

## 基于单光子计数三维成像的目标姿态获取方法

张瀚夫<sup>1,2</sup>, 刘杰<sup>1,3,4</sup>, 安其昌<sup>1,3\*\*</sup>, 王建立<sup>1,2,3,4\*</sup><sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光电探测技术研究部, 吉林 长春 130033;<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;<sup>3</sup>吉林省智能波前传感与控制重点实验室, 吉林 长春 130033;<sup>4</sup>中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室, 江苏 南京 210008

**摘要** 单光子计数成像技术在暗弱目标探测、激光遥感、自动驾驶等领域均展现出了极大的应用潜力。为了探究如何利用该技术得到更多维度的目标信息,提出并验证了一种获取目标姿态的方法。将目标处于不同姿态时的单光子计数三维成像图(深度图)建成数据库,作为先验信息,通过求取库中图像与目标实际的单光子计数成像深度图(姿态未知)的相关系数,选取相关性最强的库中姿态作为目标实际姿态。采用单光子阵列探测器搭建实验系统,激光发散照明目标,以 $20^\circ$ 为单位构建数据库中的 $-60^\circ$ 至 $40^\circ$ 的目标深度图。结合库中数据与姿态分别处于 $-45^\circ$ 和 $25^\circ$ 时的目标深度图,利用所提方法估计目标姿态并验证其准确性。在该两种姿态下,分别做出光子计数为10,50,100时的深度图,以探究目标实际姿态与库中对应姿态的相似度和光子计数间的关系。以 $15^\circ$ 和 $20^\circ$ 为单位对目标进行多轴旋转,以探究目标进行多轴姿态变化时所提方法的可行性。改变背景噪声,在信号光子与背景光子数比值(SBR)分别为8.13,4.83,3.21,0.72的条件下对目标进行三维成像,探究背景噪声对估计成功率的影响。以木头人玩具为目标,以 $30^\circ$ 为单位建立数据库,对处于 $-20^\circ$ 和 $20^\circ$ 的木头人玩具进行成像并验证所提方法对复杂目标姿态估计的可行性。实验结果表明:所提方法可成功对目标实际姿态进行估计。目标实际姿态与库中对应姿态的相关性和光子计数成正相关,高SBR有利于准确估计目标姿态。

**关键词** 三维成像; 激光雷达; 姿态估计; 时间相关单光子计数

中图分类号 TN29

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230496

## Single-Photon Counting 3D Imaging-Based Target Attitude Acquisition

Zhang Hanfu<sup>1,2</sup>, Liu Jie<sup>1,3,4</sup>, An Qichang<sup>1,3\*\*</sup>, Wang Jianli<sup>1,2,3,4\*</sup><sup>1</sup>Photoelectric Detection Technology Research Department, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, 130033, Jilin, China;<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;<sup>3</sup>Jilin Key Laboratory of Intelligent Wavefront Sensing and Control, Changchun, 130033, Jilin, China;<sup>4</sup>Key Laboratory of Space Object and Debris Observation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, Jiangsu, China

**Abstract** Single-photon counting imaging technology has demonstrated potential for applications in faint target detection, laser remote sensing, and automatic driving. Therefore, in order to explore it for obtaining more dimensional target information, a target attitude acquisition method is proposed and verified. The single-photon counting three dimensional (3D) images (depth images) of the target in different attitudes are built into a database as a priori information. By calculating the correlation coefficient between the database image and the actual single-photon counting image (unknown attitude) of the target, the most relevant attitude in the database is selected as the actual attitude. A single-photon array detector is then used to establish the experimental system, and the target is illuminated by a diverging laser. The target depth images with attitudes between  $-60^\circ$  to  $40^\circ$  in the database are constructed with  $20^\circ$  at increments. Combining database depth images and target depth images with attitudes of  $-45^\circ$  and  $25^\circ$ , the proposed method is used to estimate the target attitude as well as verify its accuracy. Under these two postures, depth images with photon counts of 10, 50, and

收稿日期: 2023-01-12; 修回日期: 2023-02-17; 录用日期: 2023-03-03; 网络首发日期: 2023-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(62135015,62005279)、国家重点研发计划(2020YFA0714102)、吉林省科技发展计划(20220402032GH)、中国科学院青年创新促进会(2020221)

通信作者: \*wangjianli@ciomp.ac.cn; \*\*anj@mail.ustc.edu.cn

100 are made, respectively, to explore the relationship between the similarity and photon count between the actual posture of the target and the corresponding posture in the database. The multi-axis rotation of the target was conducted at  $15^\circ$  and  $20^\circ$  to explore the proposed method's feasibility when the multi-axis change of target attitude occurs. To explore the influence of background noise on estimation success rate, the background noise was changed and 3D imaging was conducted for the target under the condition that the signal photon counts to background photon counts ratio (SBR) is 8.13, 4.83, 3.21, and 0.72, respectively. Using wood man as the target, the database is established with  $30^\circ$  as the unit, and the wood man at  $-20^\circ$  and  $20^\circ$  is imaged while the proposed method's feasibility for complex target attitude estimation is verified. Experimental results show that the proposed method can successfully estimate the actual attitude of the target. Meanwhile, correlation between the actual attitude of the target and the corresponding attitude in the database is positive with the photon count. High SBR is also conducive to accurate estimation of the target attitude.

