

光学测量中相位重构算法的新型复合质量图

朱勇建¹ 潘卫清² 刘宏展³ 尹韶辉¹

¹ 湖南大学国家高效磨削工程技术研究中心, 湖南, 长沙 410082

² 浙江科技学院理学院, 浙江, 杭州 310023; ³ 华南师范大学光子信息技术实验室, 广东, 广州 510006

摘要 光学相位式测量法成功与否与光学条纹图的相位重建密切相关。相位重建就是把从条纹图中获取的相位值恢复成连续的相位值。在相位重建算法中有一个共同的研究方向就是构造一个优秀的相位数据评价机制——质量图, 以达到相位重建算法的最优化。通过对两个测量实验条纹图进行研究, 发现调制度对数(以常数 e 为底)幅值的梯度偏差可以作为质量评价依据, 其所反映的测量数据可靠性可与经典的相位导数偏差质量图相当, 一般情况下可以以它作为相位重建算法的导向或权值; 进一步提出了一种复合质量图-调制度对数幅值-相位导数偏差质量图, 把调制度对数幅值的梯度偏差与相位导数偏差相结合, 并对结合的参数进行了优化。这种质量图能够标识相位导数偏差质量图所不能标识的细节缺陷, 并对坏点的标识轮廓更为清晰, 其可靠度优于调制度对数幅值的梯度偏差和相位导数偏差图, 在相位重建算法的应用方面, 其结果连续性优于调制度对数幅值的梯度偏差质量图。

关键词 仪器; 测量与计量; 光学测量; 相位重建; 调制度; 质量图

中图分类号 TN911.74

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS200929s1.0001

New Composite Quality Map for Phase Reconstructing Algorithm in Optical Measurement

Zhu Yongjian¹ Pan Weiqing² Liu Hongzhan³ Yin Shaohui¹

¹ National Engineering Research Center for High Efficiency Grinding, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China

² School of Science, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

³ Laboratory of Photonic Information Technology, the South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China

Abstract Optical phase measurement depends on the phase reconstruction from fringe patterns to a great extent. Phase reconstruction means to eliminate the discontinuity of phase extracted from fringe patterns. Most phase-reconstructing (PR) algorithms might share a common research interest, namely, to construct an excellent phase-evaluating mechanism—quality map. Hence two kinds of experimental fringe patterns are studied for 3D measurement. It's found that the gradient variance of log modulation amplitude (GVLMA) could be chosen as a phase indicator. Its reliability could be compared to the traditional phase derivative variance (PDV) quality map. Generally, it's advised to choose the GVLMA as a guide or weight of PR. For further application, a new composite quality map (log modulation amplitude and phase derivative variance (LMAPDV) has been proposed. It combines the GVLMA and PDV and optimizes the parameter of combination. The LMAPDV could identify the minute defect or badness of phase data which could hardly be recognized by the PDV. Moreover, its identified outlines of poor pixels are much clearer than those of PDV and GVLMA. Then the LMAPDV is introduced into the PR algorithm. The calculated result proves that its solution enjoys higher consistency than that of GVLMA.

Key words instrumentation; measurement and metrology; optical measurement; phase reconstructing; modulation; quality map

1 引 言

光学相位式测量法是采用光学的手段获得物体三维空间信息的方法和技术, 其在机器视觉、实物仿形、工业检测、生物医学、影视特技、虚拟现实等领域,

均具有非常重要的意义和广阔的应用前景^[1~7]。它具有精度高、速度快、效率高和一次性测量面积大等优点^[1, 4]。然而, 此方法的成功与否与光学条纹图的相位重建算法^[8~13]密切相关。相位重建就是把从条

基金项目: 国家科技支撑计划(2007BAF29B03)和杭州市产学研合作项目(20071931E41)资助课题。

作者简介: 朱勇建(1979—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光学测量方面的研究。E-mail: zhuyongjian_hn@yahoo.com.cn

