

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2313033

基于二值条纹三维测量的相位补偿方法^{*}

严飞^{1,2,3} 肖雨倩¹ 路长秋¹ 文杰¹ 刘佳^{1,2,3}(1.南京信息工程大学自动化学院 南京 210044; 2.江苏省大气环境与装备技术协同创新中心 南京 210044;
3.江苏省智能气象探测机器人工程研究中心 南京 210044)

摘要:快速三维测量在工业检测、逆向工程领域得到广泛应用,提出一种基于二值条纹解相的三维测量方法。首先,通过投影1幅二值条纹图像,利用条纹级次分布特点,将携带物体相位信息的图像分割成两个条纹掩膜,利用连通域对白色像素点进行阶梯式标记,以此获得条纹级次。其次,由于环境噪声等干扰因素导致解相时出现跳变误差,因此提出了通过融合半周期位移级次的方法来对相位进行补偿,利用解相的二值条纹来获取半周期错位的互补级次。最后,根据条纹级次和互补级次实现解相进行实验验证。实验结果表明,本文方法解决了相位展开时出现的毛刺问题,并以平板为测量对象,利用本文方法测得的均方根误差为0.198 0 mm,且只需要1幅图像即可完成解相,具有良好的鲁棒性和有效性,可应用于快速测量领域。

关键词: 三维测量;二值条纹;相位展开;条纹级次;边沿跳变

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4035

Phase compensation method based on three-dimensional measurement of binary fringe

Yan Fei^{1,2,3} Xiao Yuqian¹ Lu Changqiu¹ Wen Jie¹ Liu Jia^{1,2,3}(1. College of Automation, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Provincial Collaborative Innovation Center for Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing 210044, China;
3. Jiangsu Province Engineering Research Center of Intelligent Meteorological Exploration Robot, Nanjing 210044, China)

Abstract: Rapid 3D measurement has been widely used in industrial testing and reverse engineering. In this paper, a 3D measurement method based on binary fringe phase solution is proposed. Firstly, by projecting a binary fringe image, the image carrying the phase information of the object is divided into two fringe masks by utilizing the fringe order distribution characteristics, and the white pixels are marked by steps using the connected domain, so as to obtain the fringe order. Secondly, due to the interference factors such as environmental noise, hopping error occurs during unwrapping phase. Therefore, a method is proposed to compensate the phase by integrating the half-periodic displacement order, and the complementary order of the half-periodic dislocation is obtained by using the binary fringe of unwrapping phase. Finally, the phase unwrapped are verified experimentally according to fringe order and complementary order. Experimental results show that the proposed method solves the burr problem in the phase unwrapping process. Taking the flat plate as the measurement object, the root-mean-square error measured by the proposed method is 0.198 0 mm, and only one image is needed to complete the phase unwrapping. The proposed method has good robustness and effectiveness, and can be applied to the field of rapid measurement.

Keywords: three-dimensional measurement; binary fringe; phase unwrapping; fringe order; phase hopping

0 引 言

随着科学技术和生产制造水平的不断提高,在工业产品的研究设计中,测量技术对于外形轮廓的测量要求也越

来越高,传统的测量技术难以满足需求,快速测量与高精度测量开始广泛应用于各个领域^[1-2]。光栅投影三维测量技术,又称条纹投影轮廓术(FPP)^[3-4],具有结构简便、高精度、非接触、适合在线测量等优点,作为一种新兴的快速测

收稿日期:2023-03-08

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(61605083)、江苏省产业前瞻与关键核心技术重点项目(BE2020006-2)资助

量方法,其研究为数字化三维测量技术领域带来了新的探索途径,因而受到众多研究工作者的广泛关注。相位解包裹^[5]作为光栅投影测量技术的核心环节,是对受到调制的相位进行相位展开,即将包裹在 $(-\pi, \pi]$ 区间的相位展开为连续的相位。经过很多年的发展,研究者们将解包裹算法分为空间域和时间域两大类。

空间相位解包裹^[6-7]是在具有连续性的空间相位中,根据某一点与其邻点的相位差来求解光栅的绝对相位,如傅里叶变换轮廓术^[8]等。这种方法只需要投射一幅相位图,但是对待测物体有严格要求,若待测物体轮廓复杂、表面变化大、信噪比不够高时,由于空间相位解包裹算法与像素点的相位值紧密相关,误差会随着相位的展开路径和相邻相位信息而传递,就会出现“丢包”“拉线”等问题。时间相位解包裹^[9-10]通过在不同时间得到不同频率的相位,根据相位与频率成正比的特点来进行解包裹。这种方法是利用多幅相位图确定绝对相位,每个像素点在时间轴上进行相位展开,在空间上彼此孤立,可以避免误差传递,且对于较大不连续的区域,包裹相位也能够有效进行展开,实现复杂物体的精准测量。但是解包裹所需的条纹级次是由另外的条纹图像得到的,增加了投影图片数量,降低了测量速度。若投影周期为 T 的正弦相移条纹图,则需要多投影 $\log_2 T$ 幅二进制编码图像或格雷码图像。因此,在恢复一个三维形状时,减少投影图像的数量始终是高速应用的热点。Xu 等^[11]基于双 N 相移轮廓术原理提出了利用删减后的条纹来计算原始和附加相位值,融合两相位来达到减少投影数的目的实现快速测量。但由于测量环境以及多种噪声的影响,导致展开相位容易出现误差。对此,王建华等^[12]提出了一种将包裹相位进行偏移处理,利用梯度区域大小作为融合机制的方法实现相位误差的自校正。但对梯度判断存在不稳定因素,且投影图像数量仍然较多。在利用附加图像来解决相位误差问题中,Wu 等^[13]通过投影的正弦条纹的均值来确定二值化阈值,不需要额外投影图像。刘路等^[14]提出了一种附加二值条纹的相位误差校正方法,新引入的一幅半周期错位的二值条纹根据条纹级次的特性使级次位移半周期,原级次与位移级次的互补特性可以有效消除相位展开误差。Zhang 等^[15]提出了通过投影一个额外的格雷码来扩展该码字,并使用传统码字和附加码字的不同和互补的边界位置来解决边沿跳变问题。除此以外,石博等^[16]提出了叠加条纹级数联合优化取整函数的方法,可有效避免由伽马效应以及取整函数引起的相位跳跃性误差的累积和传递。但以上几种方法在实际测量中只能消除部分误差,仍具有局限性。

