

基于改进离散余弦最小二乘相位展开法的三维形貌重构*

常丽 支秋颖 刘帅

(沈阳工业大学信息科学与工程学院 沈阳 110870)

摘要: 相位展开图的质量是光栅投影法中三维重建的重要环节。在对变形条纹进行相位解调后,需要将卷叠的相位在整个区域范围内展开,此环节直接影响被测物的三维重建结果。针对基于离散余弦最小二乘法相位展开法在有干扰情况下不能得到正确展开结果的问题,提出利用行列展开法对离散余弦最小二乘法进行改进,减少相位展开过程中误差。仿真和实验结果表明,利用改进余弦离散最小二乘法相位展开提高了相位展开图的质量,对提高三维重建精度具有实际意义。

关键词: 相位展开;最小二乘法;行列展开法;展开图质量;三维重建

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Three dimensional shape reconstruction based on improved discrete cosine transform least square phase unwrapping method

Change Li Zhi Qiuying Liu Shuai

(Shenyang university of technology institute of information science and engineering, Shenyang 110870, China)

Abstract: The quality of phase unwrapping is an important part of 3D reconstruction in grating projection. After the phase modulation of the deformed fringes, The folded phase needs to be unwrapped throughout the region, which affects the result of 3D reconstruction of the measured object. Aiming at the problem that the phase unwrapping method based on discrete least square cannot get the correct expansion results in the case of interference, so put forward using ranks expansion method to improve the discrete cosine least square method, reducing the error in the process of phase unwrapping. The result of simulation and experimental show that the method improved can raise the quality of phase unwrapping, which is of practical significance to improve the accuracy of 3D reconstruction.

Keywords: phase unwrapping; the discrete cosine transform least square method; the ranks of expansion method; phase unwrapping quality; 3D reconstruction

0 引言

相位展开^[1-2]是为了在整个区域范围内得到连续的相位分布图。基于离散余弦的最小二乘相位展开法随着噪声增大,相位展开图质量下降,恢复出被测物体边缘毛刺现象增大。为了解决这一问题,本文利用行列展开法对基于离散余弦最小二乘法进行改进。

1 基于离散余弦的最小二乘法

基于离散余弦的最小二乘法^[3-4]相位展开就是求泊松方程的解,泊松方程如式(1)所示:

$$\rho'_{i,j} = (\bar{\Delta}_{i,j}^x - \bar{\Delta}_{i-1,j}^x) + (\bar{\Delta}_{i,j-1}^y - \bar{\Delta}_{i,j-2}^y) \quad (1)$$

对离散泊松方程(1)进行离散余弦变换(DCT):

$$\phi_{i,j} = \frac{\rho_{i,j}}{2\cos(\pi i/M) + 2\cos(\pi j/N) - 4} \quad (2)$$

基于离散余弦的最小二乘法相位展开过程为:

- 1) 根据式(1)计算 $\rho'_{i,j}$;
- 2) 对步骤 1) 所得 $\rho'_{i,j}$ 进行 DCT 变换得到 $\rho_{i,j}$;
- 3) 将步骤 2) 得到的 $\rho_{i,j}$ 代入到式(2)得到 $\phi_{i,j}$;
- 4) 对步骤 3) 计算出来的 $\phi_{i,j}$ 进行 DCT 逆变换, 逆变换

得到的相位即是展开相位。

本文以 MATLAB 软件模拟的 peak 函数为被测物,通过四步相移法^[5]得到被测物体的截断相位。

为了模拟真实的测量环境,在截断相位^[6-7]图中添加0.3~0.6的高斯噪声。利用离散余弦最小二乘法展开得到连续相位如图1所示。

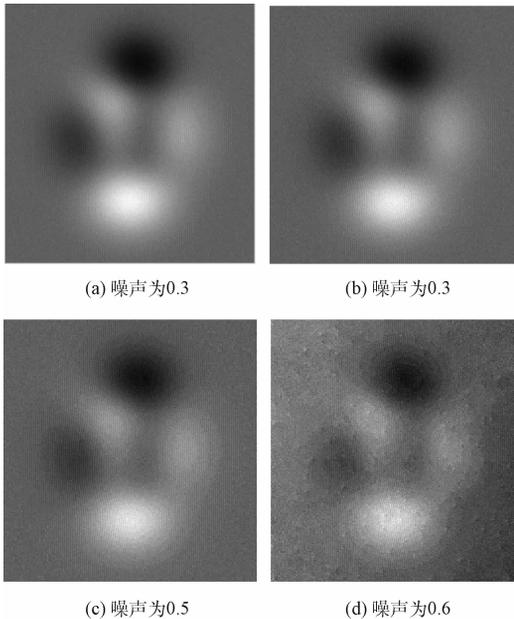


图1 不同噪声下离散余弦最小二乘法相位展开

由图1可知,在添加的噪声区间内,离散余弦最小二乘法得到的相位展开图没有明显的错误展开点,噪声为0.6时相位展开图像质量下降。

为了定量^[8]描述对截断相位图进行预处理方法的效果,需要计算相位展开后的图像与其对应截断相位图的均方根误差(RMSE);通过计算相位展开图的均方误差^[9](MSE)和峰值信噪比^[10](PSNR)表明对噪声的平滑作用。均方根误差(RMSE)和均方误差(MSE)的单位与被测数据一致,为像素(pixel);峰值信噪比单位为dB。