纹图中提取的周期性包裹相位值 φ 恢复成连续的重建相位值 φ , 其主要任务是消除噪声、无效区域、低调制度、被测轮廓跳变或条纹欠采样等多种因素的影响, 获取尽量接近真实值的结果。

为了重建真实相位图, 必须对主值相位图进行重建运算来消除主值相位图中的 2π 跳变。 $\varphi(x, y)$ 的值是动态连续变化, 可以从 $-\infty$ 到 $+\infty$, 而被测物体的 z 向坐标值 $h(x, y)$ 为^[2], 其中 l 为与测量装置的尺寸、投影条纹的频率有关的常数量。可以看出, 高效可靠的相位重建算法是光学相位式测量法成功的关键所在。总体上归结起来可分为两大类^[8]: 依赖路径的局域相位重建方法典型代表是基于质量图导引的路径法^[11]和独立于路径的全局法, 最为典型的是加权最小二乘迭代法^[9]。质量图导引的路径法速度快, 受噪声影响大, 其相位重建的结果依赖质量图的好坏; 加权最小二乘法受噪声影响小, 但速度慢, 其求解结果同样依赖质量图(其权

值采用质量图数据)的好坏。因此, 质量图的优劣是相位重建算法的关键所在。文献[8]中指出相位重建算法的一个发展方向就是构造优质可靠的质量图来知道相位重建算法的最优化。调制度对数(以常数 e 为底)幅值的梯度偏差可以作为质量评价标准, 可以用来引导相位重建算法的优化。结合了调制度幅值的梯度偏差与相位导数偏差, 提出一种复合质量图-调制图幅值-相位导数偏差质量图, 并对其参数进行优化, 采用实验图进行了验证

2 复合质量图

2.1 相位导数偏差质量图

质量图用来标识相位好坏的数据阵列, 在质量图中, 像素灰度值从 0 到 255, 表示像素点的质量从最差到最好。传统的相位导数偏差质量图只需要包裹相位图就能构造出来, 可表达为^[8]

$$q(m, n) = \frac{\sqrt{\sum_{i=m-k/2}^{m+k/2} \sum_{j=n-k/2}^{n+k/2} (\Delta_{i,j}^x - \bar{\Delta}_{m,n}^x)^2 + \sum_{i=m-k/2}^{m+k/2} \sum_{j=n-k/2}^{n+k/2} (\Delta_{i,j}^y - \bar{\Delta}_{m,n}^y)^2}}{k \times k}, \quad (1)$$

其中 k 为以点 (m, n) 为中心的窗口大小, $(\bar{\Delta}_{m,n}^x$ 和 $(\bar{\Delta}_{m,n}^y$ 为 $k \times k$ 窗口内 x 和 y 方向相位导数的均值, $\Delta_{i,j}^x$ 和 $\Delta_{i,j}^y$ 为 x 和 y 方向的相位导数, 表示为

$$\Delta_{i,j}^x = W\{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j}\}, \quad (2)$$

$$\Delta_{i,j}^y = W\{\varphi_{i,j+1} - \varphi_{i,j}\}, \quad (3)$$

其中 W 为包裹算子, 使得 $\{\dots\}$ 内的值位于 $[-\pi, \pi]$ 范围内。

2.2 调制度对数幅值-相位导数偏差质量图

2.2.1 调制度对数幅值的梯度偏差

在四步相移式光学条纹投影轮廓测量中, 条纹图的表达式为

$$I_i(x, y) = I_0(x, y) + A(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \alpha_i], \quad (4)$$

其中 $i = 1, 2, 3, 4$, $I_i(x, y)$ 为光强值, $I_0(x, y)$ 为背景光强, α_i 为附加相位, 对标准四步相移法有 $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = \pi/2, \alpha_3 = \pi, \alpha_4 = 3\pi/2$, $A(x, y)$ 为调制度幅值

$$A(x, y) = I_0(x, y) \cdot \gamma(x, y), \quad (5)$$

$\gamma(x, y)$ 为调制度, 由此可以得到

$$A(x, y)_{\text{four-step}} = \frac{[(I_1 - I_3)^2 + (I_4 - I_2)^2]^{1/2}}{\sqrt{2}}, \quad (6)$$

$$\gamma(x, y)_{\text{four-step}} = \frac{2[(I_1 - I_3)^2 + (I_4 - I_2)^2]^{1/2}}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4}, \quad (7)$$

