

利用自适应阈值条纹调制度分析方法 进行位相去包裹研究

殷功杰* 朱传贵 刘 波 薛鸣球

(中国科学院西安光机所 西安 710068)

提要 提出了一种基于条纹调制度分析的位相去包裹新算法。该算法用于三维测量中位相图的去包裹处理,取得了好的实验结果。它同样适用于激光干涉条纹的处理。

关键词 条纹分析,位相去包裹,图像处理

1 引 言

傅里叶变换条纹分析技术自 80 年代被提出以来^[1],很快在全息干涉计量学及三维测量技术中得到大量应用。该技术通过对干涉条纹的分析能精确定量地计算出波面形状。通过对投影在被测物体表面的变形条纹图的分析能计算物体表面的三维轮廓图。在这一技术中,位相去包裹算法是最关键的。因为位相图本身及外来的误差缺陷使去包裹计算产生误差。例如流场干涉测量中气流场的激波和三维测量时物体表面固有的台阶裂缝均使位相图不连续跳变,而激光干涉图中的散斑及 CCD 的电噪声有可能引起孤立像素点或像素簇失效。误差一旦出现就会沿着去包裹计算的处理方向继续扩散。为此人们想到的解决办法是,将台阶及各种无效区域标识出来,在去包裹计算时绕过这些区域。人们提出分割线算法^[2]、最小梯度生成树法^[3]等,这些算法的计算量大。X. Y. Su 提出的条纹调制度分析算法^[4]是简单有效的方法。我们的算法同样基于对条纹调制度的分析,但避免固定阈值的选取。实验结果表明,算法能够识别各种无效区域,避免误差沿去包裹计算处理方向的扩散。

2 条纹图调制度分析

文献[4]中对条纹图的条纹调制度进行了分析,条纹图中调制度低于一定数值的区域对应位相图中的误差缺陷,如台阶式跳变及孤立误差像素点或簇。去包裹计算时,应该避免处理这些区域或最后处理它们。X. Y. Su 构造一个条纹调制度的二值化图像作为“掩模”,保证低于某一阈值的区域不被处理。但有时,确定一个合适的阈值是很麻烦的事情。我们同样计算了条纹图的调制度分布,但不进行二值化,原样存储计算机中供去包裹计算时参照。

* 现在工作地址:广州中山大学电子系,邮政编码:510275。

文献[4]中采用具有 $\frac{2\pi}{N}$ 相移的 N 幅条纹图,我们仅有一幅条纹图,因而计算条纹调制度的方法是不同的。我们采用的方法完全类似于傅里叶变换求解位相图的方法。一般认为全息干涉条纹是余弦条纹,而三维测量中物体表面上的变形条纹则可能包含多次谐波。考虑最复杂的情况,可将条纹表示如下

$$g(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos[2\pi n f_0 x + n\phi(x, y)] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n \exp\{i[2\pi n f_0 x + n\phi(x, y)]\} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} q_n \exp[i(2\pi n f_0 x)] \quad (1)$$

其中 $\phi(x, y)$ 为位相, $a(x, y)$ 为零频背景, $b(x, y)$ 代表条纹幅度, f_0 为条纹频率, $c_0 = \frac{1}{2}a(x, y)$ 。当 $n \neq 0$ 时, $c_n = \frac{1}{2}b(x, y)A_n$ 。对(1)式做关于变量 x 的傅里叶变换得到

$$G(f, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} Q_n(f - n f_0, y) \quad (2)$$

$G(f, y)$, $Q_n(f, y)$ 分别为 $g(x, y)$ 和 $q_n(x, y) = c_n \exp[in\phi(x, y)]$ 的频谱。因为 $\phi(x, y)$, $a(x, y)$, $b(x, y)$ 的空间频谱比条纹频率 f_0 低得多,公式(2)中各级谱是完全分离的。对上式滤波,仅取 $n = 1$ 级谱并做傅里叶反变换得到

