

一种逐周期条纹背景自适应去除算法

刘洋, 潘娅, 罗玉琴

(西南科技大学 计算机科学与技术学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: 利用傅里叶轮廓术(FTP)可实现对单帧光栅投影条纹图像的相位提取, 恢复被测物体三维信息; 该方法具有实时性高的特点, 但在频域滤波时易受到不均匀背景分量的干扰; 现有投影条纹图背景去除方法在遇到条纹图背景分量不均匀时, 存在去除效果差, 严重影响重建精度的问题; 针对该问题, 通过实验发现单个条纹周期内的背景分量变化很小, 可近似作为常量处理; 结合两次希尔伯特变换能有效去除信号直流分量且保持相位信息稳定的特性, 提出一种自适应的分周期条纹背景滤除方法; 该方法首先对光栅投影图像中的条纹峰值进行提取, 分割出逐个条纹周期; 再对逐条纹周期分别进行两次希尔伯特变换, 自动去除该周期内的背景分量, 实现条纹背景分量的逐周期自适应去除; 该方法能有效克服条纹投影图像背景分量不均匀的问题; 实验结果表明, 该方法相对于傅里叶轮廓术可更好地消除条纹背景分量影响, 对复杂表面物体的重建异常点少, 精度优于 0.1 mm。

关键词: 结构光; 希尔伯特变换; 背景分量; 自适应; 傅里叶轮廓术

A Periodic Stripe Background Adaptive Removal Algorithm

LIU Yang, PAN Ya, LUO Yuqin

(School of Computer Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: Fourier Profilometry (FTP) can be used to realize phase extraction of single frame grating projection fringe image and restore the 3D information of the measured object. This method has the characteristics of high real-time performance, but it is easy to be interfered by non-uniform background components in frequency domain filtering. When the background component of the fringe image is not uniform, the existing methods for background removal of the projected fringe image have poor removal effect, which seriously affects the reconstruction accuracy. Aiming at this problem, it is found through experiments that the background component changes very little within a single fringe period, which can be approximately treated as a constant. Considering that the two Hilbert transforms can effectively remove the DC component of the signal and keep the phase information stable, an adaptive fractional periodic fringe background filtering method is proposed. Firstly, the fringe peak is extracted from the raster projection image, and the fringe period is segmenting. Then, two Hilbert transforms are carried out on each fringe period to automatically remove the background component in this period, so as to realize the periodic adaptive removal of the fringe background component. This method can effectively overcome the problem of the non-uniform background component of the fringe projection image. Experimental results show that the proposed method can eliminate the fringe background component better than Fourier contour technique, and the reconstruction accuracy is better than 0.1 mm with fewer abnormal points on complex surface objects

Keywords: structured light; Hilbert transform; background component; adaptive; Fourier profilometry

0 引言

结构光三维测量技术是一种有用的光学测量技术, 其具有设备简单以及在非接触模式下可提供高分辨率的全场测量能力^[1]。随着科学技术的飞速发展, 结构光三维测量技术在三维重建、位移测量、以及三维形貌测量等诸多领域得到了广泛的研究和应用^[2]。这使得结构光测量技术必须具备有效适应不同场景的能力, 这对该技术的测量速度和测量精度是一种更高的要求^[3]。在保证测量速度的同时如何提高测量精度是研究人员广泛研究的问题。由于相位携带着需要测量的物理量信息, 准确的相位提取对于结构光技术的成功应用至关重要。一般情况下, 相位提取方法

可分为两类^[4]: 一类是基于单模式条纹图^[5], 另一类是基于相移技术多模式条纹图^[6-8]。基于相移技术的方法往往需要至少三幅模式图, 这显然很难达到快速测量的效果。基于单模式条纹的方法以傅里叶轮廓术为代表, 将正弦光栅或朗奇光栅投影到被测物体表面上, 投影光栅图样的相位受物体的空间轮廓调制。这种相位调制被编码到光栅图形的基本频谱中。采集记录形变光栅图形, 利用傅里叶变换从基频谱中提取相位信息, 然后根据获得的相位信息重建三维物体表面轮廓。然而变形光栅图像除了基频成分外, 还可能包含背景分量和高阶频谱成分。当基频谱较宽时, 基频可能被其他频谱所破坏。这就是传统 FTP 的固有缺

收稿日期: 2021-03-25; 修回日期: 2021-05-13。

基金项目: 教育部重点实验室基金项目(15zxzk01)。

作者简介: 刘洋(1994-), 男, 四川绵阳人, 硕士研究生, 主要从事结构光三维重建方向的研究。

引用格式: 刘洋, 潘娅, 罗玉琴. 一种逐周期条纹背景自适应去除算法[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(11): 148-153.

