

特殊点的两步广义相移干涉相移值提取算法

周志盛^{1,2,3} 董玉明^{1,2,3*} 章逸舟^{1,2,3} 焦国华^{1,2,3} 鲁远甫^{1,2,3} 吕建成^{1,2,3}

¹中国科学院深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518055

²香港中文大学, 香港 沙田 999077

³深圳生物医学光电传感技术工程实验室, 广东 深圳 518055

摘要 提出了一种基于特殊点的两步广义相移干涉相移值提取算法。搜索干涉图中满足特殊要求的点位置并利用相移值和特殊点数据关系计算得到相移值。根据是否需要记录物光和参考光图像分为盲提取和非盲提取两种方式。进行了理论分析、模拟仿真及实验验证。实验结果表明,该算法在速度和精度上达到同类算法的水平,在干涉条纹数少于 1 时相移提取精度优于同类算法。

关键词 相干光学;相移值提取;特殊点;盲提取;非盲提取

中图分类号 TB96 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201643.0508004

Phase Shift Extraction Algorithm by Special Points in Two-Step Generalized Phase-Shifting Interferometry

Zhou Zhisheng^{1,2,3} Dong Yuming^{1,2,3} Zhang Yizhou^{1,2,3} Jiao Guohua^{1,2,3}
Lu Yuanfu^{1,2,3} Lü Jiancheng^{1,2,3}

¹Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen, Guangdong 518055, China

²The Chinese University of Hong Kong, Shatian, Hongkong 999077, China

³Biomedical Engineering Laboratory for Photoelectric Sensing Technology, Shenzhen, Guangdong 518055, China

Abstract A phase shift extraction algorithm based on the special points in two-step generalized phase-shifting interferometry is proposed. This algorithm searches the special points that meet specific requirements and calculates the phase shift via the latter's relationship with these special points. It is divided into two modes according to whether the intensity distributions of the two interference beams are recorded or not. Theoretical analysis, computer simulation and experimental verification are carried out. Experimental results show that this algorithm reaches the same level of other algorithms in speed and accuracy. Moreover, when the interferogram's fringe number is less than one, a better phase shift extraction accuracy can be obtained.

Key words coherence optics; phase shift extraction; special point; blind extraction; non-blind extraction

OCIS codes 120.3180; 120.5050; 120.4630

1 引言

移相干涉测量术在光学高精度面型检测领域发挥着非常重要的作用。传统的移相干涉需要特定的或相等的相移值,对移相器件精度要求很高,且对机械振动和空气扰动非常敏感。为了应对这些不利影响,人们发展了广义相移干涉技术,它不需要预先知道相移值,而是从干涉图中通过特定算法提取相移值并重建相位^[1-4]。广义相移干涉法按照相移步数可以分为多步、三步及两步法,其中两步法具有简单方便、能够有效消除振动影响等优点,得到了广泛关注,而其研究重点在于相移值提取及相位重建算法。最早 Kreis 等^[5]提出一种基于傅里叶变换的两步相移提取算法(傅里叶算法),该方法对噪声比较敏感,且存在相位符号校正的问

收稿日期: 2015-12-03; 收到修改稿日期: 2016-01-05

基金项目: 深圳市技术开发项目(CXZZ20140903152826677)

作者简介: 周志盛(1987-),男,博士后,主要从事光电测量技术方面的研究。E-mail: zs.zhou@siat.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: ym.dong@siat.ac.cn

题。Muravsky 等^[6]提出一种基于干涉图的相关系数的相移提取算法(CC 算法),具有简单快捷的优点,但是在条纹数少于 1 的情况下并不理想,且需要记录物光和参考光强度图。Xu 等^[7]提出一种通过对干涉图的差、和进行平均处理提取未知相移的算法(GPS 算法),需要记录参考光强度图。Niu 等^[8]提出一种基于干涉图内积的商的相移提取算法(QIP 算法),计算简单迅速,在两步相移提取算法中精度较高。