$$g_1(x, y) = \frac{1}{2}b(x, y)A_1 \exp[in\phi(x, y)] \quad (3)$$

将上式虚部和实部的平方相加得到

$$M(x, y) = \frac{1}{4}[b(x, y)]^2 A_1^2 \quad (4)$$

$M(x, y)$ 正比于条纹的调制度函数,我们将其用于去包裹计算。对公式(2)在频域内滤波时我们用汉宁窗,如下式所示

$$H(f) = 0.5 + 0.5 \cos[2\pi(f - f_0)/f_0] \quad (5)$$

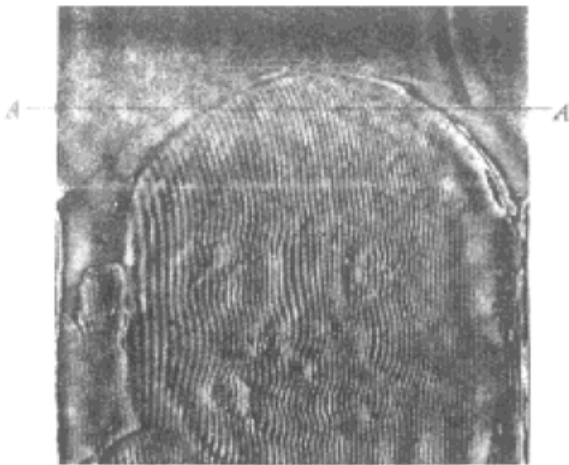


图1 物体表面的变形光栅图样

Fig. 1 Projected grating pattern on an object surface

如果用矩形窗滤波,则最终结果会有很多波纹,不能正确反映条纹调制度的分布。为了验证上述算法是正确的,我们对模拟及实测的条纹曲线进行计算。如图1为投影到佛像面部的变形光栅条纹图。条纹图获取的具体实验装置详见文献[5]。图2(a)为模拟计算的正弦条纹曲线,其中左边的三分之一振幅为1,中间三分之一振幅为2,右边三分之一振幅为0。图2(b)是图1中条纹图的一行,位置如图1中的A—A线所示。图2(c)和图2(d)分别为计算得到的条纹调制强度曲线。很明显,图2(c)中的结果等于图2(a)中条纹振幅平方。而图2(d)也反映了图2(b)中的条纹调制度情况。