点^[9-13]。目前为止针对 FTP 这个缺点已经提出了几种解决方案, 周灿林^[14]等人提出了一种利用相移去除背景分量的方法。这种方法虽然能有效提高测量精度但是不适合快速测量场景, 因为该方法需要至少两幅变形光栅图。利用二维小波变换对背景分量进行抑制也陆续被提出。基于小波的多分辨率特性^[15], 需要由具有带通滤波器响应的唯一函数通过平移、膨胀和旋转生成一组小波滤波器。当变形光栅图像的带宽较宽时, 基频的精确提取就成了频域处理的一个主要问题^[16]。文献 [17] 等人提出了一种基于损失函数最小化的小波变换方法, 通过对理想调频信号的分析得到一个恒等式, 根据这个恒等式确定一个损失函数, 以这个损失函数为标准来选择小波函数。该方法受误差影响易收敛到局部最优解从而影响重建精度, 而且计算量较大。同样是基于最优化的思想, 文献 [18] 提出了最小二乘法估计的条纹归一化算法和基于傅里叶变换的条纹归一化算法, 这两种算法等于是间接达到了滤波的效果。但是面对不稳定的背景噪声误差较大。文献 [19] 把 π 相移的图片编码进彩色图像的不同通道里, 达到了单幅投影图的效果, 但是彩色图片各通道之间存在通道串扰与不平衡对重建精度影响很大。经验模态分解是一种有效的去除背景分量的方法^[20-23], 经验模态分解 (EMD) 将变形条纹分解为由高频到低频的固有模态函数, 然后从频谱中分离背景分量。该方法对于一些受噪声干扰或者较复杂的面型重建精度不理想。

目前去除投影条纹图背景分量的方法在条纹图背景分量不均匀时存在去除效果差, 严重影响重建精度的问题。本文在实验中发现背景分量不均匀的投影条纹图在单个条纹周期内的背景分量变化很小, 可以近似作为常量处理。结合两次希尔伯特变换能有效去除信号直流分量且保持相位信息稳定的特性, 提出一种自适应的分周期条纹背景去除方法。该方法可以很好的消除条纹图中的背景分量, 提高 FTP (傅里叶轮廓术) 的测量精度。通过理论分析, 并通过计算机仿真实验与实际测量实验验证了文中方法的有效性。

本文内容安排如下: 第一节介绍条纹图周期内背景常量的分析; 第二节介绍所提方法的基本原理; 第三节阐述整体算法设计流程。第四节是对周期希尔伯特变换方法和 EMD 方法进行了仿真与实验对比分析。第五节给出了结论。

1 逐周期背景常量化分析

投影条纹背景分量容易受环境光的干扰, 在条纹图的不同区域呈现不同的强度。图 1 (a) 是受环境光干扰的投影条纹图。图 1 (b) 是暗室环境中拍摄的投影条纹图。图 2 (a) 和图 2 (b) 分别是图 1 (a) 和图 1 (b) 行像素强度值分布。图 2 中的绿色折线表示逐个周期内背景分量的变化, 可以看出图 1 (a) 由于受环境光影响背景分量呈现不均匀的分布。图 1 (b) 的背景分量相对稳定。另外本实验在不

同环境光照下采集多张投影条纹图, 对其背景分量强度变化进行分析。每张条纹图等行间距取 10 组行数据, 计算每组数据整体背景强度变化幅度和该组数据所有周期内背景强度变化的均值。实验环境中分别加入自然光, 室内灯光, 近距离点光源。实验结果如图 3 所示。所有实验条纹图整体背景分量变化量均值为 18.764 2, 单个周期内的背景分量变化量均值为 0.655 8。横坐标表示实验组数, 0~50 组是在暗室环境下的实验数据, 50~150 组是不同自然环境中的实验数据, 150~200 组实验加入室内照明, 200~230 组实验加入了近距离点光源照明。纵轴表示投影条纹图背景分量变化幅度。图中显示随着环境光干扰增加, 条纹图整体背景分量不均匀性变大。而同周期区域内的背景分量不均匀性依然很小。根据实验所得数据本题可近似纹图的背景分量在同周期内均匀, 大小设为常数如公式 (9)。

