

文章编号: 0258-7025(2009)06-1503-05

一种适合在线三维检测的改进算法

钟立俊 曹益平 喻睿智

(四川大学光电科学技术系, 四川 成都 610064)

摘要 引入 Stoilov 算法以让传统相位测量轮廓术(PMP)应用于在线三维检测,但该算法的计算式中含有开方和除法运算,对投射数字光场,CCD 摄像头的数字化非线性误差以及环境光干扰较为敏感,会出现较大的解相误差。为此,提出了一种适合在线三维检测的改进型 Stoilov 算法,通过像素匹配方法标定移动步距 S 和基于标准 PMP 的截断相位解相标定条纹周期长度 L ,再标定出相移量 Δ ,即可修正 $\sin \Delta$ 值,有效减小了原 Stoilov 算法公式的解相误差,提高了在线检测精度。为验证该方法的可行性和有效性,进行了实物测试实验。实验表明,在在线三维测量中,采用原始 Stoilov 算法重构的三维物体出现明显的失真,而采用改进的 Stoilov 算法重构的三维物体具有很好的保真度。

关键词 信息光学; Stoilov 算法; 相位测量轮廓术; 在线三维检测; 相移; 像素匹配

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093606.1503

Improved Algorithm Adapting to on-Line 3D Inspection

Zhong Lijun Cao Yiping Yu Ruizhi

(Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract In order to apply the traditional phase measuring profilometry (PMP) to on-line 3D inspection, Stoilov's algorithm is introduced. However, the formula of the original Stoilov's algorithm includes evolution and division operators, and it is quite sensitive to the digitized influence of digital light projector or CCD camera and the disturbance of the surrounding light, which leads to serious phase computing errors inevitably. Therefore, an improved algorithm based on the Stoilov's algorithm is proposed in detail. The moving step S can be calibrated by pixel matching and the stripe period length L can be calibrated by computing the discrete phase with standard PMP, then the phase-shift quantity Δ can be calibrated, so as the $\sin \Delta$. The phase computing error can be minished in effect and the precision of on-line inspection can be improved. In order to verify its feasibility and validity, the experiments are carried on. They show that in on-line 3D measurement the reconstructed 3D object appears visible distortion with the original algorithm but remains fidelity with the improved algorithm instead.

Key words information optics; Stoilov's algorithm; phase measuring profilometry; on-line 3D inspection; phase-shifting; pixel matching

1 引 言

随着工业自动化程度的不断提高,工业生产流水线的应用越来越多。为了提高生产线生产效率,保证产品质量,需要在生产线上实现产品的在线三维测量,因此,研究适合三维在线检测的高精度检测方法越来越受到人们的关注。相位测量轮廓术^[1,2]

(PMP)是目前采用面结构光三维测量方法中一种精度最高的方法,但在传统的 N 帧 PMP 中,要求每次相移量相等并严格等于 2π 的 N 分之一,由于在线检测中物体的运动影响,难以满足上述要求,不适合在线三维检测。Stoilov 算法^[3]是一种等相移算法,只需保证等步距相移,无需准确知道相移量,如

收稿日期: 2008-08-20; 收到修改稿日期: 2008-10-20

基金项目: 国家 863 计划(2007A01Z333)、国家重大专项(2009ZX02304-13)和四川省学术技术带头人培养基金(07GRC-01)资助课题。

作者简介: 钟立俊(1982-),男,硕士研究生,主要从事三维光学信息处理方面的研究。E-mail: zhongcountry@yahoo.cn

导师简介: 曹益平(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事光学三维传感、光信息处理、光机电一体化等方面的研究。E-mail: caoyiping@mail.sc.cninfo.net (通信作者)

果充分利用被测物体的相对运动,产生等效的等步距相移,可以实现在线三维检测。但 Stoilov 算法的解相由于完全依赖于 CCD 摄像头采集的图像,投射光场的误差,CCD 摄像头的数字化误差和非线性误差以及环境光干扰均会引入较大的解相误差^[4~8],使重构的物体表面可能出现毛刺、失真或畸变,甚至无法恢复。为此,本文提出了一种适合在线三维检测的改进型 Stoilov 算法,有效抑制了噪声,提高了三维重构精度。