利用物光和(或)参考光强度分布图,能够使算法简单方便,且因为引入更多已知量,精度往往更高。但是光束分时切换记录物光和参考光的强度图,步骤繁琐且容易引入干扰,另一方面在很多情况下例如同轴光路中很难分时记录物光和参考光图像。本文提出一种基于干涉图特殊点的相移值提取算法,根据是否需要记录物光和参考光可分为盲提取和非盲提取两种方式。相比较而言,相移值盲提取算法具有更高的应用价值。进行了理论分析和模拟仿真,并给出了实验结果。

2 算法理论

2.1 基本原理

两步广义相移干涉强度为

$$\begin{cases} I_1(x, y) = A_o^2(x, y) + A_r^2(x, y) + 2A_o(x, y)A_r(x, y)\cos[\varphi(x, y)] \\ I_2(x, y) = A_o^2(x, y) + A_r^2(x, y) + 2A_o(x, y)A_r(x, y)\cos[\varphi(x, y) + \theta] \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $A_o(x, y)$ 、 $A_r(x, y)$ 分别为物光和参考光的振幅分布, $\varphi(x, y)$ 为物参光波相位差分布, θ 为相移值。对于干涉图进行傅里叶变换求取频谱,将零频值置零,去除直流分量,然后傅里叶逆变换得到 $\tilde{I}_1(x, y)$ 和 $\tilde{I}_2(x, y)$, 近似有

$$\begin{cases} \tilde{I}_1(x, y) \approx 2A_o(x, y)A_r(x, y)\cos[\varphi(x, y)] \\ \tilde{I}_2(x, y) \approx 2A_o(x, y)A_r(x, y)\cos[\varphi(x, y) + \theta] \end{cases} \circ \quad (2)$$

对 $\tilde{I}_1(x, y)$ 、 $\tilde{I}_2(x, y)$ 的和差进行变化,有

$$\begin{cases} \tilde{I}_1(x, y) - \tilde{I}_2(x, y) = 4A_o(x, y)A_r(x, y)\sin[\varphi(x, y) + \theta/2]\sin(\theta/2) \\ \tilde{I}_1(x, y) + \tilde{I}_2(x, y) = 4A_o(x, y)A_r(x, y)\cos[\varphi(x, y) + \theta/2]\cos(\theta/2) \end{cases} \circ \quad (3)$$

令 $p = [\tilde{I}_1(x, y) - \tilde{I}_2(x, y)] / [\tilde{I}_1(x, y) + \tilde{I}_2(x, y)]$, 有

$$p = \tan[\varphi(x, y) + \theta/2] \tan(\theta/2). \quad (4)$$

只要 $\varphi(x, y)$ 变化范围足够大,肯定存在使 p 趋向 $\pm\infty$ 的点 (x_m, y_m) , 在这些点上 $\varphi(x_m, y_m) + \theta/2 = \pm\pi/2 \pm k\pi$, k 为非负整数。以 $\varphi(x_m, y_m) + \theta/2 = \pi/2$ 为例,有

$$\begin{cases} I_1(x_m, y_m) = A_o^2(x_m, y_m) + A_r^2(x_m, y_m) + 2A_o(x_m, y_m)A_r(x_m, y_m)\sin(\theta/2) \\ I_2(x_m, y_m) = A_o^2(x_m, y_m) + A_r^2(x_m, y_m) - 2A_o(x_m, y_m)A_r(x_m, y_m)\sin(\theta/2) \end{cases} \circ \quad (5)$$

从而有

$$\begin{cases} [I_1(x_m, y_m) - I_2(x_m, y_m)] / 2 = 2A_o(x_m, y_m)A_r(x_m, y_m)\sin(\theta/2) \\ [I_1(x_m, y_m) + I_2(x_m, y_m)] / 2 = A_o^2(x_m, y_m) + A_r^2(x_m, y_m) \end{cases} \circ \quad (6)$$

当 $A_o(x, y)$ 与 $A_r(x, y)$ 相差不大时,有 $[A_o(x, y) - A_r(x, y)]^2 \ll 2A_o(x, y)A_r(x, y)$, 可以近似认为 $2A_o(x_m, y_m)A_r(x_m, y_m) = A_o^2(x_m, y_m) + A_r^2(x_m, y_m)$, 所以有

$$\theta = 2 \times \arcsin\{ [I_1(x_m, y_m) - I_2(x_m, y_m)] / [I_1(x_m, y_m) + I_2(x_m, y_m)] \}. \quad (7)$$

