

基于光电信号传输模拟的间接飞行时间速度成像系统模型

肖云泽¹, 史再峰^{1,2*}, 王云峰¹, 杨泽伟¹

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 为满足间接飞行时间(i-ToF)速度成像系统在设计阶段的仿真需求,对动态场景下的光信号传播过程进行建模,并基于光电信号的转换、解调与量化过程,构建了i-ToF成像传感器模型。该模型引入了光电信号传输路径中各模块的关键参数,从而实现对i-ToF速度成像系统的精确仿真。在与实际i-ToF相机采集数据的对比实验中,零差测量结果的变化趋势与实测数据一致,均方根误差为0.083。在与现有模型的对比实验中,所提模型相较于基于光线模型和蒙特卡罗估计的方法,测量误差分别降低了38.5%和52.1%。在连续波速度测量的仿真应用中,连续零差测量结果呈现周期性变化,其频率与由物体运动速度推导出的理论频率相符;在多普勒速度成像的仿真中,速度测量结果的误差峰值点与理论推导的测量零点相对应。该模型能够准确反映i-ToF速度成像系统参数与速度测量结果之间的关联,为成像系统的参数设计提供可靠依据。

关键词 光学传感与传感器; 间接飞行时间; 速度成像; 成像系统建模; 光电信号传输模拟; 多普勒间接飞行时间

中图分类号 TP212 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP251098

1 引言

速度成像技术在智能驾驶、工业控制、生物医疗、军事、消费电子等领域具有重要的应用价值,能够为交通物联网、先进制造、智能机器人、目标识别、姿态感知等应用场景提供可靠的数据支持。

基于主动式光学探测的结构光三维测量方法能够实现速度成像。该方法先向被测物体表面投射预设图案,再从另一视角采集因物体形状而产生畸变的图案,最后通过轮廓术解析出各点的相位信息。对动态场景的三维重建轮廓术可分为单帧和多帧方法^[1]。常用的单帧方法有傅里叶变换轮廓术^[2]、莫尔轮廓术^[3]等。Zhang等^[4]提出的计算莫尔轮廓术以单帧测量模式实现了传统多帧方法的测量精度,并有效消除了物体表面不均匀反射率的影响,从而兼顾了测量速度与精度。多普勒飞行时间(Do-iToF)方法^[5]结合零差和外差测量提取反射信号中的多普勒频移,并结合调制信号频率计算速度。常用的多帧方法包括相移测量轮廓术^[1]、快速调制度测量轮廓术^[6]、动态相位差轮廓术^[7]等。连续波间接飞行时间(i-ToF)速度测量方法^[8]通过提取连续零差测量的频率,结合调制信号频率计算速度。结构光三维测量方法可连续测量,并通过相位

差与时间间隔计算出速度图像。然而,在测量高速动态场景时,无论拍摄帧率多高,相邻帧间捕获的图案在理论上都存在本质差异。因此,傅里叶变换轮廓术、计算莫尔轮廓术与Do-iToF等能够实现单帧测量的方法,在速度成像中更具适用性。

结构光三维轮廓术测得的相位为限制在 $(-\pi, \pi]$ 区间内的包裹相位,要获取物体表面的真实连续相位,必须对包裹相位进行相位展开^[9]。相位展开方法可分为空间相位展开(SPU)方法和时间相位展开(TPU)方法。SPU方法通过比较相邻像素的相位值,判断是否加减 2π 以消除跳变并获得连续相位。SPU方法包括质量导向型^[10]、分支切割型^[11]、菱形^[12]、帘式^[13]、多锚双向抑制SPU^[14]等。SPU方法在处理存在局部阴影、条纹断裂等情况的区域时,可能导致误差从高噪声区域向低噪声及正常区域传播和累积。TPU方法按时间顺序投影不同频率的条纹,然后采集其在物体表面上的变形图案。该方法能在每个像素上独立完成相位展开,直接获得连续的绝对相位分布。TPU方法包括格雷码^[15-16]、条纹幅度编码^[17]、二进制编码^[18]、相位编码^[19]、相移编码分复用^[20]、码字空分复用^[21]等编码方法和外差多频^[22]、分层多频^[23]等多频方法。TPU方法的相位展开依赖于按时间序列采集的多帧条纹图。在动

收稿日期: 2025-04-25; 修回日期: 2025-06-04; 录用日期: 2025-06-11; 网络首发日期: 2025-06-20

基金项目: 国家重点研发计划课题(2022YFB2804401)

通信作者: *shizhaifeng@tju.edu.cn

态场景中,物体运动会造成帧间信息失配,从而引入相位展开误差,因此该方法在速度成像中的应用受限。

基于 i-ToF 的连续波和 Do-iToF 速度测量方法可以直接提取反射信号中的频移信息,并结合调制光信号频率实现单帧速度计算。i-ToF 成像系统包含近红外波长主动光源和采用锁定像素阵列的 i-ToF 传感器,控制像素阵列同时进行速度测量即可实现速度成像。i-ToF 成像系统模型的仿真结果能为主动光源和图像传感器的设计提供参考,相关建模和仿真方法在国内外有着广泛的研究。为了模拟 i-ToF 传感器工作过程,Keller 等^[24]提出一种基于光子混频器件^[25]的 i-ToF 图像传感器模拟方法,并设计了可输出相位图像的交互式应用程序。Schmidt 等^[26]提出一种基于 i-ToF 图像传感器的物理建模方法,他们的模型包括光源、像素响应、噪声等模块。为了减小 i-ToF 系统进行距离成像时的运动误差,牛洪星等^[27]建立了 i-ToF 系统模型并提出了传感器设计指标。然而,现有研究大多直接仿真最终的距离计算结果,简化了 i-ToF 传感器中关键的像素曝光过程。为实现精确的光学物理仿真,Kim 等^[28]基于全局光照下的无偏蒙特卡罗路径积分,建立了一种基于 i-ToF 原理的精确场景渲染模型。Baumgart 等^[29]则提出了一种光线追踪方法,其能够对含透明与散射介质的复杂场景进行仿真。尽管这些工作能有效仿真锁定像素测量值的相对幅值,但其输出仍未与实际的光电转换信号相关联。

以上相关研究已汇总于表 1。可以看出,现有模型主要建立在物理或光线传播模型之上,其输出多为距离信息或像素曝光响应。尽管 Kim 等^[28]采用蒙特卡罗方法模拟了 i-ToF 测量过程,但其输出仅为相对量值。在动态场景方面,现有研究多聚焦于运动模糊引起的误差,唯 Kim 等^[28]对动态场景下的 i-ToF 速度测量进行了仿真。总而言之,现有 i-ToF 系统模型简化了传感器的光电信号传输过程,未能将动态场景曝光所产生的光电子数、电压信号等与系统参数相关联。

表 1 现有 i-ToF 模型的对比
Table 1 Comparison of existing i-ToF models

Simulation method	Simulation output	Involved error
Physical model ^[24]	Distance	Motion blur
Pixel model ^[26]	Exposure magnitude	Pixel response non-uniformity
Ray model ^[27]	Distance	Motion blur
Monte Carlo estimation ^[28]	Relative exposure magnitude	
Ray tracing ^[29]	Distance	Transparent and scattering media

