

文章编号 1004-924X(2025)15-2319-12

相位测量偏折术与机器人主动触觉检测相融合的 透明平面玻璃三维测量

胡慧然, 宋爱国*

(东南大学 仪器科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:传统视觉测量方法难以有效感知透明玻璃表面,而触觉检测受限于采样效率和测量分辨率,难以实现高精度面型重建。为克服这些局限性,提出了一种基于相位测量偏折术与主动触觉探测的视触融合测量方法。视觉测量提供相对表面相位梯度信息,触觉传感提供绝对位置信息,从而有效消除梯度-高度二义性,并抑制由底面玻璃偏折引起的幽灵条纹干扰。实验搭建了一套基于深度相机 Realsense D435 和 UR10 机械臂的测量系统,并在平面与近似平面玻璃样品上进行验证。实验结果表明:该方法可实现平面与近似平面玻璃的感知与重建,相比深度相机结合显像剂的方法,提出的方法在凹面玻璃表面重建中 RMS 降低了 80.59%,在凸面玻璃表面重建中 RMS 降低了 96.33%。提出的方法充分利用机器人自身的视觉-触觉传感能力实现了透明玻璃的三维测量与定位,为机器人在透明玻璃的感知与重建的应用中提供了一种解决方案。

关键词:相位测量偏折术;视触融合;玻璃检测;主动触觉检测

中图分类号:V248.1;TH744 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20253315.2319 **CSTR:**32169.14.OPE.20253315.2319

Three-dimensional measurement of transparent planar glass based on fusion of phase measuring deflectometry and robotic active tactile sensing

HU Huiran, SONG Aiguo*

(School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

* Corresponding author, E-mail: a.g.song@seu.edu.cn

Abstract: Traditional vision-based measurement techniques perform poorly on transparent glass surfaces, while tactile sensing is constrained by low sampling efficiency and limited resolution, impeding high-precision surface reconstruction. To address these limitations, a vision-tactile fusion measurement method is presented, integrating phase-measuring deflectometry with active tactile sensing. The vision subsystem supplies relative surface phase-gradient information, whereas the tactile subsystem provides absolute positional measurements; this combination resolves the gradient-height ambiguity and suppresses ghost-fringe artefacts produced by light deflection at the lower glass surface. An experimental setup comprising a Realsense D435 depth camera and a UR10 robotic arm was implemented and evaluated on planar and near-

收稿日期:2025-03-07;修订日期:2025-03-27.

基金项目:国防基础科研项目(No. JCKY2022110C040)

planar glass specimens. Results demonstrate that the proposed method enables accurate perception and reconstruction of both planar and near-planar transparent glass surfaces. Relative to a depth-camera approach augmented by a developer agent, the proposed method reduced RMS error by (80.59%) for concave surface reconstruction and by (96.33%) for convex surface reconstruction. The approach exploits the robot's inherent vision-tactile capabilities to achieve three-dimensional measurement and localization of transparent glass, offering a practical solution for robotic perception and reconstruction of transparent surfaces.

Key words: phase measuring deflectometry; vision-tactile fusion; glass surface reconstruction; active tactile detection

1 引言

机器人的环境感知能力对于成功执行任务至关重要。通过利用多种感知方式(如触觉、视觉、听觉等),机器人能够更好地理解和适应周围环境,这些技术在各种应用中已取得显著成效^[1-2]。透明平面玻璃在日常生活中无处不在,如玻璃窗、玻璃门等。尽管现有的传感器系统已相当成熟,但透明且具有一定镜面特性的玻璃表面测量仍然是一个技术难题。传统的视觉三维轮廓测量系统通常仅适用于表面具有漫反射特性的物体,例如线结构光相机^[3-4]、红外激光扫描仪^[5]、相位测量轮廓仪^[6]以及用于工业焊缝检测的轮廓测量系统^[7]。然而,透明玻璃会透射大部分入射光,仅反射少量光线,其表面缺乏明显的颜色和纹理特征,难以从背景中区分。在机器人应用中,透明玻璃的存在可能引发意想不到的挑战,影响系统性能,甚至导致机器人与玻璃碰撞或损坏。因此,准确感知透明玻璃表面成为机器人系统亟待解决的重要问题。

传统的解决方案是喷涂显像剂,在玻璃表面形成漫反射层,使常规的视觉传感器能够捕捉其表面几何信息^[8]。然而,该方法操作繁琐,且存在实际应用的局限性。另一种方法是基于接触的测量方式,其测量结果不受玻璃光学特性的影响,但由于需要逐点触碰扫描,其测量过程耗时且效率较低^[9]。近年来,透明玻璃感知与测量的研究^[10],主要集中在二维识别^[11-12]和三维测量^[13-14]两个方面。其中,相位测量偏折法(Phase Measuring Deflectometry, PMD)成为一种高效且便捷的高反光镜面表面 3D 测量技术。PMD 利用表面的光学反射特性,通过显示条纹并捕捉反

射条纹的相位变化,进而计算表面梯度的变化,并通过数值积分或迭代法重建表面 3D 形态^[15-17]。然而,PMD 在透明玻璃的 3D 测量中仍面临两个挑战:一是梯度与高度的二义性,二是幽灵条纹重影问题。

梯度-高度二义性是 PMD 的固有局限性。为解决该问题,研究人员提出了多种改进方案。早期研究尝试通过屏幕的垂直位移来获取多个测量位置,并利用反射光线的交点进行三维重建^[18],但高精度的垂直位移控制技术难以实现,限制了其实用性。为克服这一难题,后续研究提出了多相机和多屏幕配置,通过最小化法向向量误差来重建三维表面^[19-20]。然而,该方法对像素匹配精度和系统标定要求极高,增加了系统的复杂度。此外,一些研究引入激光传感器来获取绝对高度基准^[21],尽管该方法有效,但需要精确调整激光角度,操作较为不便。另一种方法是利用特定的光学路径设计来实现对不连续表面的测量^[22-23]。尽管这些方法在一定程度上提高了测量精度,但通常需要复杂的硬件配置,更适用于离位测量,而非机器人原位测量场景。

幽灵条纹的产生原因是透明玻璃前后表面的反射和折射混合在相机拍摄的条纹中。为解决这一问题,Liu 等通过在前后表面分别涂抹不同折射率的介质来解耦双表面的条纹^[24],或通过抑制下表面的反射仅捕获上表面的条纹^[25]。尽管这些方法有效,但效率较低,且不适合机器人原位测量。Huang 等提出了基于混合反射和折射模型,并通过最小二乘法解耦上下表面条纹的方法^[12,26],但该算法依赖于初值,且稳定性较差。Jeong 等通过设计光路并调节屏幕位置来避免二