进一步可以得到调制度对数幅值的梯度偏差为

$$Q(m, n) = \frac{\sqrt{\sum_{i=m-k/2}^{m+k/2} \sum_{j=n-k/2}^{n+k/2} [\Delta(\ln A_{i,j})^x - \bar{\Delta}(\ln A_{m,n})^x]^2 + \sum_{i=m-k/2}^{m+k/2} \sum_{j=n-k/2}^{n+k/2} [\Delta(\ln A_{i,j})^y - \bar{\Delta}(\ln A_{m,n})^y]^2}}{k \times k}, \quad (8)$$

其中

$$\Delta(\ln A_{i,j})^x = \ln A_{i+1,j} - \ln A_{i,j}, \quad (9)$$

$$\Delta(\ln A_{i,j})^y = \ln A_{i,j+1} - \ln A_{i,j}, \quad (10)$$

当 $A_{i,j}$ 为 0 时, 令 $\ln A_{i,j}$ 为 0, 这里设 k 为 3。

2.2.2 调制度对数幅值-相位导数偏差质量图

参考文献[13], 把调制度对数幅值的梯度偏差

与相位导数偏差质量图结合起来得到

$$L_{\text{OM}}(m, n) = \frac{M(m, n)}{1 + cQ(m, n)/M(m, n)}, \quad (11)$$

$L_{\text{OM}}(m, n)$ 为复合质量图, 其中 c 为可调节的变量, 可调整复合质量图中调制度对数幅值所占的比例, 通过对其取值进行考查, 考查值从 0.01 ~ 10 中进

行取样,取 10 组进行计算,其所对应的重建相位图几乎无区别,便于计算,取 $c = 1$ 。 $M(m, n)$ 为 $s/q(m, n)$, s 为常量,一般取值为 1。(13) 式描述的为相位值与调制度对数幅值对质量图的影响比例。很明显, $L_{OM}(m, n)$ 与 $q(m, n)$ 和 $Q(m, n)$ 均成反比,表示 $L_{OM}(m, n)$ 值越大,像素质量越好,可以直接用作相位图评价函数。

3 实验验证

采用标准的四步相移条纹投影法对实际物体进行测量,图 1(a)为投影到物体(手按着碗)的条纹图(其中一幅),在碗底部有一微小突出缺陷,如图 1(a)方框内放大显示。图 1(b)为包裹相位图,图 1(c)为

调制度图,图 1(d)为调制度对数幅值图。从图 1(c)和图 1(d)中可以看出,调制度对数幅值能清晰的标识出测量数据优劣,能明显区分调制度高低和突变部分。图 2 为相应的质量图,图 2(a)为调制度对数幅值的梯度偏差图,图 2(b)为相位导数偏差质量图,图 2(c)为复合质量图。从图 2 可以看出,传统的相位导数偏差质量图并不能明显的标识碗底部的缺陷部分,这将给相位重建的结果带来一定的误差,而复合质量图很好的解决了这个问题。采用复合质量图进行质量导引法重建相位,可以得到如图 3 所示的重建相位图。图 3(a)为以调制度对数幅值的梯度偏差图作为导引的相位重建图,图 3(b)为复合质量图作为导引的相位重建图,图 3(c)为图 3(b)对应的三维图。