尽管时间相位解包裹算法取得很多进展,其中一些典型的算法包括双频条纹投影法^[17-18]、外差原理^[19]、相位编码技术^[20]、格雷码辅助相移技术^[21-22]等,但都需要投影不少于 $2N$ (N 为相移步数,且 $N \geq 3$) 幅条纹图像,并且还需要额外的编码图像来求条纹级次,数量依然很多。因此,为

了减少投射的条纹图,加快测量速度,本文提出了一种快速测量方法。该方法利用二值条纹和掩膜将整个图像分割成两个条纹掩膜,通过对每个白色像素点进行标记,提取出条纹掩膜中的连通域^[23],得到条纹级次。同时,为了解决边沿跳变误差的问题,本文提出了通过位移融合获得半周期位移级次的方法,从而有效消除相位展开产生的误差跳变。最后根据条纹级次和互补级次对包裹相位进行展开。该方法只需要 $N+1$ 幅图像数,明显少于上述所提的时间相位解包裹算法,通过实验表明该方法测量速度快、精度高,且具有一定鲁棒性和有效性。

1 基本原理

本系统由投影仪、相机、计算机和待测物四部分组成,其测量原理如图 1 所示。首先,计算机生成特定结构光编码图案,通过投影仪按照时间序列投射到待测物表面,相机在另一方向采集被调制的变形条纹图,并将这些图像传输到计算机端进行数据处理。通过提取每个像素点对应的相位,利用相位与深度的映射关系获得被测物在空间中的三维深度信息,从而实现对物体三维面貌的测量。

1.1 相移法

本文通过相移法来计算包裹相位。相移法是使用投影仪投影多幅具有相位差的结构光图像来获得相位信息。常见的等相移步距的 N 步相移是将正弦条纹在一个周期内均匀移动 N ($N \geq 3$) 次,每次移动 $2\pi/N$ 的相位。其第 n ($n=1, 2, 3, \dots, N$) 幅投影图像的正弦函数表达式如式(1)所示。

$$I_n(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \left[\phi(x, y) + \frac{2\pi(n-1)}{N} \right] \quad (1)$$

式中: $A(x, y)$ 表示投影图像的背景光强,取决于物体表面各向异性的折射率; $B(x, y)$ 表示强度调制参量,即光强差,取决于投影图像的亮度差; $\phi(x, y)$ 表示受到调制后的相位值,它包含了三维物体表面的高度信息; N 表示 N 步相移。

根据这 N 幅变形条纹可计算出携带物体表面信息的截断相位,如式(2)所示。

$$\phi(x, y) = -\tan^{-1} \left[\frac{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \sin(2n\pi/N)}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cos(2n\pi/N)} \right] \quad (2)$$

在相移法中,由于相位值是利用反正切运算得到的,相位区间会截断在 $\pm\pi$ 之间,不具备唯一性,因此需要进行相位展开得到表面连续的相位。

1.2 快速解包裹算法

根据包裹相位的周期特性,本文提出了一种快速解包裹的方法,能够在保证精度的情况下减少投影图像数量。该方法只需要额外投射一幅二值条纹图像,利用掩膜将整个图像分割成两个条纹掩膜,通过对每个白色像素点进行

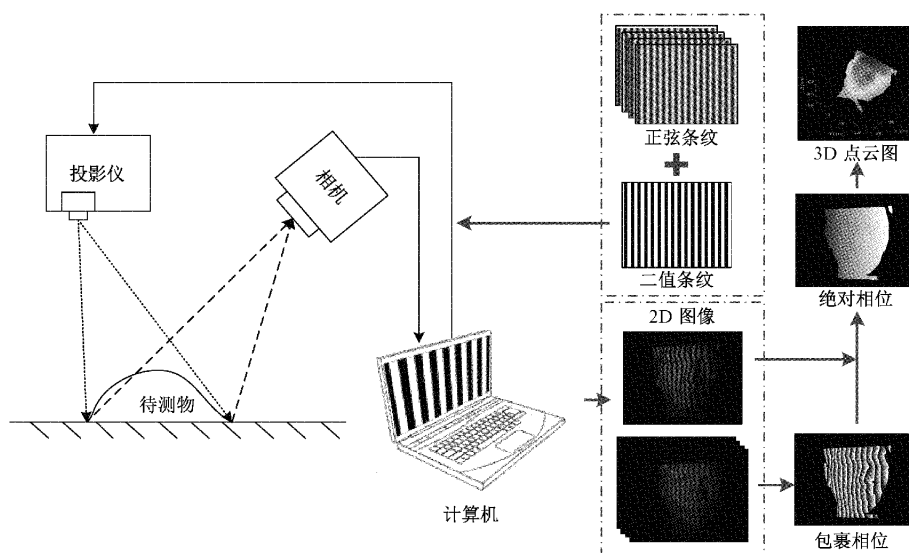


图 1 单目结构光三维重建系统测量原理图

标记,提取出条纹掩膜中的连通域,就能够得到条纹级次。由二值条纹提供合成级次,明暗交接处变换较少,具有抗环境噪声干扰强的特点。最后根据条纹级次对包裹相位进行展开,得到绝对相位。具体原理如图 2 所示。

