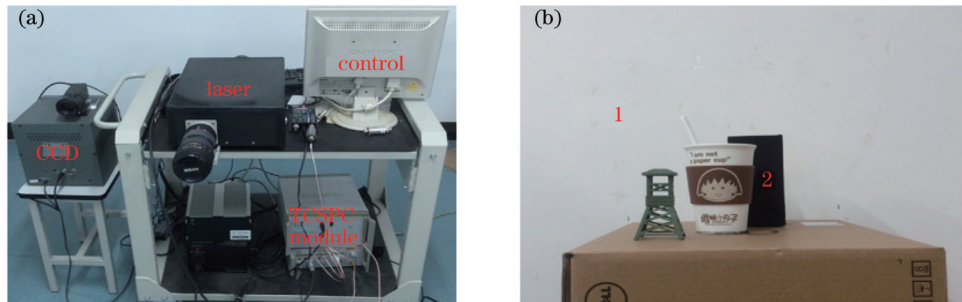


图2 实验系统。(a)实验仪器; (b)目标场景, 细节1为高反射率区域(墙), 细节2为低反射率区域(表面覆盖黑布的纸箱)

Fig.2 Imaging system. (a) Laboratory apparatus; (b) interesting target, area 1 and area 2 indicate high reflectivity (wall) and low reflectivity (carton covered with black cloth) details, respectively

固定采样积分时间成像方法获取的目标场景深度图像如图3所示。实验结果表明,采样积分时间较短时,由于噪声光子的影响,该方法无法准确估计目标的深度信息;随着采样积分时间的增加,深度估计精度随之增加,但目标场景中不同表面特性的目标区域表现出不同的特性:由于不同表面特性的目标回波光光子数差异,在采样时间增加到某一值时,高反射率区域到达饱和($t=5$ ms)状态,而低反射率区域表现出采样不足;此时若继续增加采样时间,虽然能够增加低反射率区域的深度估计精度,但会引起高反射率区域采样过剩。因此,对于复杂目标场景来说,固定采样积分时间方法无法直接确定准确的采样时间,要么出现采样不足,要么出现采样饱和的现象,且易受噪声影响,需要足够长的采样积分时间以减小噪声影响,不适用于实时的低信噪比应用场合。