次光线的产生^[27],但其系统复杂,且在实际应用中难以调节不同的阈值。

当前的视触融合方法主要用于漫反射表面的检测与分析,在处理复杂几何结构和不规则表面时表现良好^[14,28-29]。触觉感知作为视觉检测的有力补充,在视觉遮挡或表面特征不足的情况下尤为重要。本文提出了一种视触融合的透明玻璃 3D 测量方法,通过结合相位测量偏折术与触觉感知的优势,利用玻璃的反射特性提取相对相位信息,并通过触觉传感器获取部分绝对位置信息。最终,通过多项式融合这两种数据,恢复出玻璃前表面的三维形貌。该方法在保持单目 PMD 结构简单的同时,避免了高度梯度二义性和幽灵条纹的问题,提高了测量效率和精度。此外,因视觉部分仅计算相对梯度信息,无需复杂的标定过程,最终由触觉感知提供绝对高度参考。

2 原理

2.1 幽灵条纹与梯度-高度二义性问题

PMD 与相位投影轮廓术的测量原理相似^[30-31]。针对具有高反射性质的表面,PMD 通过在显示屏上呈现具有固定相位差的正弦条纹图案,并利用相机捕捉镜面区域的条纹变化,从而计算相对高度。由于单幅图像无法直接获取相位信息,采用 4 幅不同相位的相移图像来解算相位。条纹图案的具体形式及相位计算公式如下:

$$I_n(x, y) = I_0 + L \sin(\phi(x, y) + 2n\pi/N), \quad (1)$$

$$\phi(x, y) = \arctan\left(\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)}\right), \quad (2)$$

其中: I_0 表示显示屏基础光强, L 表示调制光强, $\phi(x, y)$ 表示在该处的相位值, N 表示相移的总步数, n 表示步相移步数。

对于非透明的镜面物体,由于只有反射光线,因此上述相位计算是准确的。然而,对于透明玻璃,除了上表面的反射光线外,还存在下表面反射后折射回上表面的光线。如图 1 所示,A 点的入射光线 I_A 经过玻璃上表面后,既产生了反射光线 R_A ,也产生了折射光线。折射光线经过一定光程后,在玻璃下表面反射,并再次回到上表面形成新的折射光线 G_A 。相机接收到的 A 点

光线中,除了反射光线外,还包含来自 B 点的折射光线。这些折射光线叠加在原始反射光线上,造成重影现象,形成了幽灵条纹。

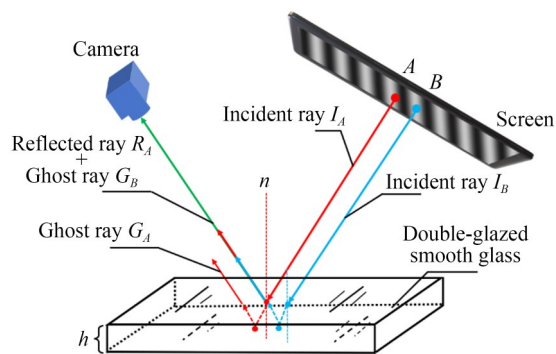


图 1 条纹反射折射路径示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fringe reflection and refraction path

经过反射和折射后的条纹 $I_w(x, y)$ 可以表示为:

$$\begin{cases} I_w(x, y) = R_A + G_B \\ R_A = I_R + L_R \sin(\phi_R(x, y)), \\ G_B = I_G + L_G \sin(\phi_G(x, y)) \end{cases} \quad (3)$$

其中: I_R, I_G 分别表示反射条纹和折射条纹的基础光强, L_R, L_G 分别表示反射和折射的调制光强, $\phi_R(x, y), \phi_G(x, y)$ 分别表示反射和折射条纹在该处的真实相位。透明玻璃的厚度 h 造成了光程差,从而影响了 B 点的位置。由于光程差直接影响屏幕上条纹的相位差,因此得出: $\phi_G(x, y) = \phi_R(x, y) + K$, 其中 K 作为 B 点和 A 点之间的相位差,对于平面或近似平面的透明玻璃, K 是一个常数。那么式(3)可以改写为:

$$I_w(x, y) = I_R + I_G + L_R \sin(\phi_R(x, y)) + L_G \sin(\phi_R(x, y) + K). \quad (4)$$

通过三角恒等式对式(4)进一步合并,形成新的振幅 R 和相位 $\phi(x, y) + \theta$, 得到:

$$\begin{cases} I_w(x, y) = I_R + I_G + R \sin(\phi(x, y) + \theta) \\ R = \sqrt{(L_R + L_G \cos(K))^2 + (L_G \sin(K))^2} \\ \theta = \arctan\left(\frac{L_G \sin(K)}{L_R + L_G \cos(K)}\right) \end{cases} \quad (5)$$

最终幽灵条纹的模型如式(5)所示,当显示屏设置的条纹编码确定后, I_R, I_G, L_R, L_G 为常数。因此 R 和 θ 也为常数,那么式(5)可以等效为

式(1),同样可以采用式(2)四步相移的方式求解 $\phi(x+y)+\theta$ 。进一步分析可知,在透明玻璃的情况下,幽灵条纹不会影响相位解算,因此使用四步相移法进行相位求解是可行的,尤其是对于平面或近平面的玻璃表面;当透明平面玻璃较薄时, K 值接近于0,幽灵条纹的影响较小,这对于传统PMD方法来说是有利的,即便如此,玻璃的厚度变化依然可能导致测量结果的误差,其中相位解包带来的误差为 θ 。由于透明玻璃下表面的二次折射和反射效应,因此 $L_G < L_R$, $\theta \in (0, \frac{\pi}{4})$,不同的玻璃厚度可能会导致相同的 θ ,这使得上下表面的条纹解耦变得更加困难。

尽管证明了幽灵条纹可以等效为一种正弦条纹的形式,并可以通过传统四步相移方式进行求解,但PMD还存在梯度和高度的二义性问题。

如图2(a)所示,当透明玻璃高度发生变化时,相机中同一像素点的反射成像从A点移动到B点,相应的相位变化 $\Delta\phi_{AB}$ 与高度 Δh 的关系如下:

$$\Delta\phi_{AB} = \frac{2\pi}{T \cdot p} \cdot \frac{\Delta h}{\sin(\alpha)}, \quad (6)$$

$$\Delta h = \frac{T \cdot p \cdot \sin(\alpha)}{2\pi} \cdot \Delta\phi_{AB}. \quad (7)$$

