

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2013.12.013

# 基于二维连续小波变换的三维轮廓 测量技术比较研究\*

何百通<sup>1</sup>, 巫少龙<sup>1,2</sup>

(1. 衢州职业技术学院, 浙江 衢州 324000;

2. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310000)

**摘要:** 为解决在物体高度梯度变化较大的情况下三维轮廓测量技术的测量精度问题, 将连续小波变换应用到三维轮廓测量技术中。开展了基于2d-paul和2d-morlet连续小波变换轮廓术研究, 进行了三维轮廓测量术比较分析, 建立了小波“脊”相位与高度之间的关系, 提出了在物体高度梯度变化较大的情况下基于2d-paul算法优于2d-morlet算法。在对比分析的基础上对两种连续小波变换轮廓测量技术的测量精度进行了评价, 进行了Matlab和实测试验。研究表明: 物体高度梯度变化较大的情况下适合采用2d-paul算法, 其能更有效地提高三维轮廓测量技术的测量精度。

**关键词:** 信息光学; 三维轮廓测量术; 2d-paul小波; 2d-morlet小波

中图分类号: TH701 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)12-1503-04

## Research of 3D-Profilometry on the basis of two-dimensional wavelet transform analysis

HE Bai-tong<sup>1</sup>, WU Shao-long<sup>1,2</sup>

(1. Quzhou College of Technology, Quzhou 324000, China;

2. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** Aiming at solving the problems of three-dimensional profile measurement precision under the condition of large gradient, the 2d-paul and 2d-morlet was investigated. After the analysis of measurement precision of two kinds of wavelet transform profilometry, the two kinds of continuous wavelet transform profilometry measurement accuracy was established. A method was presented to the 2d-paul algorithm as the object height gradient increases. The proposed methods were evaluated on the basis of the experimental results, the measurement precision of two kinds of wavelet transform profilometry were tested. The results indicate that measurement result of the 2d-paul method is better than 2d-morlet method as the object height gradient increases, measurement result of the 2d-paul method is better than 2d-morlet method, and more effective in improving measurement precision of three dimensional profile measuring technology.

**Key words:** information optics; three-dimensional profile; 2d-paul; 2d-morlet

## 0 引 言

随着光机电一体化技术的快速发展, 针对表面轮廓、几何尺寸、各种模具及复杂曲面的测量工作越来

越多, 对曲面零件的精度要求也越来越高。物体的三维形貌测量具有十分重要的价值, 光学三维测量技术由于具有便携性强、测量速度快、测量精度高等优点, 在机器视觉、计算机辅助设计制造CAD/CAM、反求工程<sup>[1]</sup>、数控加工技术、产品质量检测、生物医学甚至艺

收稿日期: 2013-07-03

基金项目: 浙江省科技厅资助项目(2011C21072)

作者简介: 何百通(1971-), 男, 浙江龙游人, 副教授, 主要从事机电工程应用和机电教育研究. E-mail: 30708641@qq.com

术领域都有重要意义和广阔应用前景。

基于Mexican hat小波“脊”提取相位方法来恢复物体高度<sup>[2]</sup>和利用小波“脊”处的小波系数,能有效抑制条纹图中有用的基频分量与零频和其他谐波频率分量的混叠<sup>[3]</sup>,更好地提取相位信息,提高小波变换轮廓术的测量范围和精度;但是随着被测物体高度分布在与光栅垂直方向上的梯度剧增,频谱混叠现象的加剧,零频分量对物体轮廓的影响也不断加大。相关文献并没有讨论在物体梯度变化比较大的情况下,更适合采用哪种小波变换方法来获得更高的测量精度。

