

飞行时间图像传感器的建模和运动误差分析

牛洪星^{1**}, 高静^{1,2*}, 聂凯明^{1,2}

¹天津大学微电子学院, 天津 300072;

²天津市成像与感知微电子技术重点实验室, 天津 300072

摘要 在动态场景中, 飞行时间图像传感器的高频多相操作会产生运动模糊, 使运动区域内产生错误的三维原始数据, 同时增加了电路设计难度。为了减小运动模糊的影响, 本文对动态场景下飞行时间图像传感器进行建模。所建模型可以通过简单的参数设置快速完成传感器的参数设定, 以仿真动态场景中各条件下的三维图像, 从而分析运动误差。本文基于该成像模型, 在不同的运动速度和帧频下分析了运动误差对成像质量的影响, 探究了动态场景中两种曝光方式之间的成像质量差异, 获得了具有高成像质量和低电路设计难度的最优成像指标。采用德州仪器(TI)公司的飞行时间相机对成像模型进行了评估, 结果表明, 在静态和动态场景中, 模型仿真数据与相机实测数据匹配良好。

关键词 遥感; 传感器; 建模仿真; 运动误差; 最优指标

中图分类号 TP212.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2428001

Modeling and Motion Error Analysis of a Time-of-Flight Image Sensor

Niu Hongxing^{1**}, Gao Jing^{1,2*}, Nie Kaiming^{1,2}

¹School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²Tianjin Key Laboratory of Imaging and Sensing Microelectronics Technology, Tianjin 300072, China

Abstract In dynamic scenes, the high-frequency and multi-phase operation of a time-of-flight image sensor will produce motion blur, causing incorrect three-dimensional original data in the motion area, and increasing the difficulty of circuit design. This paper proposes a time-of-flight image sensor model in a dynamic scene to reduce the impact of motion blur. The model can quickly complete the sensor parameter setting through simple parameter settings, which is used to simulate three-dimensional images in dynamic scenes under various conditions to analyze motion errors. The effect of motion error on imaging quality under different motion speeds and frame rates is analyzed using the imaging model, and the difference in imaging quality between the two exposure modes in dynamic scenes is investigated. Finally, the optimal imaging indicators are obtained, with high imaging quality and low circuit design difficulty. The imaging model is evaluated using a Texas Instruments time-of-flight camera, and the verification results show that the model's simulation data can effectively match the camera's measured data in both static and dynamic scenes.

Key words remote sensing; sensors; modeling and simulation; motion error; optimal indicator

OCIS codes 280.4788; 330.4060; 330.7326

1 引言

飞行时间(TOF)技术是一种基于时差测距法的三维(3D)成像技术, 现已被广泛应用于无人驾

驶、卫星测距、生物医学成像、智能机器人等领域^[1-5]。基于连续波的 TOF 技术作为近年来三维成像感知技术的重要发展方向之一, 具有精度高、抗环境光干扰强等特点, 它通过图像传感器对调制光

收稿日期: 2021-01-04; 修回日期: 2021-01-31; 录用日期: 2021-02-12

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB2204300)

通信作者: *gaojing@tju.edu.cn; **niuhongxing@tju.edu.cn

进行四相积分来计算表征距离信息的相位延迟^[6-7]。

在实际应用中,TOF 图像传感器普遍使用在动态场景中。TOF 图像传感器具有独特的成像机理,如果多相采集期间物体或 TOF 相机发生相对运动,则在光子积分时间内的相位混合就会使深度图像产生运动模糊^[8-9],造成特殊的运动误差。一方面,运动模糊的存在会限制可用的曝光时间,压缩全局快门下的单帧读出时间,增加电路的设计难度;另一方面,运动模糊是 TOF 图像传感器的固有误差,无法完全消除。针对运动模糊问题,Lottner 等^[10]提出了二维、三维相机融合的方法,即:采用边缘检测器检测二维图像中的运动模糊,随后采用相邻像素的加权平均值对该区域的三维图像进行滤波,以减小运动模糊的影响。Schmidt 等^[11]通过分析每个深度图像的原始时间信号变化来探测模糊区域,随后用前一阶段采集的原始值覆盖不连续通道的原始值,以提升三维精度。Lee 等^[12]提出了一种基于四相电荷关系的模糊检测方法,并用邻近的正常像素值取代检测出的模糊深度值。总体上看,目前已有算法主要是通过滤波或者邻近像素替换、均值处理等在视觉上提升图像的接受度,但算法只是作用于芯片设计后端已产生的深度图,不能提升三维原始数据的准确度。三维原始数据的准确度与传感器的指标有关,因此必须采用合理的芯片设计指标,在原始数据产生阶段提升数据的精度。

TOF 图像传感器建模仿真是一种高效、可再现真实场景的研究方法,对于传感器在各种条件下的成像性能评估和设计指标分析具有重要意义。为了减小运动模糊的影响,本文建立了动态场景下 TOF 图像传感器仿真模型,并采用该模型对各成像条件下两种曝光方式的成像质量进行了评估,获得了滚筒快门下具有最小运动误差的最优成像指标,该指