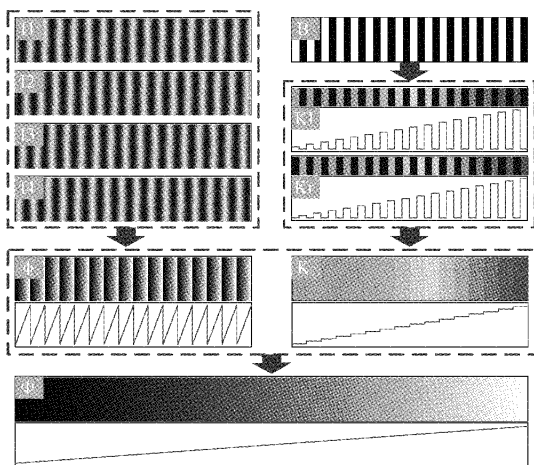


图 2 快速解包裹算法原理图

包裹相位 ϕ 与绝对相位值 Φ 之间周期性相差 2π 的整数 K 倍,只要在包裹相位的每一个截断处加上 $2\pi K$,就能恢复成连续的绝对相位。而级次 K 的取值在同一个相位周期内是相等的,因此使用二值条纹来计算白色像素点最多的连通域作为半周期级次 K_l ,通过二值条纹取反获得另外半周期级次 K_r ,再将以合成为完整的条纹级次 K 。以下将对本文方法详细说明。

根据级次特性,为使包裹相位在 2π 跳变点与条纹级次一一对应,本文所采用的二值条纹根据第一幅正弦条纹获得,如式(3)所示。

$$B(x, y) = \begin{cases} 1, \text{diff}[I_1(x, y)] \leq 0 \\ 0, \text{diff}[I_1(x, y)] > 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, $I_1(x, y)$ 为投影的第一幅正弦条纹, $\text{diff}[\]$ 为求导函数,两者周期相同。

为了提高三维测量的精确性,本文引入掩膜对图像区域进行分割,以滤得所需要的相位信息。掩膜通过分割调制度获得,调制度计算公式如式(4)所示。

$$\gamma(x, y) = \frac{2}{N} \times \sqrt{\left(\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \sin(2n\pi/N)\right)^2 + \left(\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cos(2n\pi/N)\right)^2} \quad (4)$$

由调制度 γ 来确定相位信息的质量,通常 1 表示信息质量最好,其余的作为噪声滤除。根据实际情况选择合适的阈值 C ,来判别相位信息是否可靠,由此获得掩膜图像,如式(5)所示。

$$I^{\text{mask}}(x, y) = \begin{cases} 1, \gamma(x, y) \geq C \\ 0, \gamma(x, y) < C \end{cases} \quad (5)$$

为了消除环境光线和物体反射特性的不均匀带来的影响,采用 N 幅正弦条纹的背景强度作为阈值,对所采集的二值条纹图像进行二值化,再将其取反,得到两个相反的二值条纹图像 ϕ_l 和 ϕ_r 。然后,利用掩膜 I^{mask} 分别将其进行分割,如式(6)、(7)所示。

$$\phi_l^{\text{mask}}(x, y) = \phi_l(x, y) \times I^{\text{mask}}(x, y) \quad (6)$$

$$\phi_r^{\text{mask}}(x, y) = \phi_r(x, y) \times I^{\text{mask}}(x, y) \quad (7)$$

利用连通域标记的方法来标记条纹级次,通过对每个白色像素点进行标记,拥有相同标记的像素点就构成了一个连通域,同一连通域内像素点对应的级次值相等。本文以 8 邻接的方法提取出条纹掩膜 ϕ_l^{mask} 和 ϕ_r^{mask} 中的连通域,能够分别得到条纹左级次 K_l 和右级次 K_r ,其中左级次 K_l 对应条纹级次的左半周期,右半周期为 0,右级次 K_r 对应条纹级次的右半周期,左半周期为 0。但由于在实际

测量时,叠加掩膜后难以确认左右级次,且对于表面形变较大的物体,容易因遮挡丢失部分连通域,导致同一连通域中断或者非相邻区域的连通域相邻,因此还需对级次进行修正。左右级次的修正通过取同一维度对应级次为 1 的像素点进行位置判别,若右级次 K_r 为 1 的像素点在左级次 K_l 为 1 的像素点左侧,则对右级次 K_r 非零部分整体加 1 后再进行后续处理。当非相邻区域连通域相邻时,则只需要选择合适的阈值 C 来进行修正即可,如图 3(a)所示。对于连通域中断的问题则通过判别第 m 个连通域 ϕ_m^{mask} 与第 n 个连通域 ϕ_n^{mask} 是否属于同一个条纹周期 t ,若属于同一个条纹周期,则对应级次值相同,如图 3(b)所示。