其中: T 为条纹周期, p 为显示屏的像素点间距。

当透明玻璃产生倾斜角度 β 时,如图2(b)所示,相机拍摄到的显示屏反射成像从A点到C点变化。相位变化与表面梯度 s 的关系如下:

$$\Delta\phi_{AC} = \frac{2\pi}{T \cdot p} \cdot \overline{AC} = \frac{2\pi}{T \cdot p} \cdot \overline{OA} \cdot 2\beta, \quad (8)$$

$$s = \tan(2\beta) = \tan\left(\frac{T \cdot p}{2\pi \cdot \overline{OA}} \cdot \Delta\phi_{AC}\right). \quad (9)$$

在此情况下,梯度变化引起的相位差不同于由高度引起的相位差。

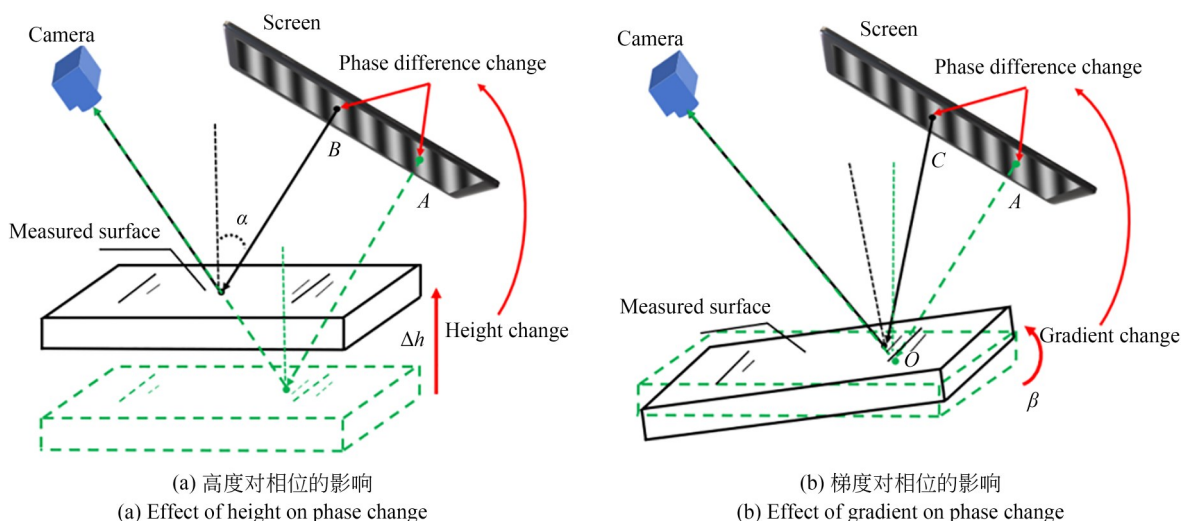


图2 梯度-高度二义性示意图

Fig. 2 Schematic diagram of gradient-height ambiguity

在不引入其他测量手段的情况下,PMD系统难以区分相位差是由高度变化还是梯度变化引起的,同时也受到幽灵条纹造成的相位差误差影响。梯度变化对相位差的影响通常远大于高度变化,在一些仅需获取相对高度而不需要绝对定位的场景中,高度的影响往往忽略不计。然而,在机器人系统中,特别是需要与环境进行交互操作的场景下,仅考虑梯度变化是不够的。尽管这些应用通常对测量精度要求不高,但正确区

分并考虑高度与梯度的影响,并减小幽灵条纹带来的误差,仍然是确保机器人操作精度和可靠性的关键。

2.2 PMD和触觉检测相融合测量原理

如图3所示,视觉测量系统捕获反射的条纹图案并提供由玻璃表面引起的相对相位变化。触觉传感器以机械臂底座为参考坐标系进行表面检测。

在实际测量场景中,参考面和被测表面之间

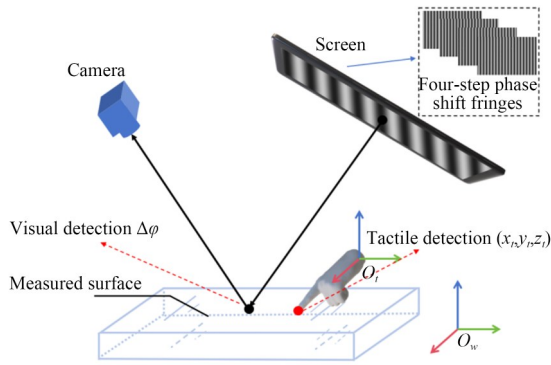


图 3 PMD 和触觉检测相融合示意图

Fig. 3 Measurement principle for mono-PMD and tactile sensing fusion

存在高度差和梯度变化。视觉测量系统捕获的相位变化受高度和梯度的共同影响。在这种情况下,视觉测量结果并不完全准确。因此,视觉系统仅捕获被测表面相对于参考面的相位变化,提供有关表面相对相位变化的信息。触觉系统通过接触感应收集离散点数据,提供相应全局 3D 信息。通过将视觉测量与触觉感应相结合,实现玻璃表面的三维重建和定位。

由于式(2)通过反正切函数计算得出相位值,最终结果被包裹在特定范围 $[-\pi, \pi)$ 内,因此需要进行展开以获得连续的相位值。采用质量引导解包裹算法^[32]对包裹相位进行相位提取和解包。在获取解包裹相位后,可以计算与参考面之间的相位差,进而将透明玻璃的测量相位与参考面的相位结果相减获得相位差 $\Delta\phi(x, y)$,并分别计算相位差在 x 和 y 方向的梯度 g_x 与 g_y ,即:

$$\begin{cases} \Delta\phi(x, y) = \phi_m(x, y) - \phi_r(x, y) \\ g_x = \frac{\Delta\phi(x+1, y) - \Delta\phi(x, y) - \Delta\phi_{\text{start}}}{dx} \\ g_y = \frac{\Delta\phi(x, y+1) - \Delta\phi(x, y) - \Delta\phi_{\text{start}}}{dy} \end{cases}, \quad (10)$$

其中: $\phi_m(x, y)$ 是测量相位, $\phi_r(x, y)$ 是参考相位, $\Delta\phi_{\text{start}}$ 是起始点的相位差结果。然后,利用相位差的梯度数据进行积分,重建表面的相对相位高度信息。将选定的透明玻璃区域(ROI)的中心设置为参考点,并在 x 和 y 方向上进行单次积分以获得基线值。使用这些初始积分值作为在 x 和 y 方向上进一步积分的起点,最终得到整个区

域的相对高度数据。积分公式如下:

$$Z_{\text{visaul}}(x, y) = Z_0(x, y) + c_x \int_{-x}^x (g_x + g_y) dx + c_y \int_{-y}^y (g_x + g_y) dy, \quad (11)$$

