

文章编号: 1002-1582(2026)03-0279-09

基于改进希尔伯特-黄变换的单帧相位解调技术

王少强¹, 刘春兵¹, 高楠^{1,2*}, 倪育博¹, 孟召宗^{1,2}, 张宗华^{1,2}

(1. 河北工业大学 机械工程学院, 天津 300401)

(2. 河北工业大学创新研究院 (石家庄), 河北 石家庄 050299)

摘 要: 单帧条纹投影技术可用于测量动态连续目标的三维形貌, 希尔伯特-黄变换因具有自适应局部分析能力被广泛应用于单帧相位解调过程, 方法中的经验模态分解阶段存在条纹分量难以集中提取的问题, 影响相位解调精度。为此, 提出一种基于改进希尔伯特-黄变换的单帧相位解调方法。首先对去噪条纹图执行小波变换以估计条纹局部周期; 然后将局部周期作为经验模态分解的自适应滤波器尺寸, 使条纹分量集中在单一本征模函数中; 最后对条纹分量执行希尔伯特变换完成相位解调。仿真及实验结果表明, 相比于已有方法, 相位解调精度提高约3倍。所提方法为单帧条纹投影技术提供了一个有效的相位解调方法。

关 键 词: 光学测量; 希尔伯特-黄变换; 经验模态分解; 相位解调; 小波变换; 单帧

中图分类号: TH741

文献标识码: A

Single-frame phase demodulation technique based on the improved Hilbert-Huang transform

WANG Shaoqiang¹, LIU Chunbing¹, GAO Nan^{1,2*}, NI Yubo¹, MENG Zhaozong^{1,2}, ZHANG Zonghua^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

(2. Innovation and Research Institute of Hebei University of Technology in Shijiazhuang, Shijiazhuang 050299, China)

Abstract: Single-frame fringe projection techniques can be used to measure the three-dimensional shape of dynamic and continuous objects. The Hilbert-Huang transform is widely applied to single-frame phase demodulation due to its adaptive local analysis capability; however, the empirical mode decomposition suffers from difficulty in concentrating the extraction of fringe components, which degrades phase demodulation accuracy. To address this issue, a single-frame phase demodulation method based on an improved Hilbert-Huang transform is proposed. First, the wavelet transform is applied to the denoised fringe pattern to estimate the local fringe period. Then, the local period is used as the adaptive filter size in empirical mode decomposition, enabling the fringe component to be concentrated into a single intrinsic mode function. Finally, the Hilbert transform is applied to the extracted fringe component to complete phase demodulation. Simulation and experimental results demonstrate that, compared with existing method, the phase demodulation accuracy is improved by approximately three times. The proposed method provides an effective phase demodulation method for single-frame fringe projection techniques.

Keywords: optical measurement; Hilbert-Huang transform; empirical mode decomposition; phase demodulation; wavelet transform; single-frame

收稿日期: 2026-01-19; 收到修改稿日期: 2026-03-10

基金项目: 国家自然科学基金 (U2341275); 河北省自然科学基金 (E2024202121)

作者简介: 王少强 (2000—), 男, 硕士研究生, 从事光学三维形貌测量研究。wangsq3245@163.com

高楠 (1982—), 男, 副教授, 博士, 从事光学三维形貌测量研究。

* 通讯作者: ngao@hebut.edu.cn

0 引 言

在光学三维测量中, 条纹投影轮廓术 (Fringe Projection Profilometry, FPP) 凭借其高精度和高鲁棒性, 已成为获取物体表面形貌信息的重要手段^[1]。其核心原理是向被测物投影相位编码的正弦条纹图, 将物体表面高度信息调制于条纹图的相位之中^[2]。依据所需条纹图数量, 条纹投影轮廓术可分为单帧法和多帧法。单帧条纹投影轮廓术仅需一幅条纹图就能恢复物体表面形貌, 能够有效避免多帧投影过程中由物体运动引起的测量误差, 可用来测量表面连续的运动物体。单帧相位解调, 即从单幅条纹图中解调出相位信息, 决定着单帧条纹投影轮廓术的测量精度^[3]。单帧相位解调方法包括傅里叶变换法^[4]、窗式傅里叶变换法^[5]、小波变换法^[6]以及希尔伯特-黄变换法^[7]等。傅里叶变换法缺乏局部分析能力^[8], 易产生频谱混叠现象; 窗式傅里叶变换法通过引入固定窗口弥补了傅里叶变换法的缺点^[9], 但窗口尺寸的选择影响着解调精度; 小波变换法具备多尺度特性^[10], 但不同的小波基对解调结果存在较大影响。相比之下, 希尔伯特-黄变换法不依赖预设基函数, 具有自适应分解与良好的局部特征分析能力, 在单帧相位解调中得到广泛的应用^[11]。

希尔伯特-黄变换 (Hilbert-Huang Transform, HHT) 最早由 Huang 等提出^[7], 由经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD) 和希尔伯特变换 (Hilbert Transform, HT) 两部分组成。EMD 能够自适应地将复杂的信号分解为若干具有不同频率的本征模函数 (Intrinsic Mode Function, IMF), 这些 IMF 具有近似单分量及零均值振荡特征, 从而满足希尔伯特变换的前提条件。希尔伯特变换通过构造解析信号, 可以从中分析出相位等局部特征。在相位解调中, EMD 主要用于分离条纹图中的背景分量和噪声, 以提取纯净的条纹分量进行希尔伯特变换^[12], 其分解质量直接决定 HHT 相位解调的效率与准确性。因此, 增强 EMD 对条纹图的分解性能, 成为提升 HHT 相位解调性能的关键。

EMD 最开始用来处理一维信号, Nunes 等^[13]通过形态学算子检测图像区域极值, 并采用径向基函数进行曲面插值以形成二维包络, 正式将 EMD 扩展为二维 EMD。二维 EMD 依赖耗时的二维曲面插值来构造极值包络, 导致效率低下。Bhuiyan 等^[14]提出快速自适应 EMD, 使用顺序统计滤波器和平滑滤波代替二维曲面插值, 滤波器尺