将左级次 K_l 和右级次 K_r 逐像素相加,就能合并为完整的条纹级次 K ,如式(8)所示。

$$K(x, y) = K_l(x, y) + K_r(x, y) \quad (8)$$

最后根据条纹级次 K 对包裹相位 ϕ 进行展开,得到绝对相位 Φ ,如式(9)所示。

$$\Phi(x, y) = \phi(x, y) + 2\pi K(x, y) \quad (9)$$

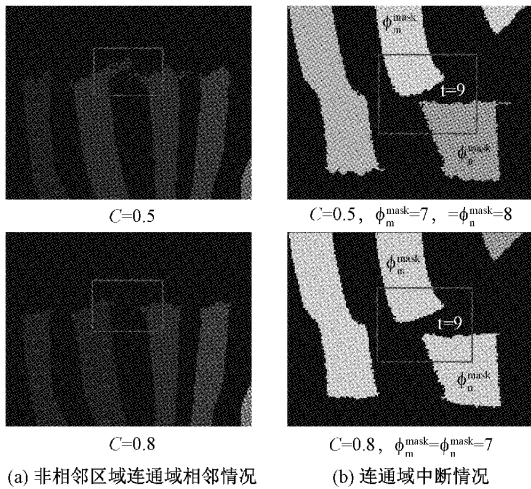


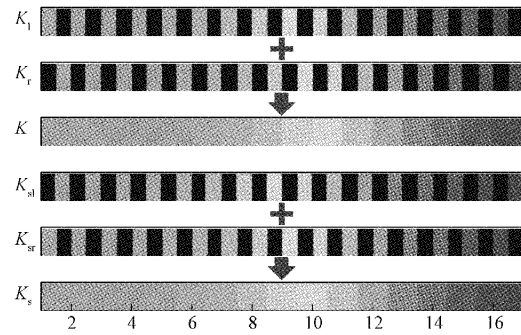
图 3 条纹级次修正过程图

2 相位补偿算法

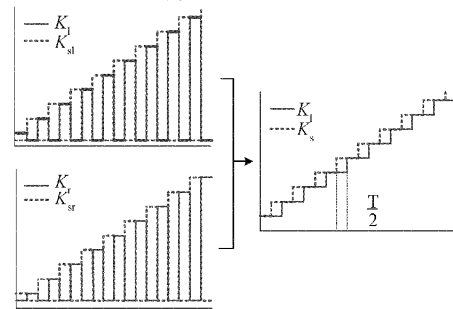
在实际测量时,由于实验室周围环境噪声的干扰,相机镜头散焦以及待测物体表面反射率的不均匀产生的反光现象,导致采集的二值条纹图像不是理想的 0、1 分布,出现周期错位,在相位的 2π 跳变点附近引入相位展开误差,使最后的绝对相位值的变化不连续。因此在相位展开时,为了避免由于条纹级次边沿与截断相位边沿匹配不准确而引起的相位展开误差,本文采用了融合半周期位移级次的方法来对相位进行补偿,如图 4 所示。

该方法沿了解相的原理,在获得左右半周期级次的基础上,将右半级次 K_r 非 0 部分加 1,即左移半个周期,得到互补的左级次 K_{sl} ,而左级次 K_l 作为互补的右级次 K_{sr} ,如式(10)、(11)所示。

$$K_{sl}(x, y) = K_r(x, y) + 1, K_r(x, y) \neq 0 \quad (10)$$



(a) 级次合成原理



(b) 级次合成原理曲线图

图 4 相位补偿原理图

$$K_{sr}(x, y) = K_l(x, y) \quad (11)$$

再将左半级次 K_{sl} 和右半级次 K_{sr} 逐像素相加,融合形成新的互补级次 K_s ,这样可使条纹级次整体向左移动半个条纹周期,与主级次形成错位,如式(12)所示。

$$K_s(x, y) = K_{sl}(x, y) + K_{sr}(x, y) \quad (12)$$

在进行相位展开时, K 与 K_s 的级次边沿正好错开,因此,在相位截断处产生的解相误差利用错位的互补级次 K_s 来做出相应的补偿,其余利用 K 正常解相,如式(13)所示:

$$\Phi(x, y) = \begin{cases} \phi(x, y) + 2\pi K_s(x, y), & \phi(x, y) < \pi/2 \\ \phi(x, y) + 2\pi K(x, y), & \pi/2 \leq \phi(x, y) < 3\pi/2 \\ \phi(x, y) + 2\pi K_s(x, y) - 2\pi, & \phi(x, y) \geq 3\pi/2 \end{cases} \quad (13)$$

另外,在其他任意解相方法中,该相位补偿方法也同样适用,只需要额外投影一幅二值图像,该图像可根据式(5)获得,并通过式(14)获得互补级次:

$$K_s(x, y) = K_{sl}(x, y) - 1 + K_{sr}(x, y) \quad (14)$$

如图 5 所示,图 5(a)为未进行相位补偿的展开结果,图 5(b)为进行了相位补偿后的展开结果,可以看出,当边沿错误区域宽度小于半个条纹周期宽度时,进行了校正后都可以较好地避免展开相位过程中出现的错误问题。同时,由于该方法是利用二值图像来预先避免错误的产生,因此,当待测物形貌发生陡变时不会影响该方法的使用。