离散余弦最小二乘法得到连续相位与截断相位间各参数如表1所示。

表1 基于离散余弦的最小二乘法参数指标

| 噪声方差 | 均方差 | 均方根差 | 信噪比 |
|------|---------|---------|----------|
| 0.3 | 5.467 2 | 2.338 2 | 40.753 2 |
| 0.4 | 5.359 3 | 2.320 5 | 40.839 7 |
| 0.5 | 5.408 6 | 2.325 6 | 40.799 9 |
| 0.6 | 5.912 9 | 2.431 6 | 40.412 8 |

2 利用行列展开法对最小二乘法进行改进

行列展开法^[11]是相位展开的基本算法,对相位图进行简单的加减运算。改进之后离散余弦最小二乘法得到的截断相位如图2所示。

利用改进离散余弦最小二乘法对截断相位进行相位展

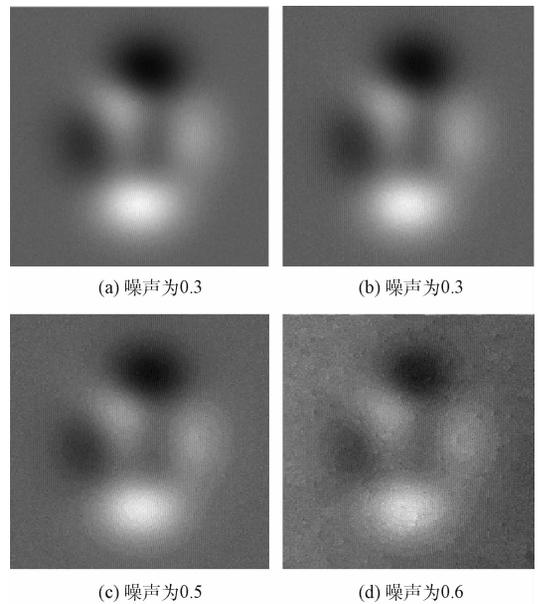


图2 不同噪声下改进离散余弦最小二乘法相位展开

开,得到连续相位与截断相位间各参数如表2所示。

表2 基于改进离散余弦的最小二乘法参数指标

| 噪声方差 | 均方差 | 均方根差 | 信噪比 |
|------|---------|---------|----------|
| 0.3 | 5.454 9 | 2.335 6 | 40.762 9 |
| 0.4 | 5.349 1 | 2.312 8 | 40.848 0 |
| 0.5 | 5.371 9 | 2.317 7 | 40.829 5 |
| 0.6 | 5.792 0 | 2.406 6 | 40.502 5 |

由表1、2对比可知:1)同离散余弦最小二乘法得到相位展开图各参数相比,噪声为0.3时,改进离散余弦最小二乘法得到相位展开图的均方差低约0.01 pixel,均方根差降低约0.001 pixel,信噪比增加0.01 dB;2)当噪声为0.4时,改进离散余弦最小二乘法得到相位展开图的均方差降低约0.01 pixel,均方根差降低约0.01 pixel,信噪比增加0.008 dB;3)当噪声为0.5时,改进离散余弦最小二乘法得到相位展开图的均方差降低约0.04 pixel,均方根差降低约0.008 pixel,信噪比增加0.05 dB;4)当噪声为0.6时,改进离散余弦最小二乘法得到相位展开图的均方差降低约0.12 pixel,均方根差降低约0.03 pixel,信噪比增加0.09 dB。

3 三维形貌重构原理

以交叉光轴系统^[12-13]测量为例。其原理如图3所示。图3中, d 为摄像机镜头光心, P 与投影仪镜头光心 C 之间的距离, P 为投影仪的光轴, C 为摄像机光轴。二者相交与参考平面 R 上的点 O 两光心连线 PC 与参考平面的垂直距离定义为 L 。

