

基于相位预测的在线三维测量像素匹配方法

许幸芬 曹益平 彭 旷

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064

摘要 物体的运动使变形条纹图中物体像素点不对应,因此需要对物体做像素匹配。提出了一种基于相位预测的在线三维测量像素匹配方法。仅投一帧正弦光栅条纹到在线运动的物体上,CCD 同步采集相同步距时刻受物体调制的变形条纹图。采用傅里叶变换轮廓术(FTP)方法对采集的变形条纹预测物体不同位置的相位信息,并以该相位信息的特征做像素匹配,实现了物体在各帧条纹图中的像素一一对应,同时匹配后的变形条纹产生等效的等步相移,进而采用等步长相移算法来重构在线运动物体的三维面形。计算机模拟与实验验证了该方法的有效性和可行性。同时,与在线 FTP 方法进行比较,在线 FTP 方法和本文方法的均方根误差分别为 1.013 mm 和 0.024 mm,表明该方法对在线三维测量具有较高的测量精度。

关键词 测量; 像素匹配; 傅里叶变换轮廓术; 相位预测; 在线三维测量; 等步长相移算法

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0612005

Pixel Matching Method in On-Line Three-Dimensional Measurement Based on Phase Prediction

Xu Xingfen Cao Yiping Peng Kuang

College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

Abstract Pixel matching must be done because the coordinates of the object in different captured patterns are not one-to-one corresponding caused by the movement of object. A pixel matching method in on-line three-dimensional measurement based on phase prediction is proposed. Only one fixed sinusoidal fringe is needed to project on a measured object moving on the pipeline. While the object is coming to some positions with a certain adjacent displacement, the deformed patterns modulated by the object are captured synchronously with CCD camera. Dealing the captured deformed patterns with Fourier transform profilometry (FTP) method, the phase information of the object in those positions can be predicted to assist the pixel matching, which realizes the one-to-one corresponding of the object, and extracts the equivalent phase-shifting deformed patterns. So the 3D surface shape of the object moving on the pipeline can be reconstructed successfully with an equal phase-shifting algorithm. The results of simulation and experiment verified its feasibility and validity. Meanwhile, compared with the on-line FTP method, the root mean square error derived by the on-line FTP and the proposed method are 1.013 mm and 0.024 mm respectively, which shows the proposed method has higher precision in on-line three-dimensional measurement.

Key words measurement; pixel matching; Fourier transform profilometry; phase prediction; on-line three-dimensional measurement; equal phase-shifting algorithm

OCIS codes 120.2830; 120.5050; 120.5060; 120.4570

1 引 言

由于具有非接触、快速测量和精度高等优势,光学在线三维测量已在生产流水线中得到广泛应用^[1-5],其中相位测量轮廓术(PMP)^[6-10]和傅里叶变换轮廓术(FTP)^[11-15]是常用的测量方法。FTP 具有单帧获取、全

收稿日期: 2016-01-14; **收到修改稿日期:** 2016-03-02

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z333)、国家科技重大专项(2009ZX02204-008)

作者简介: 许幸芬(1982-),女,博士研究生,主要从事光学三维传感及光电信息处理方面的研究。

E-mail: xuxingfen1982@163.com

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、光电信息处理及光机电一体化等方面的研究。E-mail: ypcao@scu.edu.cn(通信联系人)

场分析和高分辨率等优势, Takeda 等^[11]提出此测量方法后, 受到广泛关注。分别只需一帧参考条纹图和变形条纹图, FTP 方法就能够从频域中滤出包含物体高度信息的基频分量, 并进行傅里叶逆变换获得物体的三维面形信息。文献[7-9, 16]表明 FTP 符合在线三维测量的要求。由于对变形条纹处理的过程是一种滤波行为, 存在频谱泄露、混叠等情况; 同时, 滤波器种类以及滤波窗口大小均会造成物体的非基频信息被滤掉, 测量范围也会受到一定的影响, 物体重构结果势必会受到影响, 细节丢失较多, 尤其在物体陡变地方更明显。

而 PMP 是目前在低噪声前提下, 采用面结构光三维测量中精度最高的方法^[17]。在线三维测量方法仅需要投一帧正弦条纹, 采集 $M(M \geq 3)$ 帧变形条纹图, 并对各帧中的物体进行像素匹配, 得到物体像素点一一对应的等效变形条纹图, 最后正确解相即可获得该在线运动物体的三维面形信息。在线 PMP 通常采用定步长或等步长两种算法求解物体的相位, 等步长相移算法只要保证每一次移动的步长相等, 无须已知相移量的大小, 即可解调出物体的相位, 因此具有较大优势, 尤其是等步长相移算法中五步相移算法具有更强的抗噪能力, 可以有效地提高相位提取准确度。基于在线 PMP, 李坤等^[18]提出了利用物体本身的调制度信息作为像素匹配依据的在线三维测量方法; 郑旭等^[19-20]提出了基于调制度层析的在线三维测量方法和基于二值化调制度层析的快速在线三维测量算法; 彭旷等^[2]提出了一种低调制度特征的在线三维测量方法。