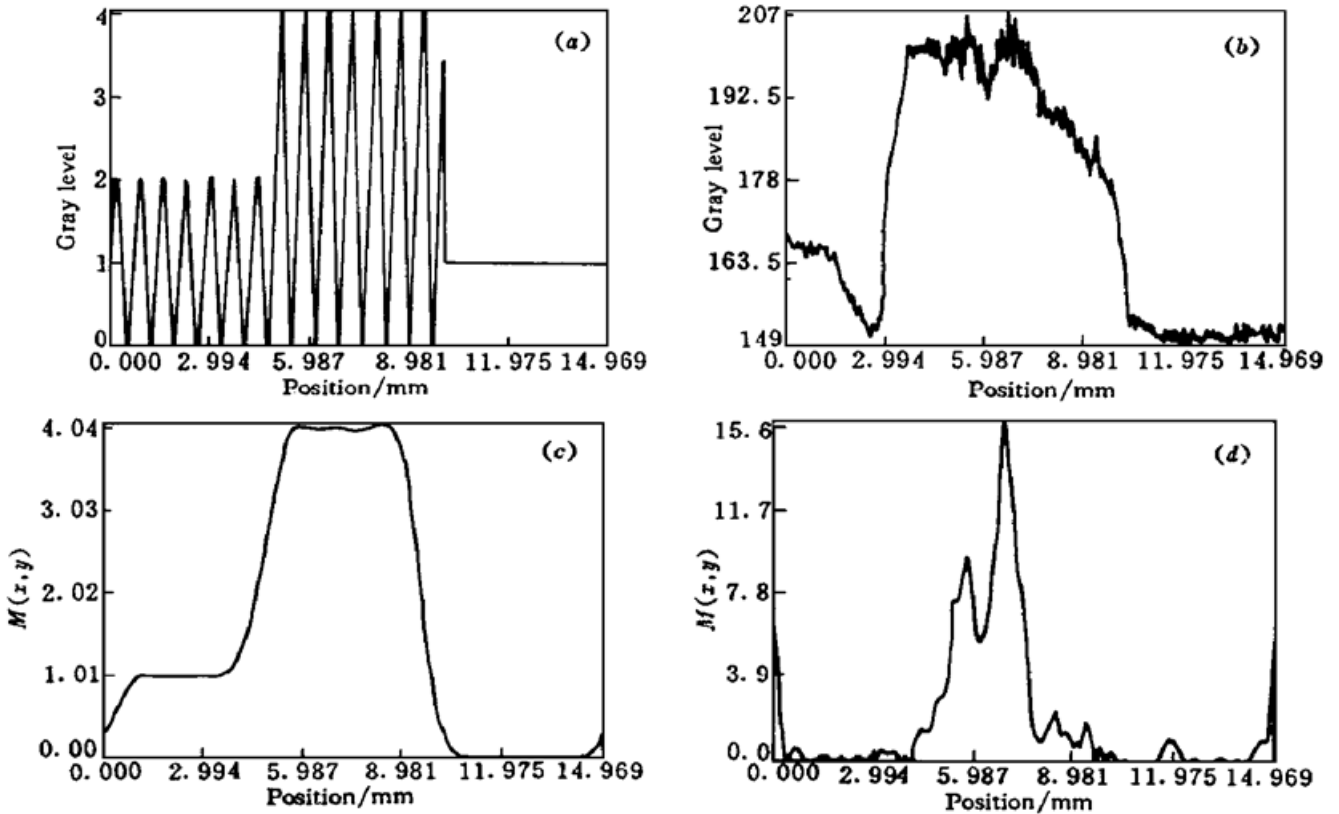


图 2

(a) 模拟正弦条纹曲线, 纵坐标为图像灰度级(取值范围 0~ 255); (b) 图 1 中实测条纹图的一行(y 取固定值), 纵坐标为图像灰度级(取值范围 0~ 255); (c) 图 2(a) 中模拟正弦条纹的计算调制强度, 纵坐标为用公式(1)~ (4) 计算的 $M(x, y)$, y 取固定值; (d) 图 2(b) 中实测条纹曲线的计算调制强度, 纵坐标为用公式(1)~ (4) 计算的 $M(x, y)$, y 取固定值

Fig. 2

(a) Simulated sinusoid fringe curve; (b) One line curve from the deformed grating pattern of Fig. 1; (c) Computed fringe modulation intensity of the curve in Fig. 2 (a); (d) Computed fringe modulation intensity of the curve in Fig. 2 (b)

3 位相去包裹算法

快速傅里叶变换条纹分析技术所得到的是位相范围限制在 $-\pi$ 到 $+\pi$ 之间的不连续位相图。所谓位相去包裹就是将其转化为连续位相图的计算过程^[1]。在激光干涉测量中, 连续位相图与被测量的激光波面有关。而在三维测量中, 连续位相图又与被测物体表面轮廓有关。传统的去包裹计算方法是逐像素点比较计算^[6]。X. Y. Su 则证明, 只有条纹调制度大于某固定阈值时, 去包裹才是可靠的。我们的算法也利用这个思路。图 3 为图 1 中的变形条纹计算得到不连续位相图。对其进行去包裹计算以说明我们的算法过程:



图 3 未去包裹时物体面形的位相图

Fig. 3 Wrapped phase map of an object

1) 计算条纹图的调制度分布 $M(x, y)$, 过程如前所述;

2) 选择去包裹计算的起始点。假设为 P 点。一般选在条纹对比度较好的区域;

3) 读入 P 点 8 个相邻点的 $M(x, y)$ 值。8 个数值按从大到小的顺序排列。第四个数值作为下一步计算的阈值。构造一个队列, 称为处理队列。将 P 点及其四个数值最大邻居点坐标按 $M(x, y)$ 数值大小顺序压入处理队列;

4) 按处理队列中的坐标对图 3 中的位相图进行去包裹计算, 处理时按先进先出的顺序。每处理一点, 其相邻的 $M(x, y)$ 被排序。大于上一步阈值的未处理像素压入对列;

5) 下一步阈值仍在 8 个相邻的 $M(x, y)$ 数值中确定。一般仍选第四个。但是, 8 个值有 3 个同属未处理且相邻时, 如果它们同时小于上一步阈值, 则可能遇见了位相图不连续边界。此时应冻结阈值;

6) 算法直到队列空时结束。



图 4 本算法去包裹的位相图

(a) 阈值选择合理的情况; (b) 阈值选择过高的情况; (c) 阈值选择过低的情况

Fig. 4

(a) Unwrapped phase map utilizing our algorithm; (b) Unwrapped phase map utilizing our algorithm,

too many valid pixels are discarded; (c) Unwrapped phase map utilizing our algorithm, too many invalid pixels are accepted