**Key words** 3D imaging; lidar; attitude estimation; time-correlated single-photon counting

## 1 引言

近年来,随着对超远距离、暗弱目标等极限条件下成像的需求越来越高,激光雷达得到了快速的发展。激光主动照明成像不依赖环境光照,对暗弱目标进行探测具有天生的优势。为了最大限度地利用激光回波能量,单光子计数三维成像技术应运而生。结合时间相关单光子计数(TCSPC)技术,利用少量回波光光子即可计算出目标的深度信息<sup>[1-4]</sup>。目前,在相关领域国内外科研团队均进行了大量的科学研究。2014年,Kirmani等<sup>[5]</sup>采用首光子成像技术在实验室内对人体模型进行了深度像的生成。2015年,为了提高信号采集效率,Shin等<sup>[6]</sup>提出了可应用于阵列探测器的成像方法,将各像素信号采集时间固定,各像素累计多个信号光子,根据其所携带的时间信息进行单光子计数三维成像,成功在平均每像素信号光子计数(PPP)约为8.3时计算得到人头像的深度图。中国科技大学的徐飞虎教授团队成功对8.2 km外不同姿势的假人(PPP约为1~6)<sup>[7]</sup>、45 km外的建筑物(PPP约为2.6)<sup>[8]</sup>、201.3 km远的地形(PPP约为0.4)<sup>[9]</sup>进行三维成像。2021年,华东师范大学的吴光团队<sup>[10]</sup>利用波长为266 nm的激光器和硅基SPAD单光子探测器,成功实现了0~400 m距离的单光子计数三维成像,成像精度达22 mm。2023年,南京理工大学的李岩等<sup>[11]</sup>利用回波信号的时域相关性,提出了一种复杂场景下的激光雷达深度估计方法,并成功对140 m外的复杂场景进行了三维成像(PPP约为11.23)。随着日渐提高的感知需求,单光子测距的精度不断提高。2014年,Sjöqvist等<sup>[12]</sup>研制出高分辨率的激光测距及成像系统,该系统的测量精度小于厘米量级。2016年,中国科学院Li等<sup>[13]</sup>针对卫星激光测距,设计了基于532 nm波长的单光子测距系统,并成功对距离3000 km的目标卫星进行了测量,精度在8 mm。上述研究为通过单光子计数三维成像对目标进行姿态估计这一方法的实现提供了坚实的理论和应用基础。

目前,随着空间态势感知的需求不断提高,利用单光子探测技术对暗弱目标的姿态进行探测具有重大的

研究意义。目前通过单光子探测技术获取目标姿态的研究极少。2022年,天津大学的李致廷等<sup>[14]</sup>验证了激光回波光光子计数与目标姿态(旋转角度)具有相关性的结论,可通过光子计数匹配得到相应的目标姿态。但该方法在实验时仅仅采用单点照明,只能得到一个采样点的光子计数,且仅仅利用了光子计数这一维度的信息。当目标移动时,难以保证激光始终照射至目标同一位置,导致该方法的准确性下降。

为了克服上述问题,本文提出了一种新的利用单光子探测技术获取目标姿态的方法。搭建了单光子计数成像实验系统,通过成像算法成功得到目标的深度图。建立多个姿态的目标深度图所构成的数据库。利用库中先验信息与其他姿态的目标深度图做相关性对比,估计目标实际姿态信息。通过实验获得不同光子计数条件下的目标深度图,探究库中对应姿态和目标姿态的相似度与光子计数之间的联系,改变背景噪声,并探究了背景噪声对目标实际姿态估计成功率的影响。所提方法在暗弱目标的姿态感知等领域具有较大的应用潜力。

## 2 算法基本原理

### 2.1 目标姿态估计原理

为了充分利用激光回波信息,需对目标进行单光子计数三维成像。通过旋转目标,目标表面的深度变化体现在单光子技术三维成像图(深度图)各个像素所对应的深度上。利用各像素的深度变化对应识别目标的不同姿态。相比通过单点光子计数<sup>[14]</sup>求取目标姿态的方法,所提方法对激光回波光光子所携带的信息挖掘更充分,从单点扩展到了整个目标表面所包含的信息,不会因单点信息有噪声干扰而出现误差,所提方法鲁棒性更强。同时,所提方法利用了三个维度的信息,新增加了深度这一维度,将能够利用的信息维度扩展到了三维空间,所利用的信息更加丰富,有利于姿态估计。如图1所示,旋转目标,以获得不同姿态下的单光子计数三维成像图,并建立先验数据库。结合库中先验信息与目标实际的单光子计数三维成像图,求取二者间的相关系数,将系数最接近于1时所对应的库中

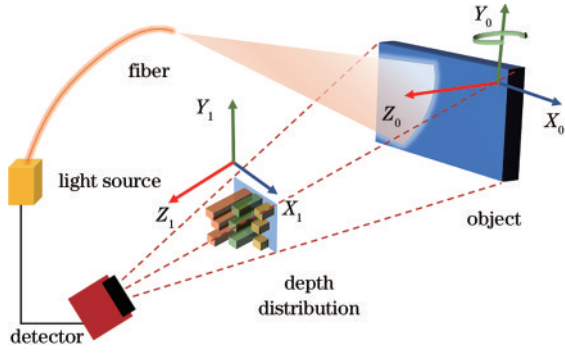


图 1 数据库建立原理

Fig. 1 Schematic of database establishment

姿态作为目标姿态。

## 2.2 单光子探测统计模型

探测器接收到的光子计数率为

$$\lambda_{x,y}(t) = \eta_{x,y}\gamma_{x,y}l(t - 2z_{x,y}/c) + \eta_{x,y}b_{x,y} + d_{x,y}, \quad (1)$$

式中:  $(x, y)$  代表深度图的像素坐标;  $b_{x,y}$  代表背景光子通量;  $d_{x,y}$  代表探测器暗计数率;  $z_{x,y}$  表示目标距离;  $l(t)$  代表激光脉冲光子通量;  $\eta_{x,y}$  代表探测器的量子效率;  $\gamma_{x,y}$  代表目标反射率,  $c$  代表光速。假设  $T_r$  代表脉冲周期, 则一个脉冲周期内的噪声光子数为

$$B_{x,y} = \int_0^{T_r} (\eta_{x,y}b_{x,y} + d_{x,y}) dt. \quad (2)$$

一个脉冲周期产生的总信号光子数为

$$L = \int_0^{T_r} l(t) dt. \quad (3)$$

假设光子计数为  $n_{x,y}$ , 一个脉冲周期内探测器接收到的光子数服从泊松分布<sup>[15]</sup>, 表达式为

$$P(n_{x,y} = i) = \frac{\left[ \eta_{x,y}\gamma_{x,y}L + \int_0^{T_r} (\eta_{x,y}b_{x,y} + d_{x,y}) dt \right]^i}{i!} \times \exp\left[ -\eta_{x,y}\gamma_{x,y}L - \int_0^{T_r} (\eta_{x,y}b_{x,y} + d_{x,y}) dt \right], \quad (4)$$