本文提出了一种无需做特殊标记, 也无需计算被测物体调制度的在线三维测量像素匹配方法。其采用 FTP 方法对采集到的变形条纹预测物体不同位置的相位信息, 并以该相位信息的特征进行像素匹配, 实现物体在各帧条纹图中的像素一一对应; 同时, 匹配后的变形条纹产生了等效的等步相移, 进而采用等步长相移算法来重构在线运动物体的三维面形。

2 在线三维测量原理

在线三维测量原理如图 1 所示。

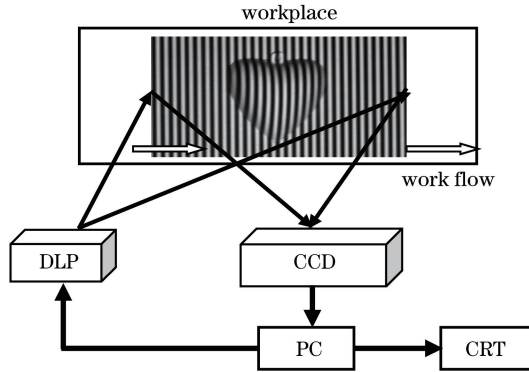


图 1 在线三维测量原理图

Fig. 1 On-line measurement principle

图 1 中测量装置为计算机(PC)、摄像机(CCD)、数字光投影仪(DLP)和阴极射线管(CRT)。将被测物体置于生产流水线传送带上, 传送带的运动速度是恒定的。由计算机编译产生一帧周期为 P 的正弦光栅, 光栅的条纹走向与物体的运动方向垂直, 通过 DLP 投影系统将其投在参考面上, 在 CCD 摄影系统中获得参考条纹分布, 其表达式为

$$I_0(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\varphi_0(x, y)], \quad (1)$$

式中 $A(x, y)$ 为背景光强度, $B(x, y)$ 为条纹对比度, $\varphi_0(x, y)$ 为受参考面高度调制的相位。将这一帧参考条纹投影到在线运动物体表面, 每隔相同的时间, 由计算机控制 CCD 采集一帧变形条纹图, 共采集 5 帧。被测物体产生的等效相移用 $\varphi(x, y)$ 表示, 采集到的变形条纹之间的 $\varphi(x, y)$ 是相等的。变形条纹 $I_N(x, y)$ 为

$$I_N(x, y) = R(x, y) \{A(x, y) + B(x, y) \cos[\Phi(x, y) + N\varphi(x, y)]\}, \quad N = 0, 1, 2, 3, 4, \quad (2)$$

式中 $R(x, y)$ 为物体表面的反射率, $\Phi(x, y)$ 为受物体高度调制的相位分布。变形条纹图通过像素匹配后, 根据 Stoilov 算法可解调出物体的相位分布

$$\Phi(x, y) = \arctan \left\{ \frac{2[I'_1(x, y) - I'_3(x, y)]}{2I'_2(x, y) - I'_0(x, y) - I'_4(x, y)} \sin \varphi \right\}, \quad (3)$$

式中 $\sin \varphi = \sqrt{1 - \left\{ \frac{I'_0(x, y) - I'_4(x, y)}{2[I'_1(x, y) - I'_3(x, y)]} \right\}^2}$, $I'_N(x, y)$ 为 $I_N(x, y)$ 在像素匹配之后截取的等效变形条纹图。因(3)式为反正切计算, 将相位截断在 $(-\pi, \pi)$ 之间, 所以相位是离散的。实际上物体的相位是连续分布的, 故需要对截断相位进行展开, 选用菱形展开算法^[2], 得到其连续相位 $\varphi'(x, y)$ 。

对(1)式进行相同的计算, 可以得到参考面上的相位分布 $\varphi_0(x, y)$, 相位展开后得到其连续相位分布 $\varphi'_0(x, y)$, 则受物体高度调制的相位为

$$\Delta\varphi'(x, y) = \varphi'(x, y) - \varphi'_0(x, y). \quad (4)$$

采用校准的方法建立起连续相位与物体高度之间的映射关系, 即可得到物体高度分布为^[21-22]

$$h(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \frac{1}{\Delta\varphi'(x, y)} + c(x, y) \frac{1}{\Delta\varphi'^2(x, y)}, \quad (5)$$