为了消除噪声和误差的影响,同时为了减弱以上的各种近似处理的影响,设置阈值 p_0 , 对于所有 $p > p_0$ 的点 S_i , 认为 $\varphi(x, y) + \theta/2 = \pm\pi/2 \pm k\pi$ 。利用(7)式计算得到 θ_i , 然后取平均得到

$$\theta = \sum_1^M \theta_i / M. \quad (8)$$

求出相移值后,需要测量的相位差可以通过下述方式得到^[9]

$$\varphi(x, y) = \arctan\{ [\tilde{I}_1(x, y)\cos\theta - \tilde{I}_2(x, y)] / \tilde{I}_1(x, y)\sin\theta \}. \quad (9)$$

上述算法不需要知道物光和参考光的强度分布,属于一种盲提取方式。如果记录了物光和参考光的强

度图,在(2)式以及(6)式中可以用实际背景光和调制度取代近似,得到准确值,即

$$\begin{cases} A_o^2(x, y) + A_r^2(x, y) = I_o(x, y) + I_r(x, y) \\ 2A_o(x, y)A_r(x, y) = 2\sqrt{I_o(x, y)I_r(x, y)} \end{cases} \quad (10)$$

这种需要记录物光和参考光的强度图的算法,属于一种非盲提取方式^[6,10]。为描述方便,盲提取和非盲提取方式分别称为 SVP 算法和 SVP-R 算法。

2.2 有效性分析

SVP 算法存在两个近似,使算法的有效性变得不可靠。首先 $A_o(x, y)$ 、 $A_r(x, y)$ 不一定是常值,事实上它们一定是变化的,所以对干涉图简单地去除直流分量并不能去除背景。其次 $[A_o(x, y) - A_r(x, y)]^2 \geq 0$, 意味着 $A_o^2(x, y) + A_r^2(x, y) \geq 2A_o(x, y)A_r(x, y)$, 由(7)式得到的 θ 在理论上是一个有偏估计。下面对此进行分析。为描述方便,将干涉图强度分布重新写为

$$\begin{cases} I_1(x, y) = a_0 + \Delta a(x, y) + b(x, y)\cos[\varphi(x, y)] \\ I_2(x, y) = a_0 + \Delta a(x, y) + b(x, y)\cos[\varphi(x, y) + \theta] \end{cases} \quad (11)$$

通过傅里叶变换去除直流分量后强度分布为

$$\begin{cases} \tilde{I}_1(x, y) = \Delta a(x, y) + b(x, y)\cos[\varphi(x, y)] \\ \tilde{I}_2(x, y) = \Delta a(x, y) + b(x, y)\cos[\varphi(x, y) + \theta] \end{cases} \quad (12)$$

对 p 有

$$p = \frac{b(x, y)\sin[\varphi(x, y) + \theta/2]\sin(\theta/2)}{\Delta a(x, y) + b(x, y)\cos[\varphi(x, y) + \theta/2]\cos(\theta/2)} \quad (13)$$

对 p 趋向 $\pm\infty$ 的点 (x_m, y_m) , 并不存在 $\varphi(x_m, y_m) + \theta/2 = \pm\pi/2 \pm k\pi$ 的关系, 而是满足 $b(x_m, y_m)\cos[\varphi(x_m, y_m) + \theta/2]\cos(\theta/2) = -\Delta a(x_m, y_m)$ 。有

$$\begin{aligned} q &= [I_1(x_m, y_m) - I_2(x_m, y_m)] / [I_1(x_m, y_m) + I_2(x_m, y_m)] = \\ &= \frac{b(x_m, y_m)\sin[\varphi(x_m, y_m) + \theta/2]\sin(\theta/2)}{a_0 + \Delta a(x_m, y_m) + b(x_m, y_m)\cos[\varphi(x_m, y_m) + \theta/2]\cos(\theta/2)} = \\ &= \frac{b(x_m, y_m)\sin[\varphi(x_m, y_m) + \theta/2]\sin(\theta/2)}{a_0} \end{aligned} \quad (14)$$

