

文章编号: 0253-2239(2009)03-0733-05

基于统计逼近的 Stoilov 改进算法

许幸芬 曹益平

(四川大学光电科学技术系, 四川 成都 610064)

摘要 Stoilov 算法是近几年提出的一种相移量任意的等步长相移算法,它无须知道相移量的大小,只要保证相移步长相等,就可以解算出物体表面的截断相位,因而在三维测量领域中倍受人们关注。但 Stoilov 算法的表达式过分依赖采集的变形条纹图像的光强,存在对光强的减法、除法和开方等运算,使相位计算时在某些位置会出现分子分母为零,开方出现复数等奇异现象,会导致算法算错或者相位展开出错,致使三维重构表面会出现畸变、失真,甚至无法进行三维重构。因此提出了一种基于统计逼近的方法对 Stoilov 算法进行修正,有效抑制了奇异现象引入的相位误差,提高了三维测量精度。实验验证了其算法的有效性和适用性。

关键词 信息光学; 三维测量; Stoilov 算法; 统计逼近; 相位误差; 算法改进

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092903.0733

An Improved Stoilov Algorithm Based on Statistical Approach

Xu Xingfen Cao Yiping

(Department of Opto-Electronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract Stoilov algorithm is a recently developed equivalent step algorithm whose phase step is arbitrary. The value of the phase shifting needn't be known but phase step must remain invariable. The wrap phase caused by measured object can be derived correctly. So it is paid wide attention in three-dimensional measurement field. However, Stoilov algorithm excessively depends on the intensity of the image, and subtraction, division and extraction must be operated in its mathematical model. Imaging process will cause some abnormal phenomena somewhere such as the zeroth denominator and complex phase, which lead to the incorrect phase calculation or incorrect phase unwrapping. The reconstructed object will be misshapen or anamorphic, or even the measured object can't be reconstructed. So a new method based on the statistical approach to improve Stoilov algorithm has been proposed. By this method the phase error brought by the abnormal phenomena is restrained and the precision of three-dimensional measurement is improved. Experiments show its feasibility and validity.

Key words information optics; three-dimensional measurement; Stoilov algorithm; statistical approach; phase error; algorithm improvement

1 引 言

在三维测量中,相移技术^[1]可分为定步长相移算法和等步长相移算法^[2~4]。定步长相移算法不仅要求控制步长量,而且相移总量是封闭的,通常情况下为 2π 的整数倍^[5]。如果只控制步长量相等,而相移总量不是 2π 的整数倍,相位计算就会出错,给测

量带来较大的误差。等步长相移算法中的 Stoilov 算法只要保证每次相移步长相等,不要求相移总量是 2π 的整数倍,就可以算出物体表面的截断位相,弥补了定步长相移算法的不足。有关文献表明其算法有着明显的应用优势^[1,6~8],在三维领域中备受人们关注。但 Stoilov 算法过分依赖条纹的灰度,在进

收稿日期: 2008-08-06; 收到修改稿日期: 2008-08-29

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z333),四川省科技攻关项目(2006Z01-028)和四川省学术和技术带头人培养基金(07GRC-01)资助课题。

作者简介: 许幸芬(1982-),女,硕士研究生,主要从事三维光学信息处理研究, E-mail: xuxingfen2005@yahoo.cn

导师简介: 曹益平(1962-),男,教授,博士生导师、主要从事光学三维传感,光电信息处理,光机电一体化方面的研究工作。E-mail: caoyiping@mail.sc.cninfo.net

行采集时光强难免会有误差,这就可能会给算法带来误差。特别是 Stoilov 算法表达式中分母和分子中都出现图像相减、相除及整体开方等运算,使计算结果出现一定程度的异常现象,如分母被零除,开方出现复数等,影响了三维重构,如表面出现毛刺、重构图像出现畸变,甚至无法恢复物体。本文提出了一种采用基于统计逼近的方法来优化 Stoilov 算法,有效抑制了上述异常现象对三维重构的影响,获得了比较满意的结果。

2 基于 Stoilov 算法的三维测量原理

相位测量轮廓术(PMP)是一种三维测量方法^[9-10],Stoilov 算法是近几年提出的一种等步长相移算法,它无须知道每次相移的大小,只要保证每次相移步长相等就可以算出物体表面的截断位相,在三维测量中备受人们关注。图 1 是基于 Stoilov 算法的三维测量原理。