2 在线三维检测原理

传统 PMP 要求被测物体固定,移动光栅得到相移条纹,并采集投射在物体表面上的变形条纹后进行解相再映射到高度重构出物体。而在线检测中被测物体是运动的,如果借助物体的运动,利用相对运动原理,产生等效的相移效果,即可实现在线三维测量^[9]。如图 1 所示,当一平行光照射一固定正弦光栅,使之投影到流水线中的被测物体上,在物体 N 个等距离 S 移动位置可控制 CCD 对应采集 N 帧变形条纹图,其对应位置 (x_i, y_i) 的光强表达式为

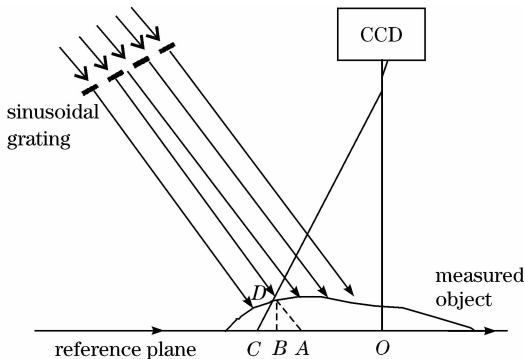


图 1 在线检测 PMP 原理图

Fig. 1 PMP principle figure for on-line inspecting

$$I_i(x_i, y_i) = R(x_i, y_i) \{A(x_i, y_i) + B(x_i, y_i) \times \cos [\Phi(x_i, y_i) + i\Delta]\} \quad (i = 0, 1, 2, 3, 4), \quad (1)$$

式中 $R(x_i, y_i)$ 表征物体表面的反射率, $A(x_i, y_i)$ 表征背景光强, $B(x_i, y_i)$ 表征条纹对比度, $\Phi(x_i, y_i)$ 表征物体高度调制相位, Δ 为物体等步距 S 移动产生的等效相移。当投射在参考面上的条纹周期为 L 时,则有

$$\Delta = \frac{S}{L} 2\pi. \quad (2)$$

由于物体相对 CCD 运动,使 CCD 采集的变形条纹中物点像素坐标发生了改变,如果采用像素匹配方法,就能使该 N 帧变形条纹中物点的像素位置实现一一对应,而变形条纹相对发生了等效相移。

图 2 是像素匹配效果示意图,图 2(a)是基于上述原理用 CCD 采集的第一帧 $I_0(x_0, y_0)$ 和第二帧 $I_1(x_1, y_1)$ 变形条纹图,二者的物体坐标不同。如果在流水线移动台的非光栅投影区放置一些具有特殊光强分布且便于识别的平面标记,通过计算两帧变形条纹图中标记“重心”,如图 2(a)所示;第二帧相对于第一帧对应物点的像素坐标改变了 M ,反向平移第二帧变形条纹图 M 个像素使之与第一帧变形条纹图的对应标记“重心”重合,便可使第二帧变形条纹图的物点像素坐标与第一帧变形条纹图的物点像素坐标一一对应,如图 2(b)所示。在上述过程中,第二帧变形条纹图的边缘会丢失一些信息,只要合理放置被测物体使之不落在该区域,就可以采用图像裁剪的方法,提取出如图 2(b)所示的有效变形条纹图 $I_0'(x_0, y_0)$ 和 $I_1'(x_0, y_0)$ 。上述图像处理过程总称为第二帧图像相对第一帧图像的像素匹配,记为

$$I_1'(x_0, y_0) = \Pi \{I_1(x_1, y_1), I_0'(x_0, y_0)\}, \quad (3)$$

其中 $\Pi\{\}$ 称为像素匹配算子。同理,第 3 至第 5 帧变形条纹图的像素匹配为

$$I_i'(x_0, y_0) = \Pi \{I_i(x_i, y_i), I_0'(x_0, y_0)\} \quad (i = 2, 3, 4). \quad (4)$$