式中 $a(x, y), b(x, y), c(x, y)$ 在系统的校准过程中来获得。

3 基于相位预测的像素匹配方法

像素匹配是在线三维测量中关键的环节之一。根据上面的描述, 提出一种基于相位预测的像素匹配方法, 即采用 FTP 方法对采集的各帧变形条纹预测物体在不同位置的相位信息, 这些相位信息反映物体在不同位置的特征, 且可作为像素匹配的依据。具体过程如下。

对(2)式沿 x 方向做一维傅里叶变换。得到的频谱中, 零频反映的是背景光强分布, 基频包含所要求的相位信息, 设计合适的带通滤波器, 可将其中的一个基频分量滤出来, 然后对其进行逆傅里叶变换, 得到的分布表示为

$$g_N(x, y) = R(x, y)B(x, y)\exp\{j[2\pi f_0 x + \Phi(x, y) + N\varphi(x, y)]\}, \quad N = 0, 1, 2, 3, 4. \quad (6)$$

对(1)式进行同样的计算, 可得到

$$g_0(x, y) = B(x, y)\exp\{j[2\pi f_0 x + \varphi_0(x, y)]\}. \quad (7)$$

从(6)式和(7)式中可以预测物体的相位 $\Delta\phi_N(x, y)$ 分布为

$$\Delta\phi_N(x, y) = \text{Im}\{\lg[g_N(x, y) \cdot g_0^*(x, y)]\}, \quad N = 0, 1, 2, 3, 4, \quad (8)$$

式中 $*$ 表示复共轭, $\Delta\phi_N(x, y)$ 为截断相位, 分布在区间 $(-\pi, \pi)$, 需要对其进行相位展开, 得到物体的连续相位分布为 $\Delta\phi'_N(x, y)$ 。

假设图像的大小为 $P \text{ pixel} \times Q \text{ pixel}$, 计算 $\Delta\phi'_N(x, y)$ 的重心坐标 $G_N(x_N, y_0)$ (物体只沿 x 方向运动, y 方向不变), 得到

$$G_N(x_N, y_0) = \frac{\sum_{i=1}^{i=P} \Delta\varphi_i x_i}{\sum_{i=1}^{i=P} x_i}, \quad N = 0, 1, 2, 3, 4, \quad (9)$$

式中 Δx_m 为采集的第 m 帧相对于第零帧变形条纹中物点像素坐标的改变量, 即物体的位移量。将 $I_m(x, y)$ 沿物体运动的反方向移动 $\Delta x_m \text{ pixel}$, 得到 $I_{mP}(x, y)$, 然后在 $I_0(x, y)$ 和 $I_{mP}(x, y)$ 截取同一区域携带物体高度信息的部分, 即可得到像素点一一对应的等效变形条纹图 $I'_N(x, y)$, 完成像素匹配。

$$\Delta x_m = x_m - x_0, \quad m = 1, 2, 3, 4. \quad (10)$$

上述方法即实现了物体在各帧条纹图中的像素一一对应, 且匹配后的变形条纹产生了等效的等步相移。

4 计算机仿真

为了验证本文方法的有效性, 进行了大量的仿真实验。以图 2 为例, 计算机生成高度为 50 mm, 底部带有台阶的圆锥形物体。计算机编程使 5 帧变形条纹图生成相等的位移并在其中加入 1% 的随机噪声。

物体的运动导致生成的各帧变形条纹图中物点不对应, 图 3 是像素匹配过程。其中, 图 3(a)~(e)是模

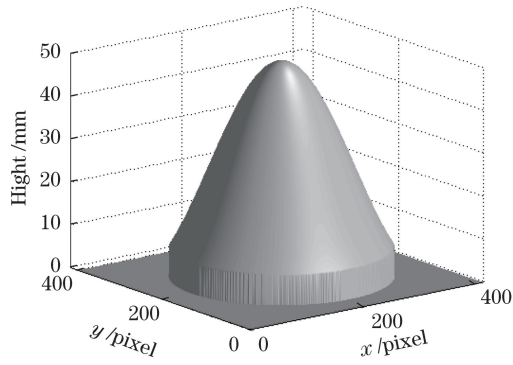


图 2 模拟物体

Fig. 2 Simulated object

拟的 5 帧变形条纹图,采用 FTP 方法预测图中物体在不同位置的相位信息,结果如图 3(f)~(j)所示,红色标记点为重心坐标,得到第 1 至第 4 帧变形条纹距离第 0 帧变形条纹的位移量 Δx_m ,然后分别将第 1 至第 4 帧变形条纹沿相反的方向移动 Δx_m pixel,得到 $I_{mP}(x, y), m=1, 2, 3, 4$,最后在 $I_0(x, y)$ 和 $I_{mP}(x, y)$ 中的同一区域截取图像,既可得到像素点一一对应的等效变形条纹图 $I'_N(x, y)$,如图 3(k)~(o)所示。