式中:  $i$  为一个脉冲周期内探测到的光子数。一个脉冲周期内没有探测到光子的概率为

$$P_0 = P(n_{x,y} = 0) = \exp\left[ -(\eta_{x,y}\gamma_{x,y}L + B_{x,y}) \right]. \quad (5)$$

由于探测器具有死区时间, 所以单光子探测器在  $(0, T_r]$  内最多仅有一个光子被探测到。故由  $N$  个激光脉冲探测到的光子计数  $m_{x,y}$  服从二项分布:

$$P(n_{x,y} = m_{x,y}) = C_N^{m_{x,y}} P_0^{N-m_{x,y}} [1 - P_0]^{m_{x,y}}. \quad (6)$$

$\omega$  表示第一个光子的到达时间, 其概率分布函数<sup>[6]</sup>为

$$F(\omega) = \frac{P[K(0, \omega) \geq 1]}{P[K(0, T_r) \geq 1]} = \frac{1 - P[K(0, \omega) = 0]}{1 - P[K(0, T_r) = 0]} = \frac{1 - \exp\left[ -\int_0^\omega \lambda_{x,y}(t) dt \right]}{1 - P_0}, \quad (7)$$

式中:  $K(0, \omega) = \int_0^\omega \lambda_{x,y}(t) dt$ ,  $K(0, T_r) = \int_0^{T_r} \lambda_{x,y}(t) dt$ 。

结合式(1)、式(5)、式(7), 在低光子通量的条件下, 光子到达时间的概率密度方程为

$$f_{T_{x,y}}(t_{x,y}; \gamma_{x,y}, z_{x,y}) = \frac{\eta_{x,y}\gamma_{x,y}L}{\eta_{x,y}\gamma_{x,y}L + B_{x,y}} \times \left[ \frac{l(t_{x,y} - 2z_{x,y}/c)}{L} \right] + \frac{B_{x,y}}{\eta_{x,y}\gamma_{x,y}L + B_{x,y}} \times \frac{1}{T_r}. \quad (8)$$

## 2.3 单光子计数三维成像算法

由式(8), 得到的目标深度的最大似然函数为

$$\hat{z}_{x,y}^{\text{ML}} = \arg \max \prod_{s=1}^{n_{x,y}} f_{T_{x,y}}(t_{x,y}^s; \gamma_{x,y}, z_{x,y}) = \arg \max \sum_{s=1}^{n_{x,y}} \log \left[ \eta_{x,y}\gamma_{x,y}l\left(t_{x,y}^s - \frac{2z_{x,y}}{c}\right) + \frac{B_{x,y}}{T_r} \right], \quad (9)$$

式中:  $\{t_{x,y}^s\}_{s=1}^{n_{x,y}}$  为光子到达时间数据集。式(9)与目标反射率  $\gamma_{x,y}$  有关, 但对于被探测的目标, 反射率  $\gamma_{x,y}$  不能直接获得, 故传统上利用对数匹配滤波估计  $z_{x,y}$ <sup>[16]</sup>, 结果为

$$\hat{z}_{x,y} = \arg \max \sum_{s=1}^{n_{x,y}} \log \left[ l(t_{x,y}^s - 2z_{x,y}/c) \right]. \quad (10)$$

## 2.4 相关系数计算

所提方法需根据库中姿态深度图与目标实际深度图的相关性来估计目标姿态, 相关程度通过计算二者深度的相关系数得到, 表达式为

$$r = \frac{\sum_x \sum_y (z_{1,x,y} - \bar{z}_1)(z_{2,x,y} - \bar{z}_2)}{\sqrt{\left[ \sum_x \sum_y (z_{1,x,y} - \bar{z}_1)^2 \right] \left[ \sum_x \sum_y (z_{2,x,y} - \bar{z}_2)^2 \right]}}, \quad (11)$$

式中:  $z_{1,x,y}$  和  $z_{2,x,y}$  分别代表两个深度图  $(x, y)$  像素的深度;  $\bar{z}_1$  和  $\bar{z}_2$  分别代表两个深度图各像素的平均深度。  $r$  值越接近 1, 深度图越相似。

## 3 实验装置

为了验证所提方法的可行性, 搭建成像系统, 如图 2 所示。在系统的发射端, 激光传输到光纤中并发

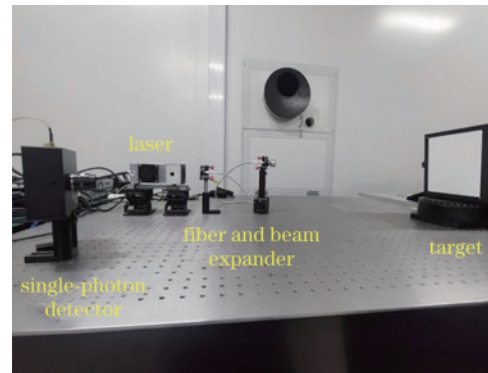


图 2 实验装置

Fig. 2 Experimental device

散以提高照明的灵活性。在接收端,采用单光子阵列探测器对激光回波信号光子进行探测。利用 FPGA 元件同步触发激光器及探测器。激光器波长为 637.5 nm。单光子阵列探测器采用 SPAD 技术,具有  $32 \times 32$  个像素,每个像素的有源区域直径为  $6.95 \mu\text{m}$ ,在 637.5 nm 波长下的量子效率约为 23%。阵列探测器的每个像素单独集成有时间数字转换器(TDC),精度为 55 ps。将目标放置在旋转台上,可利用旋转台改变目标的姿态。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 建立目标姿态信息数据库

将探测器采集的激光回波信号光子数据集与单光子计数三维成像算法相结合,得到目标深度图,以获取其三维信息。实验中以白板为目标,在旋转台上以  $20^\circ$  为单位旋转物体,不断改变目标姿态。对目标所有姿

态进行三维成像,实物拍摄图和成像图如图 3 所示。

将目标分别摆放在  $-45^\circ$  和  $25^\circ$  姿态上。在激光回波光子数分别为 10, 50, 100 的条件下分别对目标进行单光子计数三维成像,结果如图 4 所示。