其中: $Z_0(x, y)$ 表示初始基准点, c_x, c_y 分别表示 x 和 y 方向积分的系数。由于幽灵条纹和梯度-高度二义性的共同影响,计算结果并非真实的表面相对高度,而是相对于参考平面的变化量。在固定测量平台中,通过复杂的系统校准和配置,相对参考平面的高度变化可以有效地等同于被测表面的相对变化,但高精度的标定方式仍然存在实际操作的困难,导致计算出的 Z_{visaul} 不准确。另一个关键问题是积分过程中相位梯度误差的累积会导致计算出的 Z_{visaul} 不准确。这些误差会随着积分的进行而加剧,导致得到的高度数据越来越不准确。通过结合触觉反馈,可以纠正累积的相位梯度误差,从而更准确地重建表面高度并最大限度地减少这些误差的影响。

为了使机械臂能够快速进行自主触觉探测,本文提出了一种基于视觉相位解包裹结果对触觉点进行引导的方法。使触觉点均匀分布在待探测区域内,确保触觉点的间距合理性,并且触觉结果能够尽可能覆盖整个相位范围。触觉点的候选点 $P_{\text{candidate}}$ 为:

$$\begin{cases} P_{\text{candidate}} = P_n + (2r \cdot \cos(i), 2r \cdot \sin(i)) \\ r = \text{INT} \left(\sqrt{\frac{S_{\text{glass}}}{N \cdot \pi}} \right) \end{cases}, \quad (12)$$

其中: S_{glass} 表示透明玻璃区域的像素面积, N 表示自主探测点的数目, P_n 是已经确认的触觉点, r 表示最小距离以确保生成的点在空间中均匀分布, i 是在 $[0, 2\pi)$ 内进行遍历的角度。候选点的选择需要符合以下约束:

$$\begin{cases} \forall P_{\text{existing}} \in P_n, \text{distance}(P_{\text{candidate}}, P_{\text{existing}}) \geq 2r \\ \phi(P_{\text{candidate}}) \notin \bigcup_{n=1}^N [\phi(P_n) - \phi_r, \phi(P_n) + \phi_r] \\ \phi_r = \frac{\phi_{\text{max}} - \phi_{\text{min}}}{2 \cdot N} \end{cases}. \quad (13)$$

当候选点符合条件时,将其添加至点集,并继续生成新的候选点;若不符合条件,则从已放置的点集中选择下一个点进行候选点生成。确定待探测点的横纵坐标后,机械臂自主执行触觉

探测,并在触摸玻璃表面时由力传感器检测接触反馈。当测量单元的力信号超过设定阈值,系统记录当前触碰点在工具坐标系中的位置 $P_{\text{tool}} = (X_{\text{tool}}, Y_{\text{tool}}, Z_{\text{tool}})$,同时获取当前机械臂各关节的坐标变换关系 $(T_{\text{arm1}}^{\text{base}}, T_{\text{arm2}}^{\text{arm1}}, \dots, T_{\text{armn}}^{\text{armn-1}})$ 。随后,通过运动学建模将触碰点坐标转换至世界坐标系 $P_{\text{world}} = (X_{\text{world}}, Y_{\text{world}}, Z_{\text{world}})$,转换公式如下:

$$P_{\text{world}} = T_{\text{arm1}}^{\text{base}} T_{\text{arm2}}^{\text{arm1}} \dots T_{\text{tool}}^{\text{endpoint}} P_{\text{tool}}. \quad (14)$$

触觉数据是离散的,仅在触觉点处提供3D信息。要将触觉数据与视觉数据整合并计算世界坐标系中其他视觉点的3D位置,需要进一步计算。系统在 X, Y 和 Z 方向上为触觉点构建矢量 X_w, Y_w, Z_w 。由于已知视觉点对应的触觉点的3D信息,可以通过多项式拟合得出触觉和视觉数据之间的关系。以 Z 方向的计算为例,触觉高度 $Z_w = [Z_{\text{world}}]$ 和视觉相对高度 $Z_v = [1, Z_{\text{visual}}, Z_{\text{visual}}^2, \dots, Z_{\text{visual}}^n]$ 是相关的,通过最小二乘法可以拟合触觉和视觉数据以获得多项式系数 $C_z = [C_{z0}, C_{z1}, \dots, C_{zn}]$,其中 $C_z = (Z_v^T Z_v)^{-1} Z_v^T Z_w$,之后使用视觉数据计算世界坐标系中其他视觉点对应的 Z 值, X 和 Y 方向的计

算与 Z 方向类似,如下:

$$\begin{cases} Z_{\text{world}} = \sum_{n=0}^N C_{zn} Z_{\text{visual}}^n \\ X_{\text{world}} = \sum_{n=0}^N C_{xn} X_{\text{visual}}^n, \\ Y_{\text{world}} = \sum_{n=0}^N C_{yn} Y_{\text{visual}}^n \end{cases} \quad (15)$$

其中: n 表示多项式的次数, N 表示多项式的项总数, C_{xn}, C_{yn}, C_{zn} 表示多项式的系数, Z_{visual} 表示通过相位差积分得到的相对高度, $X_{\text{visual}}, Y_{\text{visual}}$ 表示视觉图像上对应的像素坐标。通过结合稀疏的触觉数据与密集的视觉数据,获得的世界坐标系下的三维信息更全面、更准确。

图4为透明玻璃感知示意图,深度相机无论从RGB图像还是深度图像都难以感知到透明玻璃的存在与所在位置。触觉检测提供了绝对定位,而视觉测量提供了相对相位变化,将二者融合能够在世界坐标系下获得准确的三维信息。视触融合方法能够有效减少幽灵条纹对相位测量的干扰,还有效解决了纯PMD系统在透明玻璃检测中的梯度与高度二义性问题。