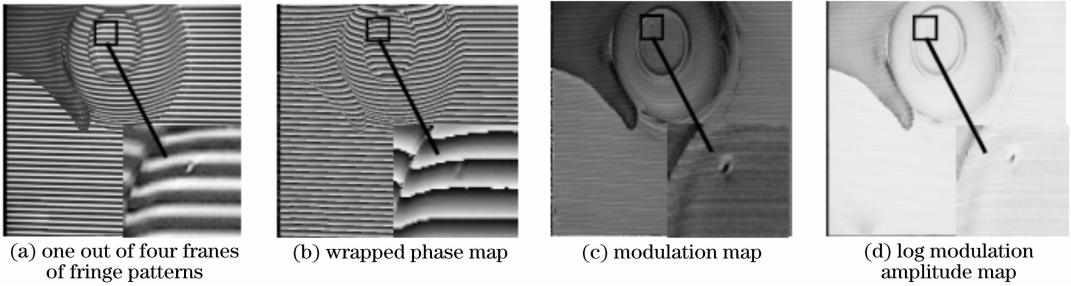


图 1 实验图及处理

Fig.1 Experimental and processed images

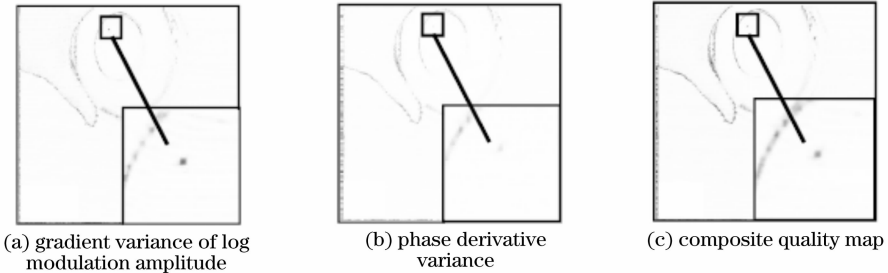


图 2 质量图

Fig.2 Quality maps

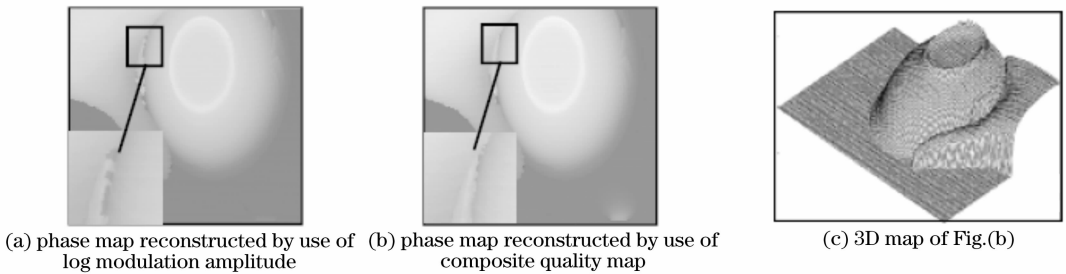


图 3 重建相位图

Fig.3 Reconstructed phase maps

从图 3 局部放大部分可以看出,由复合质量图引导的重建相位图相对来说要比调制度对数幅值的

梯度偏差图得到的结果要好,连续性要强,证明其抗噪声和相位突变能力要强一些。但其性能的验证

需要更多的实验结果验证。以木制雕刻佛像的形貌测量为例进一步验证复合质量图的可行性。图 4(a)为投影条纹图中的一幅,大小为 512×512 像素,表面轮廓突变比较大,引起测量数据的不连续,特别是眼睛部分(如放大部分所示),图 4(b)为其包裹相位图,图 4(c)为调制度图,图 4(d)为调制度对数幅值图。从调制度图中可以看出,眼睛部分的调制度最低,因此是相位重建的关键,而调制度对数幅值图则更能清晰的反映出相位重建的关键部分,比调制度图更为简洁。由此可以得到质量图如图(5)所示。图 5(a)为调制度对数幅值的梯度偏差图;图 5(b)为相位导数偏差质量图;图 5(c)为复合质量图。在图中放大的眼睛部分质量较差,其轮廓需要标识出来,从三种质量图中可以看出,复合质