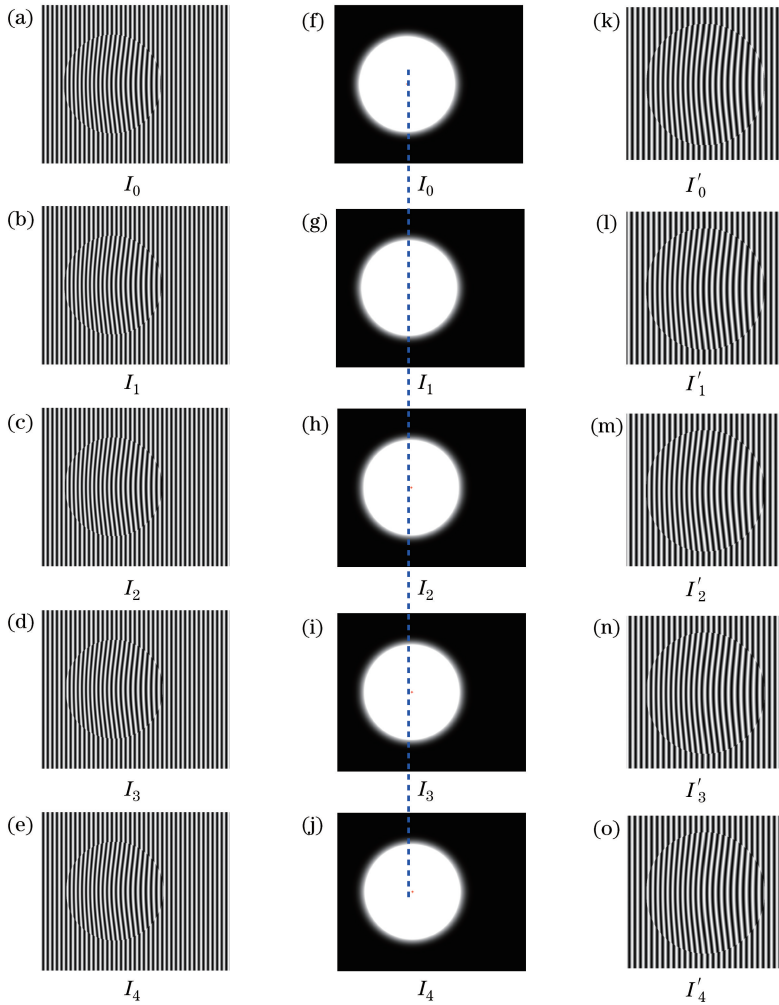


图 3 像素匹配过程。(a)~(e)采集的变形条纹图 $I_0 \sim I_4$; (f)~(j) $I_0 \sim I_4$ 的相位预测分布;
(k)~(o)像素匹配后的等效变形条纹图 $I'_0 \sim I'_4$

Fig. 3 Process of pixel matching. (a)~(e) Captured deformed patterns $I_0 \sim I_4$; (f)~(j) phase prediction distribution of $I_0 \sim I_4$;
(k)~(o) deformed patterns $I'_0 \sim I'_4$ after pixel matching

变形条纹产生等效的等步相移后,可以采用等步长相移算法来重构该在线运动物体的三维面形,重构结果如图 4 所示。其中,图 4(a)为采集的第 0 帧变形条纹采用在线 FTP 方法重构的三维物体图,可见圆锥物体的相位信息有所丢失,致使恢复物体的底部台阶没有完全重构出来,且物体的底部边缘比较模糊。图 4(b)为相应的误差分布,最大误差为 2.311 mm,均方根误差为 1.013 mm。图 4(c)为采用改进的 Stoilov 算法^[23]对像素匹配后的等效变形条纹进行三维重构的结果,可见物体恢复完整、边缘轮廓比较清晰、真实感更强。图 4(d)为相应的误差分布图,其中,最大误差不超过 0.096 mm,均方根误差不超过 0.024 mm。这表明所提方法具有较高的测量精度,适应于在线三维测量中。

