

Fourier Transform Profilometry Based on Zero Frequency Elimination

Xing-Yu Xu, Xuan-Xi Li, Xin-Tian Bian

Jiangsu Key Construction Laboratory of Modern Measurement Technology and Intelligent System, Huaiyin Normal University, Huaian Jiangsu
Email: 1094872132@qq.com

Received: Jun. 4th, 2017; accepted: Jun. 18th, 2017; published: Jun. 23rd, 2017

Abstract

The zero frequency component of Fourier transform profilometry directly affected the measurement range and accuracy; so a new frequency three-dimensional measurement method is proposed. CCD camera obtains a frame deformation fringe pattern, correcting the deformed fringe. There is no zero frequency component after the correction, then we recover the 3D shape. Compared with the way through the phase shift to eliminate zero frequency and the composite grating projection measurement, this method has obvious advantages, and only needs one frame of the deformed fringe to measure it in real-time. Theoretical analysis and experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Keywords

Information Optics, Three-Dimensional Measurement, Fourier Transform, Zero Frequency Elimination

一种消零频的傅里叶变换轮廓术

徐星宇, 李炫熹, 边心田

淮阴师范学院, 江苏省现代检测技术与智能系统重点建设实验室, 江苏 淮安
Email: 1094872132@qq.com

收稿日期: 2017年6月4日; 录用日期: 2017年6月18日; 发布日期: 2017年6月23日

摘 要

傅里叶变换轮廓术中零频成分的存在直接影响了测量范围和测量精度, 为此提出一种新的消除零频实现快速三维形貌的测量方法。通过CCD相机采集一帧变形条纹图, 然后对变形条纹图进行校正, 使校正后

的条纹不存在零频成分,再进行三维面形的恢复。与通过相移法消除零频、复合光栅投影测量技术相比,此方法有明显的速度优势,而且只需一帧变形条纹图即可测量,实时性好。理论分析和实验证明了提出方法的有效性。

关键词

信息光学, 三维测量, 傅里叶变换, 零频消除

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

基于光栅投影的三维形貌测量具有测量精度高、速度快、实时性好,易于在计算机控制下实现自动化检测等优点,在逆向工程、产品检测、文物保护、生物医学等领域有着广泛的应用[1] [2] [3] [4] [5]。傅里叶变换轮廓术通过傅里叶变换将时域条纹信号变换到频域,当有用的基频成分同其他的频率分量相互分离时,可以从频域中滤出包含物体高度信息的基频分量,经傅里叶变换、相位展开得到物体的高度信息。为了提高傅里叶变换轮廓术的测量范围,抑制零频的扩展、提高测量精度,许多研究者进行了深入的研究,并给出许多解决方法。陈文静[6]提出了采用双色正弦光栅投影来实现从一帧条纹图中消除零频对傅里叶变换轮廓术测量的影响。该方法同传统的 π 相移方法相比,测量系统简单,真正实现高速测量。在傅里叶变换轮廓术中采用短时傅里叶变换方法[7]有效地抑制零频分量,提高傅里叶变换轮廓术的测量精度。周灿林[8]提出一种改进的消零频傅里叶变换轮廓术,适应于相移无法严格控制的测量环境,简化了形貌测量时滤波器的设计。李思坤[9]将经验模态分解方法引入变换轮廓术中,对变形条纹图进行经验模态分解,用以消除零频成分。刘大海[10]提出利用强度调制消除零频的测量方法,通过采集一帧变形彩色条纹图并分离颜色通道获得两幅相位差为 π 的条纹图,对变形条纹做强度调制校正,进而消除零频分量,实现高度的解析。

本文提出了一种新型的消零频的傅里叶变换轮廓术。采用条纹优化技术,通过分段归一化对获取的变形条纹进行正弦性校正,快速有效地消除变形条纹中的零频分量。该方法运算速度快,特别适合三维物体的实时测量。

2. 测量原理

2.1. 傅里叶变换轮廓术基本原理

傅里叶变换轮廓术的测量光路如图 1 所示,其中 d 为投影仪与 CCD 相机之间的距离, L 为 CCD 到参考平面的距离。

正弦光栅图形投影到三维漫反射物体表面上时,由于受到物体高度的调制,基于正弦光栅投影的变形结构光场为:

$$g(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_0 x + \varphi(x, y)] \quad (1)$$