寸由极值间的距离决定, 显著缩短 EMD 计算时间。在快速自适应 EMD 的基础上, Trusiak 等^[15]提出增强快速 EMD (Extremely Fast EMD, EFEMD), 利用极值个数快速估计滤波器尺寸, 并且使用形态学操作来加快包络估计和极值检测步骤, 进一步减少 EMD 计算时间。虽然 EFEMD 在计算速度方面具有优势, 但其分解过程中滤波器尺寸固定, 难以适应条纹在空间上的局部变形, 导致条纹分量被分散至多个 IMF 中。包含条纹分量的 IMF 需要手动选择并进行重建, 这提高了条纹信息丢失及背景分量重新混入的风险, 从而影响相位解调精度。

为实现条纹分量的集中提取, 本文提出一种改进经验模态分解方法, 并将其与希尔伯特变换相结合, 构成改进希尔伯特-黄变换, 用于单帧条纹图的相位解调。条纹投影轮廓术中常用竖直条纹图进行投影, 其信号相位分布特征体现在水平方向, 对变形条纹图进行单行处理可以解出折叠相位, 并且每一行的求解过程互不干扰, 因此本文采用对条纹图逐行处理的方式。

改进经验模态分解主要针对滤波器尺寸进行自适应优化: 首先利用小波变换对条纹图逐行进行空频分析, 估计条纹的局部周期分布; 随后将周期估计结果作为自适应滤波器尺寸, 对条纹信号进行逐行经验模态分解, 使条纹分量集中在单个 IMF 中。完成经验模态分解后, 对该 IMF 进行希尔伯特变换以提取相位信息, 从而完成条纹图相位解调过程。

1 基本原理

1.1 条纹投影轮廓术

条纹投影轮廓术的典型系统如图 1 所示, 该系统由投影仪、相机及被测物组成。投影仪向被测物体表面投影正弦条纹图, 条纹图受物体表面高度影响而产生变形, 其相位也会产生相应变化, 进而将高度信息调制到条纹图的相位中; 相机同步采集变形条纹图, 并经过相位解调获得变形条纹图中的相位信息, 解调出的相位并不是连续的, 其折叠在 $(-\pi, \pi]$ 之间, 称之为折叠相位如图 2 (a) 所示; 将折叠相位展开为连续的展开相位如图 2 (b) 所示, 并结合系统标定参数将其映射为高度, 即可实现物体表面形貌的三维重建。

通常情况下, 相机采集的条纹图可以表示为

$$I(x, y) = N(x, y) + A(x, y) B(x, y) \cos[\phi(x, y) + \text{def}(x, y)] \quad (1)$$

式中, (x, y) 表示像素位置; $I(x, y)$ 表示条纹图

强度; $A(x, y)$ 表示条纹图中的背景分量, 其中包含环境光和直流项; $N(x, y)$ 是条纹图中的噪声; $B(x, y)\cos[\phi(x, y) + \text{def}(x, y)]$ 表示条纹图中的条纹分量, $B(x, y)$ 表示条纹调制度, $\phi(x, y)$ 是条纹图的原始相位, $\text{def}(x, y)$ 是物体高度导致的相位变化。

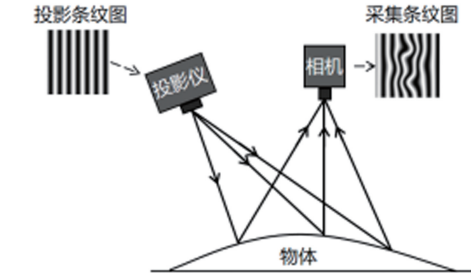


图1 FPP典型系统示意图

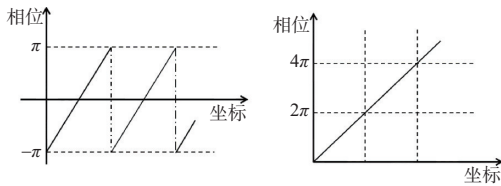


图2 折叠相位与展开相位示意图

1.2 希尔伯特-黄变换

希尔伯特-黄变换是一种无需预设基函数、具有良好局部分析能力的信号分析方法, 由EMD和希尔伯特变换两部分组成。EMD可以将复杂信号解为若干个频率不同的IMF和一个残差分量。每个IMF同时满足: 信号中极值点数与零点之差数不超过1; 局部均值为零, 即上下包络的平均值为零。

传统经验模态分解过程可描述为:

(1) 寻找信号中的极大和极小值点, 用插值方法拟合上包络线和下包络线;

(2) 计算出上下包络线的均值包络, 然后用原始信号减去均值包络获取一个中间分量;

(3) 判断中间分量是否满足IMF判断条件, 若不满足则使用中间分量继续重复上述步骤, 直到获得一个符合条件的IMF;

(4) 用原始信号减去IMF作为残差, 将残差作为新信号重复整个分解流程, 依次得到后续的IMF, 直至最后的残差是一个单调函数。

某信号 $Y(x)$ 经EMD处理后的结果可写为

$$Y(x) = \sum_{i=1}^K \text{IMF}_i(x) + r(x) \quad (2)$$

式中, K 表示IMF的个数; $r(x)$ 为残差。

希尔伯特变换的作用是对EMD得到的每个IMF分量进行特征分析, 选取信号 $Y(x)$ 的某一 $\text{IMF}_i(x)$ 执行希尔伯特变换, 其定义为

$$\overline{\text{IMF}_i(x)} = \frac{1}{\pi} \int \frac{\text{IMF}_i(x)}{x - \tau} d\tau \quad (3)$$