当 $|\Delta a(x_m, y_m)| \ll a_0$ 时, $\sin[\varphi(x_m, y_m) + \theta/2] \approx 1$ 。将物光和参考光振幅按照直流量和变化量分开,即写成 $A_o(x, y) = A_{o0} + \Delta A_o(x, y)$, $A_r(x, y) = A_{r0} + \Delta A_r(x, y)$, 代入(14)式中整理化简得到

$$q = \frac{2A_{o0}A_{r0} + 2A_{o0}\Delta A_r + 2\Delta A_oA_{r0} + 2\Delta A_o\Delta A_r}{A_{o0}^2 + A_{r0}^2} \sin(\theta/2) \quad (15)$$

假设物光和参考光的振幅变化是随机的,而且变化的均值为 0,对足够多的点取平均(这些点上 $p > p_0$), q 应该趋向于期望值,即

$$q = \frac{2A_{o0}A_{r0}}{A_{o0}^2 + A_{r0}^2} \sin(\theta/2) \quad (16)$$

所求得的相移值 θ_e 与真值 θ 的关系为

$$\theta_e = 2 \times \arcsin \left[\frac{2A_{o0}A_{r0}}{A_{o0}^2 + A_{r0}^2} \sin(\theta/2) \right] \quad (17)$$

(17)式表明该方法获得的相移值精度与物光、参考光振幅分布的直流量有关。当两者相同时,理论上能够把相移值准确提取;两者差别越大,相移值提取误差越大。实际干涉测量中,为了提高干涉条纹的对比度,一般都会调整光束能量,使物光和参考光的强度相等或相近,所以上面的约束天然地在干涉测量术上得到缓解。在一些物光衰减、散射严重的场合,物光和参考光强度差别较大,该方法是否可行就要取决于测量精度要求。

3 模拟仿真

利用计算机仿真来测试 SVP 算法效果。模拟 CCD 像素分辨率为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$, 像元尺寸为 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ 。物光波分布为 $A_o(x, y) = \exp[-(x^2 + y^2)/2\sigma_o^2] + A_{o0}$, $A_{o0} = 7$, $\sigma_o = 0.02$ 。参考光波分布

为 $A_r(x, y) = \exp[-(x^2 + y^2)/2\sigma_r^2] + A_{r0}$, $A_{r0} = 8, \sigma_r = 0.02$ 。物参光波相位差 $\varphi(x, y) = \lambda \times 2\pi [3(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]/25$, λ 为激光波长 532 nm, $x_0 = 150$ pixel, $y_0 = 170$ pixel。利用 Matlab 的 AWGN 函数向干涉强度图中添加高斯白噪声, 信噪比为 20 dB。相移值分别设为 0.4、0.8、1.2、1.6、2.0 rad。移相前后干涉强度图分别如图 1(a) 和图 1(b) (相移值为 1.2 rad) 所示。物参光光滑分布的相移提取值结果如表 1 的 θ_{es} 所示。相移提取值的最大相对误差为 0.05, 最小相对误差为 0.03。

上述物光和参考光振幅分布是光滑的, 事实上因为各种光学表面的漫反射、散射作用, 物光和参考光斑大多数是随机分布的。为了与真实过程更接近, 从实验中采集了两张物光和参考光的强度分布图 I_o 和 I_r , 从中计算出新的物光和参考光振幅分布, $A_o(x, y) = [\sqrt{I_o(x, y)} - \langle \sqrt{I_o(x, y)} \rangle] + A_{o0}$, $A_r(x, y) = [\sqrt{I_r(x, y)} - \langle \sqrt{I_r(x, y)} \rangle] + A_{r0}$, $\langle \rangle$ 代表取平均。同样向生成的干涉强度图中添加高斯白噪声, 信噪比为 20 dB。移相前后干涉强度图分别如图 1(c) 和图 1(d) (相移值为 1.2 rad) 所示。物参光光滑分布的相移提取值结果如表 1 的 θ_{ed} 所示。相移提取值的最大相对误差为 0.03, 最小相对误差为 0.01。