式中 $a(x, y)$ 表示背景光场, $b(x, y)$ 表示物面非均匀反射率, $\varphi(x, y)$ 表示由物体高度分布 $h(x, y)$ 引起的相位调制, f_0 为投影光栅的基频。在实际测量中 $a(x, y)$ 和 $b(x, y)$ 通常是缓慢变化的,则变形条纹

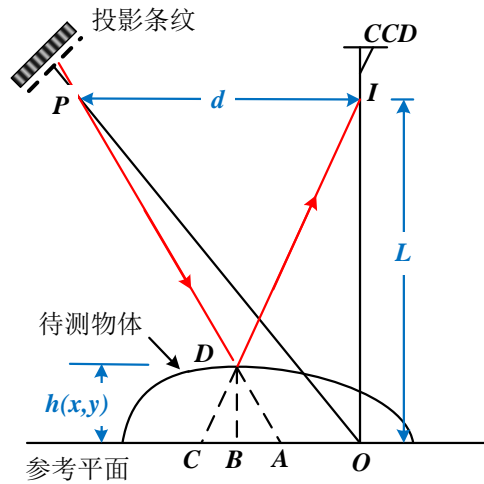


Figure 1. Principle diagram of measurement system
图 1. 测量原理图

的傅里叶频谱分布为:

$$G(f, y) = Q_0(f, y) + Q^*(f + f_0, y) + Q^*(f - f_0, y) \quad (2)$$

其中 $Q_0(f, y)$ 为背景光场傅里叶频谱, 即零频, $Q(f - f_0, y)$ 表示 $(1/2)b(x, y)\exp[i\varphi(x, y)]$ 的傅里叶频谱, $Q^*(f + f_0, y)$ 表示 $Q(f + f_0, y)$ 的共轭。投影光栅至参考平面上的相位分布为 $2\pi f_0 x + \varphi_0(x, y)$, 式中 $\varphi_0(x, y)$ 为参考平面的原始相位, 所以由物体高度引起的相位变化可表示为

$$\Delta\varphi = \varphi(x, y) - \varphi_0(x, y) \quad (3)$$

在远心投影光路条件下, $L_0 \gg h$ 时, 被测物体高度分布和调制相位 $\varphi(x, y)$ 的关系为

$$h(x, y) = -\frac{L_0}{2\pi f_0 d} \varphi(x, y) \quad (4)$$

在傅里叶变换轮廓术测量方法中, 因为涉及到滤波操作, 必须避免携带有物体高度信息的基频分量同其他频率分量的混叠, 所以其测量范围受到较大限制, 消除零频的影响后测量范围可提高到原来的 3 倍: $\left| \frac{\partial h(x, y)}{\partial x} \right| < L_0/d$ 。

2.2. 条纹校正

对于理想的正弦条纹, 可以得到准确的物体表面高度信息。但是由于条纹的非正弦特性, 使得每一个相位角都有一个附加的误差分量, 该误差通常是原始相位角的整数倍的高频误差。所以如果两个相位角相同, 其对应的高频误差项在理论上也是相同的。由于等相位平面上所有点的相位相同, 误差也相同, 所以空间中的相位平面不会移动或变形, 能过保持原始值, 得到的高度相对地就不会受高频误差的影响。

不同颜色的正弦投影到同一物体表面, 由于物体颜色反射率的差异, 采用 CCD 探测器获取的变形条纹强度将会不一致, 但通过傅里叶变换轮廓术处理后, 各自重建的深度信息将趋于一致, 所以将每行条纹强度经过条纹优化调整到同一阈值范围内。

CCD 相机获取的变形条纹图经过卷积运算获得平滑的条纹图, 变形条纹图减去灰度平均值后经条纹优化可获得正弦性较好的条纹图。其灰度值均小于 2^n , 式中 n 为 CCD 灰度值的比特数值, 从而可以对

每行条纹进行归一化处理。

减去灰度平均值后的条纹强度分布函数为

$$I'(x, y) = I(x, y) - I_{mean} \quad (5)$$

式中, I_{mean} 为条纹强度分布函数的平均值。

由式(5)可以将条纹强度分布函数分为两部分

$$I_u(x, y) = I'(x, y) > 0 \quad (6)$$

$$I_d(x, y) = I'(x, y) < 0 \quad (7)$$

式(6)、(7)中, $I_u(x, y)$ 为 $I'(x, y)$ 中大于 0 的部分, $I_d(x, y)$ 为 $I'(x, y)$ 中小于 0 的部分。