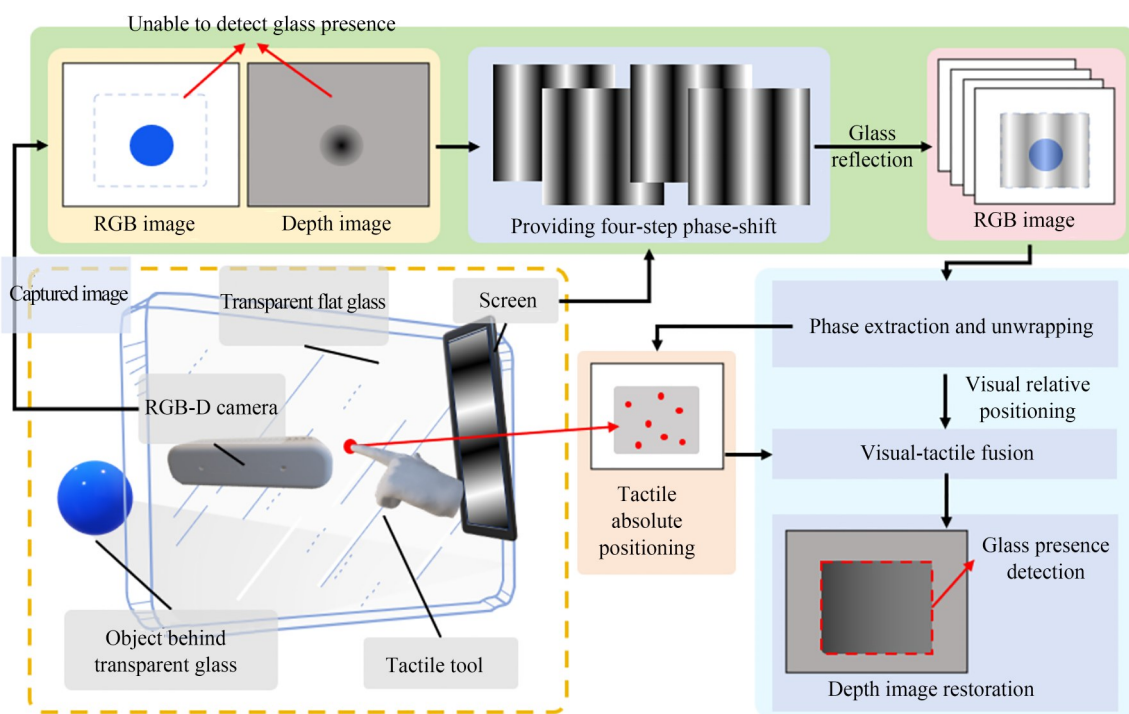


图4 透明玻璃感知的视觉-触觉融合示意图

Fig. 4 Schematic of visual-tactile fusion for transparent glass perception

3 模拟实验

如图 5 所示,根据式(1)和式(4)利用计算机模拟生成真实条纹与幽灵条纹,以分析幽灵条纹对测量的影响。在模拟过程中,幽灵条纹的 $L_G : L_R$ 设定为 1:4,同时保持调制光强和条纹周期相同,以确保实验条件的一致性和对比分析的准确性。可以看出,与真实条纹相比,幽灵条纹存在一定的相位差,并且整体幅值有所降低。通过控制相移进行包裹相位计算,如图 6(a)和 6(b)所示,在解包裹相位的过程中,仍然能够观察到相位偏差,如图 6(c)所示。因此,在仅依赖视觉时,解包裹相位的误差难以避免。

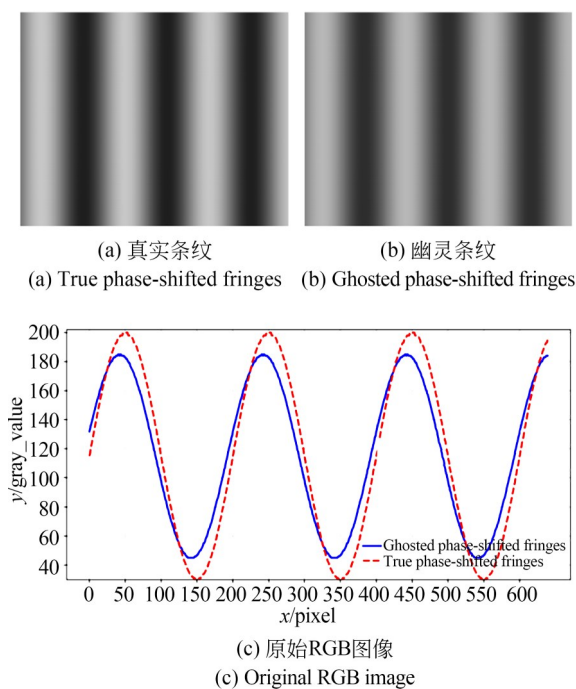


图 5 模拟幽灵条纹

Fig. 5 Simulate ghosted fringes

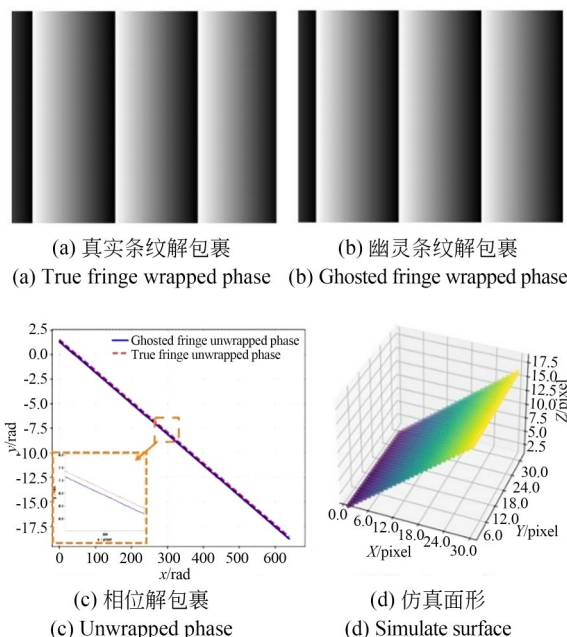


图 6 模拟相位计算与解包裹

Fig. 6 Simulate wrapped phase calculation and unwrapping

一般工业机械臂的重复定位精度约为 $\pm 0.02 \text{ mm}$ 。为模拟实际的触觉感知场景,在图 6(d)构建的模拟平面中随机选择已知点作为触觉点,并添加不同等级的噪声 ($0, \pm 0.01, \pm 0.02, \pm 0.03, \pm 0.05 \text{ mm}$)。这些触觉点被用于视触融合实验,并与 Southwell (SW) 方法^[33]的波前重建效果进行对比。SW 法是区域分析中广泛应用的一种技术,基于梯度积分并通过最小二乘法进行全局优化。为了更清晰地看到面形变化,在视触融合的模拟中,选取中间区域的测量结果与真实值进行对比,如表 1 所示。实验结果表明,随着触觉噪声水平的增加,测量误差逐步累积并影响表面重建精度。相比 SW 方法,视触融合方法在不同噪声水平下均表现出更强的抗