因此,本研究选取二维连续小波morlet与paul轮廓测量技术精度进行比较,分析在梯度变换比较大的情况下哪种方法更适合用于有效地提高三维轮廓测量精度。

### 1 测量原理

#### 1.1 二维连续小波变换

研究者利用小波变换<sup>[4]</sup>分析变形条纹图时,选用不同的母小波对物体的三维形貌的恢复会有不同的结果,本研究选用2D-CWT进行比较,然后在2D-CWT中选用不同的母小波进行三维轮廓测量精度分析比较。2d-morlet表达式为:

$$\psi_m(x,y) = \exp(ik_0(x \cos \theta + y \sin \theta)) \exp(-\frac{1}{2}\sqrt{x^2 + y^2}) \quad (1)$$

式中:  $\theta$ —旋转角,  $k_0=5.34$ 。

2d-morlet的傅里叶变换为:

$$\hat{\psi}_m(s,r) = \exp(-\frac{1}{2}((r - k_0 \cos \theta)^2 + (s - k_0 \sin \theta)^2)) \quad (2)$$

2d-paul表达式为:

$$\psi_{paul}(x,y) = \frac{2^n n! (1 - i \frac{x^2 + y^2}{2})^{-n-1}}{2\pi \sqrt{\frac{(2n)!}{2}}} \quad (3)$$

2d-paul的傅里叶变换为:

$$\hat{\psi}_{paul}(s,r) = \frac{2^n}{\sqrt{n(2n-1)!}} (\frac{s^2 + r^2}{2})^n \exp(-\frac{s^2 + r^2}{2}) H(s,r) \quad (4)$$

$$H(s,r) = \begin{cases} 1, & s > 0 \\ 0, & s \leq 0 \end{cases}$$

#### 1.2 基于小波脊提取相位

小波变幅值和相位综合反映母小波与信号的相似程度,本研究在沿尺度轴方向上提取出小波变换的最大值,进而可以提取脊所对的相位值<sup>[5-6]</sup>,获取含有物体高度的相位信息。这里把小波变换幅值的最大值处定义为小波变换的脊<sup>[7-8]</sup>,表示为:

$$r(b,\theta) = \max[A(a_i,b,\theta)] \quad (5)$$

式中:  $a_i$ —第*i*个尺度,  $b$ —平移因子,  $\theta$ —旋转角度,  $A(a_i,b,\theta)$ — $(a_i,b,\theta)$ 处的幅值。

#### 1.3 相位与高度关系

三维轮廓术的基本原理是光波的干涉理论,设CCD光轴与基面的交点*O*为原点,光栅周期方向为坐标*x*方向,垂直于纸面为一方向,投射系统轴向为高度*H(x,y)*方向。投影系统将一正弦分布的光场投射到被测物体表面,由于受到物体三维型面分布的调制致使正弦光栅条纹发生扭曲形变,由CCD成像系统获取的变形条纹<sup>[9]</sup>可表示为:

$$I_n(x,y) = A(x,y) + B(x,y) \cos[\phi(x,y) + k\pi/2] \quad (6)$$

式中:  $A(x,y)$ —投射光场中缓慢变化的背景分量,  $B(x,y)$ —条纹幅度,  $f_0$ —投射到参考面的光栅条纹频率,  $\varphi_0(x,y)$ —参考平面相位分布值。

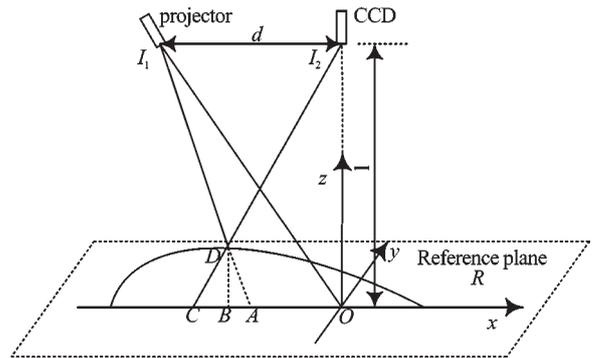


图1 测量系统图

由三角形相似可得物体的高度分布:

$$H(x,y) = \frac{AC(ld)}{1 + ACld} \quad (7)$$

由于,  $\varphi(x,y) = 2\pi f_0 |AC|$ , 简化:

$$H(x,y) = \frac{ld}{2\pi f_0} \phi(x,y) \quad (8)$$

本研究将小波脊处所提取的相位作差值  $\Delta\varphi(x,y)$ , 通过使用解包裹(unwrapping)算法<sup>[10-11]</sup>可以恢复原来连续相位分布  $\varphi(x,y)$ , 经相位解缠绕, 代入式(8)获取被测物体实际高度值。