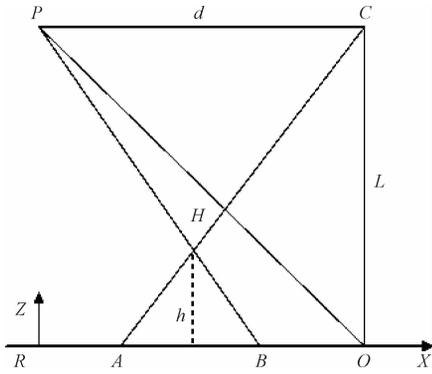


图 3 交叉光轴原理

三维形貌重构原理^[14-15]为:当面 R 上没有被测物体时,投影仪射出的条纹光线经过 H 点落在 R 面上 B 点,之后又经过反射作用在摄像机上成像;当 R 面上有被测物体时,投影仪投射出的光线由于被测物体的调制作用经过 H 点落在 R 面的 A 点,所以两次测量的相位差与被测物体的高度相关。通过采集形变条纹,计算出其截断相位并由展开算法得到连续相位,联合相位高度转换公式求出高度从而实现三维形貌重构。

根据图 3 所示原理图的几何关系可知 $\triangle ABH$ 相似于 $\triangle PCH$, 则:

$$\frac{h}{AB} = \frac{L-h}{d} \quad (3)$$

又 AB 两点间的相位差与参考面上 A、B 两点间的距离存在比例关系,其关系式如(4)所示:

$$\phi_{AB} = 2\pi f_0 \overline{AB} \quad (4)$$

联立式(3)、(4),得到高度与相位的关系式如:

$$h = \frac{L \cdot \phi_{AB}}{\phi_{AB} + 2\pi f_0 d} \quad (5)$$

式中: f_0 为正弦光栅条纹的频率本文为 $1/8$, L 为 $1\ 000\ \text{mm}$, d 为 $200\ \text{mm}$ 。AB 两点之间的相位差即为相位展开得到的连续相位。

4 实验验证

选取篮球球面为被测物,采集到的 4 幅形变条纹图如图 4 所示。对图 4 截断相位图用两种展开算法进行展开。离散余弦最小二乘法相位展开如图 5 所示。将相位转换成高度,得到的形貌轮廓图如图 6 所示。

对恢复出的高度矩阵进行标准偏差计算,其标准偏差为 $19.075\ 2$ 。利用改进离散余弦最小二乘法得到相位展开图如图 7 所示。将其进行相位高度间转换,得到的形貌轮廓图如图 8 所示。对恢复出的高度矩阵进行标准偏差计算,其标准偏差为 $18.872\ 4$ 。分别计算两种算法相位展开的参数。

离散余弦最小二乘法得到相位展开图的均方差

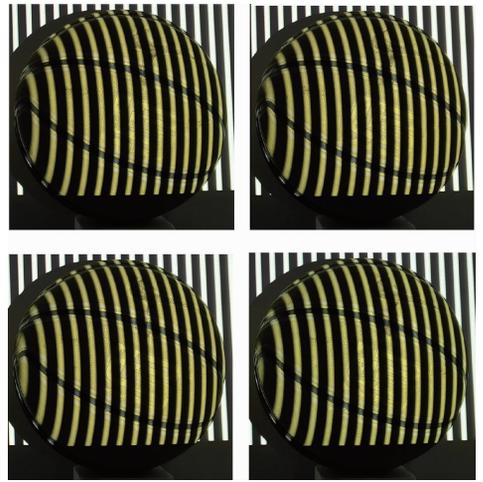


图 4 采集的形变条纹

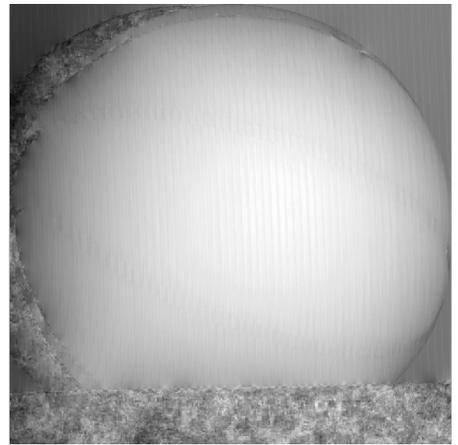


图 5 离散余弦最小二乘法相位展开

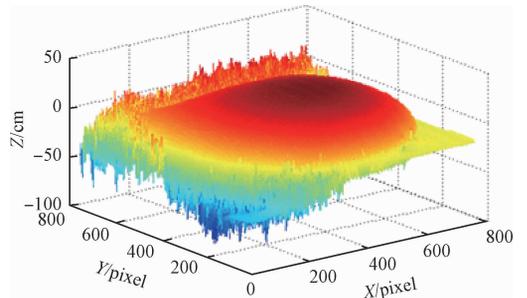


图 6 离散余弦最小二乘法球面三维形貌

$13.332\ 8\ \text{pixel}$,均方根差 $3.651\ 4\ \text{pixel}$,信噪比 $36.881\ 6\ \text{dB}$;改进离散余弦最小二乘法得到相位展开图的均方差 $13.153\ 2\ \text{pixel}$,均方根差 $3.626\ 7\ \text{pixel}$,信噪比 $36.940\ 5\ \text{dB}$ 。