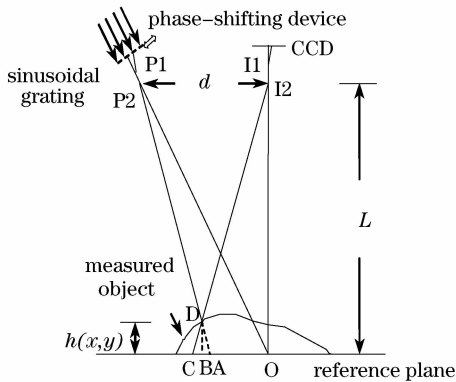


图 1 PMP 原理图

ig. 1 Principle of phase measurement profilometry (PMP)

投影的正弦光栅相位为 $\phi = -2\Phi_0 + (n-1)\Phi_0$, ($n = 1, 2, 3, 4, 5$)。相移量为 Φ_0 , 要求步长相移相等。由 CCD 采集对应的五帧变形条纹 $I_n(x, y)$ 为

$$I_n(x, y) = R(x, y) \{ A(x, y) + B(x, y) \cos[\Phi(x, y) + \varphi] \}, \quad (1)$$

$(n = 1, 2, 3, 4, 5)$

式中 $R(x, y)$ 表征物体表面的反射率, $A(x, y)$ 表征背景光强度, $B(x, y)$ 表征条纹对比度, $\Phi(x, y)$ 表征受物体高度调制的相位。可以从(1)式表征的 5 帧相移条纹中计算出相位函数, 即

$$\Phi = \arctan \left[\frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_1 - I_5} \sin \Phi_0 \right], \quad (2)$$

$$\sin \Phi_0 = \sqrt{1 - \left[\frac{I_1 - I_5}{2(I_2 - I_4)} \right]^2}. \quad (3)$$

因(2)式是反正切计算,使相位被截断在 $-\pi \rightarrow$

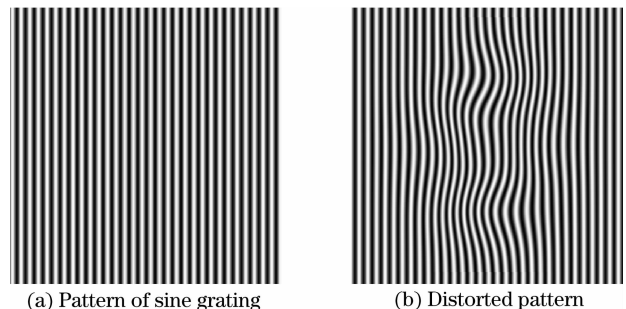
π 之间,相位是离散的。实际上物体表面的相位是连续分布的,故需要对截断相位进行展开,如果采用校准的方法建立起相位与高度之间的映射关系^[11],就可以重构物体高度分布 $h(x, y)$ 。

3 Stoilov 算法的奇异特征分析

从(3)式可看出 $\sin \Phi_0$ 依赖采集图像的光强,由于 CCD 采集的光强表现为灰度值,只能是 $0 \sim 255$ 的整数,因而会引入数值化误差;其次,在图像采集时,当物体高度变化较大时会出现变形条纹错位现象,造成不同相移图像对应像素点的灰度突跳;环境光的随机噪声也会影响采集图像的准确性。由分析可知,在计算 $\sin \Phi_0$ 时会存在一定的误差,甚至会出现异常现象。为了便于分析,对大小 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 呈 peaks 函数分布的三维物体用 Stoilov 算法进行了数值模拟。图 2(a)为模拟的投影正弦光栅,其周期为 8 pixel,该光栅按照相移量 Φ_0 为 $2\pi/5$ 等步距相移五次,投影在最大高度为 8 的上述物体上,可由 CCD 对应采集到五帧受物体高度调制的变形条纹图,如图 2(b)是其中一帧变形条纹图。数值模拟中,已知 $\sin \Phi_0 = \sin(2\pi/5) = 0.9511$ 是一个恒值。但如果 $\sin \Phi_0$ 按照(3)式计算,可能不再是一个恒值,会出现下面四种奇异点的情况:

奇异点 1:对 CCD 采集的五帧图像按照(3)式计算,结果发现在某些点存在 $I_2 = I_4$, 即式(3)中出现了分母为零的现象。表 1 是提取的其中 20 个出现分母为零的奇异点。不管 I_1 和 I_5 的取值, $\sin \Phi_0$ 均无意义,这些奇异点的存在,导致对应点位置的相位无意义,直接影响相位测量和相位展开,严重时会造成无法实现三维重构。

