

旋转物体的单光子三维重建技术

郑素珍

Single-photon 3D reconstruction technology of rotating objects

ZHENG Suzhen

引用本文:

郑素珍. 旋转物体的单光子三维重建技术[J]. 应用光学, 2024, 45(5): 879–884. DOI: 10.5768/JAO202445.0501001

ZHENG Suzhen. Single-photon 3D reconstruction technology of rotating objects[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(5): 879–884. DOI: 10.5768/JAO202445.0501001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0501001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

单光子探测三维点云与可见光图像融合处理算法研究

Fusion processing algorithm of single-photon detection for three-dimensional point cloud and visible light image

应用光学. 2021, 42(6): 1034–1039 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0602004>

高精度抗遮挡的四目相机三维重建系统

High-precision occlusion-resistant quad-vision camera 3D reconstruction system

应用光学. 2024, 45(2): 307–313 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0201005>

基于SiPM单光子探测器的荧光光谱仪研究

Fluorescence spectrometer based on SiPM single photon detector

应用光学. 2022, 43(2): 278–283 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0203001>

基于深度学习的patch-match双目三维重建

Patch-match binocular 3D reconstruction based on deep learning

应用光学. 2022, 43(3): 436–443 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0302003>

多频光栅物体高精度廓形三维测量及重建研究

Research on 3D measurement and reconstruction of high-precision profile of multi-frequency grating object

应用光学. 2020, 41(3): 580–585 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0303006>

光子计数集成成像的压缩与重构

Compression and reconstruction of photon counting integral imaging

应用光学. 2023, 44(2): 295–306 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0202001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 05-0879-06

旋转物体的单光子三维重建技术

郑素珍

(西南石油大学 理学院, 四川 成都 610500)

摘要: 单光子探测技术具有高灵敏度和高时间分辨率, 已成为三维成像领域的重要发展方向。APD 单光子探测数据为表征光子脉冲事件的 0-1 数据, 通常需要多次积累, 可实现目标三维成像, 但旋转物体的运动导致无法直接积累。针对旋转物体三维重建问题, 提出了一种基于最大强度图清晰度的旋转物体单光子三维重建方法。首先建立旋转物体的三维重建模型, 然后建立关于旋转速度的似然估计模型, 最后以强度图的最大清晰度为代价函数求解旋转速度并进行重建。计算机仿真模拟了旋转十字架物体的单光子三维成像探测数据, 通过三维重建算法对旋转物体实现了高精度三维重建, 并在不同旋转速度下进行仿真验证, 实现了不同速度下转速估计误差优于 5%, 深度重建误差优于 0.1 m, 验证了重建算法的正确性。

关键词: 旋转目标; 单光子探测; 强度图; 三维重建

中图分类号: TN955

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0501001

Single-photon 3D reconstruction technology of rotating objects

ZHENG Suzhen

(College of Sciences, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: Single photon detection technology has become an important development direction in the field of 3D imaging because of its high sensitivity and high time resolution. APD single photon detection data is 0-1 data representing photon pulse events, which usually needs to be accumulated many times to achieve 3D imaging of the target. While the rotating object cannot be directly accumulated due to its motion. In order to solve the problem of three-dimensional reconstruction of rotating objects, a single photon 3D reconstruction method based on the definition of maximum intensity map was proposed. Firstly, the 3D reconstruction model of rotating objects was established, and then the likelihood estimation model of rotation velocity was established. Finally, the maximum definition of intensity map was taken as the cost function to solve the rotation velocity and reconstruct it. The computer simulation simulated the single photon 3D imaging detection data of the rotating cross object, the 3D reconstruction algorithm was used to achieve the high precision 3D reconstruction of the rotating object, and the simulation verification at different speeds was performed. The simulation results show that the speed estimation error is better than 5% and the depth reconstruction error is better than 0.1 m at different speeds, which verifies the correctness of the reconstruction algorithm.

