

高速旋转物体频闪在线相位测量轮廓术

种晴, 曹益平*, 陈雨婷

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064

摘要 为了实现高速旋转工件的在线三维面形检测, 提出一种高速旋转物体频闪在线相位测量轮廓术(PMP)三维测量方法。利用圆形正弦光栅替代线形正弦光栅, 采用高密度二元编码光栅替代灰度编码光栅, 设计专用频闪同步控制单元同时触发投影系统频闪投射相移光栅和图像采集单元同步获取图像, 获得物体在同一“冻结”位置下的相移变形条纹后, 采用静态 PMP 相移算法重建物体的三维面形信息。实验结果表明, 该方法具备可行性和实用性, 可有效避免工件离线检测时多次装夹不一致引入的加工误差, 能够提高工件的检测效率和加工效率, 可用于其他高速旋转物体的三维面形重建。

关键词 测量; 频闪在线相位测量轮廓术; 圆形正弦光栅; 同步单元; 高速旋转物体

中图分类号 TN27

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0812003

Stroboscopic Online Phase Measurement Profilometry for High-Speed Rotating Objects

Chong Qing, Cao Yiping*, Chen Yuting

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

Abstract A stroboscopic online phase measurement profilometry (PMP) for high-speed rotating objects is proposed in this paper. In order to realize the online three-dimensional surface shape detection of a high-speed rotating workpiece, the traditional linear sinusoidal and traditional gray-coded gratings are replaced by circular sinusoidal and high-density binary-coded gratings, respectively. Further, the special stroboscopic synchronization control unit is designed to simultaneously trigger the projection system to project the phase shift grating and image acquisition unit to obtain the image synchronously, thereby obtaining the phase shift deformation stripes of the object at the same “frozen” position. Therefore, the static PMP phase shift algorithm can be used to reconstruct the three-dimensional surface shape information of the object. The experimental results demonstrate the feasibility and practicability of the proposed method. This method can effectively prevent the machining error caused by multiple clamping inconsistencies when the workpiece is detected offline, improve the workpiece detection and machining efficiencies, and be used to reconstruct the three-dimensional surface shape of other high-speed rotating objects.

Key words measurement; stroboscopic online phase measurement profilometry; circular sinusoidal grating; synchronization unit; high-speed rotating object

OCIS codes 120.2830; 120.4570; 120.5050; 120.5060

1 引 言

近年来, 相位测量轮廓术(PMP)、傅里叶变换轮廓术(FTP)、空间相位检测术(SPD)、调制度测量轮廓术(MMP)、计算莫尔轮廓术(CGMP)^[1-5]等光栅投影技术广泛应用于三维面形测量, 由于具有非接触、全场分析和高分辨率等优点, 这些三维测量技术已在计算机视觉、组件质量控制、产品检验和医学

诊断等领域得到应用^[6-7]。

在现代制造业和工业领域的生产加工中, 工件质量检测的精度和速度要求越来越高, 在线检测的一个重要参数就是工件的面形尺寸。针对旋转加工平台上工件的在线测量方法, FTP 只需一帧变形条纹即可重构物体的三维面形, 能够实现在线实时检测, 但由于受到环境光、物体反射率变化以及固有的频谱泄漏的影响, 其测量精度受到很大限制^[8];

收稿日期: 2019-01-21; 修回日期: 2019-03-02; 录用日期: 2019-05-13

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX02204-008)

* E-mail: ypcao@scu.edu.cn

PMP 固有的点对点计算特征使得其重构出的三维面形具有更高的精度;2013 年, Lu 等^[9]提出对运动物体进行三维面形重构时应考虑振动的影响, 并采用 PMP 对运动物体进行三维测量;2014 年, Wang 等^[10]通过设计一系列圆形相移正弦光栅, 实现了对旋转运动物体的在线检测。

当被测物体运动速度较快时, 需要“冻结”变形条纹图像中的物体。物体处于高速旋转状态时, 传统常亮投影光栅方式所采集的变形条纹图像会产生运动模糊现象, 所以不适合用来采集旋转物体的图像。高速摄影的频闪照明技术可以捕捉清晰的高速旋转物体^[11-12]; 而二元编码方式可避免投影装置非线性效应的影响, 同时提高投影的刷新频率。

本文基于二元编码技术, 提出一种高速旋转物体的频闪在线 PMP 方法。当物体在每个周期内旋转到一个固定位置时, DLP (Digital Light Procession) 投影一个带有 $2\pi/N$ 相移的二元编码圆形光栅到待测物体表面, 相应的变形条纹可以由 CCD 照相机与同步控制单元“冻结”, 以保证测量的准确性。在没有任何移动的情况下, 物体的图像会在变形的图案中呈静止状态, 因此, 可以准确地利用 N 步相移算法^[13]测量高速旋转物体的三维形状。