标可以在降低电路设计难度的同时获得精度较高的三维原始数据。

2 建模过程

2.1 模型成像过程

动态场景中 TOF 图像传感器成像模型的概念图如图 1 所示。在三维坐标系中,像素阵列和点光源处于同一平面 M 中, M 平面平行于 yOz 平面分布,矩形区域 $AOBC$ 代表与像素阵列相对应的视场, d 为像素阵列与视场间的垂直距离。在视场中,半球以恒定速度 v 沿 y 轴正方向移动。进行三维成像时,点光源发射的调制光辐射整个 $AOBC$ 视场区域,随后调制光经由视场反射后被像素阵列接收,最后像素阵列通过对接收的调制光进行四相积分得到表征距离信息的相位延迟值,从而对场景进行三维成像。

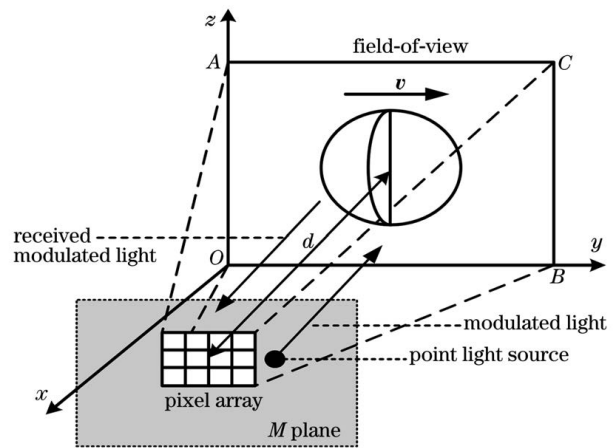


图 1 TOF 图像传感器成像模型的概念图

Fig. 1 Conceptual diagram of imaging model of TOF image sensor

2.2 坐标对应

像素阵列与视场平面具有光学几何透射关系,如图 2 所示,因此视场中各个坐标点的三维深度信

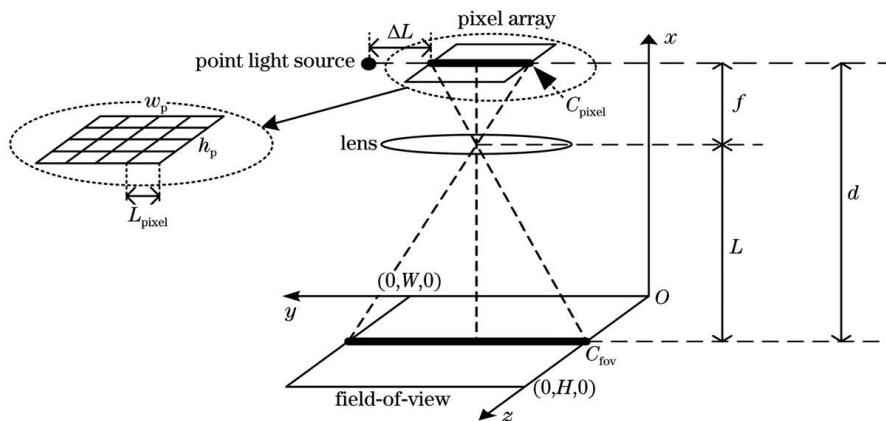


图 2 像素阵列与视场的光学几何透射关系

Fig. 2 Optical geometric perspective relationship between pixel array and field-of-view

息可以对应到像素阵列上。另外,透镜的折射本应在场景一侧形成一个倒立的虚像,本文通过对应阵列的坐标变换对图像方向进行了转换。

像素阵列的规格为 $w_p \times h_p$, 对应到视场区域为 $W \times H$, 其中 w_p 和 h_p 分别为像素阵列的总列数和总行数, W 和 H 分别为视场的宽度和高度。根据几何透射关系可以得到第 a 行第 b 列的像素点 C_{pixel} 和它对应的视场点 C_{fov} 的坐标。 C_{pixel} 的坐标为 $\left[d, \frac{W}{2} - \frac{(w_p + 1)L_{\text{pixel}}}{2} + (b - 1)L_{\text{pixel}}, \frac{H}{2} - \frac{(h_p + 1)L_{\text{pixel}}}{2} + (a - 1)L_{\text{pixel}} \right]$, C_{fov} 的坐标为 $\left[0, \frac{(b - 1)dL_{\text{pixel}}}{f}, \frac{(h_p - a)dL_{\text{pixel}}}{f} \right]$, 其中: L_{pixel} 为像素间距, f 为透镜的焦距。当 C_{fov} 在半球面的视场中时, 令 $y = \frac{(b - 1)dL_{\text{pixel}}}{f}$, $z = \frac{(h_p - a)dL_{\text{pixel}}}{f}$, 此时 C_{fov} 的坐标为 $\left[\sqrt{r^2 - \left(y - \frac{W}{2}\right)^2 - \left(z - \frac{H}{2}\right)^2}, y, z \right]$, 其中 r 为半球半径。