### 4.2 目标姿态的获取

通过比较数据库中的深度图与目标位于  $-45^\circ$  和  $25^\circ$  姿态时的深度图,计算二者间的相关系数,如图 5(a) 所示。选取系数最接近 1 的库中姿态作为所估计的目标实际姿态。若所估计姿态为数据库姿态中最接近于目标实际姿态的,则认为估计成功。根据计算结果,估计姿态分别为  $-40^\circ$  和  $20^\circ$ ,估计成功率为 100%。

计算目标位于  $-45^\circ$  和  $25^\circ$  姿态,且光子计数分别为 10、50、100 时的深度图与数据库中对应的所估计姿态的深度图之间的相关系数,结果如图 5(b) 所示。观察图 5(b) 可知,光子计数越多,目标实际姿态与库中最接近姿态的相关性越强。

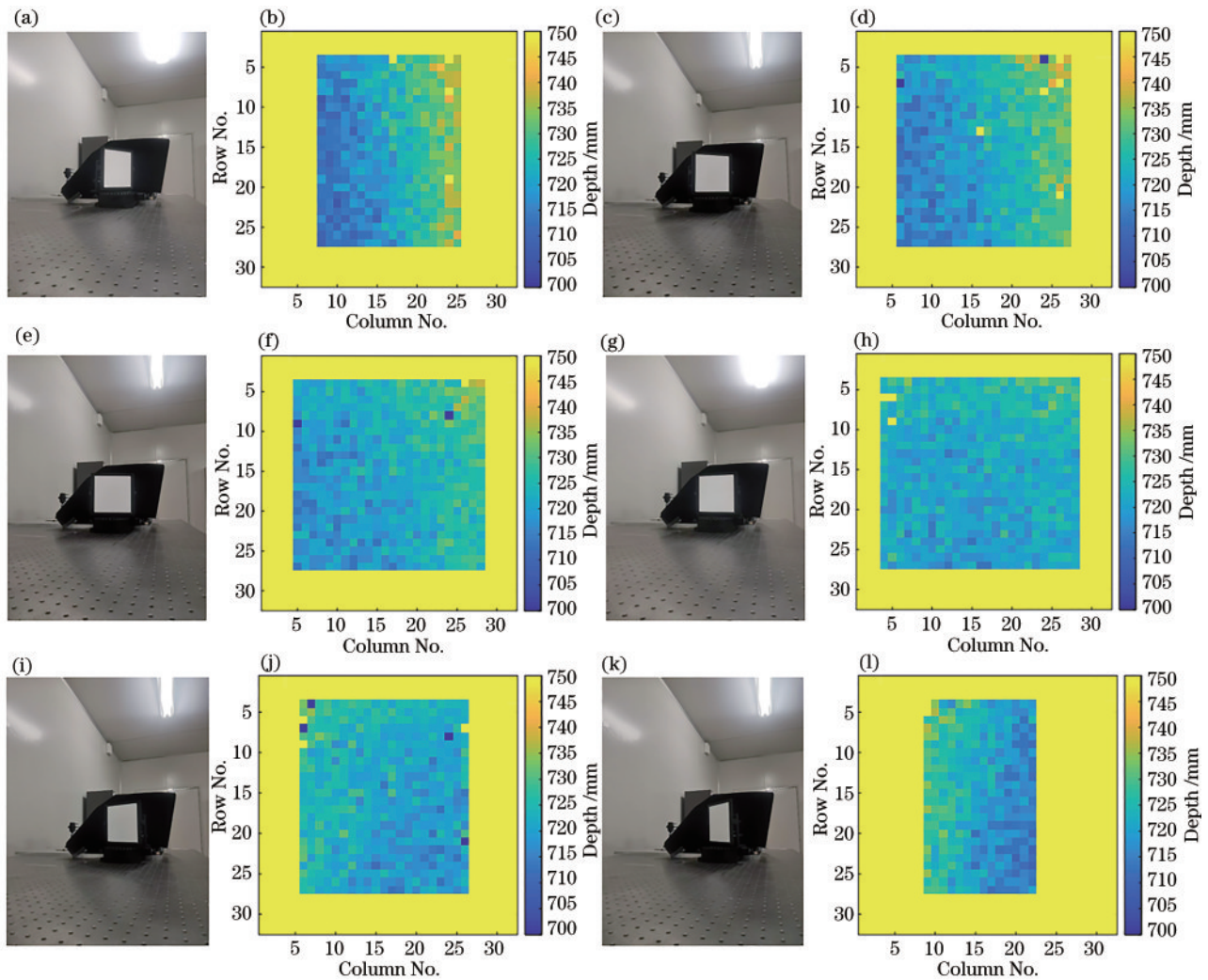


图 3 目标不同姿态下的实物图和深度图。(a)(b)  $-60^\circ$ ; (c)(d)  $-40^\circ$ ; (e)(f)  $-20^\circ$ ; (g)(h)  $0^\circ$ ; (i)(j)  $20^\circ$ ; (k)(l)  $40^\circ$

Fig. 3 Object images and depth images of target with different attitudes. (a)(b)  $-60^\circ$ ; (c)(d)  $-40^\circ$ ; (e)(f)  $-20^\circ$ ; (g)(h)  $0^\circ$ ; (i)(j)  $20^\circ$ ; (k)(l)  $40^\circ$