奇异点 2:由于(3)式中存在开方,发现在开方计算时确实有出现复数的现象,令



(a) Pattern of sine grating

(b) Distorted pattern

图 2 投影正弦光栅和变形光栅图

Fig. 2 The projected sinusoidal grating and captured distorted pattern

表 1 $\sin \Phi_0$ 无意义的情况 ($I_2 = I_4$)Table 1 Status at nonsensical $\sin \Phi_0$ ($I_2 = I_4$)

N	x/pixel	y/pixel	$I_2(I_4)/\text{grey}$
1	10	111	68
2	14	167	68
3	16	99	107
4	18	175	68
5	117	129	107
6	24	183	68
7	27	87	68
8	40	195	107
9	48	155	68
10	108	27	107
11	88	74	107
12	90	174	68
13	228	117	68
14	115	111	107
15	210	137	68
16	194	172	107
17	192	142	68
18	194	167	107
19	191	194	107
20	184	81	68

表 2 $\sin \Phi_0$ 出现复数的情况 ($s > 1$)Table 2 Status at complex $\sin \Phi_0$ ($s > 1$)

N	x/pixel	y/pixel	s
1	1	6	1.49
2	11	182	1.25
3	11	190	1.26
4	15	104	1.04
5	16	104	1.08
6	18	86	1.14
7	3	94	1.94
8	4	6	1.94
9	4	22	1.94
10	26	38	1.42
11	95	64	1.13
12	143	83	1.19
13	192	46	1.52
14	206	222	1.53
15	209	22	1.49
16	210	100	1.04
17	212	181	1.09
18	239	143	1.34
19	240	190	1.64
20	238	103	1.86

$$s = \left[\frac{I_1 - I_5}{2(I_2 - I_4)} \right]^2, \quad (4)$$

即出现了 $s > 1$ 的情况,表 2 是提取的其中 20 个出现 $s > 1$ 的奇异点。这些奇异点的存在,将导致对应点位置的相位出现复数,同样会直接影响相位测量和相位展开,严重时无法实现三维重构。

奇异点 3: 按照(3)式计算分析,同时发现在某些点存在 $I_1 = I_5$ 。此时会使 $\sin \Phi_0$ 恒等于 1,即相移量 Φ_0 恒等于 $\pi/2$,而非事先设置的 $2\pi/5$,出现了严重的相移量计算错误,导致解相时相位存在误差。表 3 是提取的其中 20 个出现 $I_1 = I_5$ 的奇异点。这些奇异点的存在,使三维重构时出现毛刺或者畸变。

表 3 $\sin \Phi_0$ 恒为 1 的情况 ($I_1 = I_5$)Table 3 Status at $\sin \Phi_0 = 1$ ($I_1 = I_5$)

N	x/pixel	y/pixel	$I_1(I_5)/\text{grey}$
1	10	111	139
2	12	107	36
3	10	159	139
4	16	99	36
5	21	179	36
6	25	120	139
7	28	112	139
8	29	187	36
9	32	145	139
10	48	155	139
11	70	115	139
12	73	99	36
13	88	74	36
14	90	174	139
15	95	189	36
16	124	23	139
17	146	192	36
18	159	95	139
19	164	206	139
20	171	202	36

奇异点 4: 在排出了以上出现的三种异常情况,还发现由于(3)式中存在除法,当分母 $2(I_2 - I_4)$ 不为零但是一个相对较小的量,分子 $(I_1 - I_5)$ 出现微小变化时,也会引起除法出现大的变化,从而导致计算相位时引入超大误差。表 4 是提取的其中 20 个出现超大误差的奇异点。这些奇异点的存在,将会导致三维重构出现失真。

上述分析是在没有环境光的影响下进行的。可以看出,即使没有环境光的影响,用 Stoilov 算法进行解相时,总会出现上述四种异常情况,影响了相位测量或相位展开。为此提出了一种基于统计逼近的方法来改进 Stoilov 算法。

表 4 $\sin \Phi_0$ 出现超大误差的情况
Table 4 Status at transnormal $\sin \Phi_0$

N	x /pixel	y /pixel	$\sin \Phi_0$
1	12	49	0.98
2	12	201	0.97
3	19	109	0.98
4	19	149	0.99
5	22	146	0.97
6	22	149	0.99
7	23	154	0.98
8	29	142	0.98
9	32	73	0.97
10	34	110	0.99
11	222	163	0.99
12	225	180	0.98
13	230	196	0.99
14	235	156	0.97
15	237	76	0.99
16	238	100	0.98
17	172	233	0.97
18	172	249	0.97
19	28	134	0.99
20	36	163	0.99