表 1 不同触觉噪声下的 RMS 与 PV-R 结果

Tab. 1 RMS and PV-R results under different noise conditions

Tactile noise level/mm	SW RMS/mm	SW PV-R/mm	Our RMS/mm	Our PV-R/mm
0	6.435×10^{-5}	1.330×10^{-3}	2.831×10^{-6}	2.192×10^{-6}
± 0.01	2.265×10^{-2}	1.582×10^{-2}	1.452×10^{-3}	1.447×10^{-3}
± 0.02	2.708×10^{-2}	5.463×10^{-2}	2.807×10^{-3}	5.119×10^{-3}
± 0.03	2.681×10^{-2}	0.335×10^{-2}	5.644×10^{-3}	9.921×10^{-3}
± 0.04	3.154×10^{-2}	0.268	7.177×10^{-3}	1.506×10^{-2}
± 0.05	5.564×10^{-2}	0.445	7.435×10^{-3}	1.447×10^{-2}

噪性,而且在PV-R误差上也显著优于SW方法,尤其在低至中等噪声水平下,误差降低幅度超过60%,有效抑制局部测量误差向全局重建误差的传播。

4 实验与分析

为验证所提出方法的有效性,实验搭建了一套测量系统,融合了相位测量偏折术与触觉检测功能(如图7所示)。该系统的视觉部分由 Realsense D435 相机和分辨率为 $1\,920 \times 1\,080$ 像素的显示屏组成,触觉部分则由 UR10 机械臂及其末端的多维力传感器组成。UR10 机械臂的重复定位精度可达 $\pm 0.01\text{ mm}$,在小范围运动场景中可实现高精度操作。

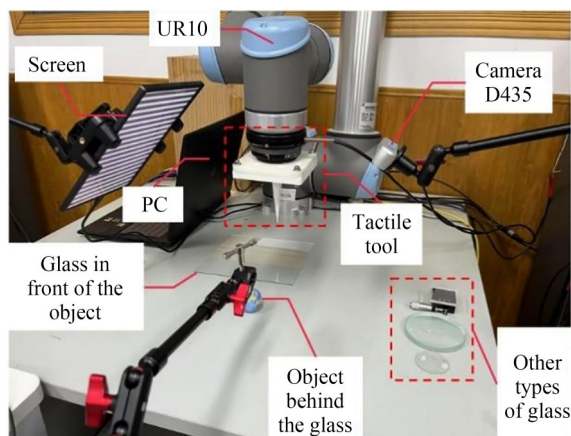


图7 视触融合测量系统

Fig. 7 Visual-tactile fusion measurement system

实验流程如图8所示,可以观察到,单独使用 D435 相机时,无论是 RGB 图像还是深度图像(如图8(a)和图8(b)),都很难有效检测出玻璃的存在,而这正是需要避免的情况。在视觉检测过程中,PC控制屏幕显示相移条纹图案(见图8(c)),相机捕捉玻璃表面的反射,然后进行相位提取和展开,如图8(d)和图8(e)所示。

在触觉检测过程中,UR10 机械臂自主接触镜面。当力传感器检测到接触力达到设定的阈值时,系统计算出末端执行器相对于机械臂底座的精确位置。实验中,每次采集15个触觉点,以确保采样点均匀分布在镜面上。数据采集完成后,结合视觉测量结果,实现透明平面玻璃的测

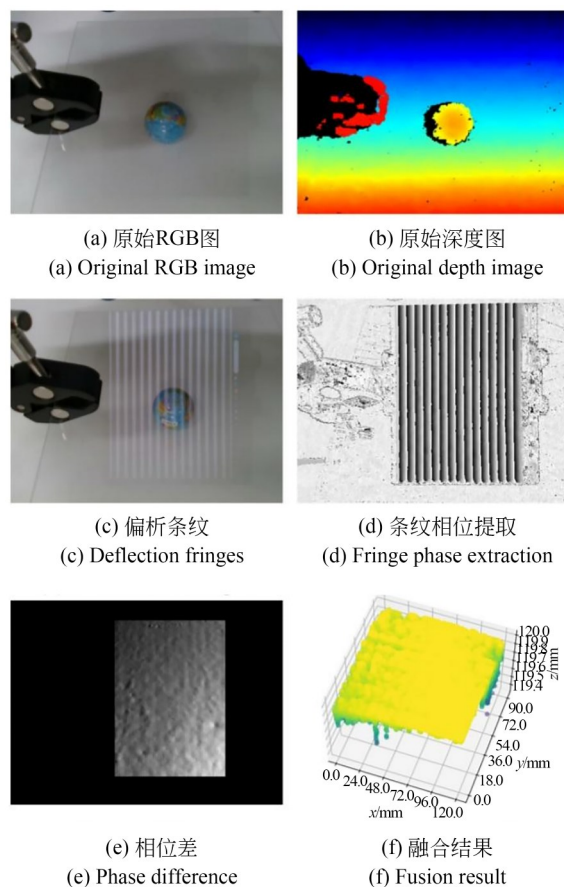


图8 透明玻璃测量过程

Fig. 8 Transparent glass measurement process

量与定位,如图8(f)所示。

视触融合方法也可应用于表面一定曲率的透明玻璃的测量,虽然具有一定曲率的透明玻璃无法适用2.1部分的推导结果,但具有一定曲率的透明表面可以通过调节屏幕亮度和拍摄角度降低第二面反射带来的影响。为了进一步验证视觉-触觉融合方法的有效性和通用性,对凹凸玻璃进行了表面重构实验,如图9所示。图9(a)为曲率半径为300 mm的凹透镜,图9(b)为曲率半径为100 mm的凸透镜。实验过程中,相机捕捉到的反射条纹如图9(c)所示。由于实验屏幕尺寸有限,而凸透镜具有更大的反射范围,因此,凸透镜的部分区域无法被视觉检测覆盖。通过视触融合方法进行重建,最终结果如图9(d)和9(e)所示。