利用 Stoilov 算法,根据(4)式对应的 5 帧条纹表达式可解得相位分布 $\Phi'(x, y)$ 为

$$\Phi'(x_0, y_0) = \arctan \left\{ \frac{2[I_1'(x_0, y_0) - I_3'(x_0, y_0)]}{2[I_2'(x_0, y_0) - I_0'(x_0, y_0) - I_4'(x_0, y_0)]} \times \sin \Delta \right\}, \quad (5)$$

其中

$$\sin \Delta = \sqrt{1 - \left\{ \frac{I_0'(x_0, y_0) - I_4'(x_0, y_0)}{2[I_1'(x_0, y_0)I_3'(x_0, y_0)]} \right\}^2}. \quad (6)$$

再经相位展开及高度映射算法,即可重建第一帧图像表征的被测物体三维轮廓,实现三维物体的在线检测。

3 Stoilov 算法的改进

从(5)式和(6)式可以看出,相位计算仅依赖于 CCD 摄像头采集的图像光强,投射光场的误差, CCD 摄像头的数字化误差和非线性误差以及环境光的干扰等均会因物体的运动而对图像光强分布产生较大的影响,必将导致较大的相位误差,影响三维测量精度。经大量的数值模拟发现,由(5)式表征的 Stoilov 算法中影响解相精度主要因素是(6)式表征的 $\sin \Delta$ 。由于(6)式中存在对光强的平方、开方等

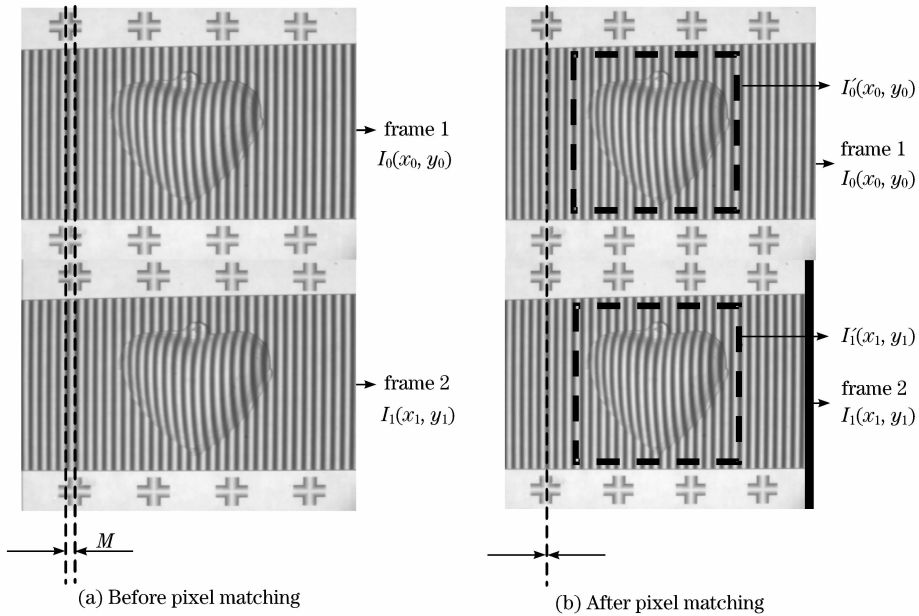


图 2 像素匹配

Fig. 2 Pixel matching

非线性运算,即使 CCD 不存在非线性误差和环境光的干扰,CCD 数字化过程也会导致(6)式很容易出现分母等于 0 和根号内值小于 0 的情况,这两种情况是互相关联的,误差产生的概率大。为此,提出了一种采用预标定^[10,11]相移值的方法,改进 Stoilov 算法,修正 $\sin \Delta$ 值,减少了算法对图像光强的依赖,从而有效减小了投射光场的误差,CCD 摄像头的数字化误差和非线性误差以及环境光干扰引入的解相误差。