4 Stoilov 改进算法

采用 Stoilov 算法计算 $\sin \Phi_0$ 时,尽管出现了上述四种异常情况,但大部分数还是接近真值的。如能从 $\sin \Phi_0$ 分布中逐步排除上述四种特征的奇异点,并对剩余接近真值的数进行统计逼近,即用这些数的平均值作为逼真值去补偿 $\sin \Phi_0$ 分布中各点值,就可有效避开上述四种异常情况带来的解相误差,也在一定程度上抑制环境光噪声的影响。具体算法如下:

1) 计算 $\Delta_1 = I_2 - I_4$ 。如果 $\Delta_1 = 0$, $\sin \Phi_0$ 标示为一个已知的超出其值域的数 100(表征奇异点 1)。

2) 计算 s 的值。如果 $s > 1$, $\sin \Phi_0$ 标示为另外一个已知的超出其值域的数 200(表征奇异点 2)。

3) 计算 $(I_1 - I_5)$ 。如其值等于 0, $\sin \Phi_0$ 标示为另外一个已知的超出其值域的 300(表征奇异点 3)。

4) 由(3)式计算 $\sin \Phi_0$ 。

5) 依次扫描 $M \times N$ 维的 $\sin \Phi_0$ 数组,将 $0 \leq \sin \Phi_0 \leq 1$ 的元素分别列入一个一维数组 A_0 ,并记录这些元素的个数 K_0 。

6) 计算数组 A_0 中各个元素的平均值 \bar{a}_0 和均方差 δ , 如果 δ 大于预先设置的某一小量 ϵ , 表明数组 A_0 中存在超大误差。将数组 A_0 中与 \bar{a}_0 的差大

于 δ 的元素重新标示为一个已知的超出其值域的数 400(表征奇异点 4)。

7) 判断 A_0 中各个元素中的值是否有 400, 如果有,则从中排除并重排 A_0 , 记录剩余有效元素的个数 K_0 , 返回到 6)。否则说明以上四种奇异点均被排除。将最终的 \bar{a}_0 取代 $\sin \Phi_0$ 数组的所有元素。

8) 由(2)式计算各点的相位。

采用以上基于统计逼近法对 Stoilov 算法计算 $\sin \Phi_0$ 所出现的异常情况进行修正,就可以有效避开上述四种异常情况带来的误差。

5 实验及结果分析

为了验证该改进算法的有效性和实用性,对图 3(a)的一个心形物体进行了实验。投影系统采用 HCP-70X 型数字投影仪,图像传感器采用 1881EXCCD 型摄像头,图像采集卡采用 DT3152 型采集卡。由计算机控制投影仪分别投影五帧具有等步距相移量的正弦光栅到工件表面,由摄像头同步采集相应的变形条纹,经图像采集卡存于计算机内。图 3(b)是按标准 Stoilov 算法重构的三维物体图,由于四种奇异点的存在,三维重构效果很差,图 3(c)是修正了奇异点 1 后得到的三维重构图,相对于图 3(b)有了一定的改善,但重构效果仍然较差。图 3(d)是修正奇异点 1 和 2 后得到的三维重构图。相对于图 3(c)又有了一定的改善,基本能重构三维图,但有畸变和毛刺。图 3(e)是修正了奇异点 1, 2 和 3 后得到三维重构图,可较好的重构了三维物体,但在一些区域还存在畸变,这主要是由超大误差引起的,进一步采用统计逼近的方法修正奇异点 4 后得到如图 3(f)所示的效果良好的三维重构图。由此表明采用统计逼近的方法改进 Stoilov 算法的有效性和适用性。

6 结 论

对 Stoilov 算法进行了系统的分析,由于 Stoilov 算法的表达式依赖所采集的图像灰度,即使没有环境光噪声的影响,解相时也会存在一定的误差,出现了四种奇异现象。而在实际的测量中又会存在环境光噪声等因素的影响,在进行图像采集时图像灰度更难免会有误差,严重影响 Stoilov 算法的解相,采用提出的基于统计逼近的方法对 Stoilov 算法出现的奇异点进行了有效的抑制,优化了 Stoilov 算法,达到了满意的效果,提高了三维测量精度。实验结果验证了该算法的有效性和适用性。