### 4.3 目标多轴旋转姿态的获取

为验证目标姿态变化更为复杂时所提方法的可行性,对目标进行多轴旋转,建立目标处于不同姿态时的

单光子计数三维成像图数据库,并根据目标实际单光子计数三维成像图与库中三维图的相关系数估计目标实际姿态。

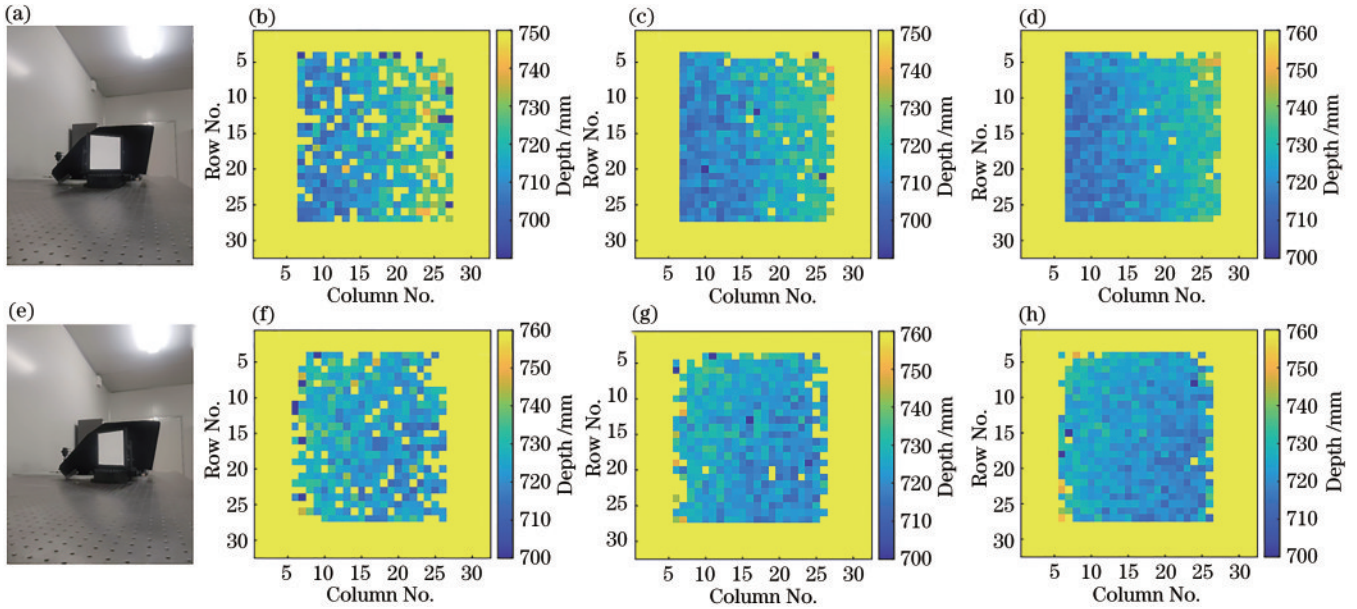


图 4 目标实物图及其处于不同光子计数条件下的单光子计数三维成像图(深度图)。(a)-(d)目标位于-45°姿态时的实物图及光子计数分别为10、50、100时的深度图;(e)-(h)目标位于25°姿态时的实物图及光子计数分别为10、50、100时的深度图  
 Fig. 4 Images of the target and its single-photon counting three-dimensional images (depth images) at different photon counts. (a)-(d) Image of the target at -45° attitude and the depth images at 10, 50, and 100 photon counts respectively; (e)-(h) image of the target at 25° attitude and the depth images at 10, 50, and 100 photon counts respectively

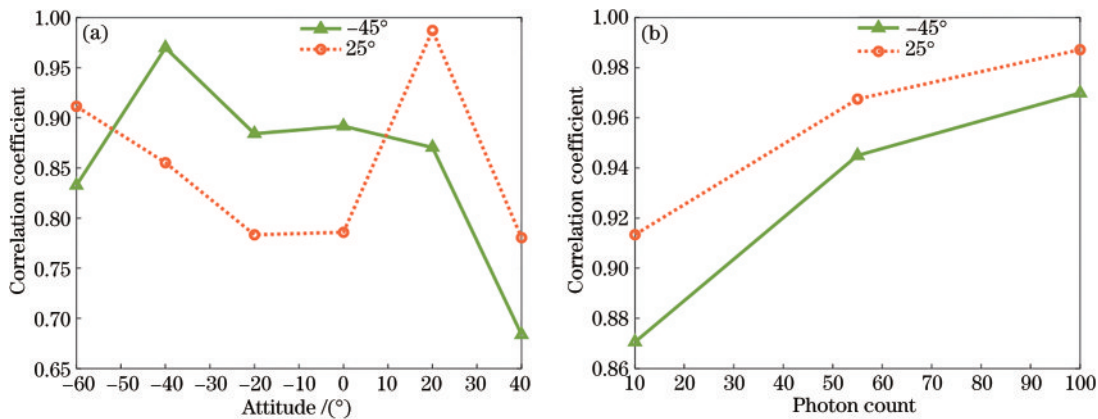


图 5 目标实际姿态单光子计数三维成像图(深度图)与库中不同姿态深度图之间的相关系数。(a)深度图与库中不同姿态深度图之间的相关系数;(b)光子计数分别为10、50、100时的深度图与所估计姿态深度图之间的相关系数  
 Fig. 5 Correlation coefficient between the single-photon counting 3D imaging image (depth image) of the actual attitude of the target and the different attitude depth images in the database. (a) Correlation coefficient between the target depth images and depth images at different attitudes in the database; (b) correlation coefficient between the target depth images under 10, 50, and 100 photon counts and target depth image at the estimated attitude

以白板为目标,将其放置在旋转台上,以20°为单位进行旋转,该方向姿态记为 $x$ ,并将目标围绕垂直于目标平面的旋转轴以15°为单位进行旋转,该方向姿态记为 $y$ ,目标在2个方向上的姿态记为 $(x, y)$ 。对不同姿态下的目标进行单光子计数三维成像并建立数据库,如图6所示。

利用亮度可调台灯调节目标背景光强,进而改变背景噪声强度,利用信号光子与背景光子数的比值(SBR)反映不同的背景光强。将目标姿态调节至(15°, 35°)。在不同强度的背景噪声条件下,对目标进

行单光子计数三维成像,如图7所示。

将姿态(0°, 0°)、(0°, 15°)、(0°, 30°)、(20°, 0°)、(20°, 15°)、(20°, 30°)、(40°, 0°)、(40°, 15°)、(40°, 30°)分别设定为姿态1到姿态9。库中深度图与不同SBR下的目标实际深度图之间的相关系数如图7(i)所示。选取系数最接近1的库中姿态作为所估计的目标实际姿态。若所估计姿态为数据库姿态中最接近于目标实际姿态的,则认为估计成功。根据计算结果,当SBR为8.13, 4.83, 3.21时,估计姿态为(20°, 30°),估计成功;当SBR为0.72时,估计姿态为(0°, 30°),估计失败。