### 2 实验分析

#### 2.1 Matlab 仿真

Matlab 三维物体仿真数学表达式为:

$$z = 3 \begin{pmatrix} 3(1-x)^2 \exp(-x^2 - (y+1)^2) \\ -10(\frac{x}{5} - x^3 - y^5) \exp(-x^2 - y^2) - \frac{1}{3} \exp(-(x+1)^2 - y^2) \end{pmatrix} \quad (9)$$

计算机三维物体仿真如图2所示。

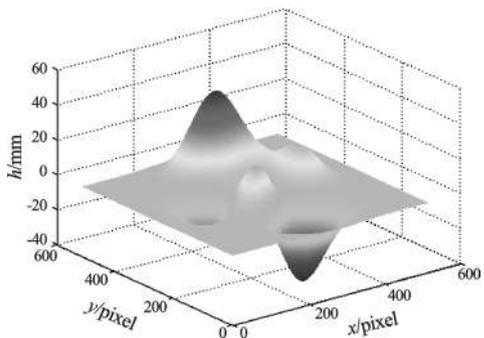
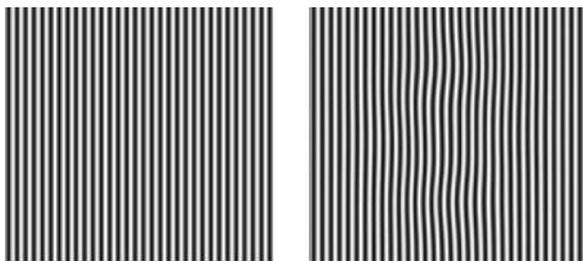