由于 $I_u(x, y)$ 和 $I_d(x, y)$ 中条纹强度分布具有分段性, 需对其进行分段归一化, 优化后的条纹强度分布函数为

$$I_{new} = \sum_{m=1}^M \frac{I_u^{(m)}(x, y)}{\left[I_u^{(m)}(x, y) \right]_{\max}} - \sum_{k=1}^K \frac{I_d^{(k)}(x, y)}{\left[I_d^{(k)}(x, y) \right]_{\min}} \quad (8)$$

式(8)中, m 为 $I_u(x, y)$ 中条纹强度的序数, k 为 $I_d(x, y)$ 中条纹强度的序数, $\left[I_u^{(m)}(x, y) \right]_{\max} = \max \left[I_u^{(m)}(x, y) \right]$, $\left[I_d^{(k)}(x, y) \right]_{\min} = \min \left[I_d^{(k)}(x, y) \right]$ 。

变形条纹强度曲线如图 2(a), 显然存在非正弦性误差; 减去灰度平均值后, 经过条纹优化修正后如图 2(b)所示, 经傅里叶变换得到图 2(c)的频谱曲线, 从图中可见零频分量为零, 说明该条纹优化能有效消除零频, 提高了测量精度。

3. 实验结果及讨论

为了验证提出方法的可行性, 对一个碗状模型进行测量。实验中采用 JAI CM-030 GE 的相机, Optoma PK301 DLP 投影仪, 测量系统的结构参数 CCD 相机与参考面之间的距离 $L_0 = 800$ mm, 投影仪与 CCD 相机之间的距离 $d = 1100$ mm, 投影条纹的周期 $T = 35/\text{pixel}$ 。测量时, 投影光栅条纹图到被测物体上如图 3(a)所示, CCD 相机获取条纹图如图 3(b), 提取灰度图像中的第 350 行强度分布如图 3(c), 经过条纹优化

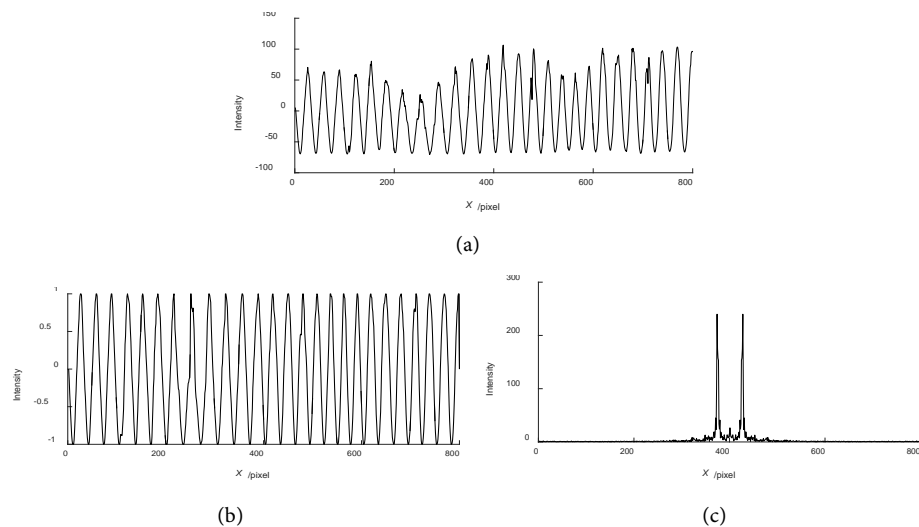


Figure 2. (a) Original fringe pattern; (b) Fringe pattern after correction; (c) Fourier spectrum
图 2. (a) 变形条纹强度; (b) 校正后的条纹强度; (c) 对应的频谱曲线