为解决这一问题,本文构建了一个涵盖从光信号传播到传感器内光电转换的完整链路模型,并引入了目标运动速度、调制频率及量化精度等关键参数。通

过分析这些参数对光电信号的影响,本模型实现了对速度成像结果的精确仿真。最后,将仿真结果与实测数据及理论推导进行对比,验证了所提模型的准确性。

2 i-ToF 速度测量方法

i-ToF 系统的主流速度测量方法主要包括连续波与 Do-iToF 两种。它们均基于零差或外差探测技术,通过解算反射光信号中的多普勒频移来推算待测物体的速度。

2.1 连续波速度测量

连续波速度方法测量基于 i-ToF 零差探测技术,首先系统的主动光源发出调幅连续波(AMCW)调制光信号,其振幅为 g_0 ,频率为 ω_g ,调制光信号 $g(t)$ 可以表示为

$$g(t) = g_0 \cos(\omega_g t) + g_0 \quad (1)$$

随后待测物体将调制光信号和背景光共同反射回传感器。设反射光信号振幅衰减至 r_1 ,反射光信号中的背景光分量为 r_0 。反射光信号回到传感器时相较于调制光信号有相位偏移 ψ ,同时运动物体使反射光信号带有多普勒频移 ω_d ,反射光信号 $r(t)$ 可以表示为

$$r(t) = r_1 \cos((\omega_g + \omega_d)t - \psi) + r_1 + r_0 \quad (2)$$

反射光信号进入传感器后,锁定像素将对反射光信号进行解调。设输入至像素的解调信号为 $f(t)$,频率为 ω_s 。当 $\omega_s = \omega_g$ 时,这种 i-ToF 测量被称为零差测量。根据 ToF 路径积分原理^[30],当曝光时间为 T 时,零差测量的结果可以表示为

$$\int_0^T f(t) \cdot r(t) dt = \int_0^T \cos \omega_s t \cdot (r_1 \cos((\omega_g + \omega_d)t - \psi) + r_1 + r_0) dt = \frac{r_1}{2} \int_0^T \cos(\omega_d t - \psi) dt \quad (3)$$

连续波速度测量方法要求传感器以固定时间间隔进行连续零差测量。设物体在连续曝光起始时刻相对于传感器的距离为 d_0 ,并以速度 v 匀速接近或远离传感器,在 t_n 时刻进行的第 n 次连续零差测量的结果^[8]可以表示为

$$s(n) = A_T \frac{r_1}{2} \cos \frac{2\omega_g(vt_n + d_0)}{c} \quad (4)$$

式中: A_T 是与曝光时间有关的振幅参数。由于连续零差测量结果具有周期性,可通过过零点检测等频谱分析技术获得其频率,然后依据式(4)并结合调制光信号的频率 ω_g 计算物体速度。

2.2 Do-iToF 速度测量

Do-iToF 速度测量方法^[5]要求传感器进行一次零差测量和一次外差测量。外差测量中的调制光信号与零差测量相同,但像素解调信号频率 ω_i 要与调制光信号频率 ω_g 存在一定的偏差,并要求曝光时长 T 为 $1/\omega_g$ 和 $1/\omega_i$ 的公倍数(lcm),即

$$T = k \cdot \text{lcm}\left(\frac{1}{\omega_g}, \frac{1}{\omega_i}\right), k \in \mathbf{Z}^+ \quad (5)$$

设零差测量和外差测量的结果分别为 s_{homo} 和 s_{hetero} ,根据式(6)可以得到两种测量结果与多普勒频移的关系,进而得到物体的运动速度:

$$\begin{cases} S_{\text{hetero}} = \frac{\int_0^T \cos \omega_f t \cdot (r_1 \cos((\omega_g + \omega_d)t - \psi) + r_1 + r_0) dt}{\int_0^T \cos \omega_g t \cdot (r_1 \cos((\omega_g + \omega_d)t - \psi) + r_1 + r_0) dt} = \frac{\omega_d}{\omega_g - \omega_f} \\ S_{\text{homo}} \\ v = \frac{\omega_d}{\omega_g} c \end{cases} \quad (6)$$

式中： c 为光速； v 为物体在反射光方向上的运动速度分量。Do-iToF 速度测量方法只需要两次 i-ToF 测量即可高效地确定物体运动速度。

3 基于光电信号传输的 i-ToF 系统模型

所提模型模拟了如图 1(a) 所示的 i-ToF 成像系统。该系统光电信号传输链路上的关键模块包括动态场景中的主动光源、运动物体,以及 i-ToF 传感器内的像素调制器、锁定像素与读出量化模块。系统的完整

光电信号传输流程如图 1(b) 所示,可分为动态场景传播与传感器内处理两大过程:1)动态场景光传播。该过程包含调制光、背景光及反射光的传播。主动光源发出调制光,该光与背景光一同经运动物体反射后返回 i-ToF 传感器。2)传感器内电信号处理。该过程包含光电转换、信号解调与读出量化。反射光由光电二极管转换为光电子信号;随后,通过像素调制器生成的解调信号对其解调,光电子累积并在扩散电容中转化为电压信号,最终被量化读出。

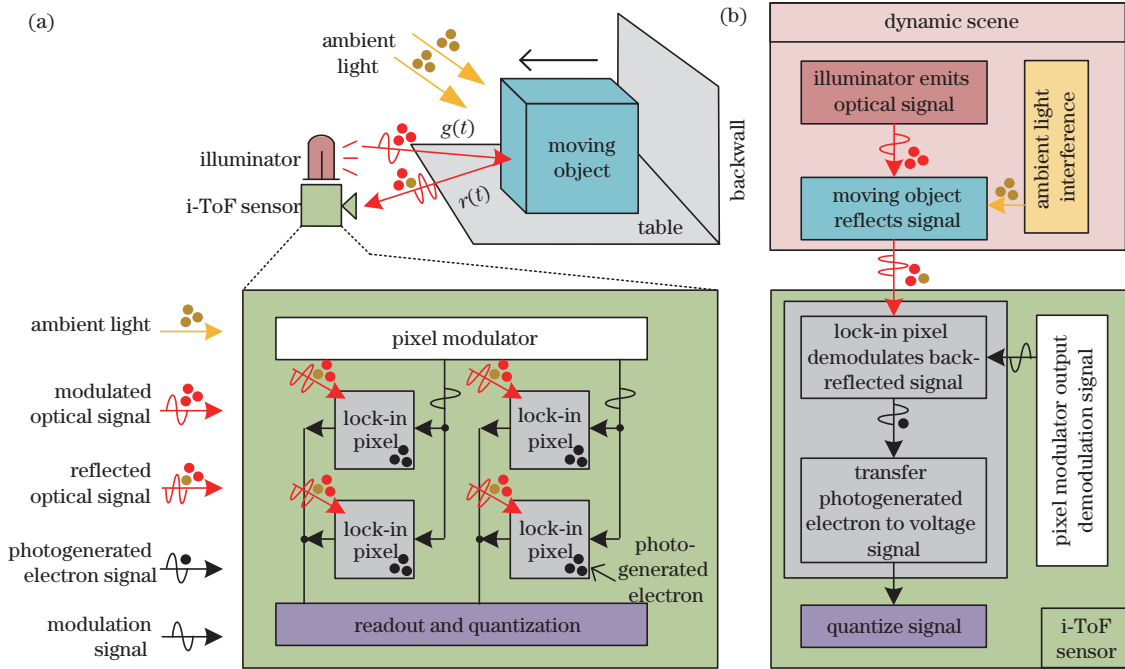


图 1 i-ToF 速度成像系统。(a) 成像系统;(b) 光电信号传输过程

Fig. 1 i-ToF velocity imaging system. (a) Imaging system; (b) transmission process of optical and electronic signal

基于上述流程构建的分模块模型如图 2 所示,其具体模拟过程如下:

1) 光发射与调制:光信号调制器将光源调制信号

输出至主动光源,后者依据发光强度与波长,将信号转化为调制光信号。

2) 目标反射与运动:运动物体反射调制光与背景

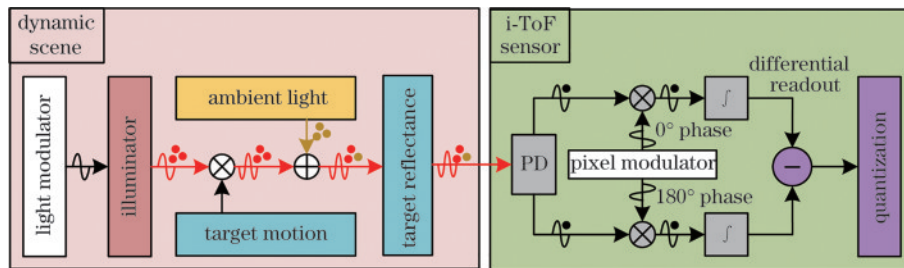


图 2 基于光电信号传输模拟的 i-ToF 成像系统模型

Fig. 2 i-ToF imaging system model based on optical and electronic signal transmission simulation