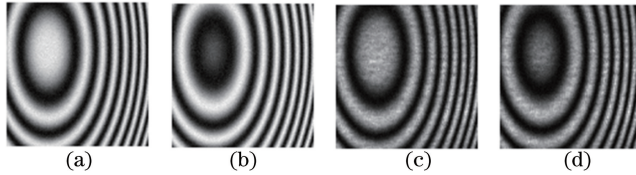


图 1 仿真移相前后干涉强度图。移相(a)前、(b)后光滑分布的干涉光束; 移相(c)前、(d)后散射分布的干涉光束

Fig. 1 Simulated interferograms before and after phase-shifting. Interference beams with smooth distribution (a) before and (b) after phase shift; interference beams with diffusing distribution (c) before and (d) after phase shift

表 1 物参光光滑分布和散射分布的相移提取值

Table 1 Extracted phase shift of interference beams with smooth and diffusion distributions

Parameter	Value				
θ/rad	0.40	0.80	1.20	1.60	2.00
θ_{es}/rad	0.42	0.82	1.23	1.65	2.07
θ_{ed}/rad	0.41	0.81	1.19	1.62	2.01

对不同 A_{o0} 、 A_{r0} 组合进行仿真实验, 其中 $A_{o0} = 7$ 固定不变, A_{r0} 从 2 变化到 14。相移值 θ 为 1.2 rad。相移提取值与(17)式比较。结果如表 2 所示。相位提取值 θ_e 基本与(17)式相吻合, 该结果证明了(17)式可以作为 SVP 算法相移提取值 θ_e 的一个估计。表 2 另一方面说明在 A_{r0} 和 A_{o0} 相差较大时, SVP 算法仍然可以获得一个比较好的相移提取值, 该算法在对物参光强度的要求有一定裕度, 具有较强生命力。当强度差异值相等时, 参考光比物光强度大更有利于提取精度, 而实际中参考光一般比物光要强, 这点两者也是吻合的。

表 2 不同 A_{r0} 的相移提取值和理论提取值

Table 2 Extracted phase shift and theoretical estimated value of different A_{r0}

$A_{r0} (A_{o0} = 7)$	2	4	6	8	10	12	14
θ_e/rad	0.57	1.00	1.19	1.21	1.14	1.04	0.96
$2 \times \arcsin \left[\frac{2A_{o0}A_{r0}}{A_{o0}^2 + A_{r0}^2} \sin(\theta/2) \right] / \text{rad}$	0.60	1.01	1.18	1.20	1.12	1.03	0.94

对 SVP、CC、GPS、傅里叶、QIP 几种算法进行了仿真, 结果如图 2 所示。图 2(a) 为不同相移值时各种算法的相移提取值误差。图 2(b) 为不同相移值时各种算法的重建缠绕相位的均方根(RMS)误差。就相移提取值而言, 几种算法差异较小, 在相移值小于 0.5 时误差较大, 相移值大于 2.3 后开始抖动。对于重建相位的 RMS 误差, 除了傅里叶算法外, 其他几种算法都具有两端误差大、中间误差小的特点。三种盲提取算法中, SVP 和 QIP 算法的表现几乎相同, RMS 误差整体比傅里叶算法要小。

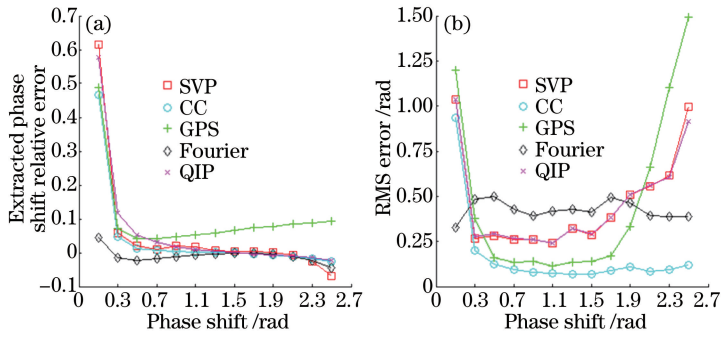


图 2 不同算法的仿真结果比较。(a) 相移提取值相对误差；(b) 重建相位 RMS 误差

Fig. 2 Simulated results of different algorithms. (a) Relative error of extracted phase shift; (b) RMS error of reconstructed phase