式中, $\overline{\text{IMF}_i(x)}$ 代表 $\text{IMF}_i(x)$ 的希尔伯特变换, τ 为积分变量。由此构造解析信号 $Z_i(x)$

$$\begin{aligned} Z_i(x) &= \text{IMF}_i(x) + \overline{\text{IMF}_i(x)} \\ &= m_i(x) e^{j\theta_i(x)} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $m_i(x)$ 和 $\theta_i(x)$ 分别表示瞬时幅值与瞬时相位, 其相应计算公式为

$$m_i(x) = \sqrt{\text{IMF}_i(x)^2 + \overline{\text{IMF}_i(x)}^2} \quad (5)$$

$$\theta_i(x) = \arctan[\overline{\text{IMF}_i(x)} / \text{IMF}_i(x)] \quad (6)$$

2 改进的希尔伯特-黄变换

2.1 基于小波变换的条纹局部周期估计

小波变换具有良好的空频分析能力, 尽管在相位解调方面存在一定局限, 但可利用小波变换的脊线检测功能获取条纹图的局部周期信息。对条纹图中某行信号进行基于小波变换的条纹局部周期估计流程如图3所示, 首先对该行信号进行小波变换并提取小波脊线, 随后将脊线对应的尺度转换为周期, 进而得到条纹信号的局部周期。

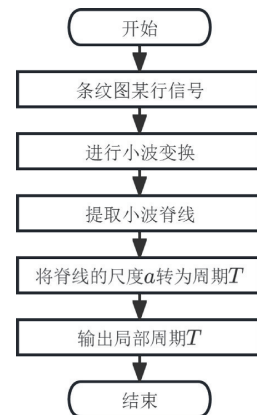


图3 基于小波变换的条纹局部周期估计流程图

条纹图某行信号 $I(x)$ 的一维连续小波变化定义为

$$W_I(a, b) = \int I(x) \Psi_{(a,b)}^*(x) dx \quad (7)$$

式中, $W_I(a, b)$ 为小波系数; $\Psi_{(a,b)}(x)$ 为小波基函数; $*$ 表示共轭; a 为尺度因子; b 为平移因子。

沿尺度轴搜索小波系数 $W_I(a, b)$ 的模最大值, 这些最大值点所形成的轨迹称为小波脊。鉴于条纹分量在条纹图中占据主导能量, 小波脊主要反映条纹分量的特征, 而几乎不受背景分量和噪声的影响。设小波基函数的中心频率为 f_0 , 则小波脊对应的尺度 a 与条纹局部周期 T 之间的转换关系为

$$T = a/f_0 \quad (8)$$

2.2 基于改进希尔伯特-黄变换的相位解调

改进希尔伯特-黄变换由改进 EMD 与希尔伯特变换构成两部分组成：前者用于提取完整的条纹分量，后者则负责从中解算相位信息。

对条纹图某行信号执行改进 EMD 的流程如图 4 所示，具体步骤如下

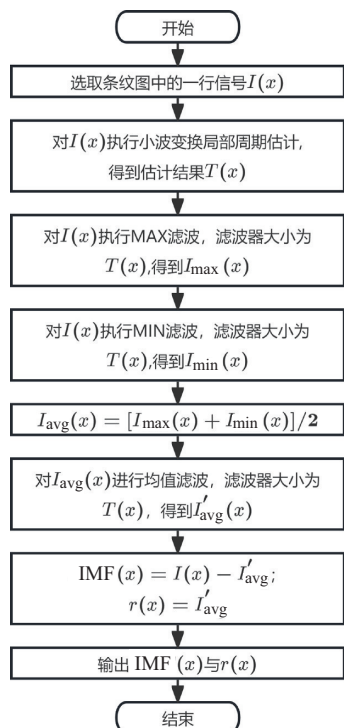


图 4 改进 EMD 流程图

(1) 选取条纹图某行信号 $I(x)$ ，执行小波变换条纹局部周期估计步骤，得到该信号的局部周期 $T(x)$ ；

(2) 对信号 $I(x)$ 分别进行 MAX 滤波和 MIN 滤波，分别生成极大值包络 $I_{\max}(x)$ 和极小值包络 $I_{\min}(x)$ ，滤波器尺寸等于条纹局部周期 $T(x)$ ；

(3) 计算 $I_{\max}(x)$ 与 $I_{\min}(x)$ 的平均值 $I_{\text{avg}}(x)$ ，并采用均值滤波对其进行平滑处理，滤波器尺寸同样等于条纹局部周期 $T(x)$ ，平滑后的结果记为 $I'_{\text{avg}}(x)$ ；

(4) 令 $\text{IMF}(x) = I(x) - I'_{\text{avg}}(x)$ ， $r(x) = I'_{\text{avg}}(x)$ ，至此完成分解。

改进 EMD 能够有效实现条纹分量的集中提取，其分解结果仅包含一个 IMF（包含全部的条纹分量）和一个 $r(x)$ （包含残余的背景分量）。但该方法无法同时分离噪声，噪声会被保留在 IMF 中。在后续对 IMF 进行希尔伯特变换时，噪声的存在会降低相位解算精度。因此，在相位解调之前，需对条纹图像进行去噪处理。

基于改进希尔伯特-黄变换的相位解调整体流程如图 5 所示。首先对条纹图进行去噪预处理，选

取某行信号执行改进 EMD，将条纹分量集中到单一 IMF 中；随后对该 IMF 进行希尔伯特变换以提取相位信息；最后逐行遍历整幅条纹图从而完成相位解调过程。

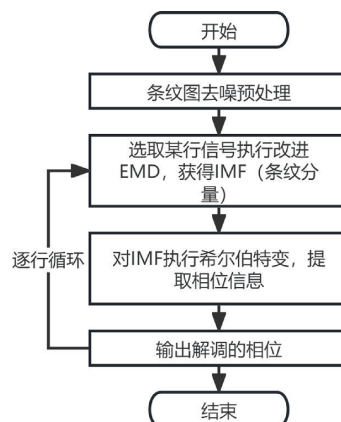


图 5 基于改进 HHT 的相位解调流程图

3 仿真与结果分析

为验证本文方法对条纹图的相位解调效果，使用 Matlab 2023a 在处理器为 AMD Ryzen 5 4600H，内存为 16GB 的笔记本电脑上进行仿真（本文中所有计算都是在这台计算机上完成）。