光。物体运动为反射光信号引入多普勒频移,而背景光分量的大小由环境光强决定。

3)光电转换与解调:反射光进入传感器后,由光电二极管(PD)将其转换为光电子信号。同时,像素调制器输出 0° 与 180° 相位的调制信号至锁定像素,控制光电子转移至对应的扩散电容。

4)电荷累积与量化:累积的光电子数量根据节点电容与满阱容量转化为电容电压信号。最后,该电压信号依据设定的量化精度与范围,经过差分读出与量化,输出最终测量结果。

3.1 动态场景中的光信号传播建模

为准确模拟动态场景中的光信号传播过程,所提模型将其分为主动光源发出调制光信号和运动物体反

射回反射光信号两个过程。设光调制器控制主动光源以频率 ω_g 发射正弦调制光信号,光源辐射强度为 P_{IR} ,则光源发出的光子通量为

$$\phi_{total} = \frac{P_{IR}}{E_p} \cdot 2\pi \quad (7)$$

式中: 2π 为半球的立体角; E_p 为近红外调制光的单光子能量。对于正弦调制信号,其振幅为强度的 $\sqrt{2}$ 倍,所以式(1)中的调制光信号振幅 $g_0 = \sqrt{2} \phi_{total}$ 。

为了对运动物体反射过程进行建模,假设动态场景中像素、滤光片与物体之间的空间几何关系如图3所示。其中,像素的尺寸为 L_p ,像素视野对应距离 d 的物体实际尺寸为 L_{obj} ,镜头的焦距为 f ,物体表面的反射率为 ρ ,像素视野内物体表面对应空间角为 Ω 。

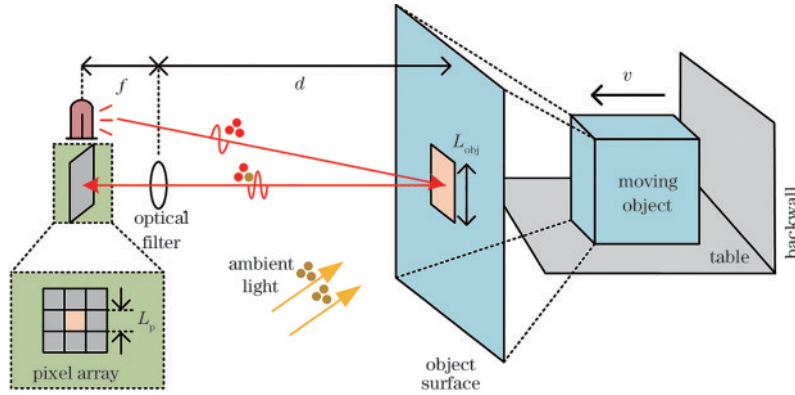


图3 动态场景中光信号传播

Fig. 3 Optical signal propagation in the dynamic scene

当主动光源紧邻传感器,即光源与传感器的间隔距离远小于物体距离时,像素阵列与镜头中轴线上的单个像素接收到的光子通量 ϕ_{pixel} 可以由式(8)得到。式(8)还考虑了镜头的光圈系数 F 、滤光片对背景光的透射比 k_{BG} 和对近红外光的透射比 k_{IR} 。

对于正弦波形的反射光信号,振幅 $r_1 = \sqrt{2} \cdot \phi_{pixel}$ 。经运动物体反射后,反射光信号会携带多普勒频移。当反射光信号到达传感器时,相对于发射光信号存在相位延迟。对于在距离传感器的位置 d 上以速度 v 运动的运动物体,反射信号的多普勒频移 ω_d 和相位延迟 ψ 如式(9)所示。

$$\begin{cases} \phi_{pixel} = k_{IR} \cdot \frac{\Omega \phi_{total}}{2\pi} \cdot \frac{1}{F^2} \cdot \rho \\ \Omega = 4 \cdot \arcsin\left(\frac{L_{obj}}{L_{obj} + 4d^2}\right) \\ L_{obj} = \frac{L_p}{f} \cdot d \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \psi = \frac{(2\omega_g + \omega_d)d}{c} \\ \omega_d = \frac{v}{c} \cdot \omega_g \end{cases} \quad (9)$$

基于背景光均匀分布的假设,反射光信号中背景光的分量可以根据辐照强度 P_{BG} 和像素视野中物体表面积 L_{obj}^2 得到, $r_0 = k_{BG} \cdot P_{BG} \cdot L_{obj}^2 / E_p$ 。基于以上对主动光源和物体反射的建模,入射传感器的反射光信号可以根据式(2)得到。

3.2 传感器的光电信号传输建模

为了准确地模拟传感器中的光电信号传输过程,所提模型参考了满足锁定像素工作机制的2-tap像素^[31]。2-tap像素的结构如图4(a)所示,其工作原理为:像素调制器输出的调制信号控制调制门TG0与TG1,将PD产生的光电子导入两个扩散电容SD0或SD1之一;依据扩散电容的大小将累积的光电子数转换为电压信号,并通过差分读出获得解调结果 ΔV 。根据上述2-tap像素工作原理,模型模拟了传感器中光电信号转换、解调和量化过程,如图4(b)所示。PD接收反射光信号并转换为光电子信号后,通过频率为 ω_s 、相位相关 180° 的两相方波信号对光电子信号进行解调;2-tap像素中的调制门TG0、TG1被建模为乘法器,扩散电容SD0、SD1被建模为积分器;解调结束后,对电容电压信号进行差分读出和量化即可得到解调结果。

首先对2-tap像素中光电信号转换和解调过程进

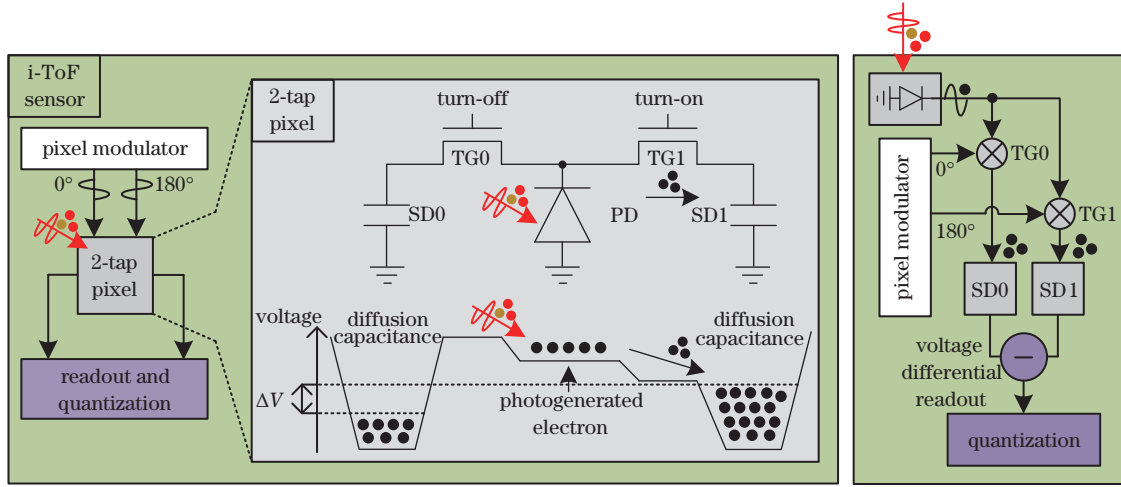


图 4 2-tap 像素结构和 i-ToF 传感器中信号传输过程

Fig. 4 The 2-tap pixel structure and the signal transmission within the i-ToF sensor