3 实验结果与分析

本文测量系统主要由计算机、相机和投影仪组成。计算机用于控制整个实验中的投影仪、相机等;相机选用

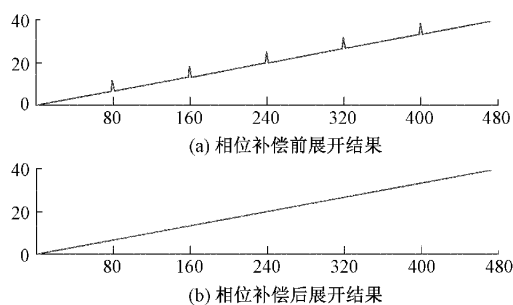


图 5 相位补偿前后对比图

FLIR 公司的 FL3-U3-13Y3M-C 型号的 Point Grey 工业相机, 搭载焦距为 8 mm 的镜头, 分辨率为 1 024 pixel×1 280 pixel; 投影仪选用 Texas Instruments Light Crafter 4 500 型号的 DLP(digital light processing) 数字投影仪, 分辨率为 1 140 pixel×912 pixel。

为了验证本文所提方法的可行性和快速性, 在实验室环境通过测量不同物体, 开展了 3 组对照实验, 一组为本文方法相位补偿前后的对比, 一组为本文方法与相位编

码、相移结合格雷码方法的对比实验, 另一组为不同频率对于复杂物体测量影响的实验。为了验证实验结果的科学性与准确性, 除频率测量实验外, 所有方法采用的正弦条纹为 32 个周期, 都使用四步相移获取包裹相位。测量步骤如下:

1) 使用逆相机法进行相机标定, 获得相机和投影机内外参数。相机标定误差为 0.05 pixel, 投影仪标定误差为 0.32 pixel;

2) 利用计算机生成的编码图像依次投射到待测物表面, 相机依次采集被调制后的条纹图像, 根据相移法计算出包裹相位, 再进行解相恢复完整相位;

3) 根据步骤 1) 得到的标定参数, 通过坐标转换获得点云重建结果。

3.1 相位补偿前后对照实验

为了验证本文展开相位补偿方法是否能够有效地消除展开相位误差, 本文对几何物体进行了测量实验, 并比较了采用与未采用相位补偿方法的所得结果, 其整体框架如图 6 所示。

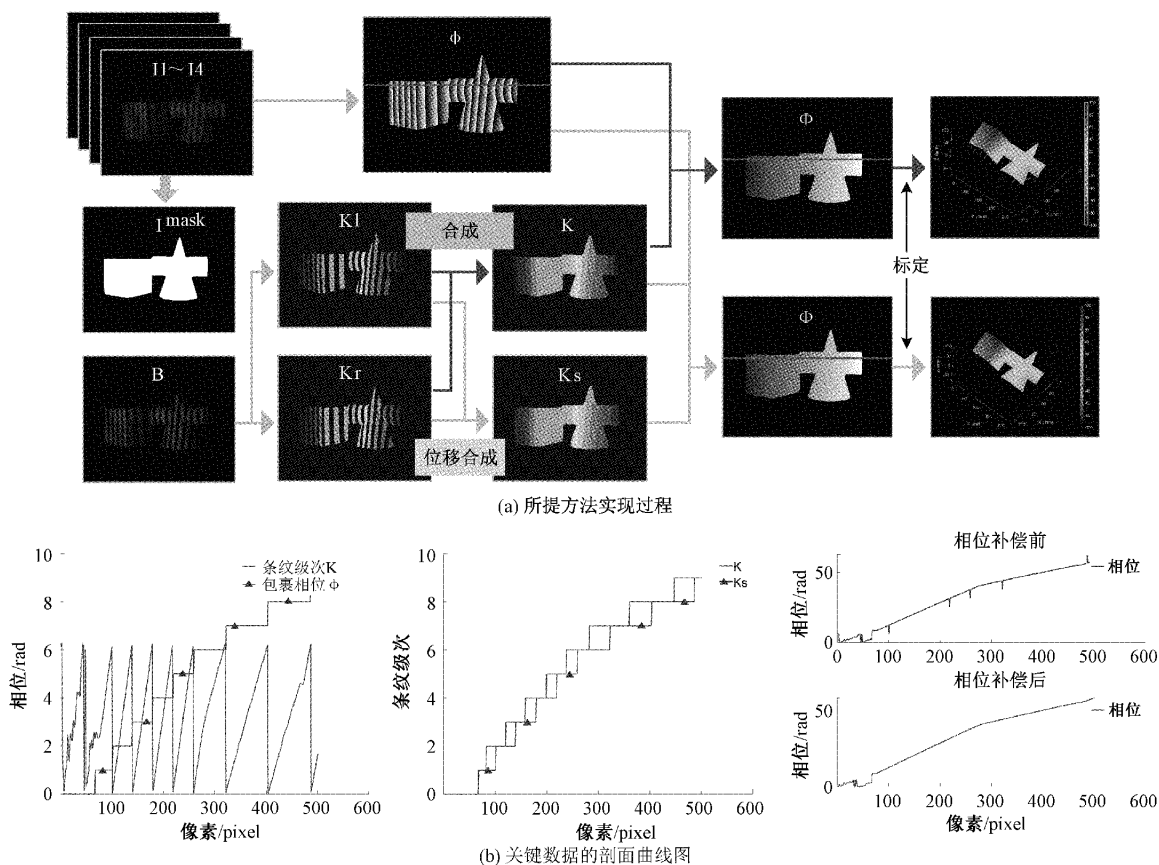


图 6 所提方法总体框架

首先利用相移法获得包裹相位 ϕ , 再根据掩膜 I^{mask} 与二值条纹 B 经过标记白色像素点得到左右半周期级次 K_l 和 K_r , 从而融合叠加为完整的级次 K 。由于投影离焦、环境噪声等因素的影响, 容易在相邻码字交界处出现