在标准 Stoilov 算法中, $\sin \Delta$ 的值是通过(6)式求解的,实际上,在测量过程中,要求 Δ 保持恒定不变,可根据(2)式计算出 Δ ,从而得到不再依赖图像信息的 $\sin \Delta$ 值,而由(2)式可知,在在线三维检测中要准确计算出相移值 Δ ,必须准确获取在线移动步距 S 和参考平面上的条纹周期长度 L ,为此,采用了像素匹配方法来标定 S ,采用了截断相位解周期法来标定 L 。

3.1 移动步距 S 的标定与控制

由图 2 可知,由移动步距 S 及其引起的像素差值 M 可以通过像素匹配方法求出。但是,如果 M 为非整数时,势必影响像素匹配精度,引入附加的解相误差,为此,采用一高精度计量光栅事先对测量步距 S 进行标定,使 $S=S_0$ 时 M 为一整数 M_0 。图 3 是标定示意图,在采集第一帧图像时,由计量光栅记录下工作台参考面位置 X_0 ,移动工作台参考面接近 S 处,记录下当前位置 X_i 同时采集第二帧图像,对

该两帧图像按(3)式和(4)式及其方法进行像素匹配,解调出对应的 M_i ,此时 M_i 不一定是整数,因此

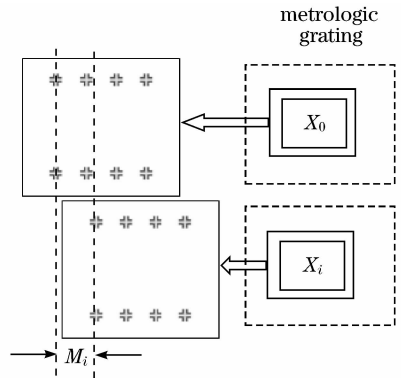


图 3 参考面移动量的标定

Fig. 3 Move-step calibration of reference plane

采用了逼近法修正 M_i 的程序来标定 S ,具体步骤为:

- 1) 对 M_i 进行四舍五入,记为 M_0 ;
- 2) 设定一个合适的小量 $\epsilon > 0$;
- 3) 判断 M_i 和 M_0 的接近程度:

(1) 若 $M_i - M_0 > \epsilon$,就适当减小移动步距 S ,跳转到步骤 4);

(2) 若 $M_i - M_0 < -\epsilon$,就适当增加移动步距 S ,跳转到步骤 4);

(3) 若 $-\epsilon < M_i - M_0 < \epsilon$,保存 $S = S_0 = X_i - X_0$, M_i 和 M_0 ,程序结束。

4) 重新记录下当前位置 X_i ,同时采集第二帧图像,并对该图像进行像素匹配,重复步骤 3);

经该标定程序处理后, M_i 逼近整数 M_0 , 此时 $S=S_0$ 即为标定移动步距。如果将 S_0 预置到一个可编程发信电路, 使被测物体每移动距离 S_0 时发一次信号控制 CCD 同步采集变形条纹图像, 既可保证所采集图像的准确像素匹配, 提高解相精度, 又不必要求工件移动速度恒定。

3.2 参考平面上条纹周期长度 L 的标定

标定条纹周期长度 L , 需要知道条纹像素周期 T 。直接用 CCD 采集参考面上的光栅条纹图, 便可估算图中条纹像素周期 T , 但会因受到数字化误差等因素影响而不准。因此提出了一种基于标准 PMP 的截断相位解相标定条纹周期长度 L 的方法。具体做法为: 将待标定光栅按 $2\pi/5$ 相移步长移动 5 步, 由数字光投影仪 (Digital light projection, DLP) 分别投射在工作台参考面上, 并用 CCD 同步采集图像 $I_j^0(x, y)$, ($j=0, 1, 2, 3, 4$), 即可解调出参考平面的截断相位

$$\text{Phase}(x, y) = \arctan \left[\frac{\sum_{j=0}^4 I_j^0(x, y) \sin(2\pi j/5)}{\sum_{j=0}^4 I_j^0(x, y) \cos(2\pi j/5)} \right] \quad (7)$$

$(j = 0, 1, 2, 3, 4)$.