4 实验验证

实验系统原理框架如图 3 所示。系统采用迈克耳孙干涉光路，一路光束通过透明物体后被反射镜反射再次通过物体作为物光进入互补金属氧化物半导体(CMOS)相机，另一路光束通过光楔后被反射镜反射再次通过光楔作为参考光进入 CMOS 相机。在垂直光束的方向上(图中蓝色箭头所示)移动光楔,参考光束的光程整体改变,从而实现相移功能^[11-12]。物体采用一个普通的玻璃双凸透镜。激光波长为 632.8 nm, CMOS 的像元尺寸为 2.5 μm , 像素分辨率为 2080 pixel \times 1552 pixel, 从中截取 512 pixel \times 512 pixel 的像素区域作为干涉强度图。为了使结果更加自然, 光路中并没有加入光强调节器件去刻意调整物参光强度分布。

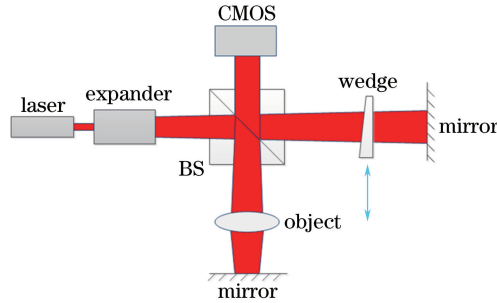


图 3 实验系统原理框架图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental arrangement

采用 SVP 和 SVP-R 算法进行相移提取和相位重建, 并且与 CC、GPS、傅里叶、QIP 等算法进行比较。根据图 2 结果, CC 算法采用记录物光和参考光进行计算, 精度最高, 所以将 CC 算法作为参照值。结果如表 3 所示。几种算法的相移提取值差异都不大, SVP-R 和 SVP 的相移提取值与 CC 算法非常接近。图 4 显示了不同算法下重建缠绕相位的二维分布。CC 和 SVP-R 算法因为采用记录物光和参考光进行计算, 相位分布非常接近, 两者间 RMS 误差低至 0.04 rad, 这也证明了 SVP-R 算法的可行性。3 种盲解调算法中, SVP 和 QIP 的 RMS 误差非常接近, 而傅里叶算法的 RMS 误差非常大, 这是因为没有也很难充分对相位符号进行校正。从运行时间考虑, 傅里叶算法因为要对相位进行大量校正, 花费时间最长, SVP-R 算法最快, CC、SVP、QIP 算法运行时间没有明显差异。

表 4 显示了不同相移值下 SVP-R、SVP 算法的相移提取值 θ_{er} 和 θ_{e} 。根据记录的物光和参考光图像, 计算出 $A_{\text{o0}} = 5.647, A_{\text{r0}} = 6.956$, 将(17)式结果与两种算法比较。相移值小于 2 时, SVP 算法和 SVP-R 算法结果差异非常小, 而且与(17)式比较吻合。相移值大于 2 时, SVP 算法误差增大。图 5 显示了不同相移值下的 SVP 算法解缠绕相位。相移值小于 2 时, SVP 算法能够较好地重建相位, 相移值大于 2 时, 重建相位误差明显增大, 该结果与仿真结果相符合。

表 3 不同算法的相移提取值、重建相位 RMS 误差及处理时间

Table 3 Extracted phase shift, RMS error of reconstructed phase and processing time of different algorithms

	CC	SVP-R	GPS	SVP	Fourier	QIP
I_o	✓	✓				
I_r	✓	✓	✓			
θ_e/rad	1.54	1.59	1.49	1.55	1.50	1.54
RMS error /rad		0.04	0.25	0.26	0.62	0.26
Time /s	0.08	0.05	0.12	0.09	0.56	0.09