2 原 理

2.1 静态 PMP 相移算法

静态 PMP 的光学原理如图 1 所示, 测量系统主要由投影装置、采集装置和放置被测物体的参考平面组成。投影装置 DLP 投影仪的光轴 P_1-P_2 与采集装置 CCD 相机的光轴 I_1-I_2 相交于参考平面上的 O 点, d 为 DLP 投影仪与 CCD 相机之间的距离, L 为 CCD 相机与参考平面之间的距离。

根据 PMP 的 N ($N \geq 3$) 步相移算法, DLP 将 N

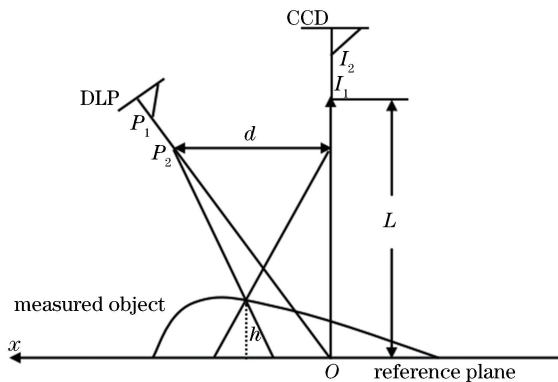


图 1 PMP 光学原理图

Fig. 1 Optical principle of PMP

帧相移光栅图像投射到被测物体表面, 物体高度调制后第 n 帧变形条纹的强度可表示为^[14]

$$I_n(x, y) = R(x, y) \left\{ A(x, y) + B(x, y) \cos \left[\varphi(x, y) + \frac{2\pi n}{N} \right] \right\}, \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

式中: $R(x, y)$ 为物体表面反射率系数; $A(x, y)$ 为环境背景光强; $B(x, y)$ 为条纹对比度; $\varphi(x, y)$ 变形条纹的相位分布; N 为相移总步数; 相邻条纹之间的相移量为 $2\pi/N$ 。

采用 N 步相移算法可计算出相位值 $\varphi(x, y)$ 为^[2,6]

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \sin \left(\frac{2\pi n}{N} \right)}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cos \left(\frac{2\pi n}{N} \right)}. \quad (2)$$

同理将 N 帧二元圆形光栅条纹图像投射到参考平面上, 在没有测量对象的情况下, (2) 式计算得到的参考平面调制相位为 $\varphi_0(x, y)$ 。计算被测物体的高度分布时, 需要利用连续的相位分布, 即绝对相位(或连续相位), 绝对相位分布 $\psi(x, y)$ 由测量相位 $\varphi(x, y)$ 和 $\varphi_0(x, y)$ 之差得到。根据截断相位恢复得到连续相位的过程为相位展开^[15-16], 本文截断相位展开均使用菱形相位展开算法^[17]。最后, 根据 Ma 等^[18]提出的相位-高度映射算法, 由物体的相位分布即可得到物体高度分布 $h(x, y)$, 即

$$\frac{1}{h(x, y)} = a_2(x, y) + b_{21}(x, y) \frac{1}{\psi(x, y)} + b_{22} \frac{\varphi_0(x, y)}{\psi(x, y)} + c_2(x, y) \frac{1}{\psi^2(x, y)}, \quad (3)$$

式中: $a_2(x, y)$ 、 $b_{21}(x, y)$ 、 b_{22} 和 $c_2(x, y)$ 可通过标定至少 4 个已知高度的平面获得, 用于标定的平面越多, 测量精度越高。

2.2 高速旋转物体的频闪在线 PMP 系统

高速旋转物体频闪在线 PMP 系统如图 2 所示。物体快速旋转, 所以必须先在每个变形图像中“冻结”物体, 然后才能进行后续精确重建。本文采用高速摄影技术所用的频闪照明方法, 利用 DLP 投射二元编码圆形光栅。

根据高速成像系统的定义, CCD 相机曝光时间内运动物体的图像移动量超过两个像素或一对扫描线时, 会产生运动模糊效应。只有当物体的相对移动距离 $d < 2 \text{ pixel}$ 时, 运动物体才会被捕获为静止状态。假设 CCD 相机像素大小为 l , 则图像移动距