在确定下一步的阈值时, 之所以选择 8 个相邻像素中按条纹调制度从大到小排列的第四个, 是因为相邻像素的调制度数值相差不大(除去边界情况), 应取中间的数值。当去包裹计算从对比度差的区域向对比度好的区域进行时, 有更多的相邻像素进入处理队列。每步计算, 阈值有所提高。这样既保证了计算进程优先流向条纹对比度好的区域, 又保证每步有所舍弃。去包裹计算以起始点为源, 呈不规则形状向四周扩张。如水流, 首先淹没条纹调制度较好的区域。在局部, 去包裹计算顺序总是优先处理条纹对比度好的像素, 最后处理或不处理对比度差的像素, 有效地防止了误差的扩展。当流向对比度好的区域时, 有时呈近乎规则直边扩张。流向对比度差的区域时, 进程缓慢且极不规则。对阈值变小有限制是为保证算法能够识别位相图中的不连续及孤立的缺陷点簇。我们的计算实践表明, 在 8 个相邻像素中, 取第三或第四个调制度数值作为下步计算的阈值一般都能取得较好的效果, 如图 4(a) 为取第四个调制度值的计算结果。过高的阈值常使计算仅局限于图像的一部分, 不能充分利用条纹图的所有信息, 有时计算甚至根本不能进行。图 4(b) 为选第二个调制度值为下一步计算阈值的结果。可见三维图中出现了大量孔洞, 计算没有到达边界时就停止了。这是因为每步计算时阈值过大, 太少的像素进入处理队列, 许多有效像素失去了参与计算的机会。图 4(c) 则是选第七个调制度值的情况。此时由于阈值过低, 左眼处出现了误差沿处理方向扩张, 且去包裹计算超越边界到无条纹区域, 形成浪花般随机误差。

4 结果讨论

我们将传统的、逐行从左到右去包裹算法的结果示于图 5 中, 和图 4 中的三个图对比。图 5 中, 佛头像上方及周围出现浪花般误差。在左眼、右腮、右嘴角处各有一道从左到右的裂缝。前一种误差是因为去包裹计算超越边界到了无条纹区域, 形成浪花般随机误差。后一种则是因为孤立像素点或点簇引起去包裹误差沿着计算处理方向(从左至右)扩散。这两种误差在图 4(c) 中虽出现, 但图 5 中的情况更严重。这说明一般情况下, 我们的新算法能够识别无条纹区域, 在边界处终止去包裹计算, 也能够绕过孤立的无效像素点簇不使其误差扩散。

致谢 感谢中国人民解放军第四军医大学提供的资金帮助。

参 考 文 献

- 1 M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(1) : 156~ 160
- 2 J. M. Huntley. Noise-immune phase unwrapping algorithm. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(15) : 3268~ 3270
- 3 D. P. Towers, T. R. Juge, P. J. Bryanston-Cross. Automatic interferogram analysis techniques applied to quasi-heterodyne holography and ESP. *Opt. Lasers in Eng.*, 1991, **14** : 239~ 281
- 4 X. Y. Su, G. von Bally, D. Vukicevic. Phase-stepping grating profilometry: utilization of intensity modulation analysis in complex objects evaluation. *Opt. Commun.*, 1993, **98** : 141~ 150
- 5 Yin Gongjie, Zhu Chuangui, Liu Bo *et al.*. Exact 3-D shape measurement of small-sized objects. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1997, **26**(9) : 841~ 845 (in Chinese)
- 6 R. M. Goldstein, H. A. Zebker, C. L. Werner. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science*, 1988, **23** : 713~ 720

Phase Unwrapping Utilizing an Adaptive Intensity Modulation Threshold Analysis

Yin Gongjie Zhu Chuangui Liu Bo Xue Mingque

(Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068)

Abstract A novel phase unwrapping algorithm, based on intensity modulation analysis and adaptive threshold is presented. It is successfully used to unwrap phase maps in Fourier transform profilometry.

Key words fringe analysis, phase unwrapping, optical metrology

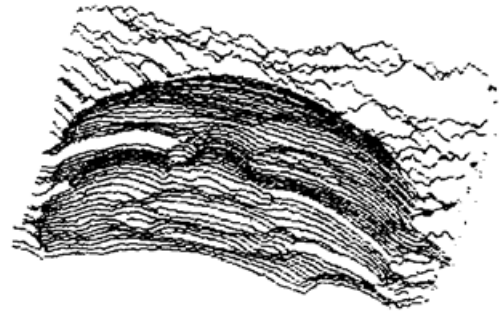


图 5 传统去包裹算法得到的位相图
Fig. 5 Unwrapped phase map by traditional algorithm