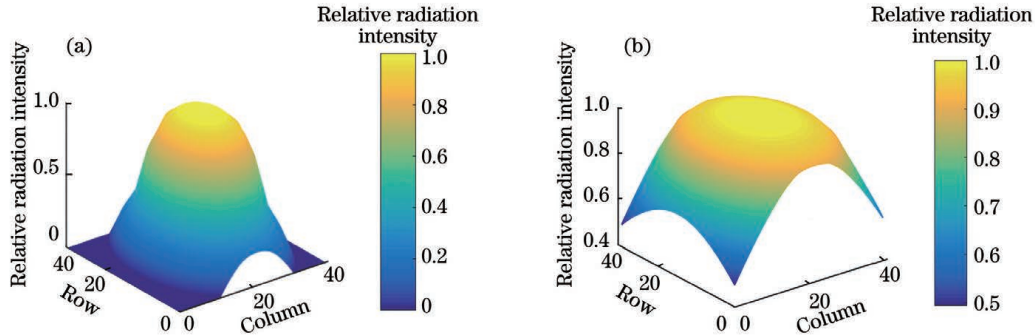


图 3 添加扩散片前后的效果图。(a)未添加扩散片;(b)添加扩散片

Fig. 3 Effect before and after adding diffuser. (a) Before adding diffuser; (b) after adding diffuser

2.4 视场物体的照明模型

由于 TOF 图像传感器输出场景的三维深度信息与物体颜色信息的关联性较小, 因此可以基于 phong 式光照模型^[14] 推导返回调制光的辐射强度。基于 phong 式模型的视场矢量图如图 4 所示, L 为发射方向的单位矢量, N 为视场表面法线的单位矢量, R 为反射光的单位矢量, V 为观察方向的单位矢量, 反射角 i 为 L 和 N 的夹角, β 为 R 和 V 的夹角, F 为半球圆心。

在 phong 式光照模型中, 视场表面任一点返回光的辐射强度 I_{total} 由环境光辐射强度 I_e 和点光源返回光的辐射强度 I_M 组成, 而 I_M 为漫反射光与镜面反射光的辐射强度之和, 因此 I_{total} 为

点光源与中心像素之间的距离为 ΔL , 因此, 点光源 C_{light} 的坐标为 $\left(d, \frac{W}{2} + \Delta L, \frac{H}{2} \right)$ 。

通过上述坐标的对应公式可以获得三维坐标系中所有点的坐标和阵列间的对应空间矢量。本文的成像模型包括三个部分: 点光源发射、视场物体的照明模型和传感器成像模型。接下来逐一介绍成像模型的这三个部分。

2.3 点光源发射

点光源在照明方向上的半球形空间内均匀发射, 而且点光源发射到视场中每个点的辐射强度与发射角有关。为了充分模拟实际情况, 点光源的辐射强度数据使用 IR26/51c 发光二极管辐射强度-角度对照表^[13] 中的数据。

为了使点光源辐射到整个视场, 在点光源发射部分添加了扩散片, 以增加点光源的辐射面积。未添加扩散片的效果如图 3(a) 所示, 点光源的发射圆锥角为 15° , 视场中部分区域的相对辐射强度为 0; 添加扩散片后的发射圆锥角为 30° , 此时点光源完全辐射整个视场, 如图 3(b) 所示。

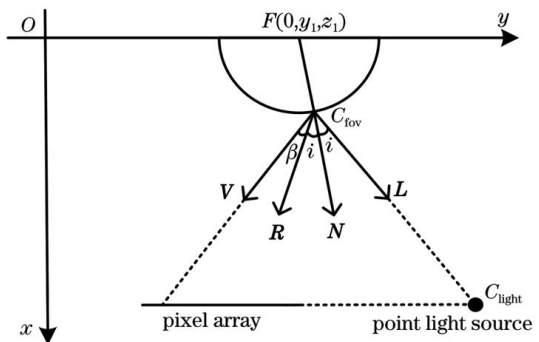


图 4 基于 phong 式模型的视场矢量图

Fig. 4 Vector diagram of field-of-view based on the phong model

$$I_{\text{total}} = I_e + IK_d \cos i + IK_s \cos^n \beta, \quad (1)$$

式中: K_d 为漫反射系数, 且 $K_d \in [0, 1]$; K_s 为镜面

反射系数; I 为视场光强度; n 为镜面高光系数; i 和 β 可由矢量图中的空间矢量表示。

因此, 由点光源发射部分得到的视场光强可以导出视场上每一点的返回光强, 用于成像模型中四相电荷的计算。

2.5 传感器成像模型

经由视场反射的返回调制光照射在像素阵列上会产生光电荷, 本文通过对返回调制光函数进行半周期积分来表征这一过程。单个像素上的辐射通量为单位时间内像元面积上辐射强度的大小, 在计及光衰减时, 返回调制光函数为

$$S(t) = \frac{L_{\text{pixel}}^2 f_t f_j I (K_d \cos i + K_s \cos^n \beta)}{|C_{\text{fov}} C_{\text{pixel}}|^2} \times [1 + \cos(2\pi f_m t - \varphi)] + B, \quad (2)$$