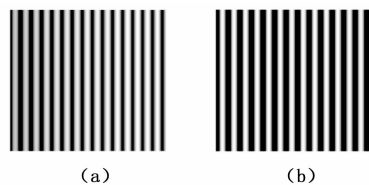


图 1 投影条纹图

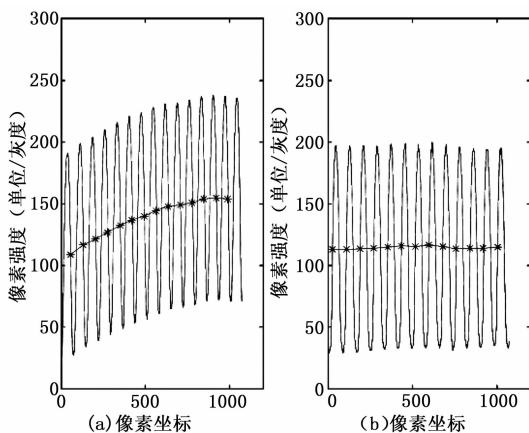


图 2 行像素强度值分布

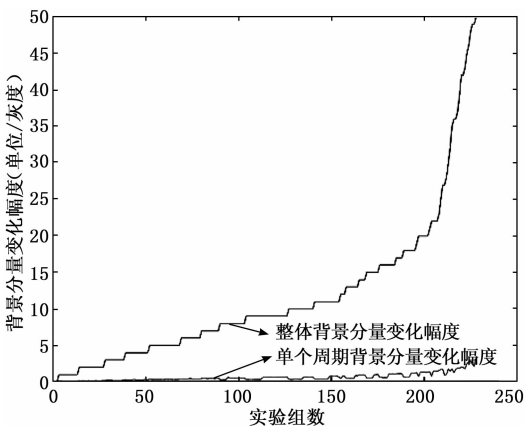


图 3 背景分量实验分析图

2 两次希尔伯特变换自适应去除背景分量

信号 $f(x)$ 的一维希尔伯特变换如下所示：

$$H(f(x)) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f(\tau)}{(x-\tau)} d\tau = \frac{1}{\pi x} * f(x) \quad (1)$$

表示卷积操作， H 表示希尔伯特变换。 $H(f(x))$ 的傅里叶频谱表示为：

$$\tau[H(f(x))] = -j\text{sgn}(\omega)F(\omega) \quad (2)$$

ω 是角频率， $\tau[\]$ 表示傅里叶变换。 $F(\omega)$ 是 $f(x)$ 的频谱， $-j\text{sgn}(\omega)$ 是 $\frac{1}{\pi x}$ 的频谱。 $\text{sgn}(\omega)$ 是一个符号函数如下所示：

$$\text{sgn}(\omega) = \begin{cases} -1, & \omega < 0 \\ 1, & \omega > 0 \end{cases} \quad (3)$$

所以， $-j\text{sgn}(\omega) = \begin{cases} e^{j\pi/2}, & \omega < 0 \\ e^{-j\pi/2}, & \omega > 0 \end{cases}$ 可以表示为：

$$-j\text{sgn}(\omega) = \begin{cases} e^{j\pi/2}, & \omega < 0 \\ e^{-j\pi/2}, & \omega > 0 \end{cases} \quad (4)$$

这意味着希尔伯特变换可以对正频率进行 90 度相移，对负频率进行 -90 度相移。对信号 $f(x)$ 进行两次希尔伯特变换，其相位无论在正频率还是负频率上都可以偏移 180 度，保持了相位变换前后的一致性。公式 (1) 能直观的展示希尔伯特变换的本质，但是假如被积函数有奇点，积分结果就是无限的。所以当用希尔伯特变换处理常量函数时，因为常量函数的频率可视为 0，用公式 (1) 是无意义的。事实上，希尔伯特变换能被定义为公式 (1) 中积分的柯西主值，只要这个值存在，就是有意义的，用公式 (5) 表示。公式 (5) 表示的希尔伯特变换是通过在一个有限且对奇点对称的范围内积分得到的，排除了长度趋于零的区间。对于任何常量 c ，构造函数 $f(x) = c$ ，由公式 (6) 可得 $H(f(x)) = \hat{c} = 0$ ， $H(\cdot)$ 表示希尔伯特变换。