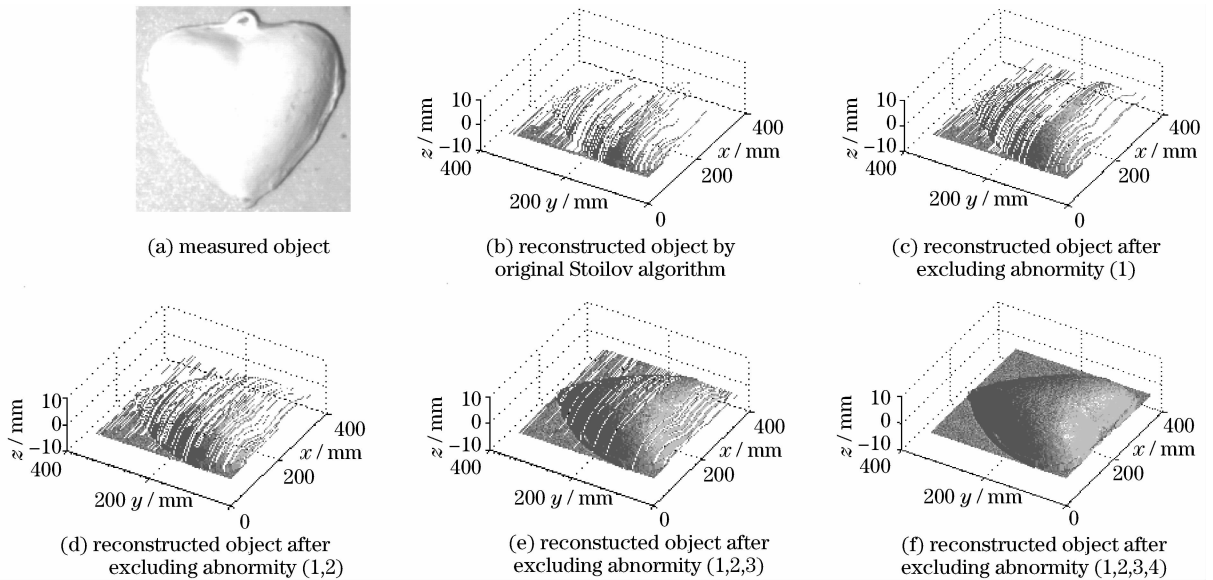


图3 实验结果

Fig. 3 Experimental results

参 考 文 献

- Gai Shaoyan, Da Feipeng. A new fast phase unwrapping method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 260~261
盖绍彦, 达飞鹏. 一种新的快速解相位方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 260~261
- Qian Kemao, Wu Xiaoping. Theoretical analysis of Stoilov algorithm in phase shifting interferometry [J]. *Optical Technique*, 2001, **27**(1): 13~16
钱克矛, 伍小平. 相移技术中五步等步长 Stoilov 算法的性能分析[J]. *光学技术*, 2001, **27**(1): 13~16
- Stiolov G, Dragostinov T. Phase-stepping Interferometry: Five-frame algorithm with an arbitrary step [J]. *Opt. & Lasers in Eng.*, 1997, **28**(1): 61~69
- Hariharan P, Oreb B F, Eiju T. Digital phase-shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation [J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(13): 2054~2056
- Zhiyong Luo, Jialin Dai. Study on an improved five-interferogram phase-shifting algorithm[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(5): 342~343
- Jiang Zhenyu, Miao Hong, Zhang Qingchuan *et al.*. Weighted phase unwrapping based on analysis of intensity modulation for phase-shifting interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1032~1035
蒋震宇, 缪 泓, 张青川 等. 调制度分析在等步长相移法相位展
- Luo Zhiyong, Chen Zhaohui, Gu Yingzi *et al.*. Five-bucket phase-shifting algorithm based on numerical simulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1687~1690
罗志勇, 陈朝晖, 顾英姿 等. 基于数值模拟的高准确度五步相移算法研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1687~1690
- Ling Xiaoping, Su Xianyu. The simulation research on the phase profilometry: influences of the system structural parameters[J]. *Opto-Electronic Engineering*. 1998, **25**(5): 53~57
梁晓萍, 苏显渝. 相位测量轮廓术的仿真研究系统结构参数的影响[J]. *光电工程*, 1998, **25**(5): 53~57
- lü Xiaoxu, Zhong Liyun, Zhang Yimo. A method of phase-shifting measurement by the difference of phase-shifting interferograms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 604~605
吕晓旭, 钟丽云, 张以谟. 通过相移条纹图差测定相移量的方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 604~605
- Li Yong, Su XianYu. New method for system calibration in phase measurement profilometry with large view field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1162~1163
李 勇, 苏显渝. 一种大视场相位轮廓术系统标定方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1162~1163
- Mao Xianfu, Chen Wenjing, Su Xianyu *et al.*. Analysis of new phase and height algorithm in fourier transform profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 226~227
毛先富, 陈文静, 苏显渝 等. 傅里叶变换轮廓术中新相位及高度算法分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 226~227

开中的应用[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1032~1035