其中,
$$B = \frac{I_{\text{BG}}}{K} \frac{WH}{\omega_p h_p} f_b f_j, \quad (3)$$

式中: f_t 为滤波器的透射率; f_j 为光衰减系数; f_m 为调制光的调制频率; φ 为表征三维距离信息的相位延迟; B 为环境光干扰; t 为时间; I_{BG} 为单位时间内像元面积对应区域的背景光照度; K 为视率; f_b 为滤波器阻塞率。

四相电荷采样过程如图 5 所示, 本文中 TOF 图像传感器成像模型具有两个浮空扩散(FD)节点^[15]。对于双 FD 结构, 在第一帧中, 返回调制光函数在 0° 和 180° 的半周期积分相位电荷被交替转移到不同的 FD 上, 曝光时间内多个积分周期的电荷累积产生一对采样电荷 A_0 、 A_2 ; 在第二帧中以同样的方式对 90° 和 270° 的相位电荷进行采样, 获得采样电荷 A_1 、 A_3 。在获得四相采样电荷后, 通过 (4) 式计算相位延迟值 (φ' 表示运动情况下由四相采样电荷计算出的相位延迟), 进而输出三维深度图。

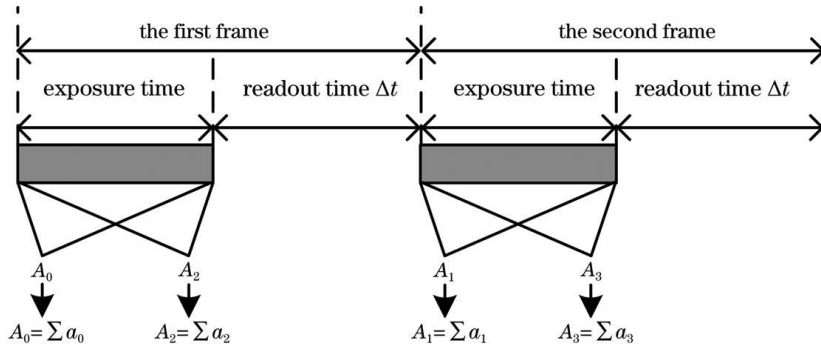


图 5 四相电荷采样过程

Fig. 5 Four-phase charge sampling process

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi' &= \arctan \left[\frac{\sum_{k=1}^m (P_{0-k} \sin \varphi_{0-k} + P_{2-k} \sin \varphi_{2-k})}{\sum_{k=1}^m (P_{1-k} \sin \varphi_{1-k} + P_{3-k} \sin \varphi_{3-k})} \right] \\ P_{g-k} &= \frac{I_{g-k} (K_d \cos i_{g-k} + K_s \cos^n \beta_{g-k})}{|C_{\text{fov}, g-k} C_{\text{pixel}}|^2} \\ \varphi_{g-k} &= \frac{4\pi f_m |C_{\text{fov}, g-k} C_{\text{pixel}}|}{c} \end{aligned} \right., \quad (4)$$

式中: $g=0, 1, 2, 3$, 表征四相采样电荷; m 为曝光时间内总积分周期数; $C_{\text{fov}, g-k}$ 为每个积分周期中单个采样电荷与视场相对应的坐标点; I_{g-k} 、 i_{g-k} 和 β_{g-k} 、 φ_{g-k} 分别为 $C_{\text{fov}, g-k}$ 点处的辐射强度、空间矢量夹角以及相位延迟; c 为光速。

图像传感器的曝光方式包括全局快门和滚筒快门^[16], 其中的流水线式全局快门^[17]被广泛应用于动态场景中, 因此本文采用流水线式全局快门和滚

筒快门这两种曝光方式。在流水线全局快门中, 第一帧的曝光结束时间和第二帧的曝光开始时间仅相差很小的全局复位时间, 因此所有像素中的 $\Delta t \approx 0$ 。在滚筒快门中, 每一行像素中的 Δt 为单行读出时间, 且传感器在滚筒快门中存在最短的帧时间, 此时各行曝光开始时间相差单倍的行读出时间, 传感器生成一帧图像的时间为像素阵列行数与行读出时间之积。

模型参数设置如表 1 所示。为了加快仿真速度并在模型验证时适配实际的 TOF 相机, 本文中像素阵列的规格设置为 40×30 。为了满足仿真分析中速度区间和空间分辨率的要求, 基于坐标对应部分 f 、 d 、 L_{pixel} 、 r 的参数设置来获得较大的视场和空间分辨率, 以避免高速运动下的三维图像错误。光照模型中的参数基于粗糙物体表面进行设置, 其他参数参照德州仪器(TI)公司的 TOF 相机数据^[18]进行设置。

表 1 模型参数设置

Table 1 Parameter settings of model

Symbol	Parameter name	Parameter value
c	Speed of light / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	3×10^8
$w_p\times h_p$	Specification of pixel array	40×30
f	Focal length of lens / m	4×10^{-4}
d	Vertical imaging distance / m	1.5
L_{pixel}	Pixel pitch / μm	10
ΔL	Distance from point light source to pixel center / m	0.01
r	Radius of the hemisphere / m	0.375
K_d	Diffuse reflection coefficient	0.8
K_s	Specular reflection coefficient	0.2
n	Specular highlight coefficient	1
f_t	Filter transmission rate	0.67
f_j	Light attenuation coefficient	0.85
I_{BG}	Irradiance of background light / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	1000
K	Vision rate	140
f_b	Filter blocked rate	2.18×10^{-2}
f_m	Modulation frequency / MHz	20