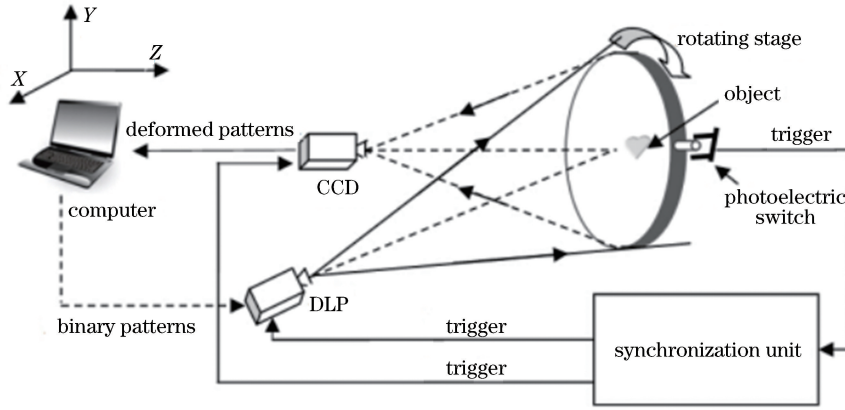


图 2 在线 PMP 测量系统装置图
Fig. 2 Setup of online PMP measurement system

离 d 必须满足方程

$$d < 2l. \quad (4)$$

被测物体在旋转平台上以某一转速进行圆周运动时,相机系统的光轴垂直于旋转平台的旋转中心。频闪投影时间 Δt 可视为一个微小的量,在频闪投影时间内,物体的运动可以假定为匀速直线运动。根据 CCD 成像理论,物体所成像的相对移动速度 V' 与 CCD 相机的垂轴放大率 β 和空间中物体的实际速度 V 成正比, Δt 内的运动距离 d

可以表示为

$$d = V\beta\Delta t = V'\Delta t. \quad (5)$$

如图 3 所示,在 CCD 相机坐标系中,图像相对移动速度 V' 为最大速度,即

$$V' = \frac{2\pi\omega r_{\max}\beta\max(\cos\alpha, \sin\alpha)}{60}, \quad (6)$$

式中: ω 为旋转平台的转速 (r/\min); r_{\max} 为测量区域的最大旋转半径; α 为被测物体运动方向与 CCD 相机成像面 y 轴方向的夹角。

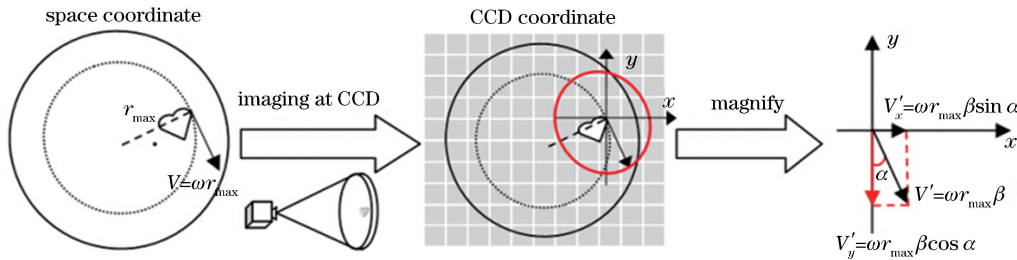


图 3 相机坐标系下物体像的实际速度
Fig. 3 Object's image actual velocity in CCD coordinate

将(5)式、(6)式和代入(4)式,可得

$$\Delta t < \frac{120l}{2\pi\omega r_{\max}\beta\max(\cos\alpha, \sin\alpha)}. \quad (7)$$

位置定位单元安装在物体运动方向与 CCD 相机成像面 y 轴方向平行的位置,因此 $\max(\cos\alpha, \sin\alpha) \approx 1$,进而(7)式可简化为

$$\Delta t < \frac{60l}{\pi\omega r_{\max}\beta}. \quad (8)$$

采用的投影设备为数字投影仪 (DLP LightCrafter 4500, Texas Instruments),该投影仪投影二元编码光栅图像时,最短闪光时间为 $235 \mu s$,刷新频率可达到 4225 Hz ;而投影灰度编码正弦光栅图像时,最短闪光时间需 $8333 \mu s$,刷新频率为 120 Hz 。为了在最大频闪投影时间内通过 DLP 投

射出光栅图像,将 Floyd-Steinberg 提出的二元脉冲密度编码算法用于正弦光栅编码二元光栅^[19],图 4(a)所示为二元光栅的一个例子,图 4(a)的截面如图 4(c)所示;将 DLP 适当离焦^[20],并对二元编码光栅进行频闪投影,CCD 采集的变形条纹图像如图 4(b)所示,其中变形条纹图像的强度变化具有正弦分布特性。因此,(1)式可以描述所采集的变形条纹图像。