$$H(f(x)) = \frac{1}{\pi} \lim_{\epsilon \rightarrow 0^+} \left(\int_{t-1/\epsilon}^{t-\epsilon} \frac{f(\tau)}{x-\tau} d\tau + \int_{t+\epsilon}^{t+1/\epsilon} \frac{f(\tau)}{x-\tau} d\tau \right) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \hat{c} &= \lim_{\epsilon \rightarrow 0^+} \left(\frac{1}{\pi} \int_{-1/\epsilon}^{-\epsilon} \frac{c}{\tau} d\tau + \frac{1}{\pi} \int_{\epsilon}^{1/\epsilon} \frac{c}{\tau} d\tau \right) = \\ & \lim_{\epsilon \rightarrow 0^+} \left(-\frac{1}{\pi} \int_{1/\epsilon}^{\epsilon} \frac{c}{\tau} d\tau + \frac{1}{\pi} \int_{1/\epsilon}^{\epsilon} \frac{c}{\tau} d\tau \right) = \\ & \lim_{\epsilon \rightarrow 0^+} \left(\frac{1}{\pi} \int_{1/\epsilon}^{\epsilon} \left(\frac{c}{\tau} - \frac{c}{\tau} \right) d\tau \right) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

根据希尔伯特变换的线性性质可得下式。

$$H(f(x) + c) = f(x) + \hat{c} = f(x) \quad (7)$$

公式 (7) 表明希尔伯特变换能自动消除任意常数 c 。据此，若对投影条纹图进行两次希尔伯特变换，则能自适应地消除投影条纹图背景分量；同时，又保持了原相位的稳定。为了验证结论，论文对模拟条纹进行两次希尔伯特变换。在图 4 中可以看到变换后信号的背景分量被有效的去除。

3 算法设计

投影条纹图的像素点强度值可以用下式表示：

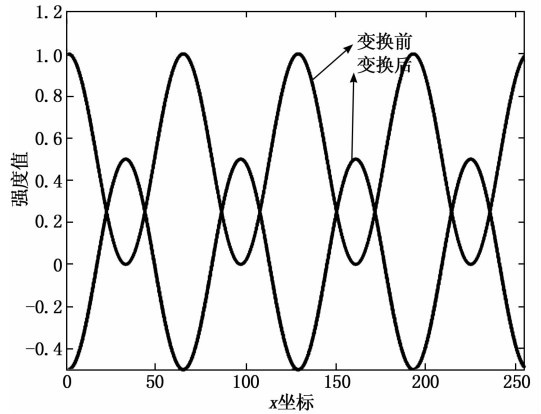


图 4 两次希尔伯特变换结果

$$I(p) = a + b(p) \cos[\varphi p + 2\pi f * p] \quad (8)$$

$*$ 表示内积运算， $p(x, y)$ 是空域坐标， $a(p)$ 和 $b(p)$ 是背景强度和调制强度。 $\varphi(p)$ 是待测的相位分布， f 是 $f(f_x, f_y)$ 的简写表示频率载波。根据本文第一部分对投影条纹图逐周期背景常量化的分析，可以近似 $a(x, y)$ 在同一个周期内是常数。于是像素点强度表达式可以表示为：

$$I_i(p) = a_i + b(p) \cos[\varphi_i p + 2\pi f * p] \quad (9)$$

$i = 1, 2, \dots, n$ 。 p 表示像素点坐标 (x, y) ， i 表示周期数。 a_i 表示在一个周期内的背景分量。 $\varphi_i p$ 表示调制相位。如图 5 是逐周期希尔伯特变换方法的流程图。用该方法去除条纹背景分量后，再采用 FTP 方法获得三维重建所需的相位信息，实验表明该方法能有效减少投影条纹背景分量对相位信息的干扰，能提高测量精度。

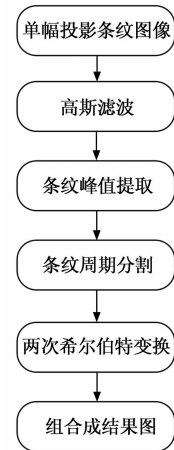


图 5 逐周期希尔伯特变换算法流程图

4 实验验证

4.1 仿真实验

仿真对象三维视图如图 6 所示。模拟对象的大小都是 $264 * 264$ 像素。模拟背景分量把 $-0.4 * \frac{\text{peaks}}{\text{Max peaks}}$ 添加到模拟变形图形中，如图 7 (a) 所示，图 7 (b) 显示的是经过周期希尔伯特变换后的结果条纹图，图 7 (c) 是经过 EMD (经验模态分解) 去除背景分量后的条纹图。为了能