3 模型的评估与验证

3.1 静态场景中的验证

在模型验证实验中,模型的参数设置与德州仪器(TI)公司的 3D TOF 相机参数相同,像素阵列为 320×240 ,镜头焦距为 5 mm,像素间距为 $15\ \mu\text{m}$,实物半球的半径为 0.1 m。在静态场景中,用模型和 TOF

相机分别对不同距离下的平坦墙壁成像,通过像素阵列中心处的 $4\ \text{pixel}\times 4\ \text{pixel}$ 阵列计算平均成像距离。仿真和实测数据对比如图 6 所示。图 6(a)表明在 $1\sim 3.6\ \text{m}$ 的成像距离下两组数据具有较高的重合度;图 6(b)所示的两组数据的均方根误差(RMSE)表明模型的仿真数据比实测数据更准确,在 $1\sim 3.6\ \text{m}$ 成像距离上模型的 RMSE 稳定在 $0.005\ \text{m}$ 以下。

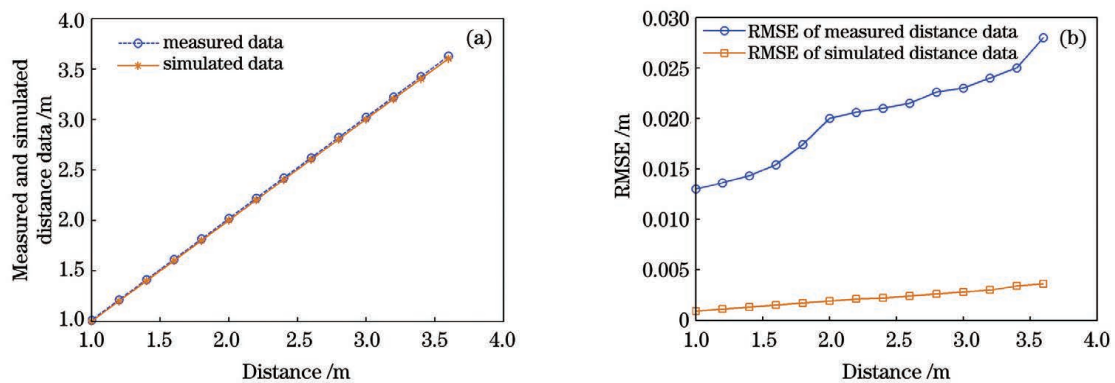


图 6 静态场景中的验证。(a)不同成像距离下实测距离和仿真距离的数值比较;(b)不同成像距离下实测距离和仿真距离的 RMSE 比较

Fig. 6 Verification in static scenarios. (a) Comparison of measured and simulated distance data at different imaging distances; (b) RMSE comparison of measured and simulated distance data at different imaging distances

图 7 为部分实测图像和模型仿真三维图像。图 7(a)、(b)、(c) 分别是成像距离为 1 m 时平坦墙壁的各类图像,图 7 中(d)、(e)、(f) 分别是成像距离为 1.5 m 时半球的各类图像,其中的振幅图像可以理解为图像的灰度图。通过对比可以直观看出模型仿真三维图更加平滑,基本不存在毛刺和深度值突变。这主要是因为曝光时间内的多次积分有效提

升了信噪比,从而降低了模型中添加的散粒噪声、环境光干扰、光衰减和滤波器光衰减等系统性干扰项对三维数据精度的影响;此外,仿真是直接基于 TOF 成像原理进行的,受非系统性误差的影响也较小。但在实际测试中,实测数据受 TOF 相机非系统性误差的影响较大,因此仿真数据的 RMSE 和三维图效果更好。