除了保证图像的清晰度外,所采集变形条纹图像中的物体必须固定在同一像素位置,才能满足(2)式的要求。由于旋转运动具有可重复性和周期性,所需的 N 帧变形条纹图像可以在 N 个不同的旋转周期内采集,因此,同步单元对在线 PMP 系统必不可少,其同步控制过程如图 5 所示。

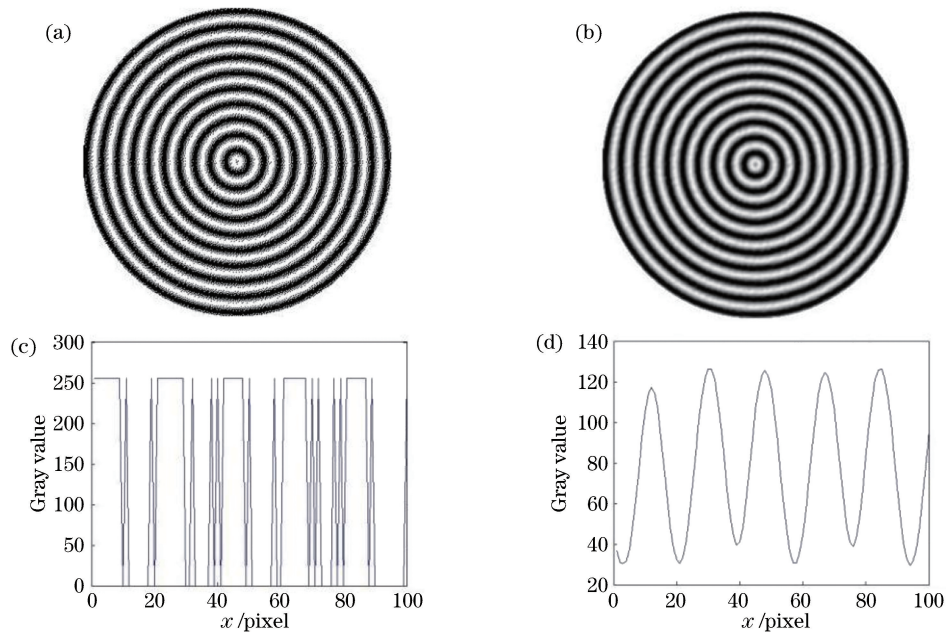


图 4 二元光栅。(a)圆形二元光栅;(b)离焦之后的条纹图形;(c)图(a)的剖面图;(d)图(b)的剖面图
Fig. 4 Binary-coded gratings. (a) Circular binary-coded grating; (b) fringe pattern after defocusing; (c) sectional view of (a); (d) sectional view of (b)

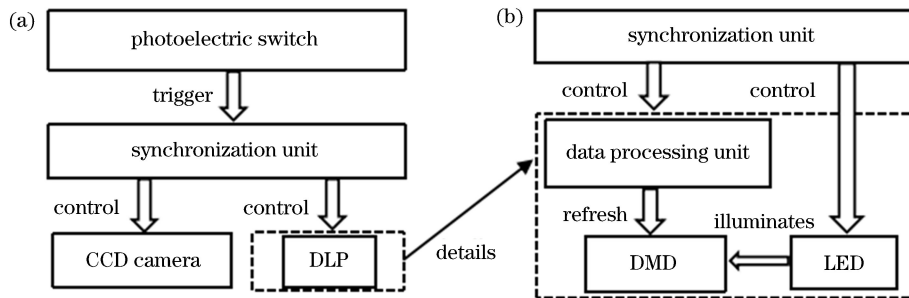


图 5 同步过程示意图。(a)同步控制过程;(b) DLP 控制过程
Fig. 5 Schematic of synchronization process. (a) Synchronization control process; (b) DLP control process

当物体旋转至同一位置时,采用光电转换开关产生脉冲触发信号,触发同步单元控制 CCD 相机采集对应的变形条纹图像,结果如图 5(a)所示;同时触发 DLP 投影二元编码光栅图像到待测物体表面, DLP 的详细控制过程如图 5(b)所示,其中 LED 闪光灯和 DMD 的刷新都由同步单元触发。