利用改进离散余弦最小二乘法进行相位展开,得到相位展开图的均方差降低约 $0.18\ \text{pixel}$,均方根差降低约 $0.024\ \text{pixel}$,信噪比增加 $0.06\ \text{dB}$ 且恢复出高度矩阵的标准偏差降低约 0.2 。

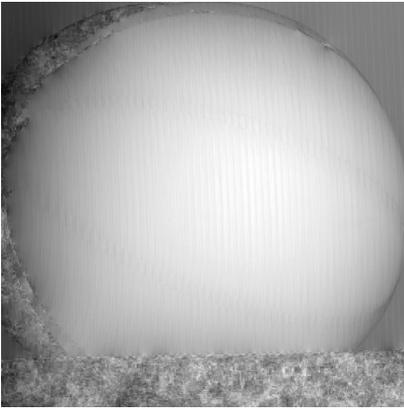


图7 改进离散余弦最小二乘法相位展开

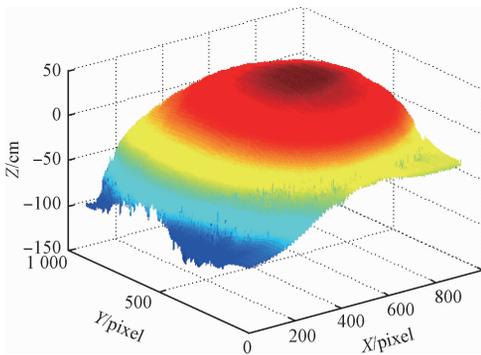


图8 改进离散余弦最小二乘法球面三维形貌

5 结 论

由仿真分析可知,在不同噪声下,改进离散余弦最小二乘法得到相位展开图的各项参数指标均小于最小二乘法,说明改进离散余弦最小二乘法可以在一定程度上改善相位展开图的质量。实验也很好的验证的仿真的结果,证明了改进离散余弦最小二乘法进行相位展开均降低了图像的均方差、均方根差并且增大了峰值信噪比,且降低了转换后高度矩阵的标准差。

故改进离散余弦最小二乘法进行相位展开在一定程度上减少了展开相位的误差,提高相位展开图的质量,缓解了随着噪声增加还原三维物体的边缘毛刺现象。

参考文献

- [1] HEMIZE M. Cluster-based robust three-dimensional phase unwrapping algorithm [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(10):1780-1785.
- [2] 王华英,刘佐强,廖薇,等. 基于最小范数的四种相

位解包裹算法比较[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 122-127.

- [3] 郭媛,陈小天. 基于最小二乘相位解包裹改进算法的研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(5):189-194.
- [4] 郭仁慧,李建欣,朱日宏. 基于 DCT 算法的种子点相位解包裹算法[J]. *光学学报*, 2012, 32(2):149-156.
- [5] 肖丹,陈良洲,干江红. 基于数字光栅相移法的三维重构[J]. *光电技术应用*, 2011, 26(5):17-20.
- [6] 朱勇建,李安虎,潘卫清,等. 结构光测量中快速相位解包裹算法的讨论[J]. *光子学报*, 2009, 38(1): 184-188.
- [7] CHEN F, SU X. Phase-unwrapping algorithm for the measurement of 3D object [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2012, 123(24): 2272-2275.
- [8] 闫钧华,朱可,张婉怡,等. 基于显著性图像边缘的全参考图像质量评价[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(9):2140-2148.
- [9] 刘姗姗,郁梅,吕亚奇. 基于联合恰可察觉失真的立体图像质量评价[J]. *电子测量与仪器学报*, 2015, 29(12):1757-1764.
- [10] 刘锦帆,徐浩煜,梁兴东,等. 基于 HVS 结构相似度的极化 SAR 图像质量评价方法[J]. *国外电子测量技术*, 2015, 34(11):19-26.
- [11] 王晋疆,吴明云,刘阳,等. 基于图切割的相位展开[J]. *光子学报*, 2012, 41(9):1130-1134.
- [12] FRANCIS D, TATAM R P. Shearography technology and applications: A review[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(10): 102001-102007.
- [13] 郭俊,王刚,孙杰,等. 四步数字相移全息干涉术三维变形测量[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(12): 2808-2813.
- [14] JANG W. Structured-light stereo: Comparative analysis and integration of structured-light and active stereo for measuring dynamic shape[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(11): 1255-1264.
- [15] 肖志勇. 基于数字投影的三维形貌测量系统的实现[J]. *通信技术*, 2011, 44(2):112-114.

作者简介

常丽,1971 年出生,副教授,主要从事纳米位移测量与控制、智能仪器及网络化测控系统。

E-mail: changlianli@163.com