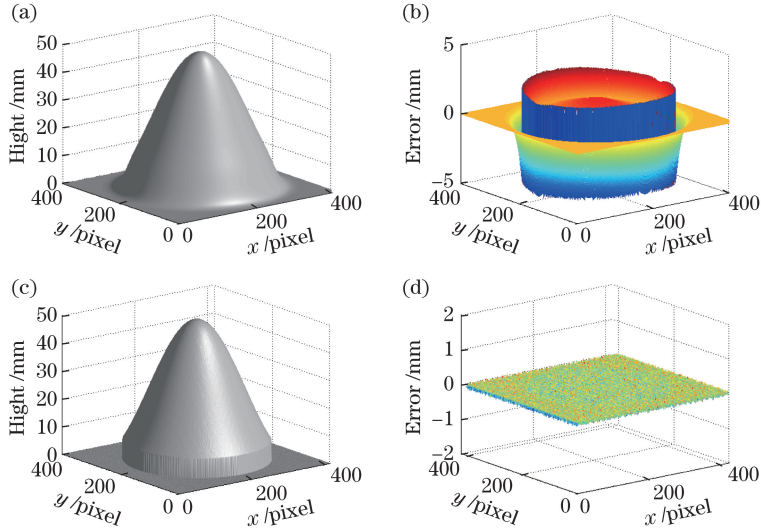


图 4 仿真结果及误差分布。(a)在线 FTP 方法;(b)图(a)的误差分布;(c)本文方法;(d)图(c)的误差分布
Fig. 4 Simulation results and error distributions. (a) On-line FTP method; (b) error distribution of Fig. (a); (c) the proposed method; (d) error distribution of Fig. (c)

5 实验及结果分析

为了验证本文方法的有效性和实用性,分别对不同的实物进行在线测量。实验装置系统如图 5 所示。DLP 采用 HCP-75X 型数字投影仪(Hitachi, 日本),CCD 型号为 MVC1000MF-M00(Microview, 中国),图像采集卡采用 DT3152 型采集卡。将被测物体置于步进电机控制的工作台上,实验中要求步进电机匀速移动。由计算机控制投影仪投影一帧正弦条纹到被测物体表面,且条纹走向垂直于物体的运动方向。CCD 同步采集具有等步距相移量的变形条纹图,经图像采集卡存于计算机内等待处理。

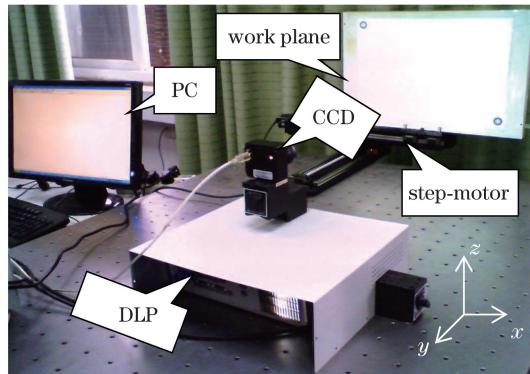


图 5 实验装置

Fig. 5 Experimental setup

对如图 6 所示的一个面形简单的心形物体进行在线三维测量。以第 0 帧和第 4 帧为例,像素匹配过程如图 7 所示。图 7(a)~(b)为采集变形条纹图,采用 FTP 方法预测这两帧变形条纹中物体的相位信息,图

7(c)~(d)中重红色标记点为重心位置。经像素匹配后,这两幅图像中的物体像素点一一对应,且产生了等效的等步相移,在像素匹配后两帧图像同一区域中截取携带有物体高度信息的图像如图 7(e)~(f)所示。

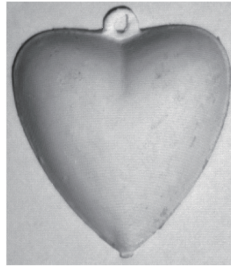


图 6 心形物体

Fig. 6 Heart-like object

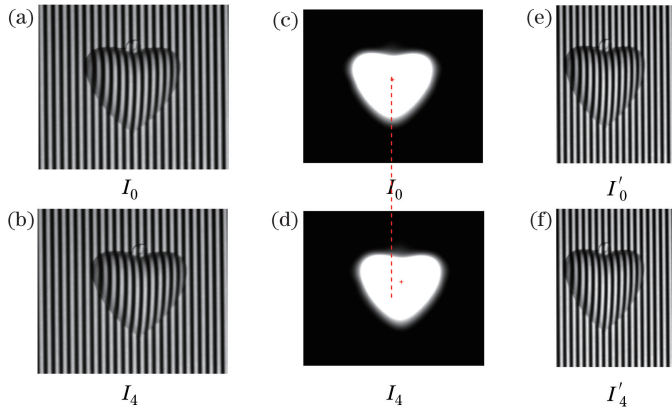


图 7 像素匹配过程。(a)~(b)采集的变形条纹 I_0 、 I_4 ；(c)~(d) I_0 、 I_4 的相位预测分布；(e)~(f)像素匹配后的等效变形条纹图 I'_0 、 I'_4