相位跳变, 导致相位展开出现误差, 因此在条纹级次分布规律的基础上再次利用二值条纹得到融合半周期位移级次, 即互补级次 K_s 。通过系统标定, 将展开相位 Φ 转换为三维深度数据。从实验结果可以看出, 利用解相的

值条纹图像可使这些误差得到补偿,在展开相位图像中没有出现明显的跳变误差,且得到的点云数据图也相对光滑。其关键数据的剖面曲线如图 6(b)所示,选取测量结果的第 480 行像素点数据进行对比,互补级次 K 。呈阶梯式上升且相对于主级次 K 错位 $T/2$,相位补偿前在 100~330 pixel 出现的 3~5 rad 的毛刺经过相位补偿后被消除,展开相位为连续的上升曲线。实验结果表明,利用本文方法进行的相位补偿能够明显减少相位展开过程中出现的误差。

3.2 测量速度与精度评价实验

为了定量评价本文方法的可行性与速度,在相同测量

条件下使用本文方法与相位编码法和相移结合格雷码法两种同样存在相位跳变问题的方法分别对平板进行测量,重建结果如图 7 所示,图 7(a)为 3 种方法的投影图像,图 7(b)为展开相位结果,图 7(c)为展开相位的剖面曲线对比图。实验结果表明,本文方法与另外两种方法测量结果基本一致,从展开相位灰度图可以看出本文校正方法能够使级次与包裹相位边沿的错位误差得到补偿。为了更直观的看出本文方法的优越性,取相位补偿前后的展开相位数据中的第 512 行 300~800 pixel 进行对比,如图 7(c)所示,3 种方法的毛刺几乎被消除,表明本文方法对于相位跳变都能有较好的抑制作用。