首先利用软件生成一幅 $700\text{pixel} \times 700\text{pixel}$ 的仿真条纹图 $I(x, y)$ ，如图 6 (a) 所示，其数学模型表示如式 (1) 所示。条纹图的背景分量和条纹分量分别如图 6 (b) 和图 6 (c) 所示。为模拟实际成像环境下的环境光干扰，背景分量采用 gauss 函数构建，设定为 $A(x, y) = 110 + 30 \times \text{gauss}(x, y)$ 。在条纹分量中，调制度 $B(x, y) = 110$ ，条纹图的原始相位分布 $\phi(x, y) = 2\pi \times (x / T)$ ，条纹周期 $T = 30\text{pixel}$ 。相位变化 $\text{def}(x, y)$ 由 peaks 函数生成，如图 6 (d) 所示，设定 $\text{def}(x, y) = \text{peaks}(350)$ 。需要说明的是，该仿真条纹图中未引入噪声 $N(x, y)$ 。

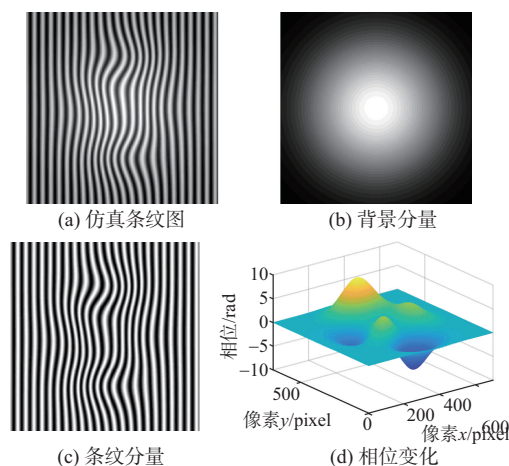


图 6 仿真条纹图及其组成

3.1 基于改进EMD的条纹分量提取仿真

为了验证改进EMD对条纹分量的提取效果,采用改进EMD法和EFEMD法分别对图6(a)所示的仿真条纹图进行分解。

在改进EMD过程中,首先利用小波变换对仿真条纹图进行局部周期估计,结果如图7所示。其中,图7(a)和图7(b)分别为仿真条纹图第350行

的小波系数幅值及小波脊线;图7(c)为整幅条纹图的局部周期估计结果,该结果作为改进EMD过程中的自适应滤波器尺寸。改进EMD的分解结果如图8所示,其中仅包含一个IMF(如图8(a)所示)和一个残差(如图8(b)所示),条纹图的条纹分量全部集中在该IMF中,背景分量存在于残差中。

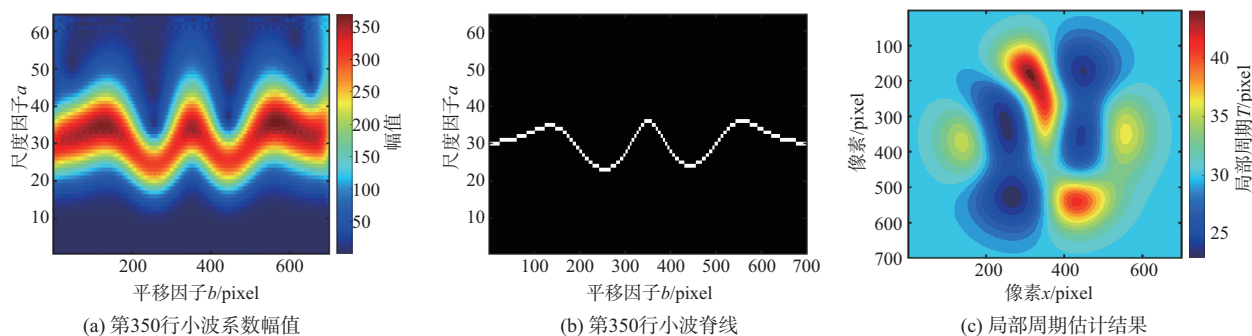


图7 基于小波变换的仿真条纹图局部周期估计

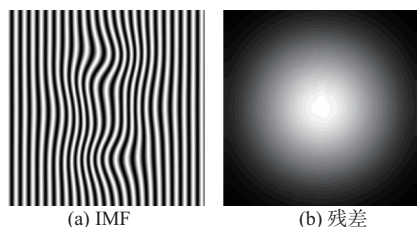


图8 改进EMD分解结果

EFEMD的分解结果如图9所示,其分解过程中得到三个IMF(分别如图9(a)–(c)所示)和一个残差如图9(d)所示。可以看出,条纹分量被分散至三个IMF中,需要进一步进行重构以获得完整的条纹分量。将EFEMD分解得到的三个IMF相加作为其提取的条纹分量,其结果如图9(e)所示。

为定量评估两种方法的条纹分量提取效果,图10给出了改进EMD法获得的条纹分量(图8(a))与EFEMD法获得的条纹分量相对于真实条纹分量(图6(c))的归一化绝对误差,结果分别如图10(a)

和图10(b)所示。选取相应误差图中第350行进行对比,如图10(c)所示,改进EMD的条纹分量最大绝对误差约为0.005,而EFEMD法的条纹分量最大绝对误差约为0.02。EFEMD法的条纹分量重建步骤造成了条纹分量缺失或是背景分量的掺杂,导致其误差较大。改进EMD能够将条纹分量集中提取,无需额外的重建,故误差更小。