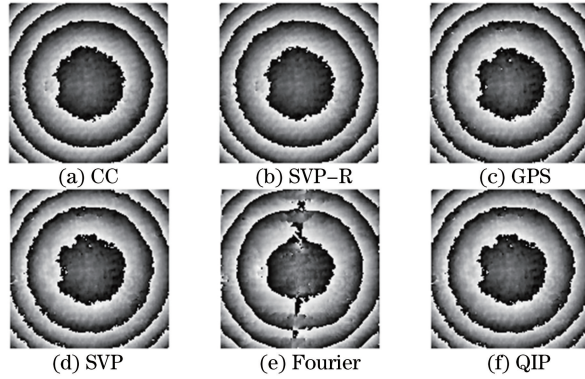


图 4 不同算法的重建缠绕相位

Fig. 4 Reconstructed wrapped phase of different algorithms

表 4 不同相移值下 SVP-R, SVP 算法的相移提取值结果

Table 4 Extracted phase shift of SVP and SVP-R algorithms under different phase shifts

Paramter	Value					
θ_{eR}/rad	0.242	0.703	1.11	1.59	1.91	2.23
θ_e/rad	0.236	0.632	1.07	1.55	1.87	1.91
$2 \times \arcsin \left[\frac{2A_{o0}A_{r0}}{A_{o0}^2 + A_{r0}^2} \sin(\theta_{eR}/2) \right] / \text{rad}$	0.237	0.687	1.08	1.55	1.85	2.15

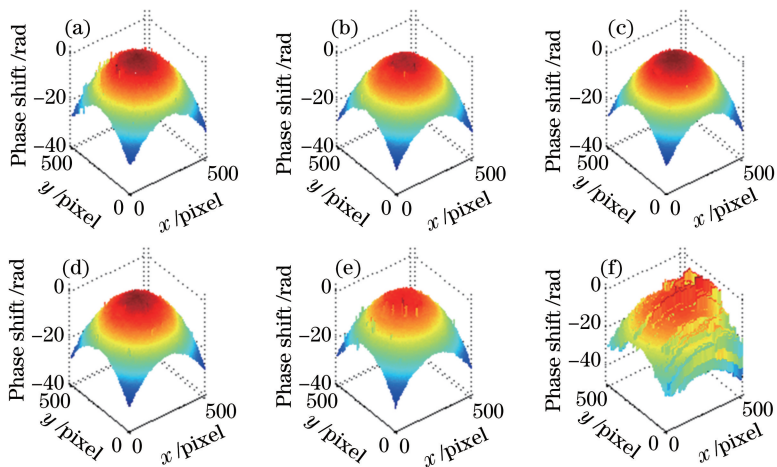


图 5 不同相移值下 SVP 算法解缠绕相位。相移值分别为(a) 0.24 rad;(b) 0.70 rad; (c) 1.11 rad;(d) 1.59 rad;(e) 1.91 rad;(f) 2.51 rad

Fig. 5 Unwrapped phase of SVP algorithm under different phase shifts. Phase shift is (a) 0.24 rad; (b) 0.70 rad; (c) 1.11 rad; (d) 1.59 rad; (e) 1.91 rad; (f) 2.51 rad

SVP 算法在基本原理推导中并没有对干涉图条纹数进行限定,意味着在条纹数非常少时也可能获得较好效果。取移相前后两幅干涉图,从原始大小 512 pixel × 512 pixel 逐渐截取部分图像,最小图像大小为

64 pixel×64 pixel,干涉图中条纹数从5条减少到不足1条,考察不同算法的相移提取值的变化。结果如图6所示。当图像大小范围在512 pixel×512 pixel到232 pixel×232 pixel时,干涉图中条纹数量大于1,几种算法的相移提取值差异很小,当图像大小范围变为176 pixel×176 pixel到64 pixel×64 pixel时,干涉图中条纹数量等于或小于1,CC、傅里叶、QIP算法的相移提取值都发生剧烈跳动,但是SVP-R及SVP算法的相移提取值保持稳定,说明这种方法在条纹数少于1时也可以获取较高精度的相移提取值。

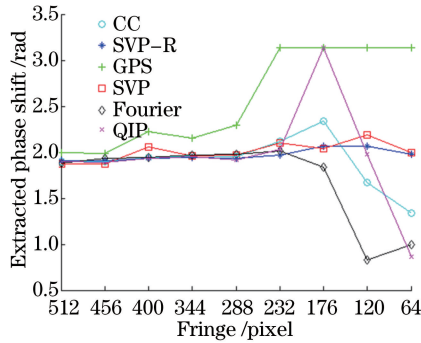


图6 干涉图条纹数变化时不同算法的相移提取值

Fig. 6 Extracted phase shift of different algorithms when the fringe number changes