Key words: rotating target; single-photon detection; intensity map; three-dimensional reconstruction

引言

单光子计数探测技术是一种新型的激光主动探测技术^[1-6], 具有高灵敏度和高时间分辨率, 因此得到了广泛应用, 如地形勘测^[7-8], 军事对抗等^[9-10]。

单光子探测数据通常为表示有无光子达到 0-1 数据, 需要重构物体的三维形貌并进行多次积累。旋转物体由于运动, 无法直接积累实现重建目标, 需要对目标的运动进行补偿, 才能实现更好

收稿日期: 2023-11-21; 修回日期: 2024-02-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11804285); 四川省自然科学基金项目 (2022NSFSC0884)

作者简介: 郑素珍 (1979—), 女, 博士, 讲师, 主要从事光学三维面形测量和单光子三维成像研究。E-mail: suzhen317@swpu.edu.cn

的积累。运动补偿在雷达成像领域已有较多研究,针对高分辨成像雷达中目标高速运动引起的多普勒扩展问题,国内外学者开展了广泛研究,有人采用变换搜索法,通过变换及搜索的方式补偿高速运动成份,如修正离散 Chirp-Fourier 变换^[11]、Radon-Fourier 变换^[12]等,通常在距离、多普勒等多个维度进行搜索补偿,当搜索步距太小时运算量极大,对处理设备要求很高,搜索步距太大时,可能漏掉最佳补偿点,无法完成补偿任务。还有人采用相关补偿法,首先利用回波数据估计出目标的运动速度,再补偿回波中的高速运动成份,如直接相关处理^[13]等,主要缺点是对信噪比要求较高,低信噪比时无法应用。在单光子探测技术领域,针对运动目标的三维成像与运动补偿等相关技术鲜有报导,由于单光子探测机理不同,雷达成像领域的运动补偿方法难以直接用于单光子探测数据处理。

针对高速运动目标,研究目标运动补偿与三维成像方法具有重要意义。本文重点针对典型旋转运动目标,研究了旋转物体的转速估计、运动补偿及三维重建方法,提出了一种基于强度图最大清晰度的旋转物体单光子三维重建方法。首先建立旋转物体的三维重建模型,然后建立关于旋转速度的似然估计模型,最后以强度图的最大清晰度为代价函数求解旋转速度,并实现了旋转物体高精度三维重建。

1 旋转物体三维成像建模

自旋目标在单光子三维特征分析中具有重要意义。为了建立自旋目标单光子三维成像模型,对三维目标建立如图 1 所示旋转轴对称坐标系。

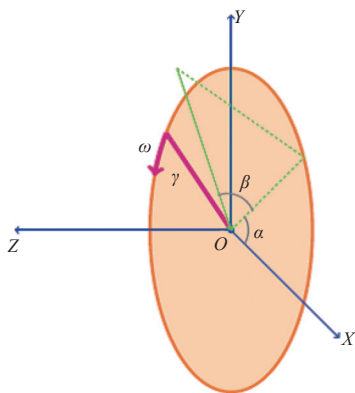


图 1 自旋目标坐标系及观测方向示意图

Fig. 1 Schematic diagram of spin target coordinate system and observation direction

图 1 所示为轴对称旋转体,定义 Z 轴为旋转轴,物体半径为 r ,目标本体上 $(d\Omega, dr)$ 的微小面元面积为 $rdrd\Omega$ 。

假设目标旋转角速度为 ω ,在初始时刻本体坐标系与世界参考坐标系重合,则经过时间 t 后有 $\Omega = \omega t$,旋转体上任意点 $R_b = (x, y, z)^T$,即:

$$R_b = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \cos \Omega \\ \sin \Omega \\ 0 \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \sin(\omega t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\Omega = \omega t$ 表示本体上点与 X 轴的夹角,逆时针为正,顺时针为负。变换到世界坐标系为

$$R_w(t) = M_{bw} R_b = M_z(\omega t) R_b \quad (2)$$

式中: M_{bw} 表示从目标坐标系变换到世界坐标系的坐标变换矩阵; $M_z(\alpha)$ 表示绕 Z 坐标轴旋转角度 α 对应的坐标变换矩阵。假设观测方向与旋转轴的夹角为 θ ,则有 $\beta = \pi/2 - \theta$ 。

2 基于强度点云清晰度评价的三维重建方法

2.1 单光子计数模型

假设单光子三维成像的分辨单元为 $\varphi(x, y, z)$,目标表面轮廓为 $\sigma(x, y, z)$,表示目标轮廓所处理的分辨单元集合。在单次探测过程中,探测器接收到的平均光子数为^[14-15]

$$\lambda_{x,y}(z_{x,y}) = \eta \sigma_{x,y}(z_{x,y}) S_{x,y}(z_{x,y}) + \eta B_{x,y} + ND_{x,y} = \lambda_{x,y}^s(z_{x,y}) + \lambda_{x,y}^b(z_{x,y}) + \lambda_{x,y}^d(z_{x,y}) \quad (3)$$