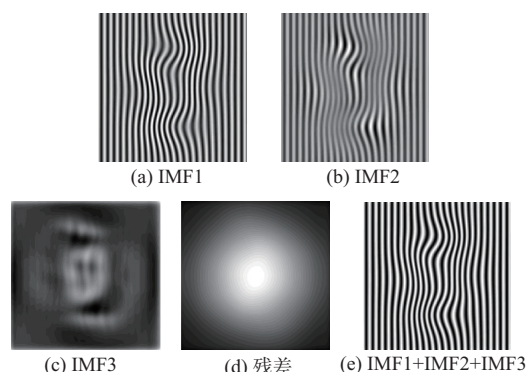


图9 EFEMD分解结果

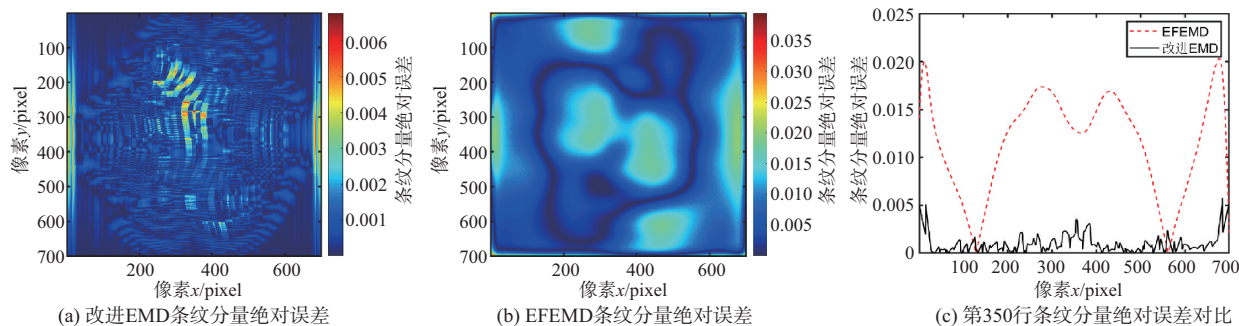


图10 条纹分量绝对误差对比

3.2 基于改进HHT的相位解调仿真

为验证本文方法(改进HHT法)对条纹图的

相位解调性能,选择EFEMD+HT法作为对比,对图6(a)进行处理,相应的相位解调结果(折

叠相位) 分别如图 11 (b) 和图 11 (d) 所示。真实相位结果由真实条纹分量经希尔伯特变换得到, 如图 11 (a) 所示。图 11 (c) 和图 11 (e) 分别给出了两种方法相位解调结果与真实相位之间的

绝对误差分布。为方便观察, 选取对应误差图的第 350 行进行展示, 其结果如图 10 (f) 所示。可以看出, 本文方法的误差整体低于 EFEMD+HT 法。

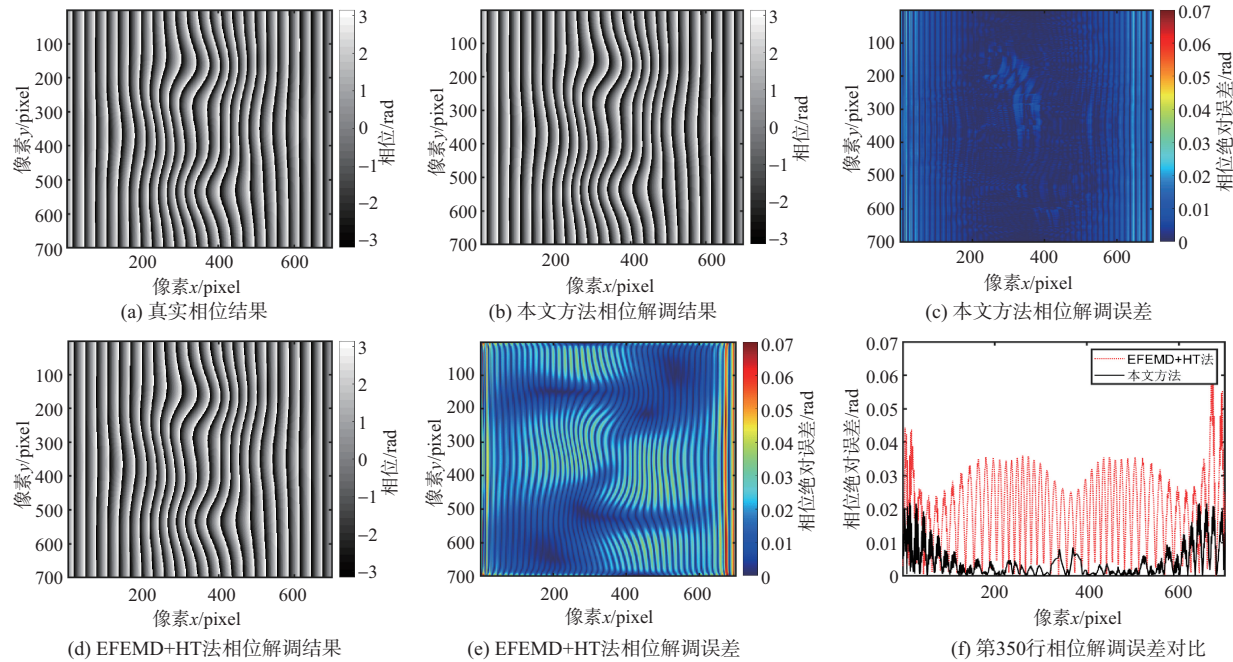


图 11 仿真条纹图相位解调结果及误差对比

同时计算本文方法与 EFEMD+HT 法相位解调结果的均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE), 其中本文方法的 RMSE 为 0.0066rad, 而 EFEMD+HT 法的 RMSE 为 0.023rad。相较于 EFEMD+HT 法, 本文方法的相位解调精度提升了约 3 倍。

3.3 条纹图去噪仿真

对于无噪声的条纹图, 本文方法能够实现高精度的相位解调。但实际测量环境下采集的条纹图会受到噪声干扰, 噪声虽不会影响改进 EMD 提取条纹分量的过程, 但会对后续希尔伯特变换求取相位阶段产生不利影响, 从而降低相位解调精度。在采用本文方法进行相位解调之前, 需要对条纹图进行有效的去噪处理。

三维块匹配算法 (Block Matching 3D, BM3D)