因光栅条纹投影在参考平面上, 所以截断相位呈与条纹周期等周期的锯齿形斜平面分布, 图 4 是截断相位剖面图, 因截断相位对图像数字化误差不

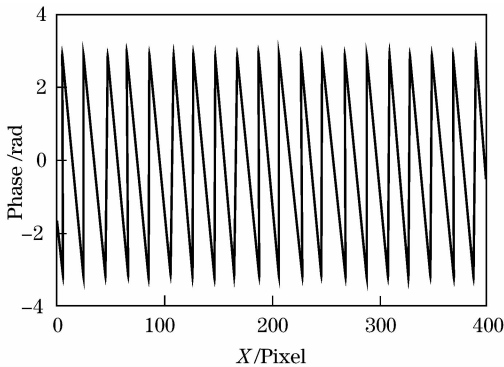


图 4 截断相位

Fig. 4 Wrapped phase

敏感, 利用多次平均算法即可较准确地获得该截断相位分布的平均像素周期 \bar{p} , 此即为所采集条纹像素周期 T ($T = \bar{p}$), 其精度可达亚像素级, 此时投射光栅在参考平面上的条纹周期长度即可标定为

$$L = \frac{S}{M} T = \frac{S}{M} \bar{p}. \quad (8)$$

3.3 改进型 Stoilov 算法

通过以上标定过程, 即可获得不依赖于图像光

强的相移量 Δ_0 。

$$\Delta_0 = \frac{S}{L} 2\pi, \quad (9)$$

因此, 改进后的 Stoilov 算法即可表示为

$$\Phi'(x_0, y_0) = \arctan \left\{ \frac{2[I'_1(x_0, y_0) - I'_3(x_0, y_0)]}{2I'_2(x_0, y_0) - I'_0(x_0, y_0) - I'_4(x_0, y_0)} \times \sin \Delta_0 \right\}, \quad (10)$$

这样即可减小算法对数字光场误差, CCD 数字化误差, 非线性误差和背景光干扰的敏感程度, 有效提高了三维重构精度。

4 实验及结果分析

为验证在线三维检测方法的可行性, 展示所改进算法在在线三维检测中的效果, 进行了大量的实物测试实验, 实验系统示意图如图 5 所示。其中, 数字光投影仪 DLP 型号为 CP-HX6500, CRT 为显示器, CCD 的选择取决于在线测量中物体运动的速度, 本实验选择的 CCD 型号为 MTV1881EX, 其帧频为 60 frame/s, 曝光时间可以在 $1/50 \sim 1/10000$ s 选择, 本实验选定的曝光时间为 $1/500$ s。图 6 是按上述在线三维测量方法对图 5 中的心型模具进行检测, 用改进前后算法重构三维物体的比较结果。图 6(a) 是用 (5) 式和 (6) 式标准 Stoilov 算法重构的三维物体, 可以看出, 此时面形重构不完整, 有许多区域出现断层, 并且表面还有较多的毛刺, 表明重构精度较差; 图 6(b) 是用 (9) 式和 (10) 式改进型 Stoilov 算法重构的三维物体, 此时, 可以完整重构三维物体的形貌, 且表面相对平滑, 未出现毛刺现象, 表明改进型 Stoilov 算法重构三维物体效果较好, 从而验证了改进算法在在线三维检测中的可行性和有效性。

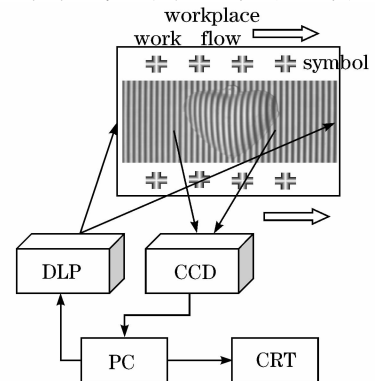


图 5 实验系统图

Fig. 5 Experiment system

由于本实验所选择的 CCD 为 MTV1881EX, 实验数据是在物体在线移动速度低于 40 mm/s 时获取的, 如果要适应更高速度的在线测量, 应选用更高帧频、曝光时间更快的高性能 CCD。