行分析。模型主要考虑像素填充因子 k_{FF} 、光源波长对应的量子效率 k_{QE} 对光电子转换效率的影响,则一个曝

光周期 T 内转移到扩散电容 $SD0$ 和 $SD1$ 的光电子数量 N_{SD0} 和 N_{SD1} 的表达式为

$$\begin{cases} N_{SD0} = k_{FF} \cdot k_{QE} \cdot \int_0^T \epsilon(\cos \omega_s t) \cdot (r_1 \cos((\omega_g + \omega_d)t - \psi) + r_1 + r_0) dt \\ N_{SD1} = k_{FF} \cdot k_{QE} \cdot \int_0^T \epsilon(\cos \omega_s t + \pi) \cdot (r_1 \cos((\omega_g + \omega_d)t - \psi) + r_1 + r_0) dt \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\epsilon(x)$ 为单位阶跃函数。为了得到式(3)和式(6)描述的解调结果,需要采用差分读出获取两个扩散电容之间的电压差值^[31-32]。在满阱容量未饱和的情况下,两个扩散电容的电压差 ΔV 可以表示为

$$\Delta V = \frac{(N_{SD1} - N_{SD2})e}{C_{SD}} \quad (11)$$

式中: e 为电子电荷量; C_{SD} 为扩散电容的电容值,该参数与设计 and 制造工艺有关。

最后对信号量化过程进行建模。设量化范围为 V_{SD} , 最终差分读出电压 V_o 可以表示为

$$V_o = \text{round} \left(\frac{\Delta V - \frac{-N_{\max} e}{C_{SD}}}{\frac{V_{SD}}{2^N - 1}} \right) \cdot \frac{V_{SD}}{2^N - 1} + \frac{-N_{\max} e}{C_{SD}} \quad (12)$$

式中: N 是量化位数; N_{\max} 为像素扩散电容满阱容量。

3.3 模型仿真流程

为了得到速度成像结果,本文基于所提模型仿真了连续波和 Do-iToF 速度测量方法,仿真流程如图 5 所示。所仿真的两种速度测量方法均需至少进行一次零差测量,因此先进行一次零差测量仿真。首先输入主动光源、运动物体、锁定像素及信号量化模块的相关参数,随后进行动态场景的仿真,具体流程包括:生成光源调制信号并依据光源参数计算调制光信号,结合物体速度与距离对该信号添加相位延迟和多普勒频移,计算环境光分量并添加至调制

光信号,最终根据物体反射率获得反射光信号。动态场景的仿真结束后,进行 i-ToF 传感器的仿真:根据反射光与像素参数计算光电子信号,生成零差测量所需解调信号并完成解调,得到扩散电容内的光电子数量。经过差分读出与量化处理后,获得最终解调结果。对于连续波速度测量,仿真程序将根据设定的零差测量次数 i_{homo} 重复运动物体反射至信号量化的完整流程,结束后通过过零点检测法获取连续测量的频率并计算速度。对于 Do-iToF 速度测量仿真,将继续进行一次外差测量,并通过 Do-iToF 方法计算速度。

4 模型仿真结果与分析

默认模型参数设置如表 2 所示,未经特殊说明模型参数将使用表中的设定。其中,与 i-ToF 系统相关的主动光源的光源辐射强度、滤光片对背景光和近红外光的透过率、锁定像素的填充因子、量子效率等参数参考了现有的 i-ToF 成像系统研究成果^[31-35]。背景光照强度设为正午晴天时的典型值,物体表面的反射率根据纸面粗糙度设定。

4.1 模型仿真结果与实测数据的对比验证

为验证所提模型有效性,采用德州仪器(TI)公司的 3D i-ToF 相机采集真实数据,并与模型仿真结果进行对比验证。该相机使用四相位测距法^[36]获得距离信息,其中, 0° 、 180° 相位测量结果与速度测量中的零差测量结果是相同的,因此可以作为对比验证的参考。

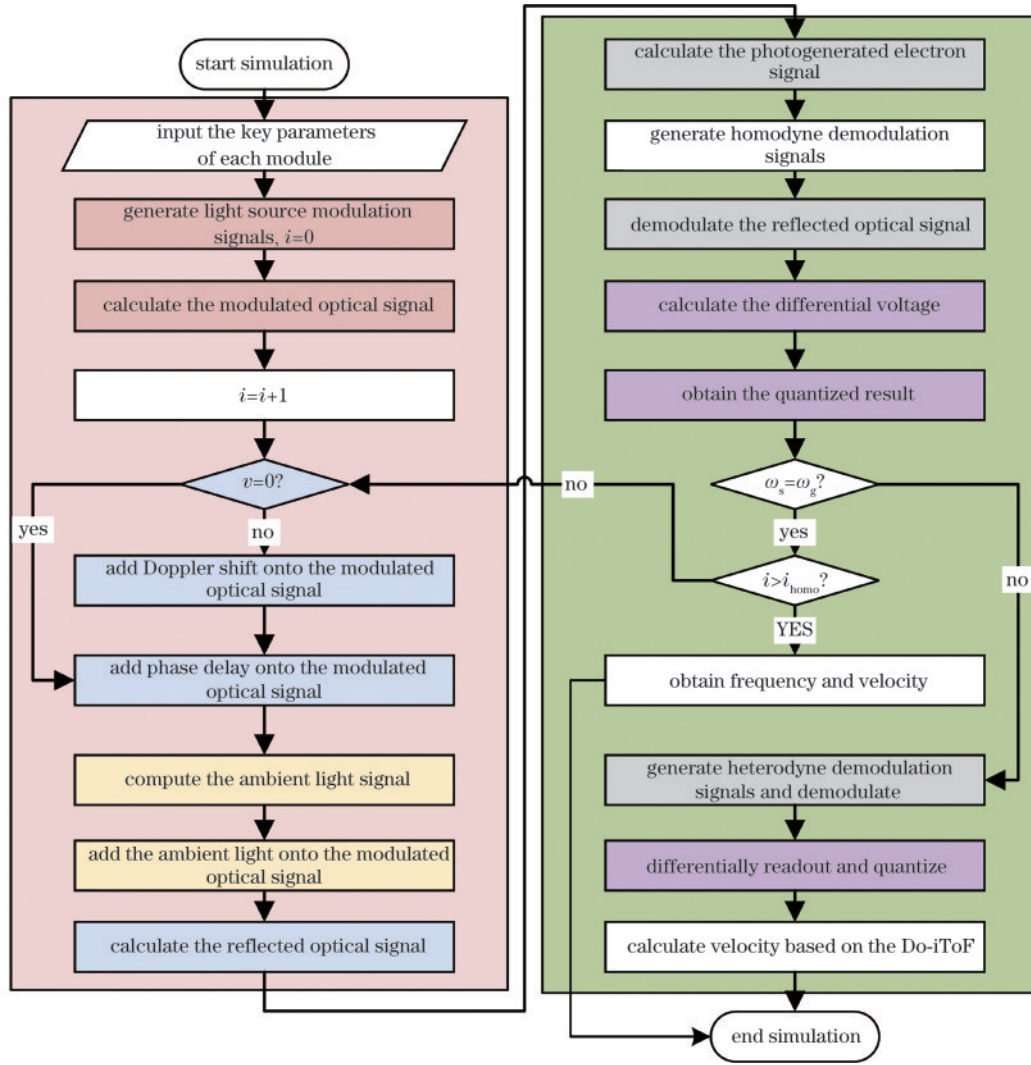


图 5 模型仿真流程图

Fig. 5 Simulation workflow of the model

表 2 默认模型参数表

Table 2 Default parameter settings of the model

Symbol	Parameter name	Parameter value
λ_{IR}	Wavelength of illuminator /nm	850
P_{IR}	Intensity of illuminator /($mW \cdot sr^{-1}$)	250
P_{BG}	Intensity of ambient light /($W \cdot m^{-2}$)	1000
ρ	Reflectance of surface	0.8
k_{BG}	Transmittance of ambient light	2.18×10^{-2}
k_{IR}	Transmittance of illuminator	0.67
F	Aperture size	1
f	Focal length of lens /mm	5
k_{FF}	Pixel fill factor	0.99
k_{QE}	Pixel quantum efficiency	0.25
N_{max}	Pixel full well capacity	25000
C_{SD}	Pixel storage node capacitance /fF	3
V_{SD}	Quantization range of the differential signal /V	1
$\omega_g - \omega_f$	Frequency offset of heterodyne modulation /Hz	1000