清晰的对比变换前后的变化, 单独对模拟图形的红线标记进行强度分布进行变换结果如图 9。不难发现经过周期希尔伯特变换后, 条纹非均匀背景分量得到了很好的抑制, 对比图 9 (a) 与图 9 (c) 可以看出图 9 (b) 中的背景分量去除的效果更好。图 10 (a)、(c)、(e) 分别是 FTP 结合两次周期希尔伯特变换方法、EMD 方法与传统傅里叶变换轮廓术的重建曲面图。可以看出这三幅图中图 10 (a)、(c) 相较于图 10 (e) 有明显的改进, 因为生成图 10 (a) 与图 10 (c) 变换条纹图的背景分量得到了抑制, 直接减

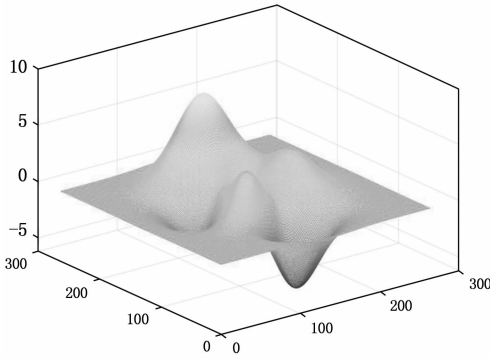


图 6 模拟目标三维示图

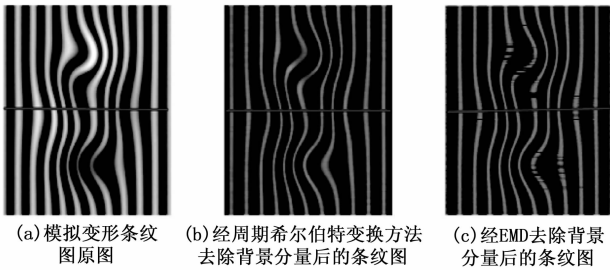


图 7 条纹图

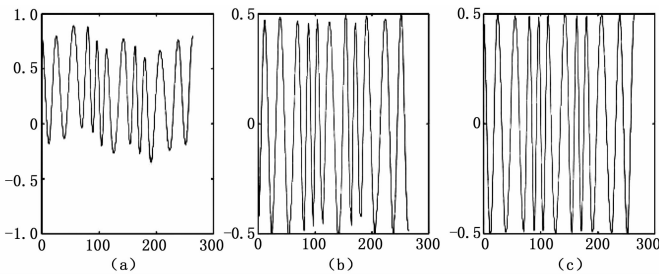


图 8 目标条纹图红线标记行强度分布

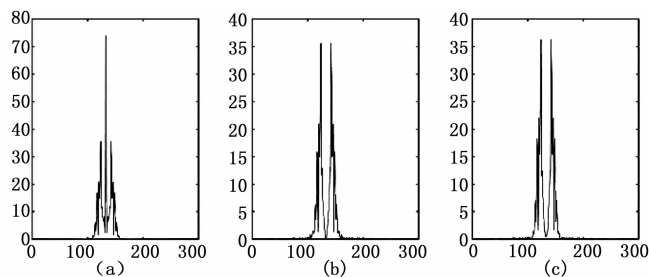


图 9 目标条纹图红线标记强度分布的频谱图

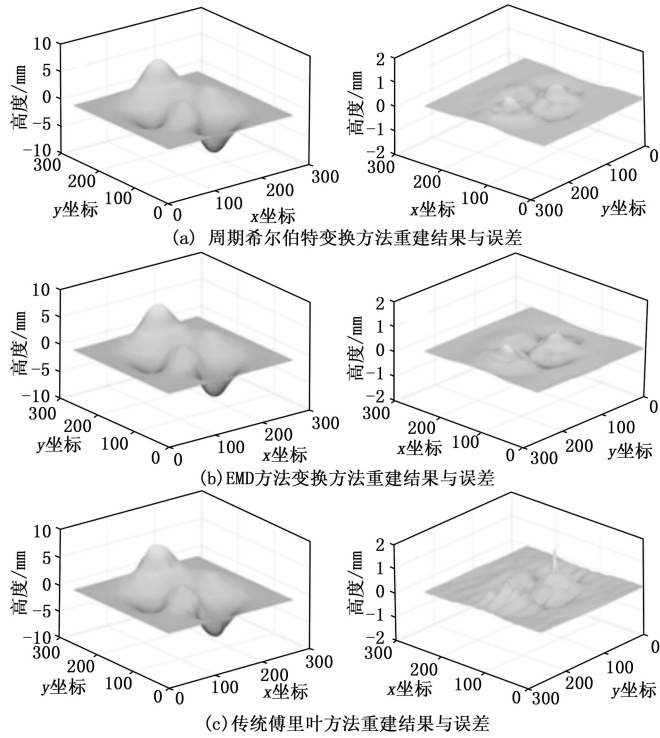


图 10 传统傅里叶方法、EMD 方法、周期希尔伯特变换方法重建结果对比

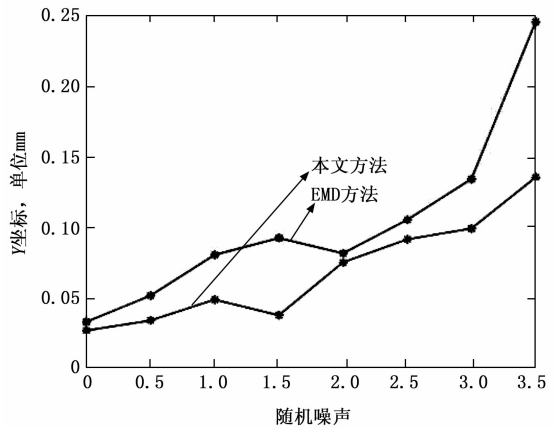


图 11 不同噪声水平下的均方误差