Fig. 7 Process of pixel matching. (a)–(b) Captured deformed patterns I_0 and I_4 ; (c)–(d) phase prediction distribution of I_0 and I_4 ; (e)–(f) deformed patterns I'_0 and I'_4 after pixel matching

采用改进的 Stoilov 算法来重构该在线运动物体的三维面形图,结果如图 8 所示。图 8(a)为对第 0 帧变形条纹图采用在线 FTP 方法得到的三维重构图;图 8(b)为本文方法得到的三维重构图。从图中可以看出,两种方法均可重构出物体的三维面形,但在图 8(a)中,物体上面的“耳朵”这个细节部分丢失,并且边缘比较模糊,从整体上看,物体的真实感不强;图 8(b)中,物体的细节部分比较清晰,边缘轮廓更加清晰可见。

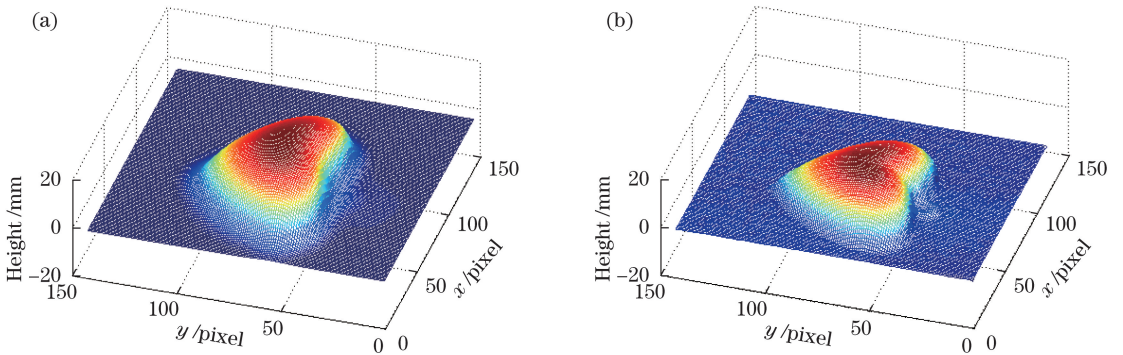


图 8 重构结果。(a)在线 FTP 方法；(b)本文方法

Fig. 8 Reconstruction results. (a) On-line FTP method; (b) the proposed method

另外一个测量的物体是如图 9 所示的面形更为复杂的人脸面具。按照上述步骤进行在线测量,实验原始数据和结果如图 10 和 11 所示。图 10 为以第 0 帧和第 4 帧变形条纹图像的像素匹配过程。图 11 为三维面形重构结果,其中,图 11(a)为第 0 帧变形条纹采用在线 FTP 方法得到的重构图;图 11(b)为采用本文方法得到的重构图。两种方法均可重构出来物体的三维面形,但图 11(a)中物体的面形轮廓中鼻子和下巴部

分不够突出,物体边缘轮廓陡峭部分变得平滑,物体的细节部分丢失比较多,尤其是陡变比较厉害的地方,整体上重构出来的物体真实感不强;而在图 11(b)中,物体的轮廓更加清晰、细节部分可见、真实感更强。以上实验表明本文方法在在线三维测量中的有效性和实用性。

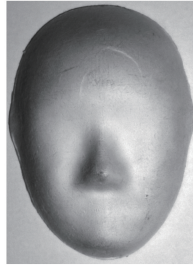


图 9 人脸面具

Fig. 9 Face mask

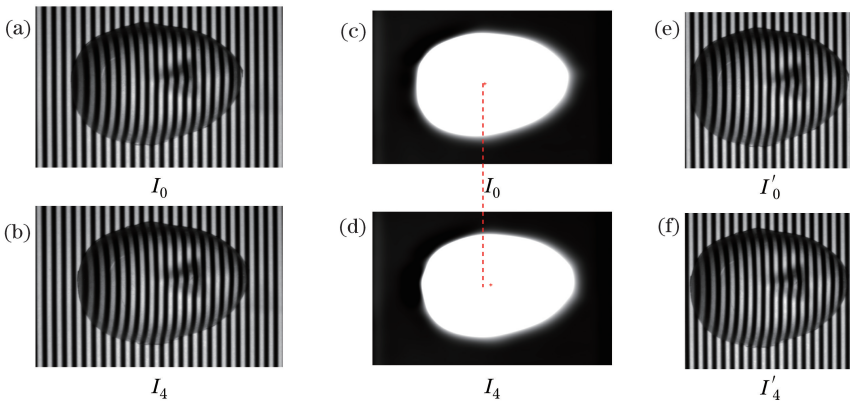


图 10 像素匹配过程。(a)~(b)采集的变形条纹图 I_0 、 I_4 ；(c)~(d) I_0 、 I_4 的相位预测分布；(e)~(f)像素匹配后的等效变形条纹图 I'_0 、 I'_4