式中: (x, y) 表示三维成像单元的像素坐标; $z_{x,y}$ 表示像素 (x, y) 处的目标深度; η 表示探测器的量子效率,通常出厂前对各像元进行标校,所以探测器效率可视为与像素坐标无关; $S(x, y)$ 表示目标的光子通量,在观测距离远大于目标尺寸时,各像素单元上的光通量可认为相等,即 $S(x, y) \equiv S$; $B(x, y)$ 表示背景的光子通量,在一定时间和空间范围内,通常可假设各像元的背景光通量相同,即 $B(x, y) \equiv B$; $D(x, y)$ 表示暗计数率,标校后理论上也与像素坐标无关,即 $D(x, y) \equiv D$; $\sigma_{x,y}$ 表示目标表面的反射率; $\lambda_{x,y}(z_{x,y})$ 表示像元的平均光子数。

当分辨单元的平均光子数为 $\lambda_{x,y}(z_{x,y})$ 时,探测器探测到的光子数分布满足泊松分布模型^[14]:

$$P_r\{K = k\} = [\lambda_{x,y}(z_{x,y})]^k e^{-\lambda_{x,y}(z_{x,y})} / k! \quad (4)$$

基于雪崩光电二极管的单光子探测器,为避免雪崩电流过大破坏器件,通常在检测到一个光子

时需用抑制电路进行淬灭, 因此在一个探测周期内, 由于探测器的死时间效应, 探测器最多仅能探测到一个光子。每次探测不能检测到光子的概率为

$$P_s(X=0) = \exp[-(\lambda_s + \lambda_b + \lambda_d)] \quad (5)$$

则探测到光子数的概率为 $P_s(X \geq 1) = 1 - P_s(X=0)$ 。

N 个激光脉冲探测后的光子计数 n 服从二项分布^[14-15]:

$$P_{s,y}(X=n; z_{x,y}) = C_N^n [P_i(0)]^{N-n} [1-P_i(0)]^n \quad (6)$$

式中: i 代表 s, b 或 d 。当探测次数 N 较大时, 探测到的光子数分布仍然满足泊松分布^[14]:

$$P_r\{K=k\} = [N\lambda_{x,y}(z_{x,y})]^k e^{-N\lambda_{x,y}(z_{x,y})} / k! \quad (7)$$

因此, 目标深度可通过求解最大概率估计得到, 即:

$$\hat{z}_{x,y} = \arg \max_{z: z_{i,j} \in [0, \infty)} P_r\{K=k; z_{i,j}\} \quad (8)$$

最简单的求解方法是通过搜索各分辨单元上检测到光子的次数, 最大次数对应的分辨单元即是目标深度估计结果。检测到的光子次数或归一化概率定义为强度函数:

$$I_{x,y} = P_{x,y}(z_{x,y}) \propto \sigma_{x,y}(z_{x,y}) \quad (9)$$

2.2 单光子成像模糊原理

当目标未运动时, 各像元检测光子数的平均值为

$$\begin{aligned} \lambda_{x,y;N} &= N[\lambda_{x,y}^s(z_{x,y}) + \lambda_{x,y}^b(z_{x,y}) + \lambda_{x,y}^d(z_{x,y})] = \\ &= N\lambda_{x,y}^s(z_{x,y}) + N\lambda_{x,y}^b(z_{x,y}) + N\lambda_{x,y}^d(z_{x,y}) = \\ &= N\eta\sigma_{x,y}(z_{x,y})S_{x,y}(z_{x,y}) + N\eta B + ND_{x,y} = \\ &= \eta S[N\sigma_{x,y}(z_{x,y})] + N\eta B + ND = \\ &= \eta S N[\sigma_{x,y}(z_{x,y}) + \eta B + D] \end{aligned} \quad (10)$$