少了背景分量对重建精度的影响。对重建精度的比较如表 1 所示, 消除背景分量能有效提高傅里叶轮廓术的重建精度, 周期希尔伯特变换方法相较于经验模态分解方法能达到更好的重建精度。

表 1 误差对比

	均方误差	最大误差
傅里叶轮廓术	0.035 8	1.331 1
EMD	0.032 6	0.899 3
本文方法	0.026 5	0.713 3

为了进一步讨论该方法受随机噪声的影响情况, 在图 6

中分别加入了由 rand 函数产生的 k 次随机噪声, 其中 k 从 0 变化到 3.5, 区间间隔是 0.5。不同程度噪声下的均方误差分布如图 13 所示, 从图 11 可以看出误差随着噪声的增加而增大, 本文方法相较于 EMD 方法对噪声更具有鲁棒性。

4.2 实验结果与分析

实验首先对直径为 20 mm 的标准半球体进行测量。条纹产生设备是 DLP 投影仪。摄像机使用 CCD 靶面与定焦镜头, 分辨率为 $1\ 920 \times 1\ 280$ 。投影条纹图如图 13 (a) 所示。

图 12 (a) 和图 12 (b) 分别是条纹图使用 EMD 算法和本文方算法处理后的效果图。图 12 (c) 和图 12 (d) 分别是目标条纹图红线标识行强度分布经 EMD 算法与本文算法处理后的频谱图, 相比较于图 12 (c), 图 12 (d) 在背景分量消除的更加彻底而且噪声更少。图 13 (b)、(c)、(d) 分别是传统 FTP 方法、EMD 方法和本文算法重建三维视图。