图2 模拟物体图

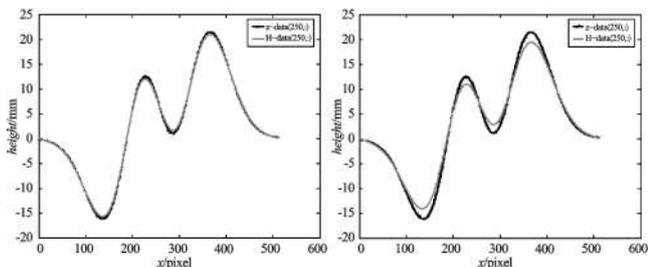
投影到物体上的基准光栅如图3(a)所示,畸变光栅如图3(b)所示。



(a) 基准光栅 (b) 畸变光栅

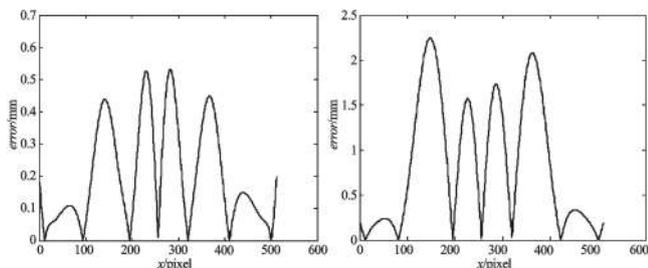
图3 Matlab模拟光栅图

笔者分别利用不同的小波对原始物体第250行进行恢复,结果比较如图4所示。



(a) 2d-paul (b) 2d-morlet

利用不同的小波得到第250行的绝对误差图,如图5所示。

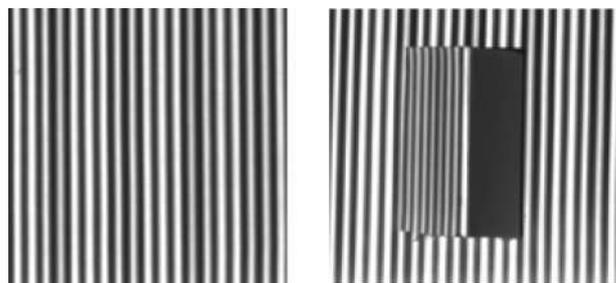


(a) 2d-paul (b) 2d-morlet

图5 分别利用不同小波恢复第250行的绝对误差

### 2.2 实测分析

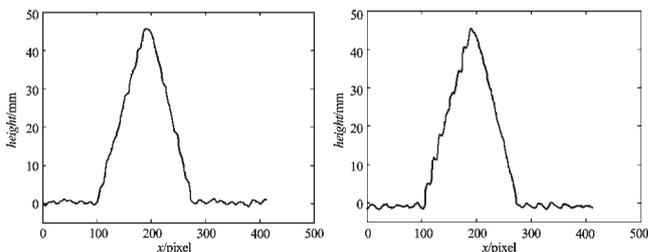
该实验的测量光路图如图1所示。数字投影仪型号 NEC 产型 NP200+, 投影镜头的焦距为 21.83 mm~24 mm, 功率 180 W, CCD 传感器为 JAI 公司生产型号为 CM-140MCL, 系统几何参数  $l=108$  mm,  $d=33$  mm,  $f_0=1/16$ 。Matlab 模拟光栅图如图6所示。



(a) 基准光栅 (b) 畸变光栅

图6 Matlab模拟光栅图

该实验利用二维连续小波恢复物体的三维轮廓测量,分别选用2d-paul与2d-morlet为母小波。分别利用不同的小波提取第235行原始图和恢复图的比较如图7所示。



(a) 2d-paul (b) 2d-morlet

图7 分别利用不同的小波提取第235行原始图和恢复图的比较

综合上述实验结果表明,被测物体高度分布在与光栅垂直方向上的梯度越来越大时,采用2d-paul小波可以获得更为满意的效果,由此表明2d-paul小波对梯度变化较大的三维物体测量精度更高。

### 3 结束语

本研究分别选用2d-paul与2d-morlet为母小波,通过对2d-paul和2d-morlet连续小波变换进行比较分析,并将连续小波变换应用到三维轮廓测量技术中,建立小波“脊”相位与高度之间的关系;通过Matlab模拟分析表明,在物体高度梯度变化较大的情况下基于2d-paul算法优于2d-morlet算法。为确切分析在实测

(下转第1519页)

#### 本文引用格式:

何百通,巫少龙. 基于二维连续小波变换的三维轮廓测量技术比较研究[J]. 机电工程,2013,30(12):1503-1505,1519.

HE Bai-tong, WU Shao-long. Research of 3D-Profilometry on the basis of two-dimensional wavelet transform analysis[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2013, 30(12): 1503-1505, 1519.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

要求。

## 6 结束语

SIMOTION D作为西门子新一代运动控制系统,该系统功能强大、灵活度高、且编程操作简便,特别是其插补、同步、工艺控制等功能足以有与NC竞争的能力。本研究以SIMOTION D435为控制器,研发了一台搅拌摩擦焊机,该设备已投入生产。

实际运行及实验结果表明,该种控制方法可以实现搅拌摩擦焊机的各种性能指标,并为以后的相关研究提供了参考依据。

### 参考文献(References):

- [1] 赵衍华,林三宝,吴林,等. 搅拌摩擦焊及焊接设备简介[J]. 电焊机,2004,34(1):7-11.
- [2] 马宗义. 搅拌摩擦焊与加工技术研究进展[J]. 科学观察,2009,4(5):53-54.
- [3] 方连军,刘晓娟,高献娟. 搅拌摩擦焊技术在航空航天工业中的应用[J]. 中国新技术新产品,2013,(13):89-90.