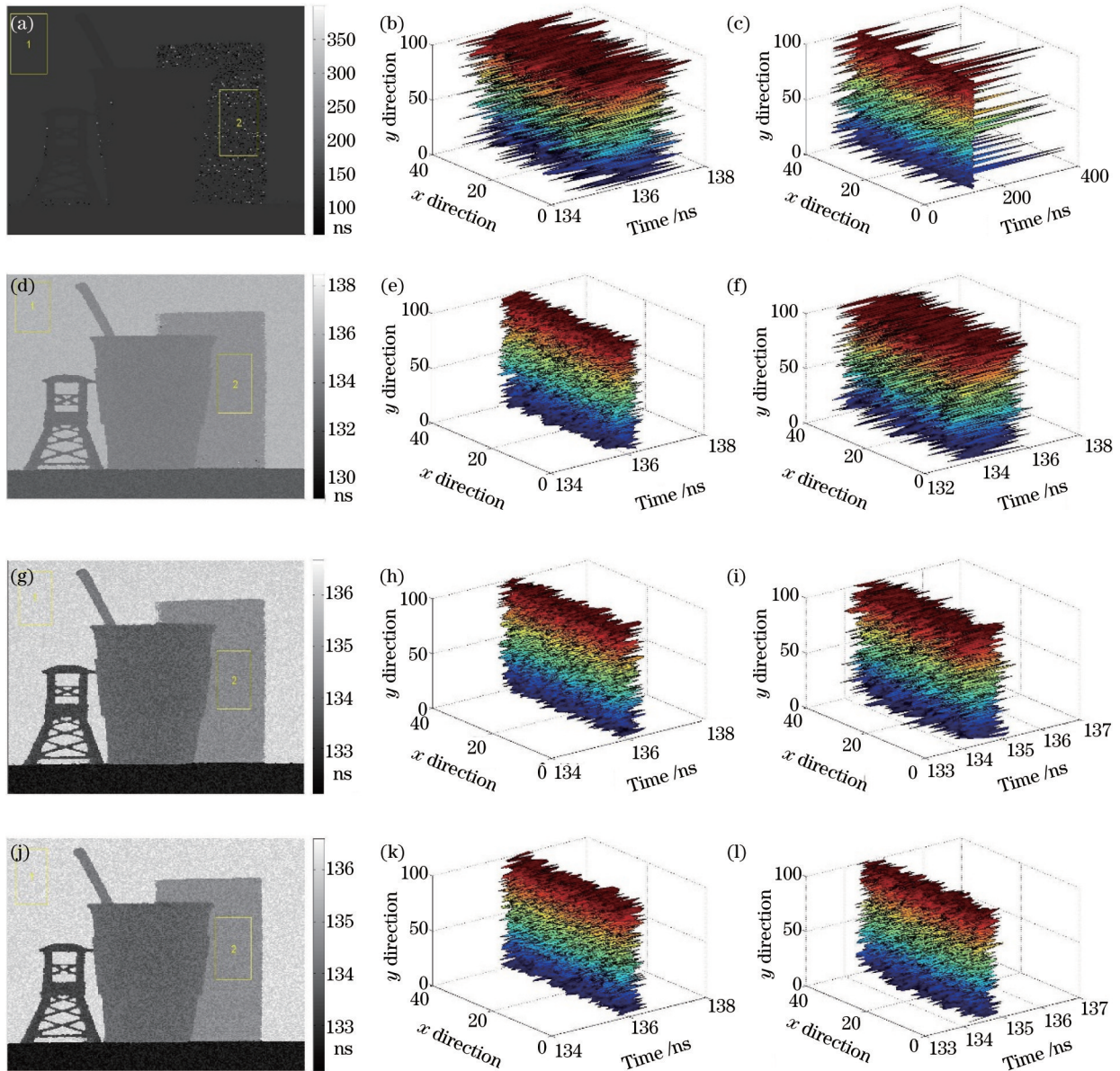


图3 固定采样积分时间成像方法的实验结果。(a)、(d)、(g)、(j) 采样积分时间为0.5、5、10和20 ms时获取的目标深度图像;
(b)、(e)、(h)、(k)区域1的细节;(c)、(f)、(i)、(l)区域2的细节

Fig.3 Results of fixed acquisition time imaging method. (a), (d), (g), (j) Scene depth images with acquisition time set to be 0.5, 5, 10 and 20 ms; (b), (e), (h), (k) details of area 1; (c), (f), (i), (l) details of area 2

自适应深度成像方法获取的目标场景的深度图像如图4所示。实验结果表明,即使在存在噪声情况下,此算法仍能够准确地获取目标的深度图像,如图4(a)所示;且对于低反射率区域,特别是目标边缘区域,也能

够准确地估计其深度信息,如图4(c)、(d)所示。从图4(b)可以看出自适应算法的采样时间分布。对于低反射率区域,特别是边缘细节部分,所需要的采样时间较长;而高反射率区域,如平滑部分,所需要的采样积分时间相对较短,这样就能够避免在固定采样积分时间成像方法中出现的采样饱和或采样不足的现象,自适应地选取每个像素点的最佳采样时间。

如表1所示,从成像时间 T_a 和成像精度 f_{RMSE} 两方面,对比所用算法与固定采样积分时间方法的性能差异。对于前者, T_a 为每个像素点的平均采样积分时间;对于后者, T_a 为预设的每个像素点的固定采样积分时间。实验结果表明,在 T_a 相近的条件下,所采用算法获取的深度估计精度较高,而固定采样时间方法无法准确估计目标的深度信息;在深度估计精度等级相近的条件下,固定采样时间方法需要的采样时间较长。从表1还可以看出,所采用算法的 f_{RMSE} 随着阈值 K 的增加而提高。可知,所用算法能够更快、更准确地重构出目标的深度图像。