该相机像素阵列分辨率为 $320 \text{ pixel} \times 240 \text{ pixel}$, 搭配焦距为 5 mm 的成像镜头, 解调频率最高可达 100 MHz , 最高帧率为 150 frame/s 。光源波长为 850 nm , 镜头集成光学带通滤波器, 可透过 $830 \sim 867 \text{ nm}$ 波长的光线。测试环境如图 6(a) 所示, 白色物块固定于导轨滑块上, 导轨一端实物相机用三角架固定。为了获取实测参考数据, 选取白色物块平面作为探测目标, 从距相机 0.1 m 的位置出发, 以 0.5 m/s 的速度沿光轴方向匀速远离传感器; 将相机固定安装于导轨一端, 调制频率设置为 100 MHz , 以 30 frame/s 的成像帧率进行连续测量。为了验证模型仿真结果, 选取像素阵列中心的 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 测量结果作为参考。由于实物相机的像素参数未知, 仿真实验无法直接模拟实物相机中像素曝光结果。因此实测结果与模型仿真结果分别基于数据范围归一化后再对比。对比结果如图 6(b) 所示, 不同时间段的均方根误差 (RMSE) 如表 3 所示。结果表明, 仿真与实测结果的变化趋势一致, 归一化数据的幅值接近, 且频率都符

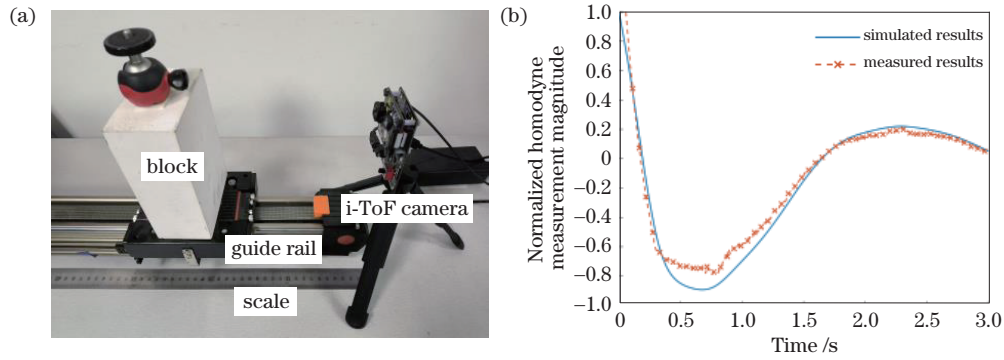


图 6 零差测量测试环境照片与结果对比。(a)测试环境;(b)仿真与实测结果对比

Fig. 6 Photograph of the homodyne measurement test environment and comparison of results. (a) Test environment ; (b) comparison between simulated and experimental results

表 3 实测数据与仿真结果分时间段的 RMSE 数据表

Table 3 RMSE of measured and simulated results over segmented time intervals

Time /s	RMSE
0.0 to 0.6	0.1843
0.6 to 1.2	0.1305
1.2 to 1.8	0.1067
1.8 to 2.4	0.0924
2.4 to 3.0	0.0827

合实验条件下根据连续波速度测量方法反推出的理论值。需要指出的是,由于真实系统中存在像素噪声^[37]、多径反射^[38]等误差因素,实测数据与理想仿真结果之间存在一定的偏差。

4.2 与现有 i-ToF 模型的对比

为了与现有的 i-ToF 模型进行对比,通过四相测距法^[36]在所提 i-ToF 系统模型中实现距离测量。为得到四相测距法所需的像素曝光结果,要控制模型进行两次零差测量仿真,其中,像素调制信号起始相位分别为 0° 和 90° 。仿真探测目标为距离传感器 1~3.6 m 的静止物体。

为公平地评估各模型对 i-ToF 测量过程本身的模拟精度,本次对比实验排除了像素噪声与量化噪声等系统误差的干扰。参与比较的模型包括所提模型、光线模型^[27]及蒙特卡罗估计模型^[28],各模型均采用四相测距法获取距离信息。以测距结果的 RMSE 作为评价指标。在图 7 所示的仿真条件范围内,各模型的误差变化趋势表明:所提模型的 RMSE 整体维持在较低水平,且未随物体距离的增加而出现显著上升。在整个仿真实验范围内,所提模型的 RMSE 为 1.34 cm,相较于光线模型(2.18 cm)降低了 38.5%,相较于蒙特卡罗估计模型(2.80 cm)降低了 52.1%。实验结果证明,在模拟 i-ToF 成像系统的测量过程方面,所提模型优于现有模型,具有更高的准确性。

4.3 连续波速度测量应用仿真

为获取整个像素阵列的测量结果,本节将仿真从

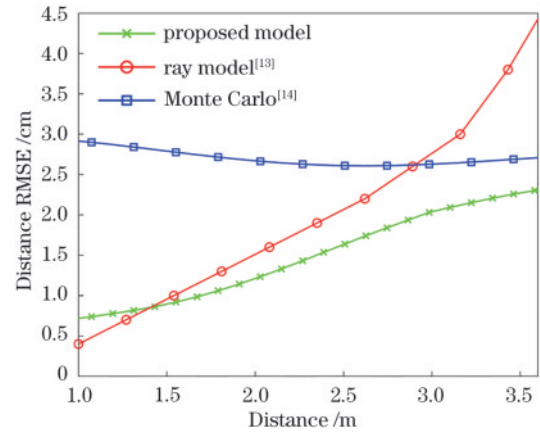


图 7 1~3.6 m 范围内各模型测距结果的 RMSE 比较

Fig. 7 Comparison of RMSE in distance measurements of each model within the range of 1 m to 3.6 m

阵列中心扩展至整个 256 pixel \times 256 pixel 阵列。该仿真基于 Mitsuba^[39]渲染器及其针对 i-ToF 优化的扩展组件 Do-iToF Render^[28]。Mitsuba 能通过光线追踪精确模拟复杂场景中的光传输,而 Do-iToF Render 则对采用 AMCW 调制信号的 i-ToF 系统进行了计算优化,但其输出仅为测量结果的相对幅值。为实现精确的绝对幅值仿真,我们设定了与第 4.1 节实测验验证完全相同的条件,并选取中心 5 pixel \times 5 pixel 区域。基于所提模型计算出的光电信号绝对幅值,对 Do-iToF Render 的相对输出进行校准,进而将此标定关系应用于整个 256 pixel \times 256 pixel 阵列绝对光电信号的生成。首先对连续波速度测量方法进行仿真。参数设置如下:目标物体从距传感器 0.1 m 处开始以 1 m/s 的速度匀速远离;传感器成像帧率为 30 frame/s,调制频率为 100 MHz,连续零差测量总时长为 3 s。图 8 展示了零差测量的仿真结果。可以看出,物体表面的测量信号呈现出清晰的周期性,该特性与式(4)的理论预测及 4.1 节的实测结果均相符,从而验证了仿真扩展的有效性。