量图标识的最为清晰,因此应当作为相位重建算法的首选。图 6 为三种质量图的相位重建图,图 6(a)为调制度对数幅值的梯度偏差图引导相位重建结果;图 6(b)为相位导数偏差质量图引导的相位重建结果;图 6(c)是复合质量图导引的相位重建图。从图 6 中可以看出,在眼睛部分的相位重建结果相差无几,进一步的比较需要采用数值计算或图像比较计算,而在耳朵部分边界处三种结果略有差别,复合质量图所得到的结果最好,相位导数偏差质量图的结果其次,单独的调制度对数幅值梯度偏差得到的结果出现明显的求解误差,因此复合质量图在相位重建算法中可以考虑优先选用,图 6(d)为图 6(c)的三维图,图中显示大部分相位不连续或突变区域都能正确处,只有少数部分还需要进一步优化算法。

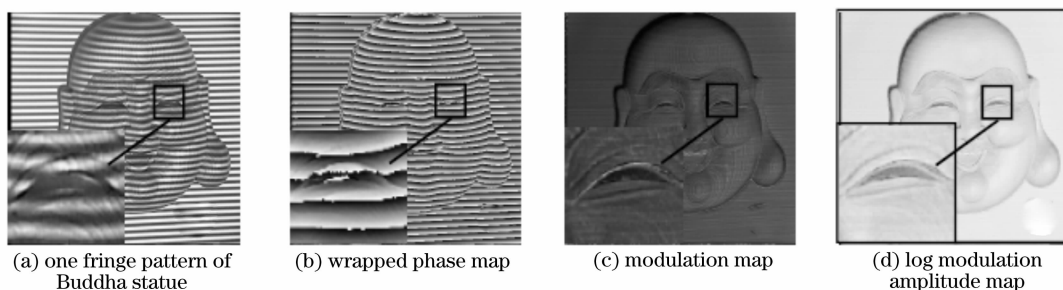


图 4 实验条纹图和处理图像

Fig. 4 Experimental fringe pattern and processed images

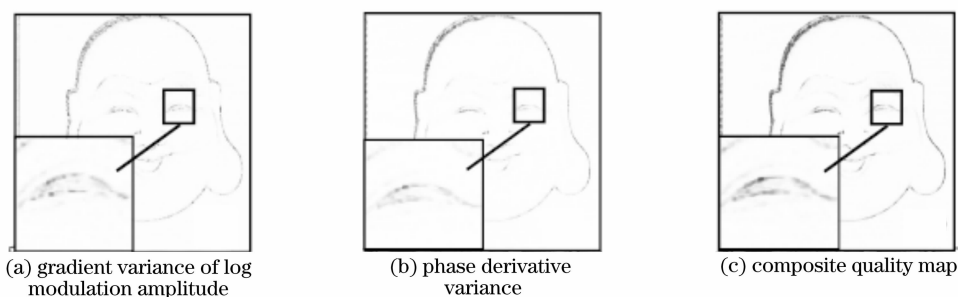


图 5 质量图

Fig. 5 Quality maps

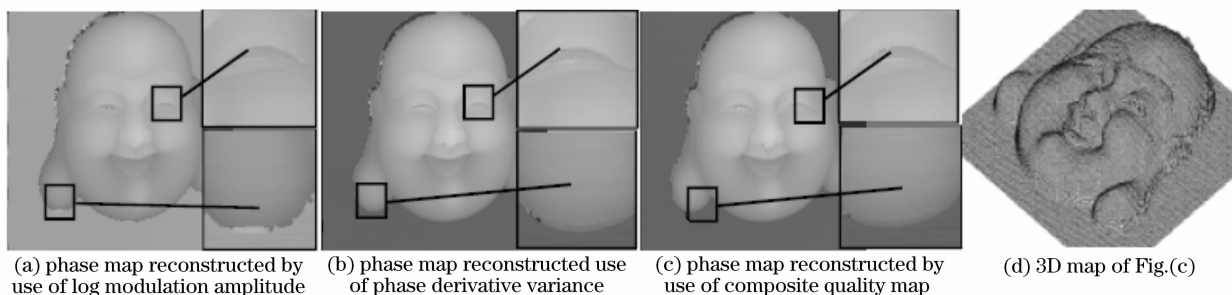


图 6 重建相位图

Fig. 6 Reconstructed phase maps

4 结 论

对光学相位式测量系统的投影条纹图进行了研究,改变了传统的数据评价方法,采用调制度对数幅值图进行数据评估,代替了调制度图,并以调制度对数幅值的梯度变化为相位重建的导向参数或权值,实验图的验证表明其有一定的可靠性,与传统的相位导数偏差质量图相近,而在标识调制度幅值变化较大的区域可靠性要高于相位导数偏差质量图,进一步提出了一种复合质量图(调制度对数幅值-相位导数偏差质量图,复合质量图把调制度对数幅值的梯度偏差图与相位导数偏差质量图结合起来,并优化了结合参数,通过两幅实验图进行了验证,结果证明在评价相位数据方面对质量较差的像素点更能清晰的识别,并能标识出传统相位导数偏差质量图所不能标识的缺陷点,具有更高的可靠性。在引入相位重建算法方面,复合质量图所得到的结果在连续性方面总体上说要优于相位导数偏差质量图,更优于调制度对数幅值的梯度偏差图,可以用作相位重建算法的首选质量图,然而,复合质量图的研究只是个初步阶段,更进一步的性能评价需要更多的实验验证和数值比较,可进一步应用于各种不同类型的相移式光学测量当中。

参 考 文 献

- 1 Huang P. S., Zhang C., Chiang F. P.. High-speed 3-d shape measurement based on digital fringe projection [J]. *Opt. Eng.*, 2003, **42**(1): 163~168
- 2 Hu Qingying. 3-D shape measurement based on digital fringe projection and phase-shifting techniques [D]. NY: State

- University of New York at Stony Brook, 2001, 11794
- 3 Huang P. S., Hu Q., Jin F. *et al.*. Colorencoded digital fringe projection technique for high-speed three-dimensional surface contouring [J]. *Opt. Eng.*, 1999, **38**: 1065~1071
- 4 Rusinkiewicz S., Hall-Holt O., Marc Levoy. Real-time 3d model acquisition [C]. 3D acquisition and image based rendering, ACM Press, 2002, **1281**: 438~446