5 结 论

提出了一种基于特殊点的两步广义相移干涉相移值提取算法。根据是否需要记录物光和参考光可分为盲提取和非盲提取两种方式。实验证明,对于两种方式在运算速度和相移值提取精度上都达到了同类算法的水平,而且当干涉图中条纹数少于1时,大多数已有算法基于其理论假设限制,相移提取精度明显下降,但是所提算法仍然能够保持较好精度。可应用于面型变化范围在波长量级的器件检测,一个典型的应用是迈克耳孙测风干涉仪的双平面镜平行度要求为几分之一甚至十分之一波长,现有的基于条纹数大于1的相移算法已经很难使用。其不足之处在于如果采用盲提取的方式,相移值提取精度取决于物光和参考光振幅分布的差异,当两者差异很大例如测量漫反射物体时误差较大,这种差异可以通过光强调节器件进行补偿,但是会额外增加系统复杂度。

参 考 文 献

- Wen Gang, Su Dongqi, Sui Yongxin, *et al.*. Calibration of Fizeau wavelength-tuned phase-shifting interferometer based on two-frame differential average phase-shifting algorithm[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1108004.
文 刚, 苏东奇, 隋永新, 等. 基于两帧差分平均移相算法标定斐索型波长移相干涉仪[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1108004.
- Deng Lijun, Yang Yong, Shi Binchuang, *et al.*. Two-step phase-shifting digital holography based on extraction of phase shift[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209014.
邓丽军, 杨 勇, 石炳川, 等. 基于相移量提取的两步相移数字全息术[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209014.
- Fan Jinping, Xu Xiaofei, Zhang Wangping, *et al.*. Multi-wavelength phase-shifting interferometry based on principal component analysis[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(10): 1008004.
范金坪, 徐小飞, 张望平, 等. 一种基于主成分分析的多波长相移干涉测量方法[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1008004.
- Wang Xuanze, Yang Liangen, Zhai Zhongsheng, *et al.*. An optimal method of calculation phase shift interference step based on inter-pixel algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1112008.
王选择, 杨练根, 翟中生, 等. 一种基于内像素计算相移干涉步长的优化方法[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1112008.
- Thomas Kreis. Digital holographic interference-phase measurement using the Fourier-transform method[J]. J Opt Soc Am A, 1986, 3(6): 847-855.
- L I Muravsky, O P Ostash, A B Kmet, *et al.*. Two-frame phase-shifting interferometry for retrieval of smooth surface and its displacements[J]. Opt Laser Eng, 2011, 49: 305-312.
- X F Xu, L Z Cai, Y R Wang, *et al.*. Simple direct extraction of unknown phase shift and wavefront reconstruction in

generalized phase-shifting interferometry: Algorithm and experiments[J]. *Opt Lett*, 2008, 33(8): 776-778.

- 8 Wenhui Niu, Liyun Zhong, Peng Sun, *et al.*. Two-step phase retrieval algorithm based on the quotient of inner products of phase-shifting interferograms[J]. *J Opt*, 2015, 17: 085703.
- 9 Jian Deng, Hankun Wang, Fengjie Zhang, *et al.*. Two-step phase demodulation algorithm based on extreme value of interference[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(22): 4669-4671.
- 10 Cheng-Shan Guo, Bei Sha, Yi-Yan Xie, *et al.*. Zero difference algorithm for phase shift extraction in blind phase-shifting holography[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(4): 813-815.
- 11 Jae Bong Song, Yun Woo Lee, In Won Lee, *et al.*. Simple phase-shifting method in a wedge-plate lateral-shearing interferometer[J]. *Appl Opt*, 2004, 43(20): 3989-3992.
- 12 Reena Disawal, Jitendra Dhanotia, Shashi Prakash. Phase-shifting lateral shearing interferometry using wedge-plate and interferometric grating[J]. *Appl Opt*, 2014, 53(31): 7534-7539.