- [4] 宫悦,尤晨. SIMOTION D在饮料自动装箱系统中的应用[J]. 自动化技术与应用,2013,32(1):59-65,70.
- [5] 王顺菊,陈增礼. SIMOTION D在铝激光焊接技术中的应用[J]. 自动化应用,2013(1):69-71.
- [6] 王文华. 基于PLC控制的液动机机械手[J]. 轻工机械,2012,30(2):46-49.
- [7] 吕俊. 基于OPC的PLC在线PIE模糊自整定系统[J]. 轻工机械,2013,31(2):35-39.
- [8] 西门子(中国)公司. SIMOTION 运动控制器基础应用手册[M]. 西门子(中国)公司,2010.
- [9] 西门子(中国)公司. SINAMICS\_S120 驱动器基础应用手册[M]. 西门子(中国)公司,2010.
- [10] 西门子(中国)公司. SIMOTION LAD\_FBD 编程和操作手册[M]. 西门子(中国)公司,2008.
- [11] 黄凯强,项占琴. SIMOTION D425在接箍上下料机械手上的应用[J]. 机电工程,2008,25(9):65-67,91.
- [12] 张有良,徐强,常晓煜,等. 码垛机械手运动轨迹的研究[J]. 包装与食品机械,2011(3):20-23.
- [13] 西门子(中国)公司. SIMOTION MCC 编程和操作手册[M]. 西门子(中国)公司,2008.

[编辑:张翔]

### 本文引用格式:

杨继东,林正,蔺俊强. SIMOTION D435在搅拌摩擦焊机中的应用[J]. 机电工程,2013,30(12):1515-1519.

YANG Ji-dong, LIN Zheng, LIN Jun-qiang. Application of SIMOTION D435 on friction stir welding machine[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2013,30(12):1515-1519.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第1505页)

条件下该方法的适应性和测量精度,据实验结果显示,2d-paul比2d-morlet连续小波获取的物体三维轮廓精度更高,被测物体高度分布在与光栅垂直方向上的梯度变化越来越大的情况下更适合,采用2d-paul算法能更有效地提高三维轮廓测量技术的测量精度。

### 参考文献(References):

- [1] ZHONG J, WENG J. Spatial carrier-fringe pattern analysis by means of wavelet transform: wavelet transform Profilometry[J]. **Applied Optics**, 2004, 43: 4993-4998.
- [2] 周翔,赵宏. 基于Mexican hat小波变换的三维轮廓术[J]. 光学学报,2009,29(1):197-202.
- [3] 孙娟,陈文静,苏显渝,等. 小波变换轮廓术的测量范围研究[J]. 光学学报,2007,27(4):647-653.
- [4] Mallat S. 信号处理的小波导引[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [5] 黎海妹,陈建文. 一种改进的小波脊提取算法[J]. 通信技术,2010,43(4):61-64.
- [6] TOMASSINI P, GIULIETTI A, GIZZI L, et al. Analyzing laser plasma interferograms with a continuous wavelet trans-

form ridge extraction technique: the method [J]. **Applied Optics**, 2001, 40(35):6561-6568.

- [7] LIU H, CARTWRIGHT A, BASARAN C, et al. Experimental verification of improvement of phase shifting moiré interferometry using wavelet-based image processing[J]. **Optical Engineering**, 2004, 43(5):1206-1214.
- [8] KADOOKA K, KUNOO K, UDA N, et al. Strain analysis for moiré interferometry using the two dimensional continuous wavelet transform [J]. **Experimental Mechanics**, 2003, 43(1):45-51.
- [9] SANDOZ P. Wavelet transform as a processing tool in white-light interferometry [J]. **Optics Letters**, 1997, 22: 1065-1067.
- [10] ZAPPA E, BUSCA G. Comparison of eight unwrapping algorithms applied to Fourier-transform profilometry. [J]. **Optics and Lasers in Engineering**, 2008;46(2):106-116.
- [11] LIU H, CARTWRIGHT A, BASARAN C. Moiré interferogram phase extraction: a ridge detection algorithm for continuous wavelet transforms [J]. **Applied Optics**, 2004, 43(4):850-857.

[编辑:李辉]