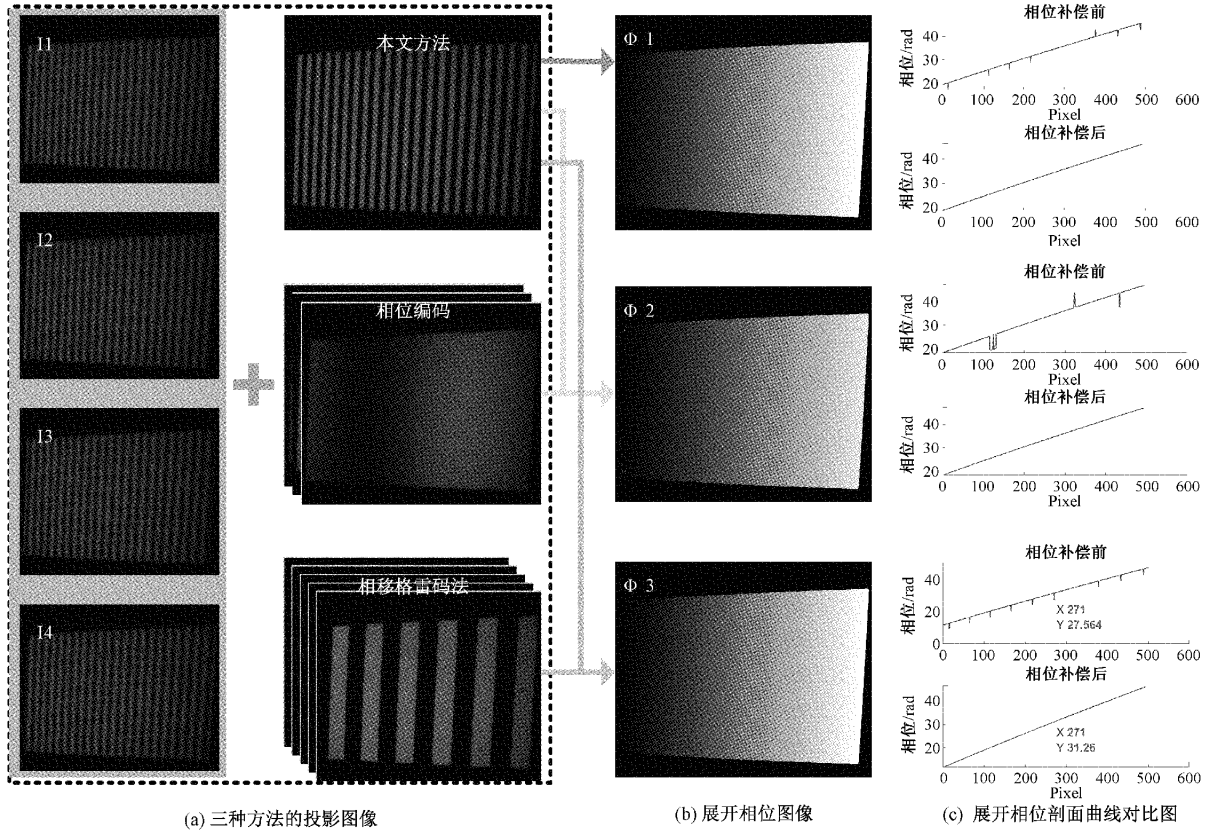


图 7 平板测量结果

在精度评价方面,由于所测平板表面深度近似于线性,因此利用曲线拟合器对 3 种方法测得的点云数据进行直线拟合,拟合结果如图 8 所示,拟合数据分析结果如表 1 第一列数据所示。结果表明,所提方法均方根误差 (RMSE) 为 0.198 0 mm,相位编码法和相移结合格雷码法分别为 0.284 6 mm、0.191 9 mm,与相移结合格雷码方法相近,相较于相位编码法精度更高。在速度评价方面,利用 matlab 中的计时函数对 3 种展开相位方法制定程序所消耗的时间资源分别进行定量计算,且 3 种方法全部以最优算法,相同滤波条件进行计算,为了使结果更加严谨,都取 5 次时间采样成本均值来进行对比,如表 1 第 2、3 列所示,从中可以看出,本文方法平均运行时间为 0.706 9 s,相

位编码法、相移结合格雷码法分别为 0.604 9 s、0.814 3 s,相比于相移结合格雷码法速度提升了 13.19 %。并且由于相位编码法需要投影 8 幅图像,相移结合格雷码法需要投影 10 幅图像,而本文方法只需要投影 5 幅图像,所需要的图像数量明显减少。同时,本实验所使用的数字投影仪投影 8 bit 的灰度图像速率一般为 120 Hz,投影 4 幅相移图像加 1 幅二值图像的速率理论上不超过 30 Hz。综上所述,本文方法在保证精度的同时加快了测量速度,极大地提升了重建效率。

3.3 复杂物体测量实验

为了验证本文方法对于复杂物体测量的可行性与不同频率对物体测量的影响,本文对人物头像模型进行了测

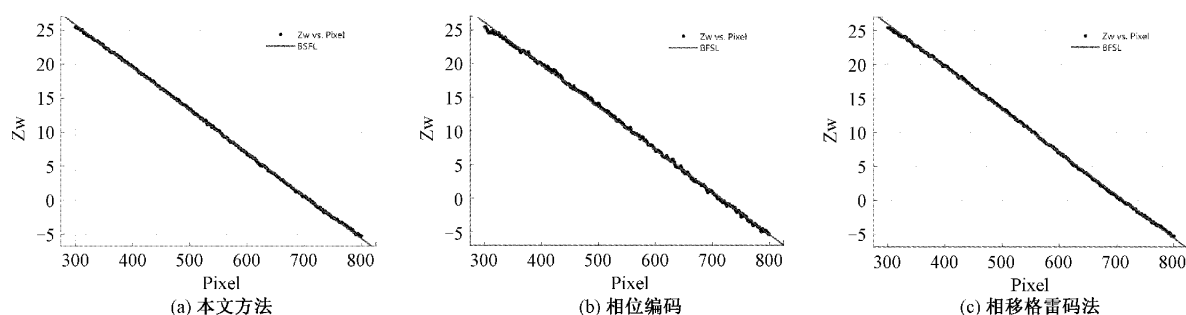


图 8 平板直线拟合曲线图

表 1 平板测量结果数据分析

方法	RMSE/mm	平均运行时间/s	投影图像数量
本文方法	0.198 0	0.706 9	5
相位编码	0.284 6	0.604 9	8
相移格雷码法	0.191 9	0.814 3	10

量实验,投影并采集了两组不同周期($T=16, T=32$)的结构光图像,所得重建结果如图 9 所示,图 9(a)为绝对相位结果,图 9(b)为重建的点云结果,图 9(c)为点云局部细节图。

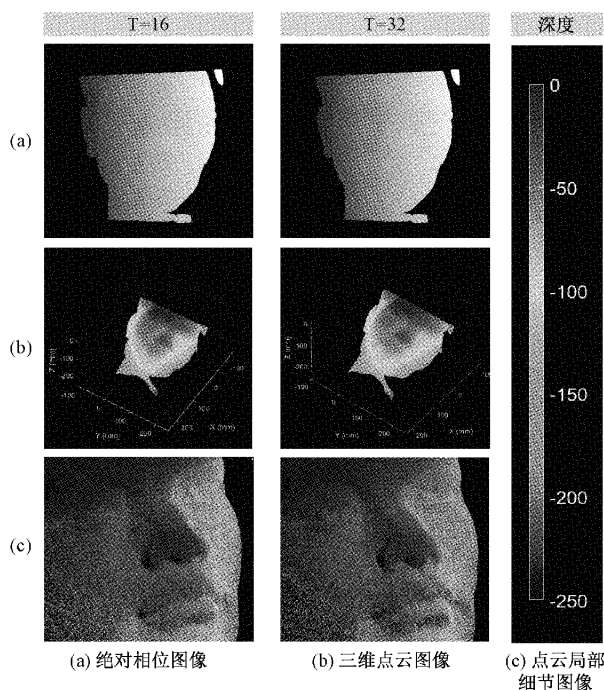


图 9 头像模型测量结果

从实验结果来看,对于复杂物体的测量在一定条纹频率范围内能够实现,特别是对于 32 周期的高频条纹也能实现完整测量,从测量精度来看,32 周期相对于 16 周期的重建结果受到的周期性误差影响较小,相位特征更加细致明显,人物头像点云也更加稠密平滑。因此,本文方法对于复杂物体使用高频条纹进行测量也同样可行。