图 9 分别展示了在调制频率为 150 MHz、100 MHz 和 50 MHz 条件下的速度成像结果。为了得到速度图

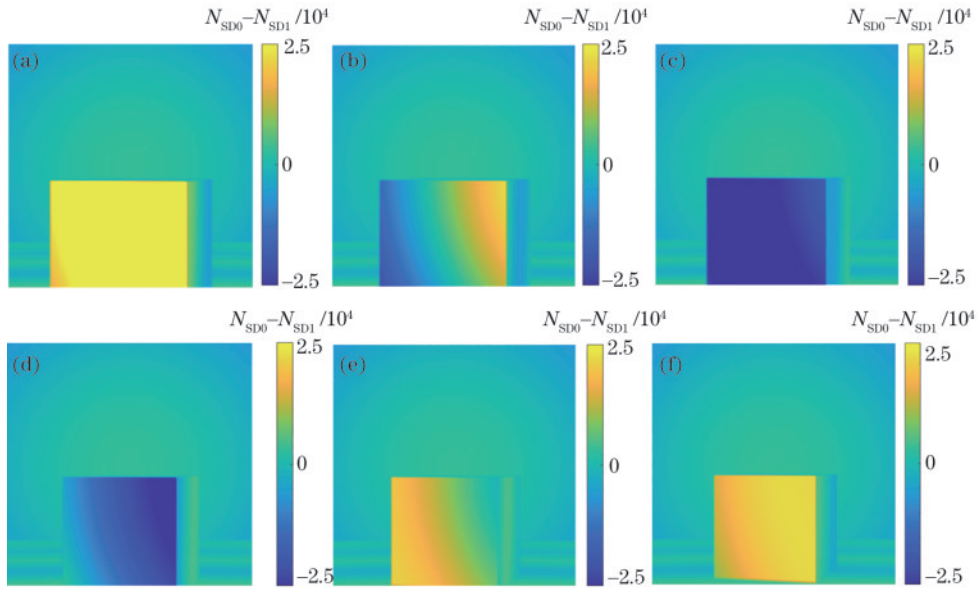


图 8 连续零差测量仿真结果

Fig. 8 Simulated results for continuous homodyne measurement

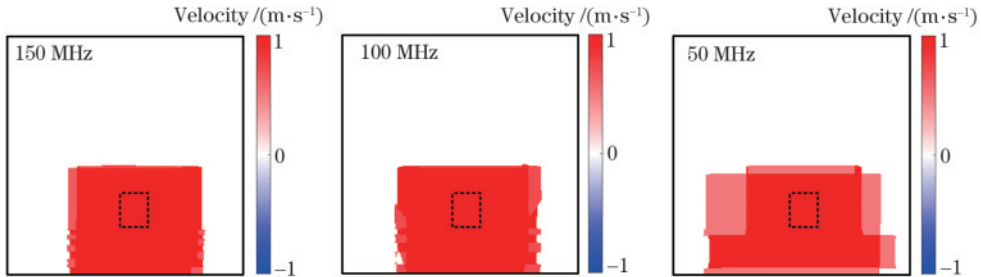


图 9 不同调制频率下的速度成像结果

Fig. 9 Continuous-wave velocity imaging results under different modulation frequencies

像,首先采用过零点检测法得到每一个像素连续零差测量结果的频率,然后根据式(4)计算出速度。结果显示,在上述3种调制频率下,从连续零差测量仿真结果中提取出的频率与根据式(4)得到的理论值均是符合的,验证了模型在连续波速度测量中的准确性。

为进一步探究系统参数对精度的影响,本研究仿真分析了不同调制频率与成像帧率组合下的速度成像误差。我们选取图9中虚线框所示的32 pixel×32 pixel区域进行统计,其速度成像结果的RMSE如图10所示。总体而言,速度误差随调制频率升高而减小。这是因为更高的调制频率会在反射光信号中引入更显著的多普勒频移,从而提升了频率提取与速度计算的灵敏度。然而,在3种帧率条件下均可观察到,当调制频率提升至一定阈值后,其对误差的改善效果趋于饱和。此时,提升成像帧率成为进一步降低误差的有效途径。这源于过零点检测法的频率估计精度受限于采样频率(即成像帧率)。因此,更高的帧率能直接带来更精确的频率估计,从而获得更优的速度成像精度。综上所述,在高调制频率下,成像帧率将取代调制频率,成为限制速度测量精度的主导因素。

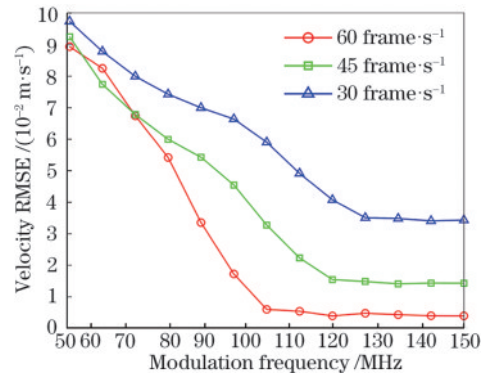


图 10 成像帧率和光源频率对速度成像误差影响

Fig. 10 The influence of imaging frame rate and illuminator frequency on velocity imaging error

4.4 Do-iToF 速度测量应用仿真

为对 Do-iToF 速度测量方法进行仿真分析,我们设定如下条件:目标物体在距传感器 1 m 处以 1 m/s 的速度向传感器接近,光源调制频率为 100 MHz。仿真得到的零差与外差测量信号如图 11 左图和中间图所示。经式(6)处理各像素的仿真数据后,所得速度图像如图 11 右图所示。计算得到的物体运动速度与预设仿

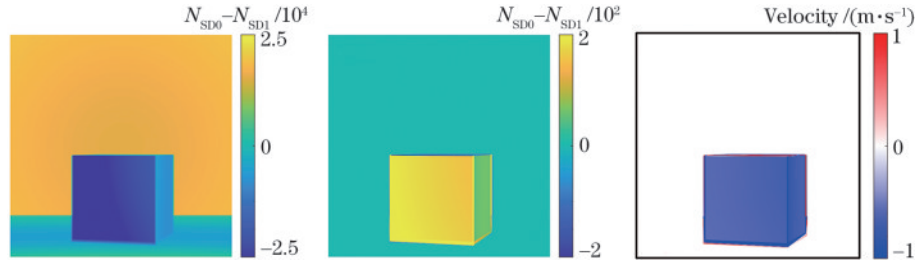


图 11 Do-iToF 速度测量的仿真结果

Fig. 11 Simulated results for Do-iToF velocity measurement

真条件相符,初步验证了模型的有效性。从图 11 右图可观察到,运动物体边缘存在明显的深色伪影区域。该现象源于曝光期间物体逐渐侵入这些像素的视场,导致其接收的反射信号在运动物体与静止背景间动态切换。此过程使得零差与外差测量结果偏离了 Do-iToF 方法所基于的稳态假设,从而产生错误的测量值,并在速度图像中形成伪影。为系统评估模型在 Do-iToF 速度测量中的准确性,我们在 0.1~1.5 m 的距离范围内,对以 1 m/s 速度运动的物体进行了成像仿真。图 12 展示了距离与量化精度对速度成像误差的影响。仿真结果表明:当量化精度较低时,速度误差整体较大,并出现两个显著的误差峰值。此现象可由式(6)解释:零差与外差测量结果与反射光信号的相位延迟(即物体距离)密切相关。在测量结果过零点附近的距离区间,两个扩散电容收集的光电子数差值极小。此时,低量化精度会引入较大的相对误差。两个误差峰值的间距约为 0.75 m,这与根据式(6)理论推导出的过零点间距完全吻合。该结果有力地证明了所提模型在 Do-iToF 速度测量中的准确性。

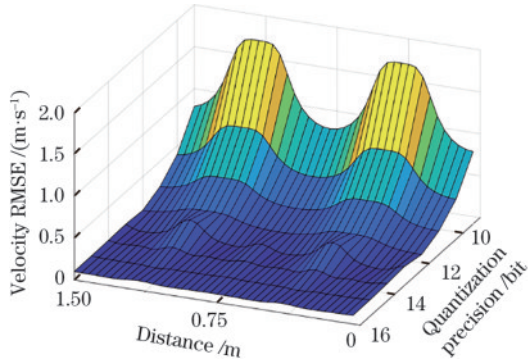


图 12 距离和量化精度对速度测量误差的影响

Fig. 12 The influence of distance and quantization precision on velocity measurement error

图 13 展示了不同量化精度下速度测量结果的 RMSE。结果表明,Do-iToF 速度测量方法对系统量化精度具有较高要求,尤其在对低速运动物体成像时,误差更为显著。这主要是因为低速目标产生的多普勒频移较小,导致外差测量信号幅度较低,使其在量化过程中更易受精度损失的影响。而对于高速运动目标,其增大的多普勒频移会产生更强的外差信号,信噪比