当目标旋转运动时, 各像元检测的平均光子数为

$$\begin{aligned} \lambda_{x,y;N}(\omega) &= \eta \left[\sum_{n=1}^N \sigma_{x',y',n}(z_{x',y',n}) S_{x',y',n}(z_{x',y',n}) \right] + N\eta B + ND = \\ &= \eta S \left[\sum_{n=1}^N \sigma_{x',y',n}(z_{x',y',n}) \right] + N\eta B + ND = \\ &= \eta S N \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sigma_{x',y',n}(z_{x',y',n}) \right] + N\eta B + ND = \\ &= \eta S N \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sigma_{x',y',n}(z_{x',y',n}) + \eta B + D \right] = \\ &= \eta S N [\bar{\sigma}_{x,y}(z_{x,y}) + \eta B + D] \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)表明, 沿运动轨迹上的所有像素的平均光子数均被相邻像元的平均光子数的均值取代, 即出现模糊和清晰度降低。

假设在像元 (x, y) 处, 反射率为 $\sigma(x, y)$, 其邻域内的反射率最小和最大值分别为 $\sigma_0(x, y)$, $\sigma_1(x, y)$, 则由平均值原理可知:

$$\sigma_0(x, y) \leq \bar{\sigma}(x, y) \leq \sigma_1(x, y) \quad (12)$$

显而易见, 强度函数的梯度函数满足如下关系:

$$\bar{\nabla} I(x, y) \leq \nabla I(x, y) \quad (13)$$

2.3 旋转速度估计与三维重建

为了解决物体旋转运动的影响, 需要对旋转速度进行估计, 并用估计速度进行补偿处理。假设以第一帧成像几何为基础, 建立目标三维成像分辨单元 $\varphi(x, y, z)$, 则目标旋转引起目标的分辨单元发生变化。设旋转角速度为 ω , 则经过 N 帧采样后物体旋转的角度为 $\theta = \omega \cdot N\Delta T$, 其中 ΔT 为探测的帧周期。假定目标在深度方向上未发生变化, 则旋转后对应的分辨单元为 (x', y', z') , 其中:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (14)$$

假设旋转角度或旋转速度已知时, 可以对各分辨单元进行补偿处理。设补偿参数为 $\Theta = -\omega \cdot N\Delta T = -\theta$, 则有:

$$\begin{bmatrix} \cos \Theta & \sin \Theta & 0 \\ -\sin \Theta & \cos \Theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Theta & \sin \Theta & 0 \\ -\sin \Theta & \cos \Theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (15)$$

因此可得:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (16)$$

为了方便, 用矩阵表示为

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}(n\Delta T; \omega) \mathbf{r}' = \mathbf{H}_n(\omega) \mathbf{r}' \quad (17)$$

式中 $\mathbf{r} = [x, y]^T$ 表示像素坐标。假设待估计参数 (即补偿参数) 为 ω , 为了便于描述, 将反射率参数也在形式上表示为矩阵形式:

$$\sigma(\mathbf{r}) = \sigma[\mathbf{H}_n(\omega) \mathbf{r}' n] \quad (18)$$

则通过补偿,得到成像分辨单元上的平均光子数满足:

$$\begin{aligned}\lambda_{x,y;N}(\omega) &= \eta S \left[\sum_{n=1}^N \sigma(H_n(\omega) r') \right] + N\eta B + ND = \\ \eta S N \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sigma(H_n(\omega) r') \right] + N\eta B + ND &= \\ \eta S N \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sigma(H_n(\omega) r') + \eta B + D \right] &\stackrel{(a)}{=} \\ \eta S N [\sigma(r) + \eta B + D] &\quad (19)\end{aligned}$$

式中 $\stackrel{(a)}{=}$ 对应的项表示为在最优补偿下得到的结果。

因此,基于上述公式选择合适的代价函数,建立关于旋转角速度的估计模型,则旋转角速度为取得最大代价函数值条件下的解,即:

$$\omega = \arg \max_{\omega} |J(\omega)| \quad (20)$$

选择能量梯度函数(EOG)作为代价函数进行求解,能量梯度函数表达式为^[16]

$$J = \sum_x \sum_y |f(x+1, y) - f(x, y)|^2 + |f(x, y+1) - f(x, y)|^2 \quad (21)$$

也可以采用其他评价方法进行评价。

3 三维重建仿真

为研究旋转物体的单光子三维成像效果,模拟了十字架旋转物体的三维模型,模型名称 Fan_EX3(需要注意,由于柱体垂直成像时没有相对深度,所以增加了薄片作为参考)。旋转物体原型如图2所示。单次相邻2个脉冲之间的时间间隔为1个单拍,多个单拍作为一个完整探测,定义为1帧。