Fig. 10 Process of pixel matching. (a)–(b) Captured deformed patterns I_0 and I_4 ; (c)–(d) phase prediction distribution of I_0 and I_4 ; (e)–(f) deformed patterns I'_0 and I'_4 after pixel matching

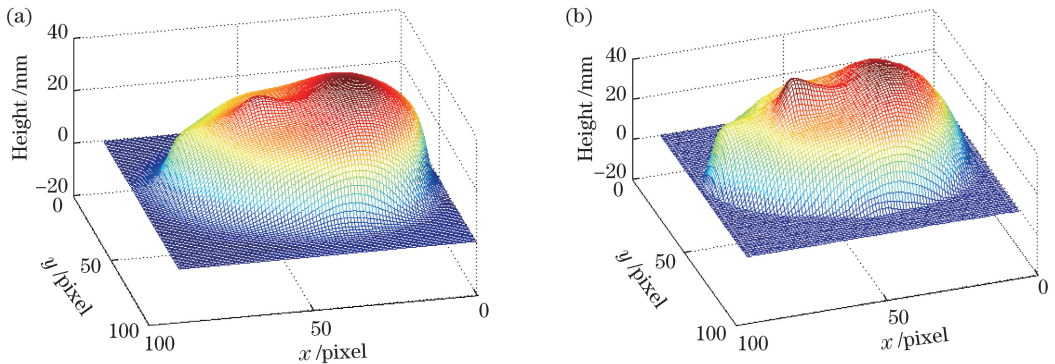


图 11 重构结果。(a)在线 FTP 方法；(b)本文方法

Fig. 11 Reconstruction results. (a) On-line FTP method; (b) the proposed method

6 结 论

提出了一种基于相位预测的在线三维测量像素匹配方法,仅投一帧正弦光栅到在线运动的物体上,CCD 在依次移动相同步距时刻同步采集受物体调制的变形条纹图。采用 FTP 方法对采集的变形条纹图预测不同位置物体的相位信息,并以不同位置的相位信息做像素匹配,实现了各帧变形条纹图中物体的像素一一对应,同时匹配后的变形条纹产生了等效的等步相移,进而采用等步长相移算法来重构该在线运动物体的三维面形。计算机仿真与实验验证了所提方法的有效性和可行性。比较该方法与在线的 FTP 方法表明,该方法