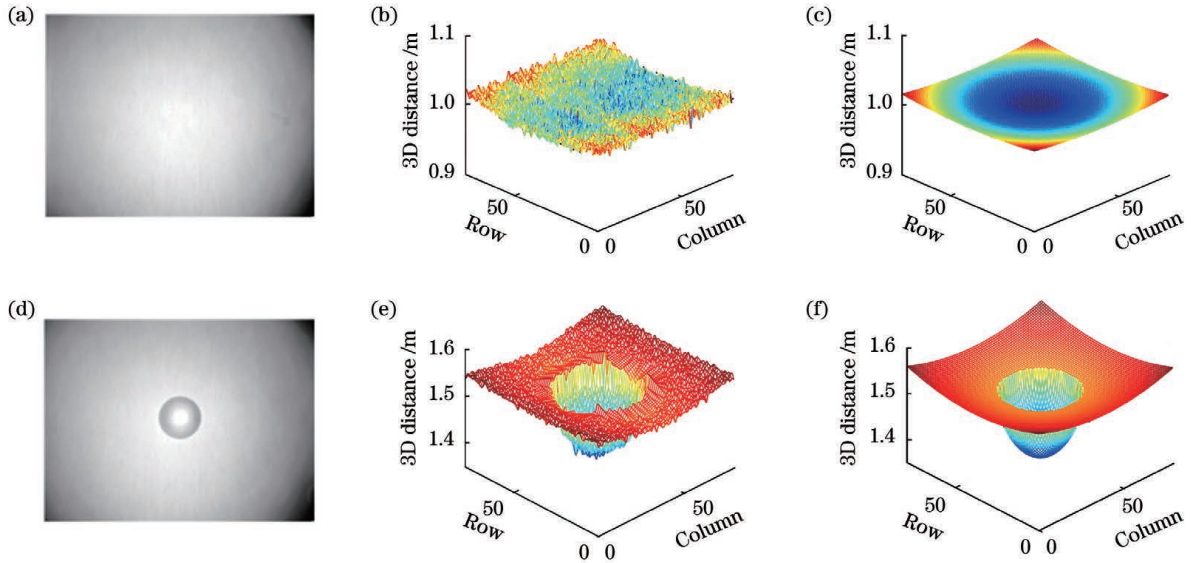


图 7 实测图像和模型仿真三维图像。(a)墙的振幅图;(b)墙的实测三维图;(c)墙的仿真三维图;(d)半球的振幅图;(e)半球的实测三维图;(f)半球的仿真三维图

Fig. 7 Measured images and simulated three-dimensional (3D) images. (a) Amplitude image of a wall; (b) measured 3D image of a wall; (c) simulated 3D image of a wall; (d) amplitude image of a hemisphere; (e) measured 3D image of a hemisphere; (f) simulated 3D image of a hemisphere

3.2 动态场景中的验证

为了模拟动态场景,将 TOF 相机固定在可以匀速横向移动的线性导轨上。采用模型和 TOF 相机在不同速度和不同帧频下对平坦墙面上的半球进行成像,获得仿真和实测三维图,随后用平均像素误差 [MPE, 其计算公式为 $E_{MPE} =$

$\frac{1}{a} \cdot \frac{1}{b} \cdot \sum_a \sum_b |A(a, b) - B(a, b)|$, $A(a, b)$ 、 $B(a, b)$ 分别表示仿真和实测三维图上同一点的三维数据]遍历两个三维图像中每个像素点对点的距离误差,结果如图 8 所示。在 1.5 m 的成像距离下,当运动速度为 0.5 m/s 时,在不同帧频

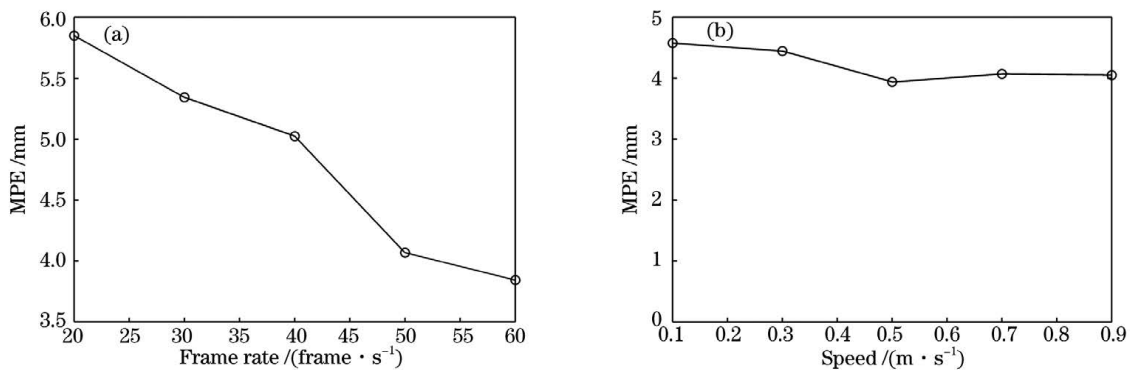


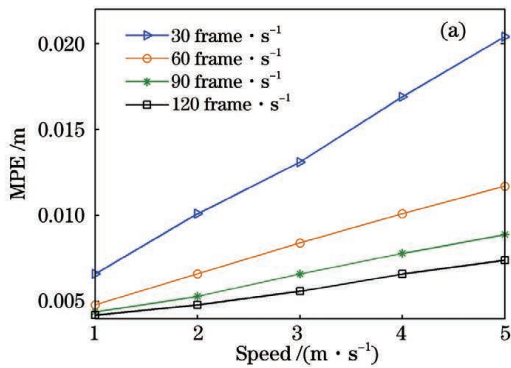
图 8 不同帧频、速度下实测图像与仿真三维图像的 MPE。(a)不同帧频;(b)不同速度

Fig. 8 Mean pixel error (MPE) between measured and simulated 3D images at different frame rates and speeds. (a) Different frame rates; (b) different speeds

下仿真和实测数据的平均像素误差小于 6 mm, 误差率小于 0.4%, 如图 8(a) 所示; 当帧频为 60 frame/s 时, 在不同运动速度下仿真和实测数据的平均像素误差小于 5 mm, 误差率小于 0.33%, 如图 8(b) 所示。