以五步相移算法为例,同步单元的时序如图 6 所示。在待测物体旋转运动的一个周期内,当光电转换开关检测到旋转平台上物体运动到固定位置时,光电转换开关向同步单元发送脉冲信号,同步信号由该脉冲信号的上升沿触发后,产生一个同步控制信号,CCD 相机在同步控制信号的上升沿到达时开启。延迟一段时间后,投影仪的 LED 灯开始频闪投影当前存储在数字微反射镜(DMD)上的光栅图像,当 CCD 相机完成当前采集后,控制投影仪 DMD

刷新下一帧光栅图像,系统进入下一个周期。经过 5 个周期,5 帧相邻相移量为 $2\pi/5$ 的变形条纹图像即可完成采集,在所采集的 5 帧图像中,物体被“冻结”在图像的固定位置。因此,可利用(1)~(3)式的静态 PMP 相移算法对高速旋转物体进行三维面形重建。LED 开始频闪投影的时间与 CCD 相机开始采集的时间有一段延时,目的是为了确保变形条纹图像在相同亮度和对比度条件下采集,通过多次实验,本文将延迟时间设置为 $50 \mu\text{s}$ 。

3 数值模拟

为了分析旋转运动的影响,在仿真实验中使用二元脉冲密度编码方法生成的二元圆形相移光栅。图 7(a)所示为设计的一帧二元编码圆形光栅图像;图 7(b)为局部区域放大图像。

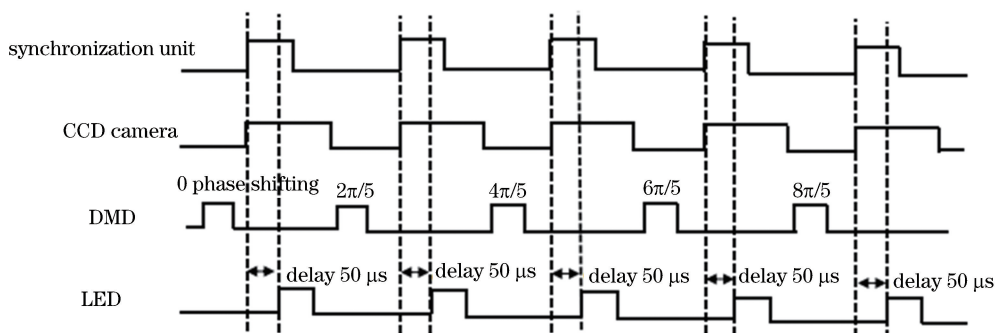


图 6 同步控制时序图

Fig. 6 Time-sequence of synchronization control process

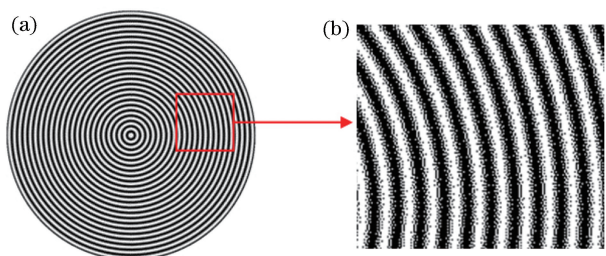


图 7 一帧圆形二元光栅。(a)二元脉冲密度编码光栅图像；(b)光栅放大区域

Fig. 7 One frame of circular binary-coded grating. (a) Circular binary pattern encoded by pulse density; (b) magnified area of grating

在同步单元的触发信号和 CCD 摄像机控制信号的上升边缘,均存在不理想的时间延迟。因此,重建精度受到时间延迟的影响。有许多控制时间延迟的方法,如容错控制和模糊控制^[21-22]。容错控制技术能够逼近任何实际系统中不可避免的未知非线性,模糊控制更容易建立语言控制规则^[23-24],这些技术与自适应控制、人工智能和神经网络等相结合,可以提高控制系统的性能,并能应对各种困难,如未建模的动力学和动态干扰。杨光红在 1999 年对电压比较器高频振荡引起的时间延迟进行了详细研究,其认为实际和理想波形在前后位置存在误差,即同步时序不稳定;时间延迟很短,一般小于从示波器波形观察到的 $5 \mu\text{s}$ ^[25]。为了模拟时间延迟对重建的影响,以不同的旋转速度重建图 8(a)中所示的峰值函数剖面的仿真对象;图 8(b)给出了不同转速下的最大、最小和平均绝对误差(MAE)。当旋转速度小于 2000 r/min 时,重建结果受同步单元的影响较小。