重构物体更具有真实感,测量精度更高,适应于在线三维测量。

参 考 文 献

- 1 Dai Shijie, Shao Meng, Wang Zhiping, *et al.*. Study on the two-step method to remove the background in 3D measurement of titanium blade[J]. *Journal of Optoelectronic•Laser*, 2014, 25(8): 1541-1546.
戴士杰, 邵 猛, 王志平, 等. 超钛合金叶片三维测量中背景去除的两步法研究[J]. *光电子•激光*, 2014, 25(8): 1541-1546.
- 2 Peng Kuang, Cao Yiping, Wu Yingchun, *et al.*. On-line three-dimensional measurement method based on low modulation feature[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(7): 0708006.
彭 旷, 曹益平, 吴迎春, 等. 基于低调制度特征的在线三维测量方法[J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 0708006.
- 3 Zhang Shaoze, Zhang Jianqi, Huang Xi, *et al.*. Three-dimensional profile data representation based on gray value encoding[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(12): 1209001.
张绍泽, 张建奇, 黄 曦, 等. 基于灰度值编码的三维轮廓数据表示方法[J]. *中国激光*, 2015, 42(12): 1209001.
- 4 Tian Zixia, Chen Wenjing, Su Xianyu. Method for improving accuracy and measurement speed of PMP using error diffusion binary encoded sinusoidal grating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(12): 121201.
田紫霞, 陈文静, 苏显渝. 采用二元编码的正弦光栅提高 PMP 测量速度和精度的方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(12): 121201.
- 5 Zheng Suzhen, Cao Yiping. Five steps of unequal step online three-dimensional inspection based on two-dimensional empirical mode decomposition[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(12): 1208004.
郑素珍, 曹益平. 基于二维经验模态分解的五步非等步在线三维检测[J]. *中国激光*, 2014, 41(12): 1208004.
- 6 Zhang S, Shing T Y. High dynamic range scanning technique[J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(3): 033604.
- 7 Chen F, Su X Y. Analysis and identification of phase error in phase measuring profilometry[J]. *Optics Express*, 2010, 18(11): 11300-11307.
- 8 Zhao X L, Liu J S, Zhang H Y, *et al.*. Measuring the 3D shape of high temperature objects using blue sinusoidal structured light[J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(12): 125205.
- 9 Hu E Y, He Y M, Yu H. Profile measurement of a moving object using an improved projection grating phase-shifting profilometry[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(15): 3047-3051.
- 10 Tang Y, Su X Y. 3D sharp measurement of the aspheric mirror by advanced phase measuring deflectometry[J]. *Optics Express*, 2008, 16(19): 15090-15096.
- 11 Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shape[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(24): 3977-3982.
- 12 Su Xianyu, Tan Songxin, Xiang Liqun, *et al.*. Complex object shape measurement using FTP method[J]. *Acta Sinica Sinica*, 1998, 18(9): 1229-1233.
苏显渝, 谭松新, 向立群, 等. 基于傅里叶变换轮廓术方法的复杂三维面形测量[J]. *光学学报*, 1998, 18(9): 1229-1233.
- 13 Emanuele Z, Giorgio B. Static and dynamic features of Fourier transform profilometry: A review[J]. *Optics and Lasers Engineering*, 2012, 50(8): 1140-1151.
- 14 Cobelli P J. Global measurement of water waves by Fourier transform profilometry[J]. *Experiments in Fluids*, 2009, 46(6): 1037-1047.
- 15 Wu Shuangqing, Zhang Yin, Zhang Sanyuan, *et al.*. Analysis of three-dimensional measurement system and the coordinates calibration in Fourier transform profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009: 29(10): 2781-2785.
吴双卿, 张 引, 张三元, 等. 傅里叶变换轮廓术物体三维形貌测量的系统分析及其坐标校准方法[J]. *光学学报*, 2009, 29(10): 2781-2785.
- 16 Guo Yuan, Wu Quan, Chen Xiaotian, *et al.*. Phase retrieval method of single interference fringe pattern based on shearing interferometry[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(12): 1208003.
郭 媛, 吴 全, 陈小天, 等. 基于剪切干涉的单幅干涉条纹相位恢复算法[J]. *中国激光*, 2015, 42(12): 1208003.
- 17 Zhai Aiping, Cao Yiping, Kou Jun. Improved on-line 3-D shape measurement method based on only one frame of deformed pattern[J]. *Journal of Optoelectronic•Laser*, 2012, 23(1): 117-120.
翟爱平, 曹益平, 寇 俊. 一种改进的单帧变形条纹在线三维测量方法[J]. *光电子•激光*, 2012, 23(1): 117-120.
- 18 Li Kun, Cao Yiping, Chen Yongquan, *et al.*. A new method for online three dimensional inspection without marked[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2009, 7(2): 57-61.

- 李 坤, 曹益平, 陈永权, 等. 一种无需标记的在线三维测量[J]. 光学与光电技术, 2009, 7(2): 57-61.
- 19 Zheng Xu, Cao Yiping, Li Kun. An on-line 3D measurement method based on modulation delamination[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2573-2577.
- 郑 旭, 曹益平, 李 坤. 基于调制度层析的在线三维测量方法[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2573-2577.
- 20 Zheng Xu, Cao Yiping. A fast on-line 3D measuring algorithm based on two-value modulation delamination[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(8): 1443-1448.
- 郑 旭, 曹益平. 基于二值化调制度层析的快速在线三维测量算法[J]. 光子学报, 2010, 39(8): 1443-1448.
- 21 Li Wansong, Su Likun, Su Xianyu. Phase measuring profilometry in big scale measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(6): 792-796.
- 李万松, 苏礼坤, 苏显渝. 相位检测面形术在大尺度三维面形测量中的应用[J]. 光学学报, 2000, 20(6): 792-796.
- 22 Asundi A, Zhou W S. Unified calibration technique and its applications in optical triangulation profolomrtry[J]. Applied Optics, 1999, 38(16): 3556-3561.
- 23 Xu Xingfen, Cao Yiping. An improved Stoilov algorithm based on statistical approach[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(3): 733-737.
- 许幸芬, 曹益平. 基于统计逼近的 Stoilov 改进算法[J]. 光学学报, 2009, 29(3): 733-737.