在实验中,比较了使用D435相机并对玻璃样品涂抹显影剂后获得的测量结果以及通过所提出的视觉-触觉融合方法获得的测量结果。测试对

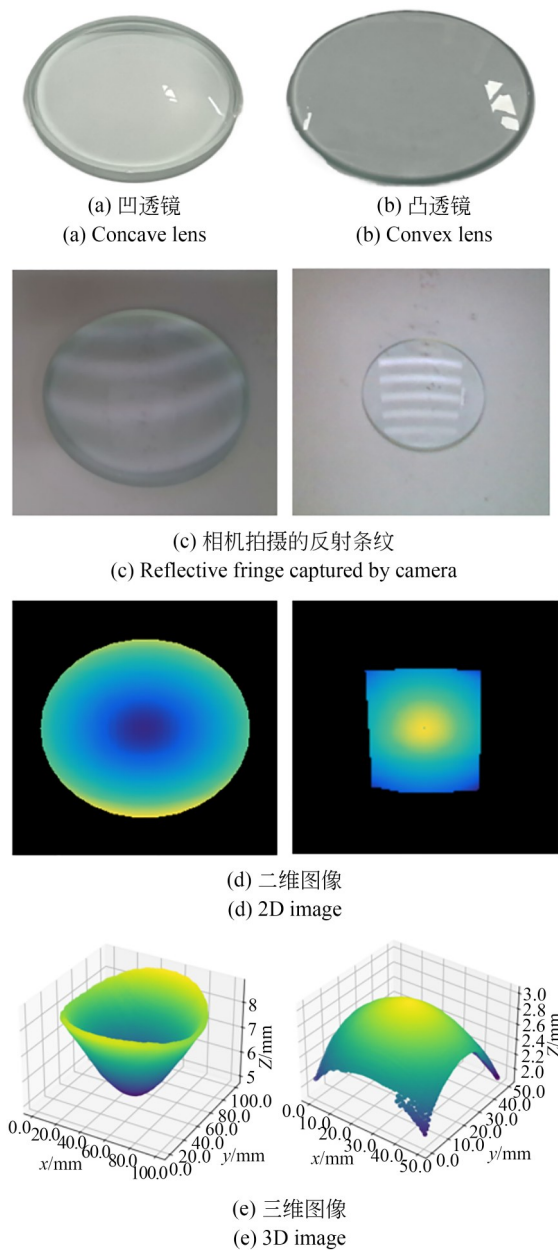


图9 透明玻璃表面重建

Fig. 9 Surface 3D reconstruction of transparent glass

象包括凹面玻璃(曲率半径为 300 mm)、凸面玻璃(曲率半径为 100 mm)。表 2 显示了两种方法的曲率半径(ROV)和均方根误差(RMS)。结果表明,视觉-触觉融合方法在测量透明玻璃的曲率半径和表面精度方面优于传统方法。相比 D435 相机结合显像剂的方法,本文方法在凹面玻璃和凸面玻璃试验中均显著降低了 RMS,提升了测量精度。此外,喷涂显像剂的过程较为繁琐耗时,难以满足快速检测需求。

在透明玻璃为严格平面结构时,第一面与第

二面的反射方向高度重合,导致投影条纹在图像中出现幽灵条纹干扰。由于两面反射角度相近,仅通过调节显示屏亮度或角度,难以有效抑制第二面反射。相比之下,当玻璃具有一定曲率(如凸面或凹面),第一面和第二面的反射方向存在明显差异,且其在相机成像中的投影位置不重合。此时,通过合理调整显示屏亮度、相机拍摄角度和条纹方向,可显著削弱第二面反射的影响,从而提高第一面反射条纹的清晰度,有效抑制幽灵条纹的干扰。虽然文中理论推导主要适用于平面玻璃,但实验验证了所提出的视触融合测量方法在一定曲率范围内仍具有可行性。

表 2 不同方法的重建结果比较

Tab. 2 Comparison of reconstruction results from different methods

SUT	Method	ROV/mm	RMS/mm
Concave lens ($R=300$ mm)	D435	304.936	0.376
	Ours	297.541	0.073
Convex lens ($R=100$ mm)	D435	92.3541	0.381
	Ours	104.867	0.014

最后,对透明玻璃的不同三维测量方法进行了对比分析。如表 3 所示,与纯视觉 PMD 方法相比,所提出的视觉-触觉融合方法引入了触觉检测,虽然增加了额外的测量时间,但显著提高了测量的稳健性和准确性。搭建的系统触觉检测时间约为每点 6 s,视觉检测时间主要由 PC 控制屏幕的四步相移过程、相机拍摄以及快速质量引导解包裹算法的计算消耗所决定,实验中视觉检测的时间约为 3 s,总测量时间由触觉点的数量决定。在静态检测场景中,整个检测过程的时间可以满足机器人的应用需求。实验选择

表 3 不同方法的复杂度与速度比较

Tab. 3 Comparison of complexity and time for different methods

Method	Gradient-height ambiguity	Complexity	Speed
D435	None	Medium	Slow
Only PMD	Present	High	Medium
Only Tactile	None	Low	Slow
Ours	None	Medium	Medium

了 15 个触觉点来平衡测量效率和准确性。与全表面触觉扫描的高时间成本相比,该方法仅使用有限数量的离散触觉点即可实现高精度重建。虽然测量时间有所增加,但总体时间可控,同时避免了 PMD 系统固有的梯度高度模糊性问题与透明玻璃产生的幽灵条纹带来的影响。

尽管 PMD 在镜面表面测量中通常能达到微米级精度,但透明玻璃的反射效果较差,存在折射和透射现象,导致反射强度较弱,影响了视觉检测的相位解算效果,且传统 PMD 通常仅适用于离位测量。视触融合方法中,视觉系统仅计算相对相位变化,而触觉系统通过全局定位和检测提供绝对空间位置信息,决定了最终的感知与定位的精度,触觉点的选择依据相位结果引导,且其精度受限于“手眼”标定。通过提升视觉系统分辨率和优化手眼标定精度,并将视觉系统集成到机械臂上以便进行角度调整,将进一步提升系统的整体性能。

5 结 论

本文提出了一种基于视觉-触觉融合的透明玻璃三维测量方法,充分利用机器人自身的视觉与触觉传感能力,结合相位测量偏折术和主动触

觉检测,有效克服了传统 PMD 方法中的梯度-高度二义性问题和幽灵条纹干扰。该方法能够实现对平面透明玻璃的感知与重建。为验证方法的通用性,进一步在近似平面的透明玻璃表面上开展了重建实验。相比深度相机结合显像剂的方法,提出的方法在凹面玻璃表面重建中 RMS 降低了 80.59%,在凸面玻璃表面重建中 RMS 降低了 96.33%。实验结果验证了该方法在平面及近似平面透明玻璃的测量中均具备可行性。尽管触觉检测增加了测量时间,但视触融合方式使机器人具备了在未知环境下的自主探测能力,无需额外的标定或复杂的环境调整,从而提升了测量的适应性和灵活性。此外,机器人具备高自由度运动能力和多模态传感特性,使得该方法不仅适用于实验室环境,未来也能够拓展至工业检测、玻璃制造、自动化装配等应用场景。虽然触觉点的选择对测量精度和效率存在一定影响,但视触融合提供了一种兼顾精准度、效率和可操作性的测量方案,为未来机器人在透明物体感知与三维测量中的应用提供了一种可行的解决途径。

作者贡献声明:

胡慧然:测量方法提出,论文构思和撰写;

宋爱国:提供实验资源,论文审核与编辑。

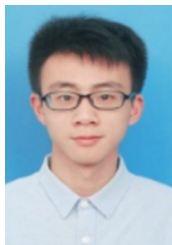
参考文献:

- [1] CHENG Y W, SU J R, JIANG M X, *et al.* A novel radar point cloud generation method for robot environment perception[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2022, 38(6): 3754-3773.
- [2] BARREIROS J A, XU A, PUGACH S, *et al.* Haptic perception using optoelectronic robotic flesh for embodied artificially intelligent agents[J]. *Science Robotics*, 2022, 7(67): eabi6745.
- [3] PAN X, LIU Z, ZHANG G J. Line structured-light vision sensor calibration based on multi-tooth free-moving target and its application in railway fields[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(9): 5762-5771.
- [4] LILIENBLUM E, AL-HAMADI A. A structured light approach for 3-D surface reconstruction with a stereo line-scan system[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, 64(5): 1258-1266.
- [5] MÉRIAUDEAU F, ALONSO SANCHEZ SECADES L, EREN G, *et al.* 3-D scanning of non-opaque objects by means of imaging emitted structured infrared patterns[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, 59(11): 2898-2906.
- [6] DENG F Q, LIU C, SZE W, *et al.* An INSPECT measurement system for moving objects[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, 64(1): 63-74.
- [7] LI Y, LI Y F, WANG Q L, *et al.* Measurement and defect detection of the weld bead based on online vision inspection[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, 59(7): 1841-1849.
- [8] MOLLEDA J, USAMENTIAGA R, BULNES F G, *et al.* Uncertainty propagation analysis in 3-D shape measurement using laser range finding[J].

- IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, 61(5): 1160-1172.
- [9] LIU H P, YU Y L, SUN F C, *et al.* Visual - tactile fusion for object recognition[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2017, 14(2): 996-1008.
- [10] JIANG J Q, CAO G Q, DENG J K, *et al.* Robotic perception of transparent objects: a review [J]. *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*, 2024, 5(6): 2547-2567.
- [11] XIE E Z, WANG W J, WANG W H, *et al.* *Segmenting Transparent Objects in the Wild* [M]. Computer Vision-ECCV 2020. Cham: Springer International Publishing, 2020: 696-711.
- [12] MEI H Y, YANG X, WANG Y, *et al.* Don't hit me! glass detection in real-world scenes[C]. 2020 *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. June 13-19, 2020. Seattle, WA, USA. IEEE, 2020: 3684-3693.
- [13] XU J, XI N, ZHANG C, *et al.* A robot-assisted back-imaging measurement system for transparent glass [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, 17(4): 779-788.
- [14] YE J Q, NIU Z Q, ZHANG X C, *et al.* Simultaneous measurement of double surfaces of transparent lenses with phase measuring deflectometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 137: 106356.
- [15] GRAVES L R, CHOI H, ZHAO W C, *et al.* Model-free optical surface reconstruction from deflectometry data[C]. *Optical Manufacturing and Testing XII*. August 19-23, 2018. *DiegoSan, USA*. SPIE, 2018: 36.
- [16] GRAVES L R, CHOI H, ZHAO W C, *et al.* Model-free deflectometry for freeform optics measurement using an iterative reconstruction technique [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(9): 2110-2113.
- [17] KNAUER M C, KAMINSKI J, HAUSLER G. Phase measuring deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces[C]. *Optical Metrology in Production Engineering*. Strasbourg, France. SPIE, 2004: 366.
- [18] GUO H W, FENG P, TAO T. Specular surface measurement by using least squares light tracking technique [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 166-171.
- [19] YUE H M, WU Y X, SONG Y P, *et al.* Solution to the slope-height ambiguity problem in phase measuring deflectometry based on a co-axial telecentric optical path[J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(4): 045007.
- [20] LI C, LI Y F, XIAO Y, *et al.* Phase measurement deflectometry with refraction model and its calibration [J]. *Optics Express*, 2018, 26 (26) : 33510-33522.
- [21] LI W S, SANDNER M, GESIERICH A, *et al.* Absolute optical surface measurement with deflectometry [C]. *Interferometry XVI: Applications*. San Diego, California, USA. SPIE, 2012: 84940G.
- [22] NIU Z Q, GAO N, ZHANG Z H, *et al.* 3D shape measurement of discontinuous specular objects based on advanced PMD with bi-telecentric lens [J]. *Optics Express*, 2018, 26 (2) : 1615-1632.
- [23] LIU Y, HUANG S J, ZHANG Z H, *et al.* Full-field 3D shape measurement of discontinuous specular objects by direct phase measuring deflectometry [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 10293.
- [24] LIU S L, LIU Z W. Double transmission-mediums based geometric phase analysis for determining the two surface profiles of transparent object [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 80: 17-23.
- [25] Sprenger D, Faber C, Seraphim M, *et al.* UV-Deflectometry: No parasitic reflections [C]. *Proc. DGO*. 2010, 111: A19.
- [26] HUANG L, ASUNDI A K. Phase retrieval from reflective fringe patterns of double-sided transparent objects[J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(8): 085201.
- [27] JEONG B, ORDONES S, QUACH H, *et al.* Digital filtering of ghost signal in phase measuring deflectometry [J]. *Optics Letters*, 2023, 48 (7) : 1642-1645.
- [28] TAHOUN M, TAHRI O, CORRALES RAMÓN J A, *et al.* Visual-tactile fusion for 3D objects reconstruction from a single depth view and a single gripper touch for robotics tasks[C]. 2021 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. September 27-October 1, 2021, Prague, Czech Republic. IEEE, 2021: 6786-6793.

- [29] LI B J, BAI J B, QIU S J, *et al.* VITO-trans-former: a visual-tactile fusion network for object recognition[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 2530810.
- [30] SRINIVASAN V, LIU H C, HALIOUA M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(18): 3105.
- [31] HALIOUA M, LIU H C. Optical three-dimensional sensing by phase measuring profilometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1989, 11(3): 185-215.
- [32] MING Z, QIAN K M. Quality-guided phase unwrapping implementation: an improved indexed interwoven linked list[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(16): 3492.
- [33] SOUTHWELL W H. Wave-front estimation from wave-front slope measurements[J]. *Journal of the Optical Society of America (1917-1983)*, 1980, 70(8): 998.

作者简介:



胡慧然(1995—),男,博士研究生,2020年于合肥工业大学获得硕士学位,主要从事遥操作机器人、三维测量和虚拟环境重建技术的研究。E-mail:18605592115@163.com

通讯作者:



宋爱国(1968—),男,博士,教授,博士生导师,1996年于东南大学精密仪器及机械专业获得博士学位,主要研究领域为机器人力触觉传感器技术、机器人遥操作控制技术、空间机器人技术、康复与医疗机器人技术、人机交互和虚拟现实技术。E-mail: a. g. song@seu. edu. cn