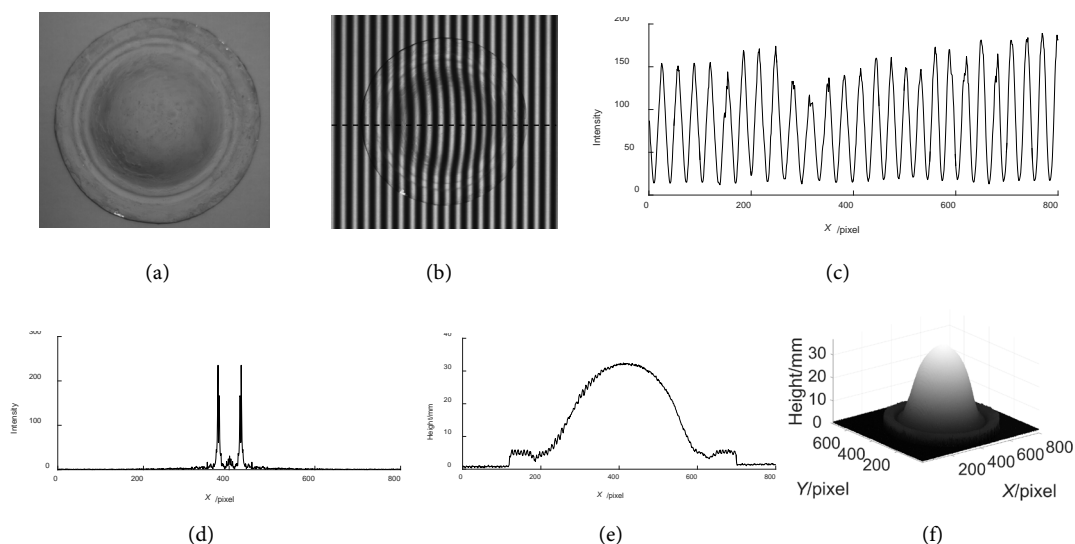


Figure 3. (a) Tested object; (b) Deformed fringe; (c) Gray distribution at row 350; (d) Frequency spectrum after correction; (e) Unwrapped phase distribution; (f) Restored 3D height

图 3. (a) 被测物体; (b) 变形条纹图; (c) 第 350 行的强度分布; (d) 校正后的频谱分布; (e) 第 350 行高度图; (f) 三维重建结果

校正消除零频后获得的频谱及其解包裹相位分别如图 3(d)和图 3(e)。图 3(f)为物体的三维重建结果,与实际物体轮廓分布相同。

实验结果显示,本文提出的新型傅里叶变换轮廓术,通过条纹优化,消除零频,从而扩大了傅里叶轮廓术的测量范围,有效提高测量精度。

4. 结论

本文提出了一种新型的消除零频的方法,通过条纹优化对变形条纹图进行正弦性校正处理,消除零频分量,可有效扩大傅里叶轮廓术的测量范围。同时,条纹优化的运算效率显著高于其他方法,更适用于三维形貌测量。实验结果表明该方法能恢复三维物体的面形,并提高其高度变化的测量范围。

基金项目

江苏省高等学校大学生创新创业训练计划项目,江苏省高校自然科学研究面上项目(15KJB460004),淮安市应用研究与科技攻关(工业)项目(HAG2014019)。

参考文献 (References)

- [1] Wang, B., Yu, X., Wu, H., *et al.* (2017) Phase-Unwrapping Approach Based on Dual-Frequency Analog Structured Light. *Optics Communications*, **382**, 272-280.
- [2] 边心田, 程菊, 左芬等. 基于光栅预校正的三维面形测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54: 011202.
- [3] Xiao, Y., Xue, J. and Su, X. (2013) Robust Self-Calibration Three-Dimensional Shape Measurement in Fringe-Projecting Photogrammetry. *Optics Letters*, **38**, 694-696.
- [4] 马云秀, 边心田. 相位测量轮廓术投影条纹畸变的研究[J]. 光电技术应用, 2013, 28(4): 83-85.
- [5] Zhong, K., Li, Z., Shi, Y., *et al.* (2013) Fast Phase Measurement Profilometry for Arbitrary Shape Objects without Phase Unwrapping. *Optics and Lasers in Engineering*, **51**, 1213-1222.
- [6] 陈文静, 苏显渝, 曹益平, 等. 基于双色条纹投影的快速傅里叶变换轮廓术[J]. 光学学报, 2003, 23(10): 1153-1157.
- [7] 陈文静, 苏显渝, 曹益平, 等. 傅里叶变换轮廓术中抑制零频的新方法[J]. 中国激光, 2004, 31(6): 740-744.

- [8] 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.
- [9] 李思坤, 陈文静, 苏显渝, 等. 傅里叶变换轮廓术中基于经验模态分解抑制零频的方法[J]. 光学学报, 2009, 3(29): 664-669.
- [10] 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.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: oe@hanspub.org