4 实验结果及分析

高速旋转物体在线 PMP 的实验装置如图 9 所

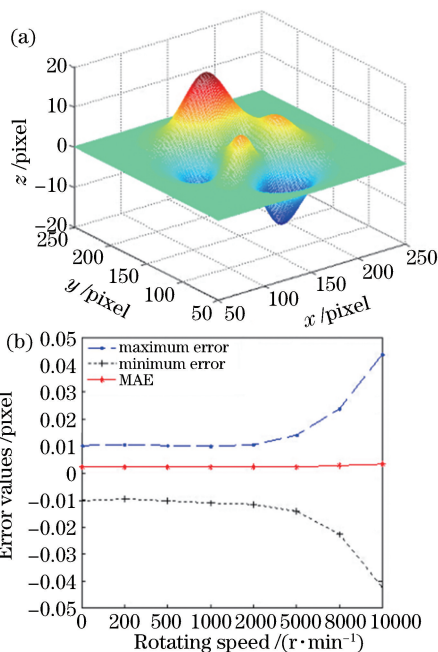


图 8 仿真结果。(a)峰值函数；(b)重构误差
Fig. 8 Simulation results. (a) Peak function; (b) reconstruction errors

示。设备类型和参数如表 1 所示。DLP 和 CCD 都工作在外触发模式下;DLP 对二元编码光栅图像要求最短闪光时间为 $235 \mu\text{s}$ 。采用五步相移算法实

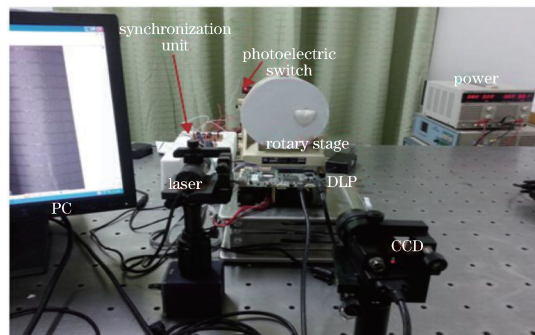


图 9 高速旋转物体在线 PMP 实验装置图
Fig. 9 Experimental setup of online PMP measurement for high-speed rotating object

表 1 设备类型和参数
Table 1 Types and parameters of devices

Device	Type	Parameter
DLP	LightCrafter™ 4500	Resolution: 912 pixel × 1140 pixel
CCD camera	GM501-H	Resolution: 1024 pixel × 768 pixel
Rotating stage	—	Diameter: 200 mm
Step motor	Zolix-RSA200	Speed: 300 r/min
Controller	SC3	Voltage: 220 V

现被测物体三维面形重建。

在传统的常亮投影方式下,采集到的一帧变形条纹图像如图 10 所示,可以看到常亮投影下采集图像上物体模糊,无法利用该变形条纹图像重建被测物体的三维面形信息。



图 10 常亮投影方式下变形条纹图像

Fig. 10 Deformed pattern under permanent projection

根据现有实验设备,表 2 给出了根据(8)式计算的频闪投影时间所需的参数。以(8)式计算出的频闪投影临界时间 $290.30 \mu\text{s}$ 为依据,选择满足该临界条件的实际频闪投影时间 $290 \mu\text{s}$ 和不满足临界条件的另一个实际频闪投影时间 $580 \mu\text{s}$,进行对比实验及分析讨论。本文所提方法采集到的第 1、3 帧变形条纹图像如图 11(a)~(b)所示,频闪投影时间为 $290 \mu\text{s}$ 。高速旋转平台上的物体被“冻结”在变形条纹图中相同的像素位置。

表 2 计算频闪时间所需的参数

Table 2 Parameters to calculate stroboscopic time

Parameter	Value
β	8.045×10^{-3}
$L / \mu\text{m}$	2.2
$\omega / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	300
$R_{\text{max}} / \text{mm}$	60

图 11 变形条纹图像中虚线框区域为感兴趣区域,利用所提方法重建被测物体的三维面形,结果如

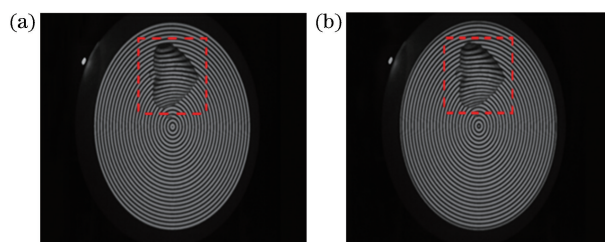


图 11 采集变形条纹图。(a)第一帧变形条纹图;
(b)第三帧变形条纹图

Fig. 11 Captured deformed patterns. (a) First-frame deformed pattern; (b) third-frame deformed pattern