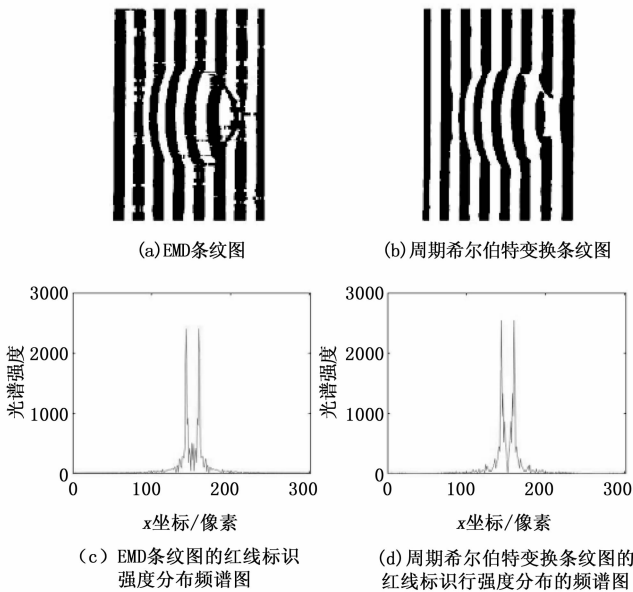


图 12 效果对比

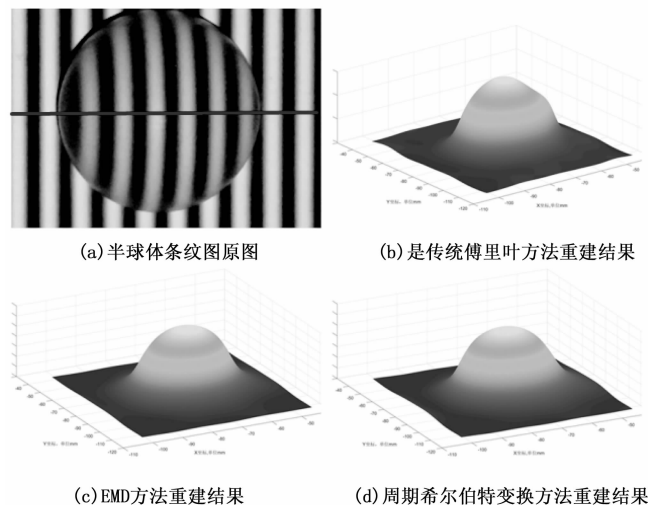


图 13 三维视图

表 2、表 3 为精度评估表, 从表中可知相比于传统傅里叶轮廓术、EMD 方法, 本文方法在测量精度上分别提高了 52.36% 和 19.82%。

表 2 测量结果与测量误差

次数	傅里叶轮廓术		EMD		本文算法	
	高度/mm	误差/mm	高度	误差	高度	误差
1	10.213 0	0.213 0	10.121 2	0.121 2	10.093 5	0.093 5
2	10.296 4	0.296 4	10.173 6	0.173 6	10.102 7	0.102 7
3	10.301 8	0.301 8	10.112 8	0.112 8	10.094 1	0.094 1
4	10.283 5	0.283 5	10.134 9	0.134 9	10.093 8	0.093 8
5	10.274 3	0.274 3	10.191 5	0.191 5	10.101 6	0.101 6

表 3 测量误差分析

	平均误差	最大误差	标准差
傅里叶轮廓术	0.255 8	0.296 4	0.968 4
EMD	0.146 8	0.191 5	0.034 6
本文算法	0.097 1	0.102 7	0.004 6

另一组实验对比了传统 FTP 方法、EMD 方法和本文方法对手型的测量结果。实验如图 14 所示。为了更清晰的展示差别, 用侧视图 (如图 15 (a)、(c)、(e)) 来展示三维图像的细节部分。图 15 (b)、(d)、(f) 分别是传统 FTP 方

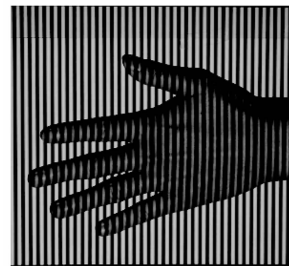


图 14 手型实验图

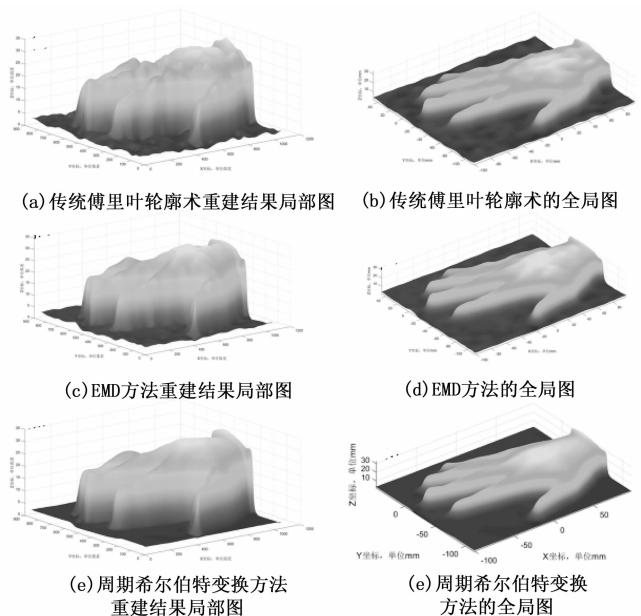


图 15 三种方法局部图和全局图



图 16 手型三维模型

法、EMD方法、本文方法恢复出来的三维图像的侧视图。由图可见本文方法恢复的手型三维模型相较于另外两种方法恢复的结果,没有波纹样的噪声,精度相较于传统的FTP方法有明显提升。与EMD方法相比也有一定的改进。这也为FTP方法应用于复杂面型的三维恢复提供了参考。

5 结束语

本文提出了一种逐周期条纹背景自适应去除算法,通过近似条纹图每个周期内的背景分量是一个常数,对条纹图每个周期分别进行两次希尔伯特变换,再把变换后的条纹周期组合成结果条纹图。只需要一张变形条纹图即可恢复出物体的三维形貌。计算机模拟与实验结果都表明本文所提方法在消除条纹背景方面具有良好的效果而且能提高FTP的测量精度。