4 结 论

本文提出了一种利用二值条纹编码进行快速测量的方法,该方法利用条纹级次分布特点,通过二值条纹和掩膜将整个图像分割成两个条纹掩膜,并对连通域的白色像素点进行阶梯式标记,且同一连通域的像素点标记值相同,以此获得条纹级次。其次,由于采样时随机噪声,相机散焦等影响,导致级次边沿与截断相位边沿匹配不准确而引入相位误差,本文提出了融合半周期位移级次的方法对相位进行补偿,利用解相的二值条纹来获取半周期错位的互补级次,预先避免了由于截断相位与条纹级次错位产生的边沿跳变。最后根据条纹级次和互补级次对包裹相位进行展开,从而实现快速测量。通过相位补偿前后对照实验,表明本文补偿方法能够达到消除边沿跳变误差的效果。在精度上,以平板为测量对象,本文方法与相移结合格雷码法精度相似,对比相位编码法精度更高。在速度上,只需要额外投影 1 幅图像就能完成解相,与相移结合格雷码方法和相位编码法相比投影图像数量明显减少。但对于更高频率条纹的测量,其稳定性较差,后续研究会据此进行改进。综上所述,本文方法不仅能够消除边沿跳变误差,在保证精度的同时还提高了测量速度,可应用于快速测量领域。

参考文献

- [1] 董鹏辉,柯良军. 基于图像的三维重建技术综述[J]. 无线电通信技术, 2019, 45(2): 115-119.
- [2] FARHAT W, CHATELAIN F, MARRET A, et al. Trends in 3D bioprinting for esophageal tissue repair and reconstruction[J]. Biomaterials, 2021, 267: 120465.
- [3] 毛翠丽,卢荣胜,董敬涛,等. 相移条纹投影三维形貌测量技术综述[J]. 计量学报, 2018, 39(5): 628-640.
- [4] ISAIS C, OCHOA N A. Improvement on fringe projection profilometry [J]. Optical Engineering, 2015, 54(10): 104114.
- [5] 王永红,陈维杰,钟诗民,等. 相位解包裹技术及应用研究进展[J]. 测控技术, 2018, 37(12): 1-7, 16.
- [6] FENG Y F, HAN Y, ZHANG Q C. Two 3D spatial phase unwrapping algorithms for dynamic 3D shape

- measurement[J]. *Journal of Modern Optics*, 2020, 67(7):1-13.
- [7] ZHANG Q C, HAN Y, WU Y S. Comparison and combination of three spatial phase unwrapping algorithms[J]. *Optical Review*, 2019, 26(4): 380-390.
- [8] 夏桂书,武兴焜,魏永超,等. FTP动态测量航空发动机叶片三维型面[J]. *中国测试*, 2021, 47(3):30-35.
- [9] 师力力,刘卫国,田爱玲,等. 时间相位解包裹算法的抗噪性能对比研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(12):409-416.
- [10] 李响,何东钢. 基于主动编码光源的单摄像机立体测量方法[J]. *电子测量技术*, 2022, 45(2):13-21.
- [11] 徐鹏,刘锦涛,王建华. 改进的双N步相移轮廓术[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(8):213-222.
- [12] 王建华,周玉国,杨延西. 基于相位误差自校正的高速三维测量技术[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(12):116-125.
- [13] WU Z J, ZUO C, GUO W B, et al. High-speed three-dimensional shape measurement based on cyclic complementary Gray-code light[J]. *Optics Express*, 2019, 27(2): 1283.
- [14] 刘路,潘艳娟,奚冬冬,等. 相位编码条纹投影轮廓术的相位展开误差校正方法[J]. *应用光学*, 2020, 41(5): 978.
- [15] ZHANG Q C, SU X Y, XIANG L Q, et al. 3D shape measurement based on complementary Gray-code light[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(4): 574-579.
- [16] 石博,刘宏立,马子骥. 基于多级条纹级数修正的相位误差校正方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(17):141-148.
- [17] DAI M L, YANG F J, LIU C, et al. A dual-frequency fringe projection three-dimensional shape measurement system using a DLP 3D projector[J]. *Optics Communications*, 2017, 382(1): 294-301.
- [18] 彭旷,曹益平,武迎春. 基于满周期等相移算法的改进双频在线相位测量轮廓术[J]. *光学学报*, 2019, 39(4): 217-224.
- [19] 刘今越,刘佳斌,郭志红,等. 一种基于面结构光的刀具三维测量系统[J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(12):1884-1891.
- [20] ZHOU C L, LIU T C, SI S C, et al. An improved stair phase encoding method for absolute phase retrieval[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 66: 269-278.
- [21] 曹毅,陈星飒,吴翔,等. 基于局部光栅补全的反光物体三维重建[J]. *电子测量技术*, 2023, 46(4):91-98.
- [22] WANG Z G, FU Y J, YANG J, et al. Three-dimensional shape measurement based on a combination of gray-code and phase-shift light projection[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8916: 89163Y-89163Y-7.
- [23] 甘晓英,白阳,何晓栋,等. 一种并行二值图像连通域标记算法[J]. *计算机与数字工程*, 2021, 49(5): 993-997,1002.

作者简介

严飞,博士,副教授,硕士生导师,主要从事三维测量与显示、嵌入式图像处理技术等方面的研究。

E-mail: fyan@nuist.edu.cn

刘佳(通信作者),博士,教授,硕士生导师,主要从事虚拟现实增强现实、人机交互及机器人技术等方面的研究。

E-mail: liujia@nuist.edu.cn