- 5 Zhang H, Lalor M. J., Burton D. R.. Spatiotemporal phase unwrapping for the measurement of discontinuous objects in dynamic fringe-projection phase-shifting profilometry [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(16): 3534~3541
- 6 Kang Xin, He Xiaoyuan. Two-step phase-shifting technique for phase measurement profilometry by grating projection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 75~79
康新,何小元. 两步相移实现投影栅相位测量轮廓术[J]. *光学学报*, 2003, **23**(1): 75~79
- 7 Pan Wei, Zhao Yi, Yuan Xueyu. A new method for getting high precision phase in structural light measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 687~691
潘伟,赵毅,阮雪榆. 结构光测量中获取高精度相位的新方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 687~691
- 8 Dennis C. Ghiglia, Mark D. Pritt. Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software [M]. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1998
- 9 Dennis C. Ghiglia, Louis A. Romero. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(1): 107~1178
- 10 Lei Zhihui, Li Jianbin. Full automatic phase unwrapping method based on projected double spatial frequency fringes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 39~42
雷志辉,李健兵. 基于双频投影条纹的全自动相位解包裹方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 39~42
- 11 Thomas J. Flynn. Consistent 2-D phase unwrapping guided by a quality map [C]. *IEEE*, 1996, 2057~2059
- 12 Zhao H, Chen W, Tan Y. Phase-unwrapping algorithm for the measurement of three-dimensional object shapes [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(20): 4 497~ 4500
- 13 Su Xianyu, Chen Wenjing. Reliability-guided phase unwrapping algorithm: a review [J]. *Opt. and Lasers Engng.*, 2004, **42**(3): 245~261