4 仿真结果与分析

运动速度和传感器的帧频直接影响着成像质量



和运动误差, 因此本文将它们作为分析两种曝光方式下运动误差的主要指标。基于模型对不同帧频和速度下两种曝光方式的运动误差进行仿真, 并将帧频无限大时的三维图像作为具有三维真值的深度图像, 从而获得了不同成像条件下两种曝光方式的 MPE 曲线, 如图 9 所示。可以看出, 在两种曝光方式下, 随着帧频的提升或运动速度的降低, 运动误差减小, 三维数据的精度得到提升。

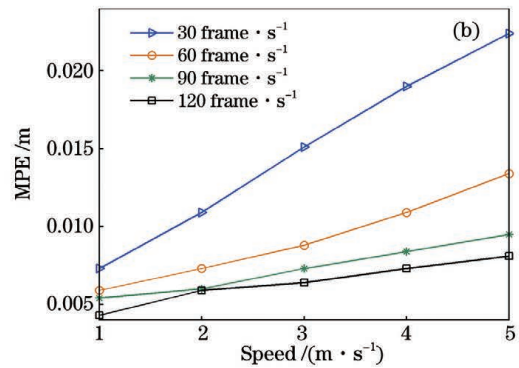


图 9 不同帧频和速度下两种曝光方式的 MPE。(a) 全局快门; (b) 滚筒快门

Fig. 9 MPE of two exposure modes at different frame rates and speeds. (a) Global shutter; (b) rolling shutter

为了比较两种曝光方式的成像质量, 基于两种快门下不同运动速度、帧频和 MPE 数据的统计, 整合获得了 MPE 差、帧频和运动速度之间的三维关系图, 其中 MPE 差为滚筒快门 MPE 与全局快门 MPE 之差。如图 10 所示, MPE 差始终为正值, 这意味着全局快门的成像质量始终优于滚筒快门。但在图 10 所示的三维图中存在 MPE 差最小的区域, 在该区域内两种曝光方式的 MPE 比较接近, 此时采用滚筒快门可以在降低电路设计难度的同时获得较高的三维数据精度。

大, 所以此区域不具有实际应用意义; 在成像条件 b 处, 帧频范围为 60~80 frame/s, 运动速度范围为 2.5~3.7 m/s, 该区域内的 MPE 差小于 0.5 mm。成像条件 b 处不仅运动速度范围大, 而且帧频易实现, 因此成像条件 b 处是最优的成像区域。

成像条件 b 的最低点处的 MPE 差仅为 0.3416 mm, 此时两种曝光方式的 MPE 相差得最小。本文深入探究了 MPE 差最小处的最优成像距离, 通过仿真得到了最低点处成像距离与 MPE 的关系, 如图 11 所示。当成像距离在 2 m 以内时, 由于视场面积有限, 物体的细微运动会导致深度图上

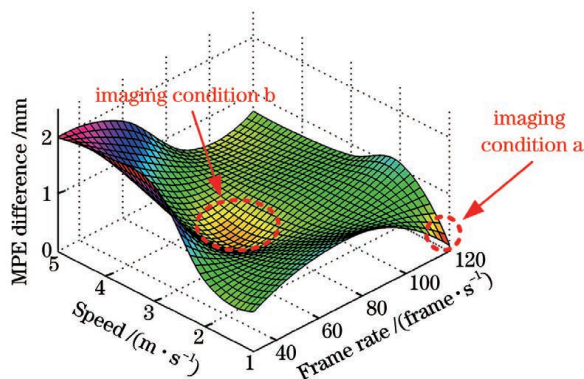


图 10 MPE 差、帧频和运动速度的三维关系图

Fig. 10 Three-dimensional diagram between MPE difference, frame rate and speed

图 10 中两处区域的 MPE 差相对较小: 在成像条件 a 处, 帧频高达上百帧且对运动速度的限制较

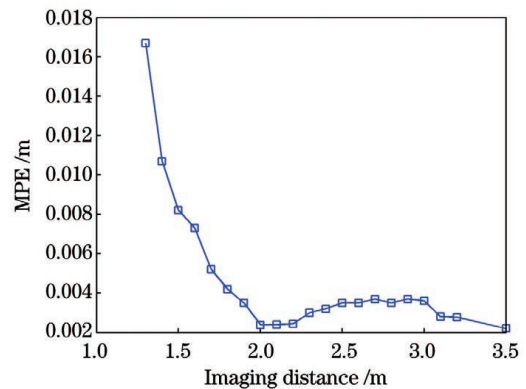


图 11 在成像条件 b 的最低点处成像距离与 MPE 之间的关系

Fig. 11 Relationship between imaging distance and MPE at the lowest point of imaging condition b

三维数据剧烈变化,因此 MPE 变化得较为显著;当成像距离达到 2 m 时,MPE 到达最低点,并且在 2 m 后趋于稳定;当成像距离达到 3 m 后,视场面积的增加导致物体的空间分辨率降低,因此运动引起的误差影响逐渐减小。为了同时获得较高的成像精度和空间分辨率,选择 3 m 以内 MPE 最低点对应的成像距离 $d=2$ m 作为最优成像距离。表 2 给出了动态场景中的最优成像指标。