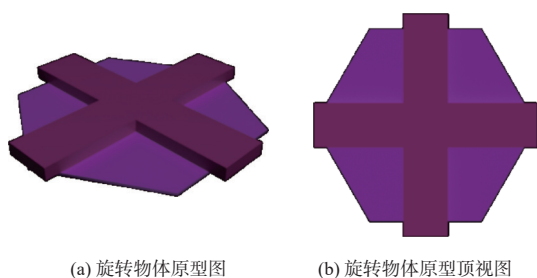


图2 Fan_EX3 模型视图

Fig. 2 Fan_EX3 model view

3.1 仿真参数

对图2所示的旋转物体,采用表1所示参数进行仿真。

表1 旋转目标仿真参数

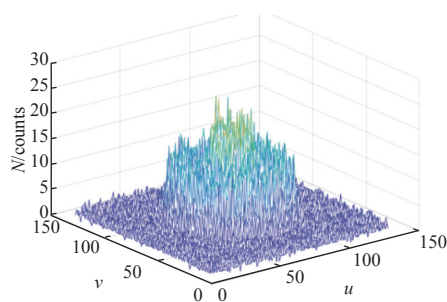
Table 1 Simulation parameters of rotating target

参数名称	参数值	参数名称	参数值
叶片长度/m	$l = 10$	叶片宽度/m	$w = 2$
叶片高度/m	$h = 0.5$	旋转角速度/(r/min)	300
脉冲周期/ms	$\Delta T = 1$	旋转总角度	$\Omega = \pi/2$
信号光子数	$n_s = 0.4$	背景光子数	$n_b = 0.001$
平均暗计数	$n_d = 0.01$	时间分辨率/ps	$\delta t = 100$
系统焦距/m	$f = 0.2$	物距/m	$L = 1000$

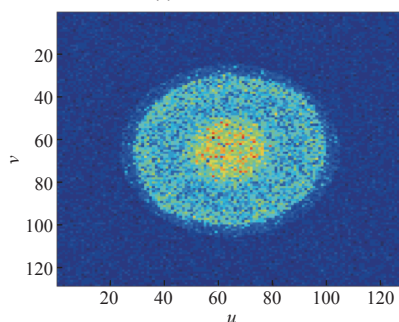
3.2 直接重建结果

若不考虑物体旋转,当作静止物体进行重建时,得到的重建结果如图3所示。

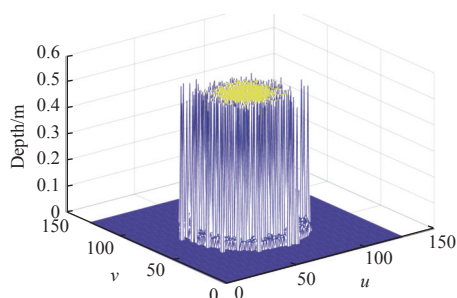
从图3中可以看出,由于未对旋转参数进行补偿,直接重建得到的物体三维结构呈现为圆柱形状,主要是由于物体旋转运动的结果,由于运动导致页面旋转形成的圆形空间上均返回了均匀分布的光子数,直接重建时三维重构结果为圆柱形。



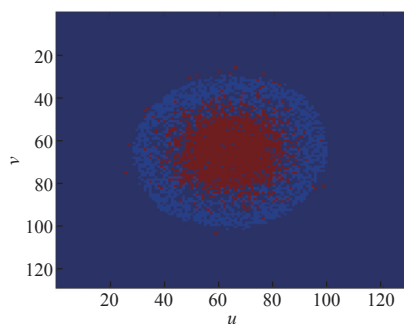
(a) 强度点云三维图



(b) 强度点云二维投影图



(c) 深度点云三维图



(d) 深度点云二维投影图

图3 旋转物体直接重建结果

Fig. 3 Direct reconstruction results of rotating objects

3.3 旋转补偿重建结果

通过选择能量梯度函数(EOG)作为强度对比度评价函数,可得到不同速度补偿下的强度对比度曲线,如图4所示,图4中强度对比度值最大点为目标旋转速度的最优估计值。从图4可知,估计得到的旋转角速度为 $1\,833.5\text{ }^\circ/\text{s}$,物体实际旋转角速度为 $300\text{ circs}/\text{min} = 1\,800\text{ }^\circ/\text{s}$,估计误差为 1.86% 。对旋转参数进行估计和补偿后,得到的重建结果如图5所示。