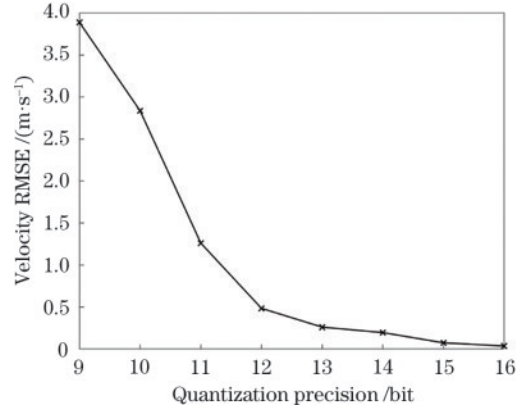


图 13 量化精度对速度测量误差的影响

Fig. 13 The influence of quantization precision on velocity measurement error

得以提升,因此测量误差相应降低。为优化 Do-iToF 的测量精度,在后续的 i-ToF 速度场成像传感器设计中,可考虑引入可编程增益放大器(PGA)以动态适配信号幅度,或采用增强型像素结构来提升电荷处理能力,从而有效抑制量化误差。

5 结 论

结构光投影方法在动态场景速度成像中展现出高精度与实时性的优势。本文聚焦于基于 i-ToF 的速度成像技术,重点研究了连续波与 Do-iToF 两种测量方法。这两种方法通过提取反射光信号中的多普勒频移,并结合发射光频率直接计算速度,从而避免了复杂的相位展开过程。此外,i-ToF 技术采用易于生成的 AMCW 作为调制信号,无需辅助条纹投影,简化了系统结构。为给 i-ToF 成像系统设计提供理论依据,本文围绕其光电信号传输过程,建立了一个高精度的系统模型。与现有模型相比,所提模型能更精确地模拟 i-ToF 成像过程。基于该模型,本文系统分析了调制频率、成像帧率及量化精度对速度测量误差的影响。仿真研究表明:提高调制频率与成像帧率可有效降低连续波速度测量的误差;而提升系统量化精度则能显著改善 Do-iToF 速度测量的性能。综上所述,所提模型不仅为后续 i-ToF 速度成像系统的优化设计提供了有力工具,还为速度测量的误差分析与精度提升研究奠定了重要基础。

参 考 文 献

- [1] 吴周杰, 张启灿. 基于条纹投影的高速三维形貌测量技术发展综述[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(8): 0811001.
Wu Z J, Zhang Q C. High-speed 3D topography measurement based on fringe projection: a review[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(8): 0811001.
- [2] Zhang Q C, Liu Y K, Lehtonen P. Shape measurement and vibration analysis of moving speaker cone[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9234: 92340T.
- [3] 曹益平, 张鹤晨. 计算莫尔轮廓术及其发展动态[J]. 光学与光电技术, 2023, 21(5): 1-23.
Cao Y P, Zhang H C. Computer-generated Moiré profilometry and its development trends[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2023, 21(5): 1-23.
- [4] Zhang H C, Cao Y P, Li H M, et al. Spatial computer-generated Moiré profilometry[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2024, 367: 115054.
- [5] Heide F, Heidrich W, Hullin M, et al. Doppler time-of-flight imaging[J]. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(4): 36.
- [6] Ai J, Zhang Q C, Su X Y. Fast modulation measurement profilometry based on phase-shifting and modulation ratio[J]. Optics Express, 2025, 33(10): 21707-21718.
- [7] Wei Z M, Cao Y P, Wu H T, et al. Dynamic phase-differencing profilometry with number-theoretical phase unwrapping and interleaved projection[J]. Optics Express, 2024, 32(11): 19578-19593.
- [8] Whyte R, Streeter L, Cree M J, et al. Application of lidar techniques to time-of-flight range imaging[J]. Applied Optics, 2015, 54(33): 9654-9664.
- [9] 张宗华, 李雁玲, 高峰, 等. 面向结构光三维测量的相位展开技术综述(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(8): 20230126.
Zhang Z H, Li Y L, Gao N, et al. Phase unwrapping technology for structured light three-dimensional measurement: a review (invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(8): 20230126.
- [10] Mostafavi Amjad J. Robust and fast filtering method for enhancement of two-dimensional quality-guided path unwrapping algorithms[J]. Applied Optics, 2020, 59(13): 3920-3926.
- [11] Du G L, Wang M M, Zhou C L, et al. A simple spatial domain algorithm to increase the residues of wrapped phase maps[J]. Journal of Modern Optics, 2017, 64(3): 231-237.
- [12] 李琴, 曹益平. 一种改进的菱形相位展开算法[J]. 光电子·激光, 2019, 30(6): 665-672.
Li Q, Cao Y P. An improved rhombus phase unwrapping algorithm[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2019, 30(6): 665-672.
- [13] Xu C, Cao Y P, Wu H T, et al. Curtain-type phase unwrapping algorithm[J]. Optical Engineering, 2022, 61(4): 044103.
- [14] Zhang Y, Cao Y P, Wu H T, et al. Spatial phase unwrapping algorithm based on multi-anchors bidirectional location and suppression[J]. Optical Engineering, 2024, 63(1): 014101.
- [15] 王浩然, 吴周杰, 张启灿, 等. 基于时间复用编码的高速三维形貌测量方法[J]. 光学学报, 2023, 43(1): 0112003.
Wang H R, Wu Z J, Zhang Q C, et al. High-speed three-dimensional morphology measurement based on time multiplexing coding[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(1): 0112003.
- [16] Wu Z J, Guo W B, Lu L L, et al. Generalized phase unwrapping method that avoids jump errors for fringe projection profilometry[J]. Optics Express, 2021, 29(17): 27181-27192.
- [17] Wang J, Cao Y P, Wu H T, et al. Absolute phase retrieval based on fringe amplitude encoding without any additional auxiliary pattern[J]. Optics Express, 2023, 31(25): 41952-41966.
- [18] 严飞, 路长秋, 文杰, 等. 复用加权二进制编码条纹三维测量方法[J]. 光学学报, 2023, 43(11): 1112005.
Yan F, Lu C Q, Wen J, et al. Three-dimensional measurement method of reusing weighted binary coded stripes[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(11): 1112005.
- [19] 汪俊霖, 张启灿, 吴周杰. 基于分段阶梯相位编码的三维形貌测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(14): 1415012.
Wang J L, Zhang Q C, Wu Z J. Three-dimensional shape measurement based on piecewise step phase coding[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(14): 1415012.
- [20] Wu F, Cao Y P, An H H, et al. Dynamic three-dimensional reconstruction with phase shift coding division multiplexing[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2024, 379: 115847.
- [21] Wu H T, Cao Y P, Dai Y B, et al. Ultra-fast 3D imaging by a big codewords space division multiplexing binary coding[J]. Optics Letters, 2023, 48(11): 2793-2796.
- [22] Tang J F, Feng X, Xu Y P, et al. Local phase correction method based on multi-frequency phase heterodyne[C]//2021 26th International Conference on Automation and Computing (ICAC), September 2-4, 2021, Portsmouth, United Kingdom. New York: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [23] Zhang C W, Zhao H, Gu F F, et al. Phase unwrapping algorithm based on multi-frequency fringe projection and fringe background for fringe projection profilometry[J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(4): 045203.
- [24] Keller M, Kolb A. Real-time simulation of time-of-flight sensors[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2009, 17(5): 967-978.
- [25] Schwarte R, Xu Z P, Heinol H G, et al. New electro-optical mixing and correlating sensor: facilities and applications of the photonic mixer device (PMD) [J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3100: 245-253.
- [26] Schmidt M, Jähne B. A physical model of time-of-flight 3D imaging systems, including suppression of ambient light[M]//Kolb A, Koch R. Dynamic 3D imaging. Lecture notes in computer science. Berlin: Springer, 2009, 5742: 1-15.