表 2 最优成像指标

Table 2 Optimal imaging indicator

Indicator	Content
Shutter type	Rolling shutter
Properties of imaging object	Rough
Speed / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	3
Frame rate / ($\text{frame} \cdot \text{s}^{-1}$)	66
Imaging distance / m	2
Focal length of lens / m	4×10^{-4}
Pixel pitch / μm	10
Distance from light source to pixel / m	0.01
Modulation frequency / MHz	20

在最优指标中,像素阵列可以等比例放大,以满足大阵列的要求,最优成像距离也可以在误差允许范围内相应地增大或减小,并且还可以根据设计调整不影响结果的其他参数。但如果对结果有直接影响的参数发生变化,例如调制频率、像素间距、焦距等发生变化,则结果将出现无规则的变化,此时需要根据具体情况重新进行参数设置和仿真。

5 结 论

为了在动态场景中获得高精度的原始三维数据并降低电路的设计难度,减小运动模糊的影响,本文建立了两种曝光方式下的 TOF 图像传感器成像模型。模型直接基于 TOF 成像原理进行建立,可以通过简单的参数设置快速完成传感器参数的设定,有效提升多场景下的仿真效率。基于成像模型统计了各成像条件下两种曝光方式的运动误差,获得了滚筒快门下具有最小运动误差的最优成像指标,最优成像指标可以在较低的误差水平下降低电路的设计难度。采用德州仪器(TI)公司的 TOF 相机对本文建立的成像模型进行了评估和验证,结果表明两组数据具有较好的匹配度,并且静态场景下的验证结果表明模型仿真数据相较于实测数据精度更高。

参 考 文 献

- [1] Fu Q Y, Zhou Z M, Jin D F, et al. Triangular-wave modulation in a laser ranging system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0304006.
傅勤毅,周遵梅,金鼎沸,等.三角波调制在激光测距中的应用研究[J].中国激光,2020,47(3): 0304006.
- [2] Jiang B, Huang M S, Guan Z H. Pulsed laser ranging method using cyclostationary random sequences[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0101004.
姜博,黄民双,关在辉.基于循环平稳随机序列的脉冲激光测距方法[J].中国激光,2020,47(1): 0101004.
- [3] Rezaei A, Schramm G, van Laere K, et al. Estimation of crystal timing properties and efficiencies for the improvement of (joint) maximum-likelihood reconstructions in TOF-PET [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2020, 39(4): 952-963.
- [4] Kraft M, Nowicki M, Penne R, et al. Efficient RGB-D data processing for feature-based self-localization of mobile robots [J]. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 2016, 26(1): 63-79.
- [5] Huang M S, Guan Z H. A fast and high-precision pulse laser ranging method based on cursor principle [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0510001.
黄民双,关在辉.基于游标原理的快速高精度脉冲激光测距方法[J].中国激光,2019,46(5): 0510001.
- [6] Lange R, Seitz P. Solid-state time-of-flight range camera [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2001, 37(3): 390-397.
- [7] Jiang B, Jin X L. Improved correction algorithm for harmonic- and intensity-related errors in time-of-flight cameras [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111024.
蒋彬,金湘亮.改进的 TOF 相机谐波和强度误差校正算法设计[J].光学学报,2020,40(1): 0111024.
- [8] Lee S. Time-of-flight depth camera motion blur detection and deblurring [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2014, 21(6): 663-666.
- [9] Lefloch D, Hoegg T, Kolb A. Real-time motion artifacts compensation of ToF sensors data on GPU [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8738: 166-172.
- [10] Lottner O, Sluiter A, Hartmann K, et al. Movement artefacts in range images of time-of-flight cameras [C]//2007 International Symposium on Signals, Circuits and Systems, July 13-14, 2007,

- Iasi, Romania. New York: IEEE Press, 2007: 1-4.
- [11] Schmidt M, Jähne B. Efficient and robust reduction of motion artifacts for 3D time-of-flight cameras [C]//2011 International Conference on 3D Imaging (IC3D), December 7-8, 2011, Liege, Belgium. New York: IEEE Press, 2011: 1-8.
- [12] Lee S, Kang B, Kim J D K, et al. Motion blur-free time-of-flight range sensor[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8298: 265-270.
- [13] Everlight. 1.6 mm round subminiature side looking infrared LED[EB/OL]. (2006-03-06)[2020-11-20]. <http://www.everlight.com>.
- [14] Phong B T. Illumination for computer generated pictures[J]. Communications of the ACM, 1975, 18 (6): 311-317.
- [15] Cho J, Choi J, Kim S J, et al. A 3-D camera with adaptable background light suppression using pixel-binning and super-resolution [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2014, 49(10): 2319-2332.
- [16] Mase M, Kawahito S, Sasaki M, et al. A wide dynamic range CMOS image sensor with multiple exposure-time signal outputs and 12-bit column-parallel cyclic A/D converters [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2005, 40(12): 2787-2795.
- [17] Ge X L. The design of a global shutter CMOS image sensor in 110 nm technology [D]. Holland: Delft University of Technology, 2012.
- [18] Texas Instruments. OPT8241 3D time-of-flight sensor[EB/OL]. (2016-01-14)[2020-11-20]. <https://www.ti.com.cn/product/cn/OPT8241>.