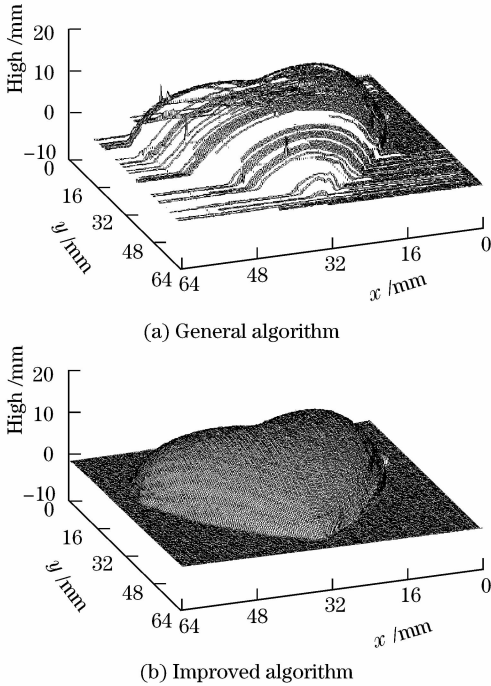


图 6 重构的物体
Fig. 6 Reconstructed object

5 结 论

建立了一种适合在线三维检测的实验系统, 讨论了 Stoilov 算法应用在在线三维检测中所出现的精度问题, 从理论上分析了 Stoilov 算法易出现较大误差的原因, 并提出了一种基于相移量与标定的解决方法, 并用实验验证了该方法的可行性和有效性, 有效提高了在线三维测量精度。

参 考 文 献

1 Wu Qingyang, Su Xianyu, Xiang Liqun *et al.*. A new calibration method for two-sensor measurement system based on line-structure light[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 259~264

吴庆阳, 苏显渝, 向立群等. 线结构光双传感器测量系统的标定方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 259~264

2 Gai Shaoyan, Da Feipeng. A new fast phase unwrapping method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 259~267

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): 259~267

3 G. Stoilov, T. Dragostinov. Phase-stepping interferometry: five-frame algorithm with an arbitrary step[J]. *Opt. & Lasers in Eng.*, 1997, **28**(1): 61~69

4 C. Brophy. Effect of intensity error correlation on the computed phase of phase-shifting interferometry[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1990, **74**: 537~541

5 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

6 Xue Lian, Su Xianyu. Automated phase-measuring profilometry of 3D analysis for measurement of a complex object by the phase-measuring-profilometry method[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(8): 1207~1215

7 Zhu Yongjian, Liu Liren, Luan Zhu *et al.*. New quality map based on modulation for phase unwrapping algorithm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 667~672

朱勇建, 刘立人, 栾竹等. 相位解包裹算法中基于调制度的新质量图[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 667~672

8 Li Yong, Su Xianyu. New method for system calibration in phase measurement profilometry with large view field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1162~1166

李勇, 苏显渝. 一种大视场相位测量轮廓术系统标定方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1162~1166

9 Yu Ruizhi, Cao Yiping. A three dimensional on-line inspecting method for workpiece by PMP[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1139~1143

喻睿智, 曹益平. 一种采用相位测量轮廓术的工件在线三维检测方法[J]. *光子学报*, 2008, **37**(6): 1139~1143

10 Zhang Nanyangsheng, Yang Kuntao. Three-dimensional measurement technology based on virtual grating of double frequency[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1407~1411

张南洋生, 杨坤涛. 双频虚拟光栅投影三维测量技术[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1407~1411

11 Li Yong, Su Xianyu, Wu Qingyang. Calibration and data merging of two-camera phase measuring profilometry system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 551~556

李勇, 苏显渝, 吴庆阳. 双摄像机相位测量轮廓术系统标定与数据融合[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4): 551~556