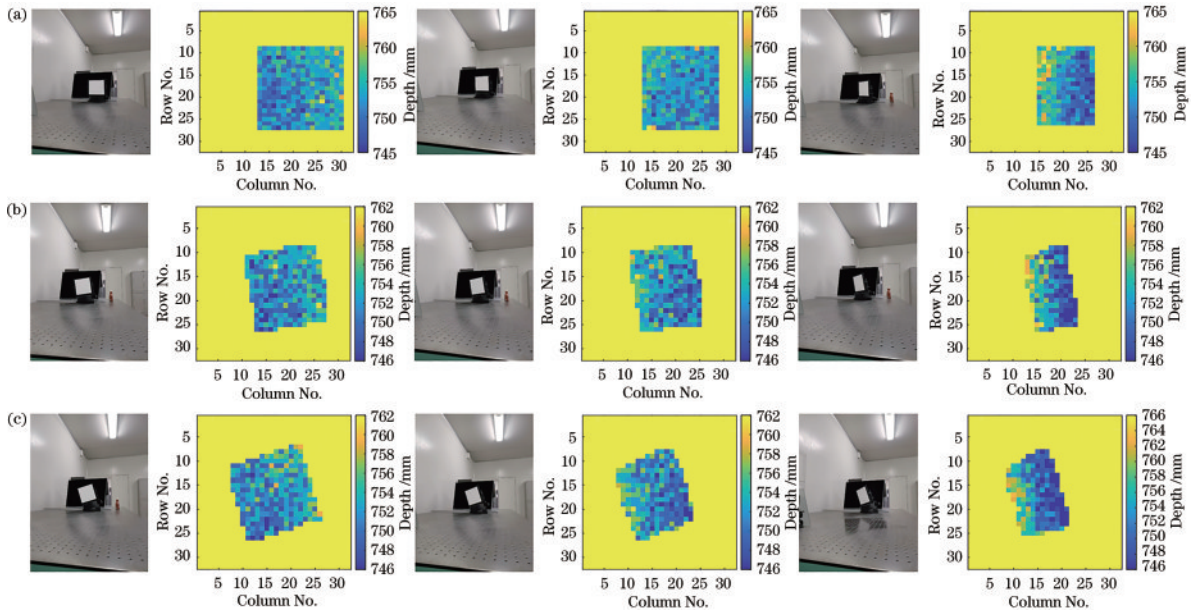


图 6 目标不同姿态下的实物图及深度图。(a)(0°, 0°), (20°, 0°), (40°, 0°)姿态; (b) (0°, 15°), (20°, 15°), (40°, 15°)姿态; (c)(0°, 30°), (20°, 30°), (40°, 30°)姿态

Fig. 6 Object maps and depth maps of target under different attitudes. (a) (0°, 0°), (20°, 0°), (40°, 0°) attitude; (b) (0°, 15°), (20°, 15°), (40°, 15°) attitude; (c) (0°, 30°), (20°, 30°), (40°, 30°) attitude

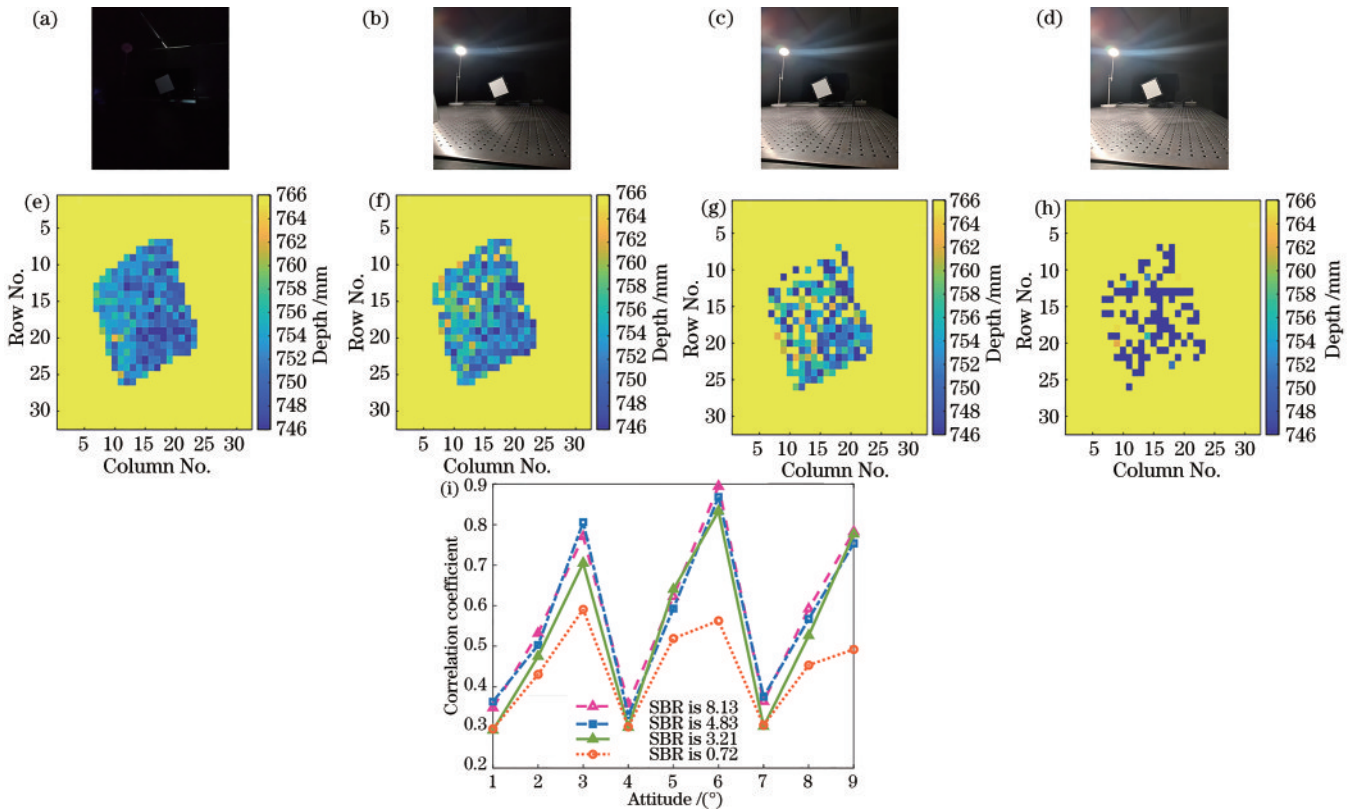


图 7 (15°, 35°)姿态下,不同 SBR 下的目标实物图及单光子计数三维成像图(深度图)。(a)(e) SBR 为 8.13 时的实物图及深度图; (b)(f) SBR 为 4.83 时的实物图及深度图; (c)(g) SBR 为 3.21 时的实物图及深度图; (d)(h) SBR 为 0.72 时的实物图及深度图; (i) 库中深度图与不同 SBR 下的目标实际深度图间的相关系数