图 12(b)所示。结果表明,所提出的高速旋转物体频闪在线三维测量方法能够快速准确地重建物体三维面形。

当频闪投影的时间增加到 $580 \mu\text{s}$ 时,所得结果如图 12(a)所示。在重建物体三维面形中可以看出,物体边缘处高速旋转运动引起的运动模糊效应非常显著。图 13(b)给出了频闪时间分别为 $290 \mu\text{s}$ 、 $580 \mu\text{s}$ 时的重建物体剖面图;图 13(a)、图 13(c)所示为图 13(b)区域的放大结果。从图中可以看出,频闪时间为 $580 \mu\text{s}$ 的重建面形在边缘区域产生较大的误差。因此,当频闪投影时间超过临界时间 $290.30 \mu\text{s}$ 时,高速旋转被测物体的三维面形不能精确重建。

当 DLP 的频闪时间设置为 $290 \mu\text{s}$ 时,在不同的旋转速度下,物体的重建三维结果如图 14 所示。当旋转速度为 300 r/min 时,重建面形较光滑,边缘轮廓信息分明,重建结果很好,如图 14(a)所示;当旋转速度增加到 450 r/min 时,物体三维面形信息虽然被重建,但一些特征可能会丢失,如图 14(b)所示;而当转速度设置为 870 r/min 时,重建结果很差,清晰度不够,如图 14(c)所示。

因为变形条纹图像的亮度和对比度受到相机灵敏度 and 帧频的限制,物体转速越高,获取的变形条纹亮度和对比度越低,而低亮度和对比度的变形条纹

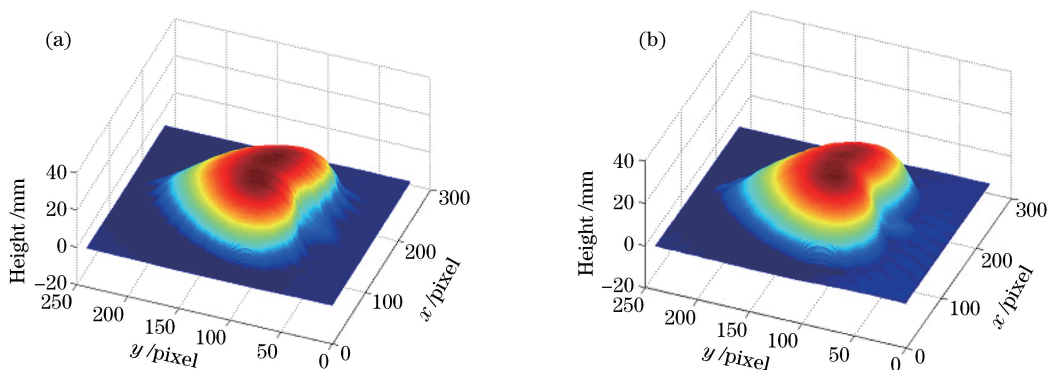


图 12 重建物体的三维面形图。(a)频闪时间 $580 \mu\text{s}$; (b)频闪时间 $290 \mu\text{s}$

Fig. 12 Reconstructed three-dimensional surface shapes of object. (a) Stroboscopic time is $580 \mu\text{s}$; (b) stroboscopic time is $290 \mu\text{s}$

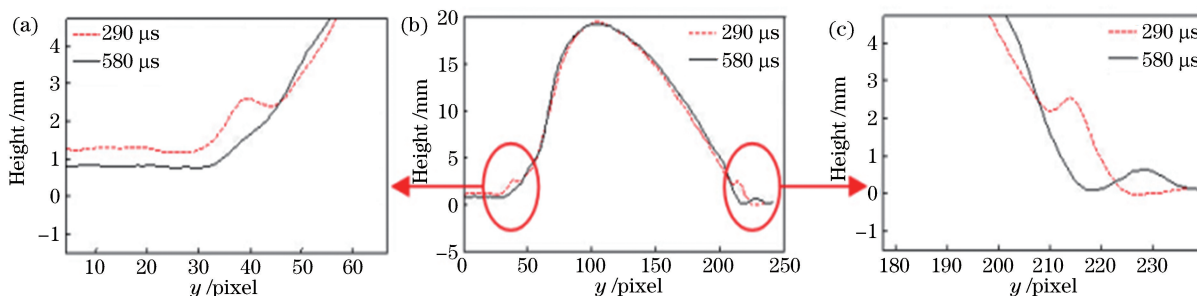


图 13 重建物体三维面形截面。(a)左部分轮廓; (b)三维面形截面; (c)右部分轮廓

Fig. 13 Cross-sections of reconstructed three-dimensional surface shapes of object. (a) Profile chart of left circled ROI; (b) cross-sections of three-dimensional surface shapes; (c) profile chart of right circled ROI