参考文献:

- [1] PHANG J, LIM K H, CHIONG R. A review of three dimensional reconstruction techniques [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2021 (1): 1573 - 1582.
- [2] ZHONG K, LI Z, ZHOU X, et al. Enhanced phase measurement profilometry for industrial 3D inspection automation [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 76 (9-12): 1563 - 1574.
- [3] DAS A J, VALDEZ T A, VARGAS J A, et al. Volume estimation of tonsil phantoms using an oral camera with 3D imaging [J]. *Biomedical Optics Express*, 2016, 7 (4): 1445 - 1457.
- [4] ZHANG S. High-speed 3D shape measurement with structured light methods; A review [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2018, 106: 119 - 131.
- [5] SONG K, HU S, XIN W, et al. Fast 3D shape measurement using Fourier transform profilometry without phase unwrapping [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 84: 74 - 81.
- [6] YUN H, LI B, ZHANG S. Pixel-by-pixel absolute three-dimensional shape measurement with modified Fourier transform profilometry [J]. *Applied Optics*, 2017, 56 (5): 1472 - 1480.
- [7] SINGH V, TAYAL S, MEHTA D S. Single shot fringe projec-

- tion profilometry using tunable frequency Fresnel biprism interferometer for large range of measurement [J]. *Optics Communications*, 2019, 451: 104 - 110.
- [8] 尚忠义, 李伟仙, 董明利, 等. 基于四步相移光栅投影的三维形貌测量系统 [J]. *应用光学*, 2015, 36 (4): 584 - 589.
- [9] YANG F J, GENG M, DAI M L, et al. 3D shape measurement of discontinuous objects based on single frequency fringe projection in 4-step phase shifting profilometry [J]. *Journal of Optoelectronics. Laser*, 2012, 23 (8): 1535 - 1538.
- [10] SHANG Z, LI W, DONG M, et al. 3D shape measurement system based on fringe projection in 4-step phase shifting [J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36 (4): 584 - 589.
- [11] YEPENG L, GUANGLIANG D, CHAORUI Z, et al. An improved two-step phase-shifting profilometry [J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, 127 (1): 288 - 291.
- [12] HYUN J S, ZHANG S. Superfast 3D absolute shape measurement using five binary patterns [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 90 (mar.): 217 - 224.
- [13] KEMAO Q. Applications of windowed Fourier fringe analysis in optical measurement; A review [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2015, 66: 67 - 73.
- [14] 周灿林, 杨允鑫, 司书春, 等. 一种改进的消零频傅里叶变换轮廓术 [J]. *光电子·激光*, 2014, 25 (6): 1140 - 1145.
- [15] HUANG J, CHEN W, SU X. Application of two-dimensional wavelet transform in the modulation measurement profilometry [J]. *Optical engineering*, 2017, 56 (3): 1 - 8.
- [16] Jesús, Villa, Efrén, et al. Fringe pattern denoising using spatial oriented gaussian filters - ScienceDirect [J]. *Optics Communications*, 457: 124704.
- [17] CASCO-VASQUEZ J F, JUAREZ-SALAZAR R, ROBLEDO-SANCHEZ C, et al. Fourier normalized-fringe analysis by zero-order spectrum suppression using a parameter estimation approach [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52 (7): 074109.
- [18] 刘大海, 林 斌. 利用强度调制消除零频的傅里叶变换轮廓测量 [J]. *光子学报*, 2011, 40 (11): 1697 - 1701.
- [19] ZHANG H, WANG F, JIA D, et al. Automatic Interference Term Retrieval From Spectral Domain Low-Coherence Interferometry Using the EEMD-EMD-Based Method [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8 (3): 1 - 9.
- [20] ZHANG H, WANG F, JIA D, et al. Automatic Interference Term Retrieval From Spectral Domain Low-Coherence Interferometry Using the EEMD-EMD-Based Method [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8 (3): 1 - 9.
- [21] 郑素珍. 基于二维统计经验模态分解的三维面形测量 [J]. *光电子·激光*, 2017 (11): 1246 - 1251.
- [22] JIN T, LI Q, Mohamed M A. A Novel Adaptive EEMD Method for Switchgear Partial Discharge Signal Denoising [J]. *IEEE Access*, 2019, 7 (1): 58139 - 58147.