Fig. 7 Images of the target and its single-photon counting three-dimensional images (depth images) at (15°, 35°) attitude under different SBR. (a)(e) SBR is 8.13, the target and its depth image; (b)(f) SBR is 4.83, the target and its depth image; (c)(g) SBR is 3.21, the target and its depth image; (d)(h) SBR is 0.72, the target and its depth image; (i) correlation coefficient between the depth images in the database and the actual depth image of the target under different SBR

结合估计结果与不同 SBR 下的目标三维成像图可得：背景噪声对目标姿态估计的准确率有影响，低 SBR 会导致计算得到的单光子计数三维成像图不准确，致使估计失败。采用抗噪声干扰的成像算法或提高 SBR 可提高估计目标实际姿态的准确率。

#### 4.4 复杂目标姿态估计

为证明所提方法对复杂目标进行姿态估计的可行性，以木头人玩具为例，将其放置在旋转台上，以  $30^\circ$  为单位旋转目标，建立目标不同姿态下的单光子计数三维成像图数据库，如图 8 所示。

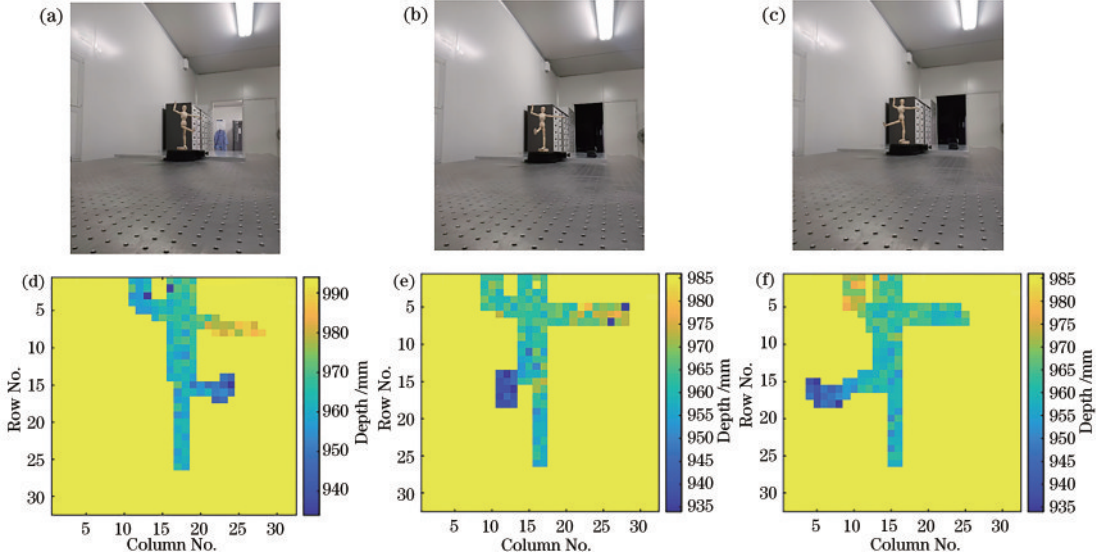


图 8 目标实物图及其处于不同姿态下的单光子计数三维成像图(深度图)。(a)(d)  $-30^\circ$ ; (b)(e)  $0^\circ$ ; (c)(f)  $30^\circ$   
 Fig. 8 Images of the target and its single-photon counting three-dimensional images (depth images) at different attitudes. (a)(d)  $-30^\circ$ ; (b)(e)  $0^\circ$ ; (c)(f)  $30^\circ$

将目标姿态调至  $20^\circ$  和  $-20^\circ$ ，对其进行单光子计数三维成像，计算其与库中深度图的相关系数，并据此估计目标实际姿态。目标实物图及三维成像图如

图 9(a)~(d) 所示，目标实际姿态深度图与数据库中深度图的相关系数如图 9(e) 所示。

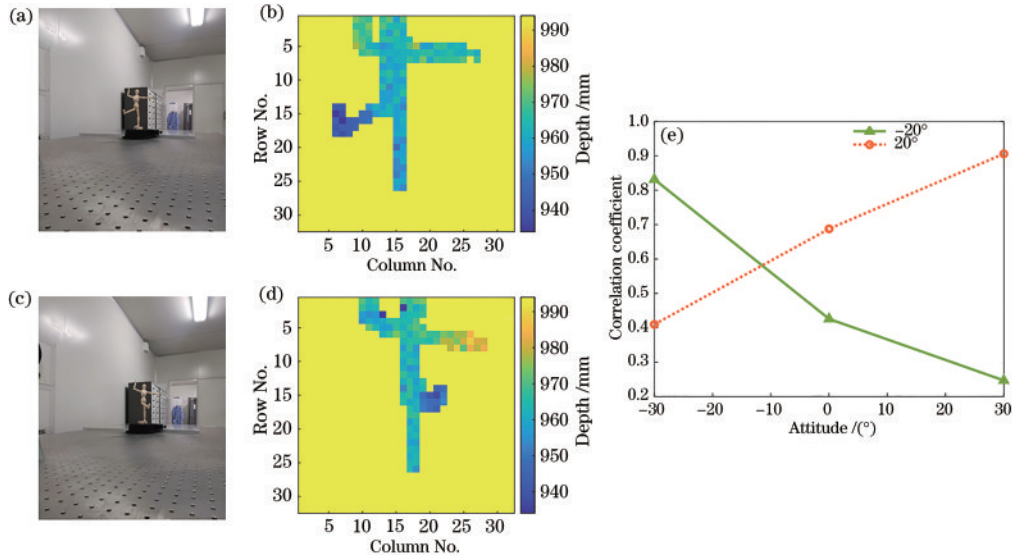


图 9 目标实物图及其单光子计数三维成像图(深度图)。(a)(b) 目标位于  $20^\circ$  姿态时的实物图及深度图; (c)(d) 目标位于  $-20^\circ$  姿态时的实物图及深度图; (e) 目标实际姿态深度图与数据库中深度图的相关系数