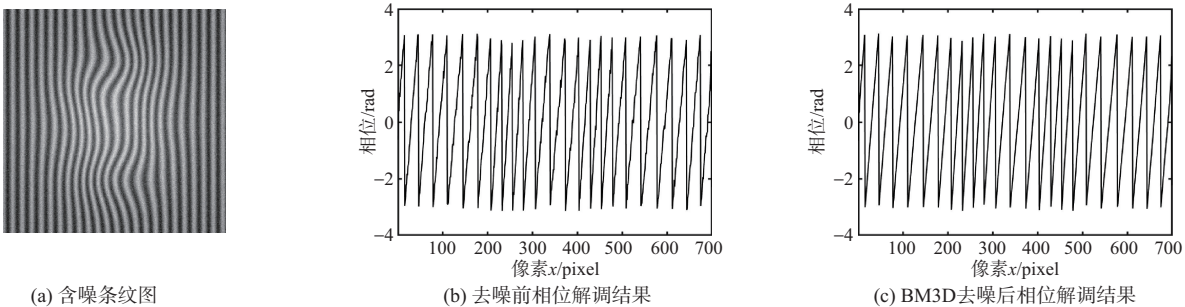


图 12 BM3D 去噪效果展示

是一种性能优异的图像去噪方法, 已被证明在条纹图去噪方面具有良好效果^[16]。本文方法在相位解调前采用 BM3D 算法对条纹图进行去噪处理, 并通过仿真验证了其去噪的有效性。

在图 6 (a) 所示的仿真条纹图中加入 5% 水平的随机噪声, 生成含噪声条纹图, 如图 12 (a) 所示。直接对含噪声条纹图采用本文方法进行相位解调, 其结果第 350 行如图 12 (b) 所示; 经 BM3D 去噪处理后再采用本文方法进行相位解调, 其结果第 350 行如图 12 (c) 所示。可以看出 BM3D 能够有效抑制噪声对解调结果的干扰。图 13 对比了不同噪声水平下, BM3D 去噪前后本文方法相位解调结果的 RMSE。在 10% 的噪声水平下, 去噪前的 RMSE 超过 0.2rad, 去噪后的 RMSE 在 0.05rad 内, 因此 BM3D 可稳定抑制噪声对相位解调精度的影响。

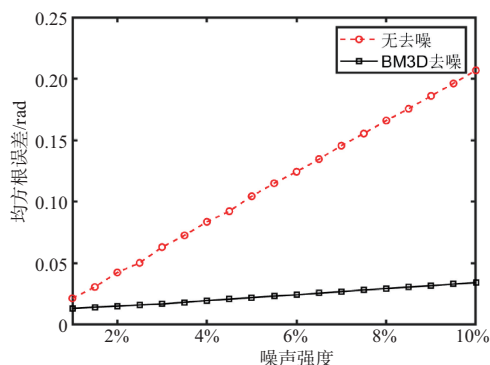


图13 不同水平噪声下BM3D去噪前后相位解调精度对比

4 实物实验

为验证本文所提方法的实际性能，搭建了如图14所示的条纹投影轮廓术实物测量系统，该系统由投影仪、CCD相机和水平移动平台组成。系统的主要硬件参数如下：投影仪型号为VisionFly 6500，分辨率为 1920×1080 pixel；相机型号为SVS-eco655CVGE，分辨率 2448×2050 pixel；水平移动平台型号为GCD203300M，精度为 $1 \mu\text{m}$ 。

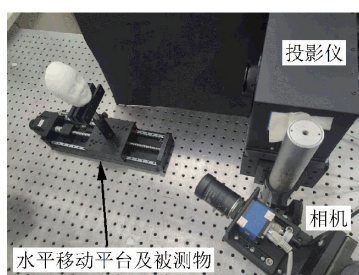


图14 FPP实物测量系统

4.1 基于改进HHT的单帧相位解调实验

为验证本文方法对实际条纹图的单帧相位解调性能，选择人脸模型作为测量对象进行相位解调实验。人脸模型如图15(a)所示。为便于结果展示，将相机采集的条纹图像裁剪至 $1250 \text{pixel} \times 1680 \text{pixel}$ 大小，并以红色实线标出了经过人脸模型鼻尖的第1000行位置，如图15(b)所示。

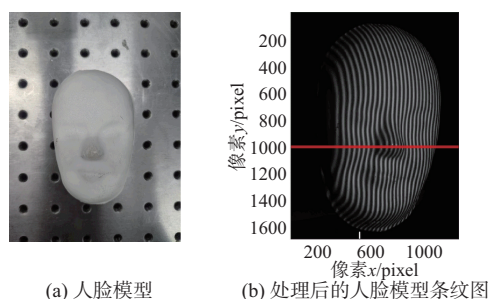


图15 人脸模型被测物

在实验过程中，人脸模型的真实相位难以获取。相移法^[17]是一种多帧相位解调方法，其相位解调精度高于单帧方法，因此本文采用八步相移法

的相位解调结果作为参考相位，如图16(a)所示。分别采用本文方法和EFEMD+HT法对图15(b)进行相位解调，解调结果分别如图16(b)和图16(d)所示。本文方法和EFEMD+HT法的相位解调结果相对于参考相位的绝对误差分别如图16(c)和图16(e)所示。进一步选取第1000行的相位误差进行对比分析，其结果如图16(f)所示。从相位解调结果的误差分布可以看出，本文方法的解调结果与参考相位更加一致，误差整体较小。

为进一步进行定量评估，分别计算两种方法相位解调结果相对于参考相位的RMSE，其中本文方法的RMSE为 0.0329rad ，EFEMD+HT法的RMSE为 0.0967rad 。同时统计两种方法的计算时间，本文方法的时间为 35.43s （其中包含BM3D去噪时间），而EFEMD+HT法的时间为 16.17s 。由于引入了基于小波变换的条纹局部周期估计、逐像素自适应滤波器尺寸调整以及去噪预处理步骤，本文方法的计算复杂度有所提高，相位解调时间相对增加，但在精度方面表现出明显优势。