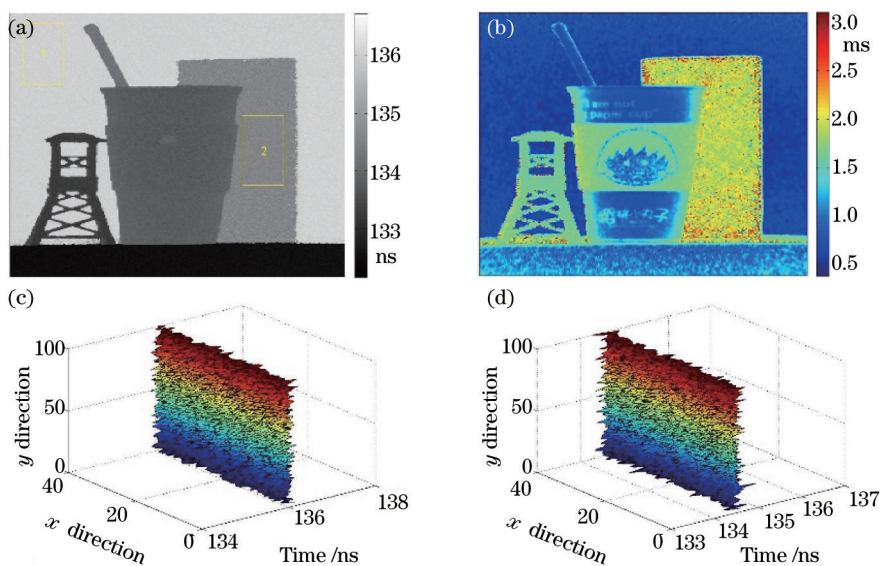


图4 自适应成像方法的实验结果。(a) $K=20$ 时估计的目标深度图像;(b) 每个像素点的采样积分时间分布;
(c)、(d) 深度图像中区域1和区域2的细节

Fig.4 Results of adaptive imaging method. (a) Scene depth image with $K=20$; (b) acquisition time needed in each pixel;
(c)、(d) details of area 1 and area 2

表1 结果对比

Table 1 Comparison of adaptive method and traditional method

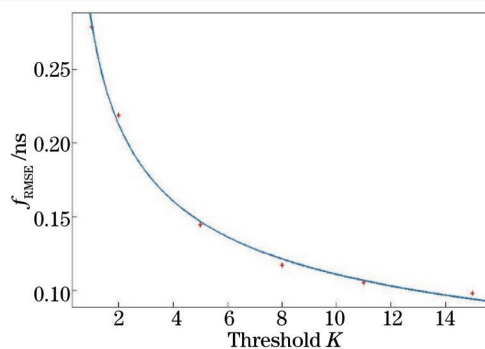
Imaging method	f_{RMSE} /ns	T_a /ms
Tradition method	6.9277	1.5
Adaptive method	0.2949	20
	0.0966	1.1017

算法深度估计精度 f_{RMSE} 随阈值 K 的变化如表2和图4所示,实验过程中,选取时域2-领域,即以 $n=3$ 为单元估计目标的先验信息。从实验结果可以看出,随着阈值 K 的增大,算法深度估计精度 f_{RMSE} 单调递减,阈值 K 与估计精度的变化关系近似为 $f_{RMSE} \propto 1/\sqrt{K}$;但每个像素点的平均采样积分时间随之增加。

表2 阈值分析

Table 2 Analysis of threshold

Threshold K	f_{RMSE} /ns	T_a /ms
1	0.2793	0.0940
5	0.1447	0.3233
20	0.0966	1.1017