Fig. 9 Images of the target and its single-photon counting three-dimensional images (depth images). (a)(b) Target and its depth image at  $20^\circ$  attitude; (c)(d) target and its depth image at  $-20^\circ$  attitude; (e) correlation coefficient between the actual attitude depth image of the target and the depth image in the database

选取系数最接近 1 的库中姿态作为所估计的目标实际姿态。若所估计姿态是数据库姿态中最接近目标

实际姿态的，则认为估计成功。估计姿态分别为  $-30^\circ$  和  $30^\circ$ ，估计成功。由实验结果可得，所提方法对复杂

目标姿态识别依然有效。

## 5 结 论

基于单光子计数三维成像,提出了一种估计目标姿态的方法。该方法具有几个显著的特点:第一,单光子计数三维成像在激光回波极其微弱的情况下依然可以根据少数信号光子所携带的时间信息对目标进行成像,为在极弱光等极端条件下的三维成像提供了可能;第二,充分利用了激光回波信号光子所携带的信息,将三个维度上的目标特征加以利用,以提高姿态估计的准确性;第三,将目标处于不同姿态时的单光子计数三维成像图作为先验信息,建立成数据库。通过比较库中先验信息与目标实际姿态的三维成像图的相关性,估计出目标的姿态信息。搭建实验系统,以 $20^\circ$ 为单位,将目标处于 $-60^\circ$ 至 $40^\circ$ 姿态的单光子计数三维成像图(深度图)建成数据库并与目标处于 $-45^\circ$ 和 $25^\circ$ 姿态时的不同光子计数条件下的单光子计数三维成像图进行相关性比较,以估计目标姿态。分别以 $15^\circ$ 和 $20^\circ$ 为单位对目标进行多轴旋转并成像建库,并与目标处于 $(15^\circ, 35^\circ)$ 姿态时的不同 SBR 下的三维成像图进行相关性比较,以估计目标姿态。以木头人为目标,探究了所提方法对复杂目标进行姿态估计的可行性。实验结果表明:所提方法可有效应用于目标多轴姿态估计及复杂目标姿态估计,且光子计数越多,与库中对应的估计姿态的相关性越强。所提方法在高 SBR 条件下的姿态估计成功率为 $100\%$ ,低 SBR 下姿态估计准确率低,未来可通过发展抗噪声成像算法进行提高。在实际应用中,应根据需求建立包含不同目标的多个姿态信息的数据库,以提高对目标实时姿态信息的感知能力及估计的准确性。所提姿态感知方法在暗弱目标探测等领域有着极大的应用潜力。

### 参 考 文 献

- [1] Deems J S, Painter T H, Finnegan D C. Lidar measurement of snow depth: a review[J]. *Journal of Glaciology*, 2013, 59(215): 467-479.
- [2] McCarthy A, Krichel N J, Gemmell N R, et al. Kilometer-range, high-resolution depth imaging via 1560 nm wavelength single-photon detection[J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8904-8915.
- [3] Bao Z Y, Liang Y, Wang Z Y, et al. Laser ranging at few-photon level by photon-number-resolving detection[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(18): 3908-3912.
- [4] Maccarone A, McCarthy A, Ren X M, et al. Underwater depth imaging using time-correlated single-photon counting[J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33911-33926.
- [5] Kirmani A, Venkatraman D, Shin D, et al. First-photon imaging[J]. *Science*, 2014, 343(6166): 58-61.
- [6] Shin D, Kirmani A, Goyal V K, et al. Photon-efficient computational 3-D and reflectivity imaging with single-photon detectors[J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2015, 1(2): 112-125.
- [7] Li Z P, Huang X, Jiang P Y, et al. Super-resolution single-photon imaging at 8.2 kilometers[J]. *Optics Express*, 2020, 28(3): 4076-4087.
- [8] Li Z P, Huang X, Cao Y, et al. Single-photon computational 3D imaging at 45 km[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(9): 1532-1540.
- [9] Li Z P, Ye J T, Huang X, et al. Single-photon imaging over 200 km[J]. *Optica*, 2021, 8(3): 344-349.
- [10] 李召辉, 申光跃, 庞程凯, 等. 日盲紫外单光子成像[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(10): 1011023.
- [11] Li Z H, Shen G Y, Pang C K, et al. Solar-blind ultraviolet single-photon imaging[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(10): 1011023.
- [12] 李岩, 邬淼, 何伟基, 等. 复杂场景下单光子激光雷达深度估计方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(10): 1011004.
- [13] Li Y, Wu M, He W J, et al. The depth estimation of a single-photon lidar in complex scenes[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(10): 1011004.
- [14] Sjöqvist L, Henriksson M, Jonsson P, et al. Time-correlated single-photon counting range profiling and reflectance tomographic imaging[J]. *Advanced Optical Technologies*, 2014, 3(2): 187-197.
- [15] Li H, Chen S J, You L X, et al. Superconducting nanowire single-photon detector at 532 nm and demonstration in satellite laser ranging[J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 3535-3542.
- [16] 李致廷, 刘长明, 王与焱, 等. 基于单光子探测的目标光学散射特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(9): 20210825.
- [17] Li Z T, Liu C M, Wang Y Y, et al. Research on the optical scattering characteristics of targets based on single-photon detection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(9): 20210825.
- [18] Lawrance A J, Snyder D L. Random point processes[J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1976, 139(4): 547.
- [19] Huang P W, He W J, Gu G H, et al. Depth imaging denoising of photon-counting lidar[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(16): 4390-4394.