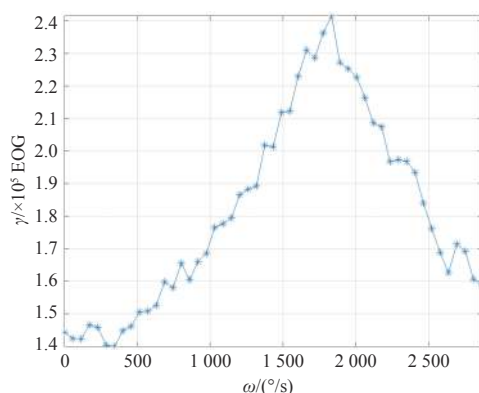
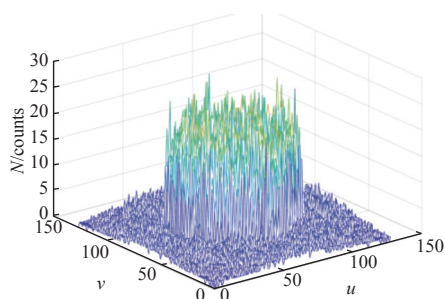


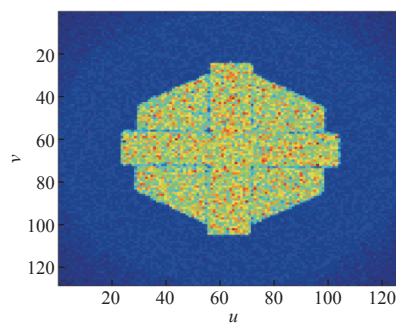
图4 不同补偿速度下的强度对比度

Fig. 4 Intensity contrast at different compensation speeds

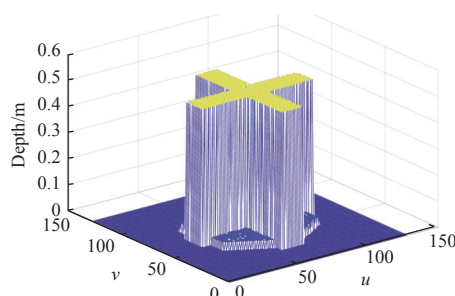
从图5中可以看出,由于较好地补偿了旋转参数,旋转物体的三维结构得到了较好的重建。角速度补偿后重建得到的三维深度误差为 0.048 m 。为了对比不同旋转速度下的重建效果,表2给出了不同转速下的估计误差和补偿重建误差。



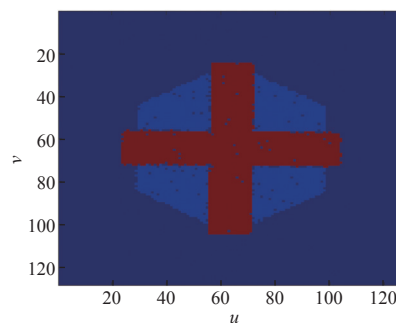
(a) 强度点云三维图



(b) 强度点云二维投影图



(c) 深度点云三维图



(d) 深度点云二维投影图

图5 旋转物体补偿重建结果

Fig. 5 Compensation reconstruction results of rotating objects

表2 不同转速下重建误差对比

Table 2 Reconstruction error comparison under different speeds

真实 转速/(°/s)	旋转 总角度/(°)	探测 次数	估计 转速/(°/s)	转速估计 误差/%	重建 误差/m
600	90	150	600	0.00	0.044
900	90	100	900	0.00	0.050
1 200	90	75	1 230	2.50	0.042
1 500	90	60	1 570	4.67	0.051
1 800	90	50	1 833.5	1.86	0.048
2 100	90	43	2 110	0.48	0.065
2 400	90	38	2 380	0.83	0.091

4 结论

旋转物体由于其运动,基于单光子三维重建时需要对旋转角度进行估算,然后进行运动补偿。

本文提出的基于强度图最大清晰度的旋转物体单光子三维重建方法,通过建立强度对比度评价函数,以强度图的最大清晰度为代价函数求解旋转速度,得到了比较精确的重建效果,实现了不同旋转速度下转速估计误差优于 5%,深度重建误差优于 0.1 m,为任意运动形式的动目标三维重建提供了有效的方法。

参考文献:

- [1] 曹智祥,曾美玲,杨健,等.一种改进型单光子雪崩二极管探测概率模型及验证[J].光学学报,2023,43(10): 238-245.
CAO Zhixiang, ZENG Meiling, YANG Jian, et al. Detection probability model and verification of an improved single photon avalanche diode[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(10): 238-245.
- [2] 李佩展,钟家强,张文,等.高性能超导相变边缘单光子探测器(特邀)[J].光子学报,2023,52(5): 11-19.
LI Peizhan, ZHONG Jiaqiang, ZHANG Wen, et al. High-performance superconducting transition-edge single-photon detectors(Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(5): 11-19.
- [3] 张飞飞,彭雷,袁韬.单光子探测三维点云与可见光图像融合处理算法研究[J].应用光学,2021,42(6): 1034-1039.
ZHANG Feifei, PENG Lei, YUAN Tao. Fusion processing algorithm of single-photon detection for three-dimensional point cloud and visible light image[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(6): 1034-1039.
- [4] 杨函霖,李召辉,吴光.1 030 nm 单光子探测激光雷达技术[J].激光与红外,2023,53(11): 1671-1676.
YANG Hanlin, LI Zhaohui, WU Guang. 1 030 nm single-photon detection lidar technology[J]. Laser & Infrared, 2023, 53(11): 1671-1676.
- [5] LI Z H, PAN H F, SHEN G Y, et al. Single-photon lidar for canopy detection with a multi-channel Si SPAD at 1 064 nm[J]. Optics and Laser Technology, 2023, 157: 108749.
- [6] SCHOLLES S, MORA-MARTÍN, G, ZHU F, et al. Simulating single-photon detector array sensors for depth imaging[EB/OL]. (2022-10-07)[2023-05-10]. <https://arxiv.org/abs/2210.05644>.
- [7] SMITH B, FRICKER H A, HOLSCHUH N, et al. Land ice height-retrieval algorithm for NASA's ICESat-2 photon-counting laser altimeter[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 233: 111352.
- [8] TANG X, XIE J, LIU R, et al. Overview of the GF-7 laser altimeter system mission[J]. Earth and Space Science, 2020, 7(1): e2019EA000777.
- [9] LUTZMANN P, GOEHLER B, HILL C A, et al. Laser vibration sensing: overview and applications[J]. SPIE: The International Society for Optical Engineering, 2011, 56(3): 031215.031211-031215.031219.
- [10] 陈军燕,廖龙文,曾鹏.美国地基反卫星激光武器发展分析[J].红外与激光工程,2020,49(S1): 42-47.
CHEN Junyan, LIAO Longwen, ZENG Peng. Development analysis of American anti-satellite ground-based laser weapon[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(S1): 42-47.
- [11] 刘爱芳,朱晓华,刘中.基于修正离散 Chirp Fourier 变换的高速目标 ISAR 距离像补偿[J].航空学报,2004,25(5): 495-498.
LIU Aifang, ZHU Xiaohua, LIU Zhong. ISAR range profile compensation of fast-moving target using modified discrete Chirp-Fourier transform[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(5): 495-498.
- [12] 吴兆平,符渭波,苏涛,等.基于快速 Radon-Fourier 变换的雷达高速目标检测[J].电子与信息学报,2012,34(8): 1866-1871.
WU Zhaoping, FU Weibo, SU Tao, et al. High speed radar target detection based on fast Radon-Fourier transform[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(8): 1866-1871.
- [13] 董鹏曙,向龙,谢幼才,等.高速机动目标信号多普勒频移补偿方法[J].探测与控制学报,2016,38(3): 67-70.
DONG Pengshu, XIANG Long, XIE Youcai, et al. Doppler frequency shift and coherent integration performance of high speed maneuvering targets[J]. Journal of Detection & Control, 2016, 38(3): 67-70.
- [14] SHIN D, KIRMANI A, GOYAL V K, et al. Photon-efficient computational 3D and reflectivity imaging with single-photon detectors[J]. IEEE Transactions on Computational Imaging, 2015, 1(2): 112-125.
- [15] 张瀚夫,刘杰,安其昌,等.基于单光子计数三维成像的目标姿态获取方法[J].激光与光电子学进展,2023,60(8): 0811031.
ZHANG Hanfu, LIU Jie, AN Qichang, et al. Single-photon counting 3D imaging-based target attitude acquisition[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(8): 0811031-1-8.
- [16] 路朋罗.基于图像处理技术的自动调焦方法研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2016.
LU Pengluo. Study on auto-focusing methods based on image processing technology[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.