- [27] 牛洪星, 高静, 聂凯明. 飞行时间图像传感器的建模和运动误差分析[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(24): 2428001.
Niu H X, Gao J, Nie K M. Modeling and motion error analysis of a time-of-flight image sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(24): 2428001.
- [28] Kim J, Jarosz W, Gkioulekas I, et al. Doppler time-of-flight rendering[J]. ACM Transactions on Graphics, 2023, 42(6): 271.
- [29] Baumgart M, Druml N, Consani C. Multipath ray-tracing-based modelling of time-of-flight cameras[M]//van Driel W D, Pyper O, Schumann C. Sensor systems simulations. Cham: Springer, 2020: 93-147.
- [30] Hansard M, Lee S, Choi O, et al. Time-of-flight cameras: principles, methods and applications[M]. London: Springer London, 2013.
- [31] Keel M S, Kim D, Kim Y, et al. A 1.2-mpixel indirect time-of-flight image sensor with 4-tap 3.5- μm pixels for peak current mitigation and multi-user interference cancellation[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2021, 56(11): 3209-3219.
- [32] Kim D, Lee S, Park D, et al. Indirect time-of-flight CMOS image sensor with on-chip background light cancelling and pseudo-four-tap/two-tap hybrid imaging for motion artifact suppression[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2020, 55(11): 2849-2865.
- [33] Bamji C S, O'Connor P, Elkhatib T, et al. A 0.13 μm CMOS system-on-chip for a 512×424 time-of-flight image sensor with multi-frequency photo-demodulation up to 130 MHz and 2 GS/s ADC[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2015, 50(1): 303-319.
- [34] Keel M S, Jin Y G, Kim Y, et al. A VGA indirect time-of-flight CMOS image sensor with 4-tap 7- μm global-shutter pixel and fixed-pattern phase noise self-compensation[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2020, 55(4): 889-897.
- [35] Ebiko Y, Yamagishi H, Tatani K, et al. Low power consumption and high resolution 1280X960 Gate Assisted Photonic Demodulator pixel for indirect Time of flight[C]//2020 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), December 12-18, 2020, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020.
- [36] Lange R, Seitz P. Solid-state time-of-flight range camera [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2001, 37(3): 390-397.
- [37] Illade-Quinteiro J, Brea V M, López P, et al. Distance measurement error in time-of-flight sensors due to shot noise[J]. Sensors, 2015, 15(3): 4624-4642.
- [38] Whyte R, Streeter L, Cree M J, et al. Review of methods for resolving multi-path interference in Time-of-Flight range cameras[C]//SENSORS, 2014 IEEE, November 2-5, 2014, Valencia, Spain. New York: IEEE Press, 2014: 629-632.
- [39] Nimier-David M, Vicini D, Zeltner T, et al. Mitsuba 2: a retargetable forward and inverse renderer[J]. ACM Transactions on Graphics, 2019, 38(6): 203.

Indirect Time-of-Flight Velocity Imaging System Model Based on Optical and Electronic Signal Transmission

Xiao Yunze¹, Shi Zaifeng^{1,2*}, Wang Yunfeng¹, Yang Zewei¹

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

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

Abstract

Objective With the widespread application of indirect time-of-flight (i-ToF) imaging technology in areas such as intelligent driving, industrial inspection, and biomedical imaging, there is an urgent need to develop a system model that can accurately simulate the velocity imaging process and clearly represent the relationship between system parameters and velocity measuring results. This study aims to establish a high-precision i-ToF velocity imaging system model for dynamic scenes, addressing the limitations of existing modeling approaches in terms of simulation accuracy and signal modeling. Most existing models simplify the transmission and processing of optical and electronic signals, making it difficult to fully capture the effects of key components such as pixel-level signal conversion, demodulation, and quantization on imaging performance. This is particularly problematic when simulating Doppler shifts and phase variations in dynamic environments. Therefore, building a simulation model that can precisely replicate the internal signal processing of an i-ToF system and closely match actual measurement results is of great theoretical significance and practical value for guiding system design, error analysis, and performance optimization in velocity imaging applications.

Methods This study presents a system-level simulation model for i-ToF velocity imaging, grounded in the transmission processes of optical and electronic signals. The modeling starts with the propagation of optical signals in dynamic scenes, incorporating modulated light emission, background light interference, and Doppler-based frequency and phase shifts caused by moving objects. On the sensor side, the model captures essential physical processes, including optical and electronic signal conversion, pixel modulation control, diffusion capacitance integration, and quantized readout, enabling accurate simulation from optical input to electrical output. Based on

this framework, a complete simulation workflow is constructed for both continuous-wave and Doppler i-ToF velocity measurement methods, and simulation experiments are conducted under various scene conditions. The accuracy of the model is evaluated by comparing its outputs with theoretical calculations and data obtained from a Texas Instruments i-ToF camera, with a focus on velocity frequency extraction and error trends. Furthermore, the Mitsuba ray-tracing engine is employed to extend light distribution modeling across full pixel arrays. The influence of modulation frequency, frame rate, and quantization precision on velocity imaging error is systematically analyzed, demonstrating the model's practicality and effectiveness for system design and optimization.

Results and Discussions The proposed i-ToF velocity imaging system model demonstrates high accuracy and practicality across multiple simulation validations. In continuous-wave velocity measurement experiments, the simulation results closely align with data from a Texas Instruments i-ToF camera. The normalized waveform trends match well under homodyne measurements, with a root mean square error (RMSE) as low as 0.0827 (Fig. 6 and Table 3), confirming the model's capability to replicate real-world i-ToF measurements. Compared with existing ray-based and Monte Carlo estimation methods, the proposed model significantly reduces ranging errors within the 1–3.6 m range, achieving an overall root mean square error (RMSE) of 1.34 cm—38.5% and 52.1% lower than the two baseline methods, respectively (Fig. 7). Additional continuous-wave velocity imaging simulations show that the model accurately captures Doppler frequency shifts caused by object motion under various modulation frequencies, with extracted frequencies closely matching theoretical values (Fig. 9). The analysis indicates that higher modulation frequencies and frame rates effectively reduce velocity imaging errors (Fig. 10). In Doppler i-ToF simulations, the model successfully replicates both homodyne and heterodyne measurement processes, producing accurate velocity images (Fig. 11). Error analysis further reveals that system quantization precision has a notable impact on velocity accuracy: lower bit-depth quantization introduces larger errors, particularly near the zero-crossing point of homodyne measurement magnitude (Fig. 12), whereas high-precision quantization significantly reduces RMSE (Fig. 13). Overall, the model effectively integrates the transmission processes of optical and electronic signals with system parameters, offering a reliable reference for the design optimization and performance improvement of i-ToF velocity imaging systems.

Conclusions This study presents a comprehensive simulation model for indirect i-ToF velocity imaging systems, with a focus on the transmission processes of optical and electronic signals. The model accurately captures key components of the imaging pipeline, including optical signal propagation in dynamic scenes, optical and electronic signal conversion within the sensor, signal demodulation, and quantization, thereby establishing a precise relationship between system parameters and velocity measurement outcomes. Simulations of two i-ToF measurement methods—continuous-wave and Doppler-based i-ToF—are conducted and validated against experimental data from a Texas Instruments i-ToF camera as well as theoretical predictions, demonstrating the model's accuracy in replicating system behavior and capturing error trends. Error analysis shows that increasing the modulation frequency and frame rate significantly reduces velocity imaging errors in continuous-wave systems, while higher quantization precision is essential for improving accuracy in Doppler-based systems. Compared to existing models based on ray tracing and Monte Carlo estimation, the proposed model achieves superior ranging accuracy and more effective error control. Overall, this work provides a robust theoretical and technical reference for the design and optimization of i-ToF velocity imaging systems, offering practical guidance for enhancing measurement precision and system robustness across diverse application scenarios.

Key words optical sensing and sensor; indirect time-of-flight; velocity imaging; imaging system modeling; simulation of optical and electronic signal transmission; Doppler indirect time-of-flight