4.2 基于改进HHT的三维重建实验

为验证本文方法在基于条纹投影轮廓术三维重建中的有效性，对图15(a)人脸模型进行三维重建实验。首先对图14所示的条纹投影测量系统进行系统标定。标定过程中，采用平面标定板进行深度标定，控制标定板沿垂直于投影仪光轴方向进行水平移动，共设置18个标定位置，相邻位置间距为 3mm 。在每个标定位置处向标定板表面投射正弦条纹图像，获取各像素点对应的展开相位信息，从而建立像素相位与深度之间的映射关系，完成系统深度标定。各标定位置均采用八步相移法进行相位解调获得折叠相位，并利用最佳三条纹法^[18]完成相位展开，所选条纹频率分别为100、99和90。在相同标定位置下，进一步采用圆环标定板进行横向标定，建立像素深度与横向距离之间的映射关系，完成系统横向标定。

最佳三条纹法通过在时间序列上投影三组特定频率的条纹，实现折叠相位的逐像素独立展开。该方法在投影图案数量上优于传统多频法，同时在解调精度与鲁棒性方面显著高于空间展开方法^[19]。因此，在完成系统标定后，对八步相移法、本文方法以及EFEMD+HT法获得的人脸模型条纹图相位解调结果（分别如图16(a)、图16(b)和图16(d)所示），统一采用最佳三条纹法进行相位展开，并结合系统标定参数完成三维重建，结果分别如图17(a)、图17(c)和图17(e)所示。图17中同样给出了人脸模型鼻尖区域的局部

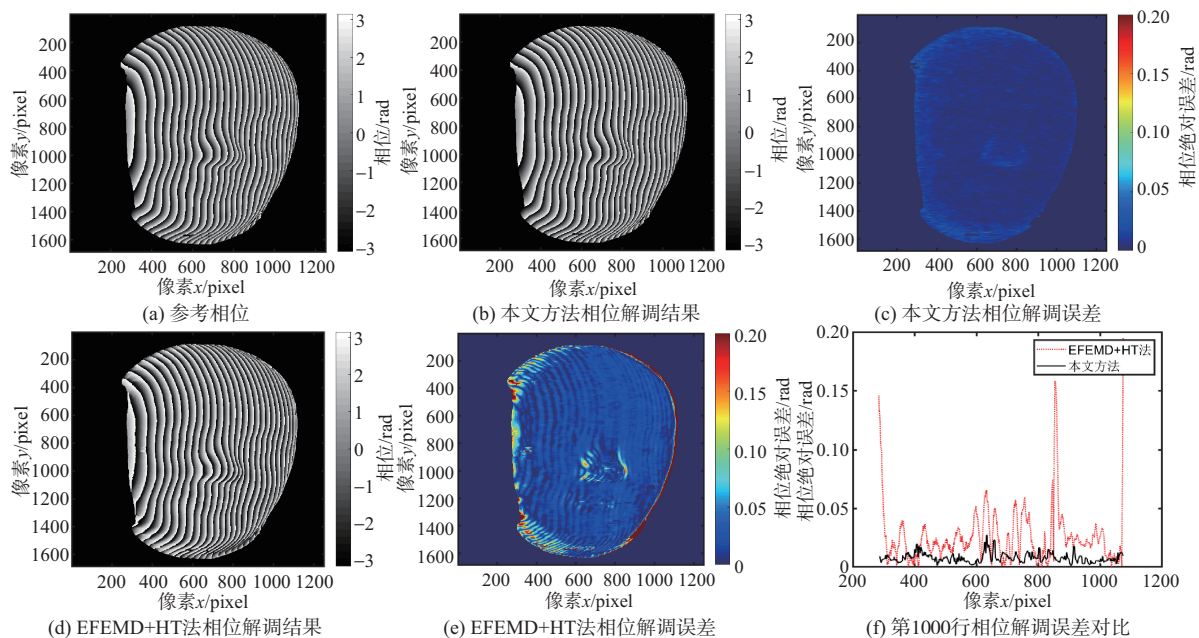


图 16 人脸模型相位解调结果及误差对比

放大结果, 分别如图 17 (b)、图 17 (d) 和图 17 (f) 所示。

5 总 结

本文提出一种基于改进希尔伯特-黄变换的单帧相位解调方法, 该方法由改进经验模态分解和希尔伯特变换组成。改进经验模态分解成功实现条纹分量集中提取, 避免了条纹信息丢失及背景分量重新混入条纹分量的风险, 为希尔伯特变换提供了完整且干净的条纹分量。本文方法首先采用 BM3D 对条纹图进行去噪预处理; 随后利用小波变换估计条纹的局部周期, 并将其结果作为改进经验模态分解中的自适应滤波器尺寸, 使条纹分量集中于单一 IMF 中; 最终对该 IMF 进行希尔伯特变换以获取相位信息, 实现相位解调。

以人脸模型为被测对象, 将本文方法与 EFEMD+HT 法进行对比实验, 并以八步相移法的相位解调结果作为参考。实验结果表明, 本文方法的均方根误差为 0.0329rad, 显著低于 EFEMD+HT 法的 0.0967rad。但本文方法的计算复杂度较高, 在相位解调阶段的计算时间有所增加。此外, 相位解调技术只能获得折叠相位, 后续的三维重建过程还需相位展开技术进行辅助。为重建人脸模型的三维形貌, 本文借助最佳三条纹法进行相位展开, 结果表明本文方法具有和相移法相似三维重建效果, 证明本文方法在基于条纹投影轮廓术三维重建中的有效性。未来研究将重点探索单帧相位展开方法, 并与本文方法相结合, 以实现真正的单帧三维测量。

参考文献:

[1] 王晨, 张宗华, 丁宇航, 等. 基于立体标靶的双目系统标定研

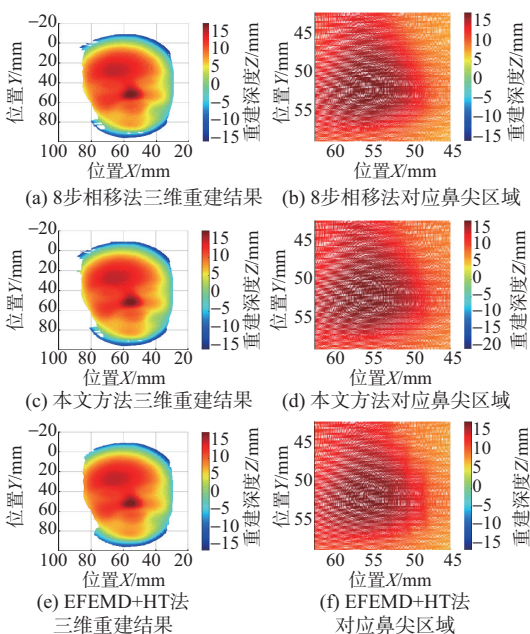


图 17 人脸模型三维重建结果及鼻尖区域对比

从图 17 的三维重建结果可以观察到, 八步相移法与本文方法的重建表面较为光滑, 而 EFEMD+HT 法的重建表面存在明显的波纹状起伏。上述三种重建过程均采用了相同的相位展开方法, 且前两者的重建结果光滑, 这表明图 17 (f) 鼻尖处的波纹并非由相位展开环节引起。其原因在于, 鼻尖区域形貌梯度大, EFEMD+HT 法对该区域的相位解调误差较大, 致使重建表面出现波纹。从三维重建结果来看, 本文方法能够获得与八步相移法相近的重建质量, 且明显优于 EFEMD+HT 法。

- 究[J]. 光学技术, 2020, 46(3): 322—329.
- Wang Chen, Zhang Zonghua, Ding Yuhang, et al. Research on the calibration of binocular system based on stereoscopic target[J]. Optical Technique, 2020, 46(3): 322—329.
- [2] 王永红, 张倩, 胡寅, 等. 显微条纹投影小视场三维表面成像技术综述[J]. 中国光学, 2021, 14(03): 447—457.
- Wang Yonghong, Zhang Qian, Hu Yan, et al. 3D small-field surface imaging based on microscopic fringe projection profilometry: a review[J]. Chinese Optics, 2021, 14(03): 447—457.
- [3] Wang J H, Yang Y X. Phase extraction accuracy comparison based on multi-frequency phase-shifting method in fringe projection profilometry[J]. Measurement, 2022, 199: 111525.
- [4] 王邺, 陈文静, 韩梦奇. 基于傅里叶变换的改进圆形条纹投影轮廓术[J]. 光学学报, 2022, 42(13): 89—99.
- Wang Ye, Chen Wenjing, Han Mengqi. Improved circular fringe projection profilometry based on Fourier transform[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(13): 89—99.
- [5] 邓烨欢, 陈文静, 张启灿. 基于窗口傅里叶变换的圆形条纹投影轮廓术[J]. 光学与光电技术, 2025, 23(01): 67—78.
- Deng Yehuan, Chen Wenjing, Zhang Qican. Circular fringe projection profilometry based on windowed Fourier transform[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2025, 23(01): 67—78.
- [6] Han M Q, Chen W J. Dual-angle rotation two-dimensional wavelet transform profilometry[J]. Optics Letters, 2022, 47(6): 1395—1398.
- [7] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903—995.
- [8] Zhao Q, Tang C, Min X, et al. Dynamic shape measurement for objects with patterns by Fourier fringe projection profilometry based on variational decomposition and multi-scale Retinex[J]. Applied Optics, 2021, 60(33): 10322—10331.
- [9] 黄宇, 钟金钢. 窗口傅里叶变换轮廓术中窗口尺度选取的改进[J]. 光学技术, 2010, 36(3): 378—385.
- Huang Yu, Zhong Jingang. Improved algorithm to choose the window scale for windowed Fourier transform profilometry[J]. Optical Technique, 2010, 36(3): 378—385.
- [10] Han M Q, Chen W J. Two-dimensional complex wavelet with directional selectivity used in fringe projection profilometry[J]. Optics Letters, 2021, 46(15): 3653—3656.
- [11] 高楠, 张璨, 孟召宗, 等. 频域分析的条纹投影技术相位解调方法研究进展[J]. 光学技术, 2023, 49(04): 436—445.
- Gao Nan, Zhang Can, Meng Zhaozong, et al. Review on phase demodulation methods of fringe projection based on frequency domain analysis[J]. Optical Technique, 2023, 49(04): 436—445.
- [12] 王辰星, 达飞鹏. 基于经验模态分解法的光学条纹图像处理研究进展[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 0303013-0303013-11.
- Wang Chenxing, Da Feipeng. Researches of optical fringe pattern analysis based on EMD algorithms[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 0303013-0303013-11.
- [13] Nunes J C, Bouaoune Y, Delechelle E, et al. Image analysis by bidimensional empirical mode decomposition[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(12): 1019—1026.
- [14] Bhuiyan S M A, Adhami R R, Khan J F. Fast and adaptive bidimensional empirical mode decomposition using order-statistics filter based envelope estimation[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2008, 2008: 1—18.
- [15] Trusiak M, Wielgus M, Patorski K. Advanced processing of optical fringe patterns by automated selective reconstruction and enhanced fast empirical mode decomposition[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 52: 230—240.
- [16] Cywińska M, Trusiak M, Patorski K. Automatized fringe pattern preprocessing using unsupervised variational image decomposition[J]. Optics Express, 2019, 27(16): 22542—22562.
- [17] Guo W B, Wu Z J, Zhang Q C, et al. Real-time motion-induced error compensation for 4-step phase-shifting profilometry[J]. Optics Express, 2021, 29(15): 23822—23834.
- [18] Zhang Z H, Towers C E, Towers D P. Time efficient color fringe projection system for 3D shape and color using optimum 3-frequency selection[J]. Optics Express, 2006, 14(14): 6444—6455.
- [19] 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(08): 23—45.
- Zhang Zonghua, Li Yanling, Gao Feng, et al. Phase unwrapping technology for structured light three-dimensional measurement: a review (invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(08): 23—45.