图5 f_{RMSE} 随阈值 K 变化关系Fig.5 Relation of f_{RMSE} and threshold K

4 结 论

从理论分析和实验结果两方面证明了本算法的有效性。对于未知的复杂目标场景来说,固定采样积分时间成像方法无法直接准确估计每个像素点所需要的采样积分时间,且需要长的采样积分时间以减小低光子计数过程固有泊松噪声的影响,不适用于低信噪比和实时的应用场合;提出的基于光子计数的自适应快速深度成像方法,根据噪声光子和信号光子这两类不同权重光子所具有的特性,分别采取不同的处理策略,通过改进传统的基于ML的成像模型,自适应选取每个像素点的最佳采样时间,即使在高背景噪声的情况下,仍能够快速、准确重构出目标的深度图像,更加适用于实时快速的应用场合。

参 考 文 献

- 1 Zhao Mingbo, He Jun, Fu Qiang. Simulation modeling and analysis of full-waveform lidar signatures[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0628002.
赵明波, 何 峻, 付 强. 全波形激光雷达回波信号建模仿真与分析[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0628002.
- 2 Liu Zhengjun, Li Qi, Wang Qi. Target recognition of coherent lidar range image using feature selection[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0814003.
刘正君, 李 琦, 王 骥. 基于特征选择算法的相干激光雷达目标识别[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0814003.
- 3 Jiang Haijiao, Lai Jiancheng, Wang Chunyong, *et al.*. Research on ranging property of laser radar and its range accuracy[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0514001.
姜海娇, 来建成, 王春勇, 等. 激光雷达的测距特性及其测距精度研究[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0514001.
- 4 Xu Lu, Zhang Yu, Zhang Yong, *et al.*. Research on the detection performance of Geiger-mode APD laser radar with accumulated detection[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0414003.
徐 璐, 张 宇, 张 勇, 等. 盖革模式雪崩光电二极管激光雷达累积探测性能的研究[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0414003.
- 5 A McCarthy, Ximing Ren, Adriano Della Frera, *et al.*. Kilometer-range, high resolution depth imaging via 1560 nm wavelength single-photon detector[J]. Opt Express, 2013, 21(19): 8904-8915.
- 6 Philip A Hiskett, Colin S Parry, G S Buller, *et al.*. A photon-counting time-of-flight ranging technique developed for the avoidance of range ambiguity at gigahertz clock rates[J]. Opt Express, 2013, 16(18): 13685-13698.
- 7 A McCarthy, R J Collins, N J Krichel, *et al.*. Long-range time-of-flight scanning sensor based on high-speed time-correlated single-photon counting[J]. Appl Opt, 2009, 48(32): 6241-6251.
- 8 Hyunjung Shim, Seungkyu Lee. Hybrid exposure for depth imaging of a time-of-flight depth sensor[J]. Opt Express, 2014, 22(11): 13393-13402.
- 9 Ahmed Kirmani, Dheera Venkatraman, Dongeek Skin, *et al.*. First-photon imaging[J]. Science, 2014, 343(3): 58-61.
- 10 Ahmed Kirmani, Dheera Venkatraman, Dongeek Skin, *et al.*. Spatio-temporal regularization for range imaging with high photon efficiency[C]. SPIE, 2013, 8858: 88581F.
- 11 Ahmed Kirmani, Dheera Venkatraman, Dongeek Skin, *et al.*. Parametric Poisson process imaging[J]. IEEE, 2013: 1053-1056.
- 12 Markus Henriksson. Detection probabilities for photon-counting avalanche photodiodes applied to a laser radar system[J]. Appl Opt, 2005, 44(24): 5140-5147.

- 13 Daniel G Fouche. Detection and false-alarm probabilities for laser radars that use Geiger-mode detectors[J]. Appl Opt, 2003, 42(27): 5388-5398.
- 14 R D Richmond, S C Cain. Direct-detection LADAR Systems[M]. USA: SPIE Press, 2010.
- 15 P F McManamon. Errata: Review of ladar: a historic, yet emerging, sensor technology with rich phenomenology[J]. Opt Engineering, 2012, 51(6): 060901.
- 16 Sima Boyu. Photon-Counting Laser Radar 3D Imaging System Design and Implementation[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
司马博羽. 光子计数激光雷达三维成像系统设计和实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.

栏目编辑: 刘丰瑞