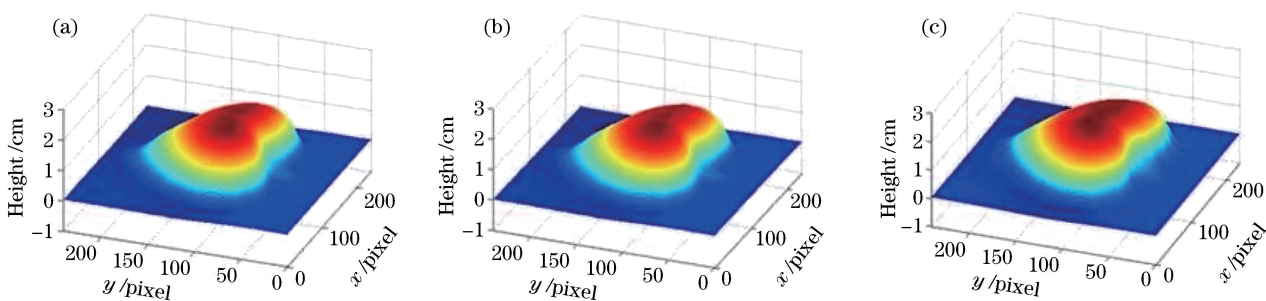


图 14 不同转速下重建物体的三维面形。(a) 300 r/min ; (b) 450 r/min ; (c) 870 r/min

Fig. 14 Reconstructed three-dimensional surface shapes of object. (a) 300 r/min ; (b) 450 r/min ; (c) 870 r/min

图像会导致重建结果错误。频闪投影时间设置为 $290 \mu\text{s}$, 其他条件不改变, 所提方法与 FTP 算法重建结果的剖面如图 15 所示。由于 FTP 算法进行三维面形重建时只需一帧变形条纹图像, 重建结果的精度受到环境光和物体反射率变化的影响, 因此, 重建结果中物体的边缘信息缺失, 而所提方法得到的重建结果较好。

测量相同条件下的静态物体, 放大的左、右感兴趣区域剖面图给出了更多的细节信息, 如图 15(a)、(c) 所示, 频闪时间为 $290 \mu\text{s}$ 时得到的结果与静态结果非常类似, 均具有较高的精度。

最后, 采用已知高度的 3 个平面测试所提方法的可重复性。对比本文所提方法在旋转条件下的结果和传统 PMP 方法在静态条件下的实验结果, 实验参数与表 2 一致。重建平面的平均绝对误差、均方根(RMS)误差用于评估测量精度和重复精度。表 3 所示为 3 个已知平面的比较结果, 其中 h_0 为测试平面的已知高度, h_{avg} 为测量平面的平均高度。

从表 3 可以看出, 所有重建平面的 $\text{MAE} < 0.1 \text{ mm}$, $\text{RMS} < 0.07 \text{ mm}$ 。结果表明, 在相应的计算频闪投影时间内, 本文方法可精确测量不同速度的旋转物体。

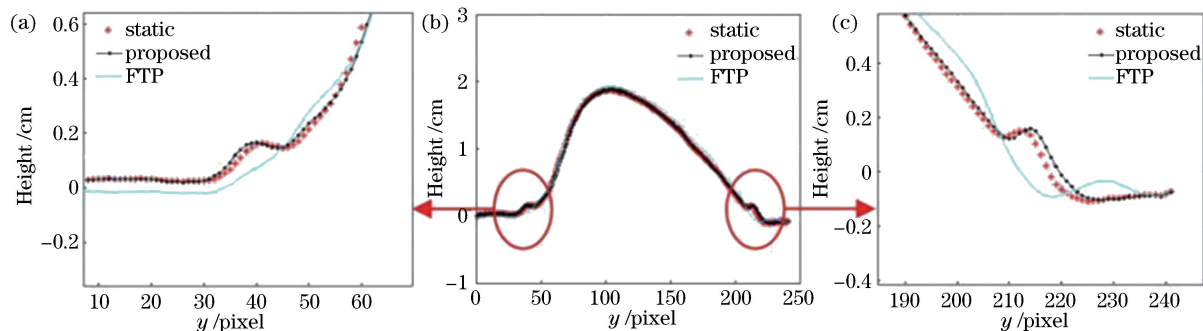


图 15 重建物体三维面形截面图。(a)左部分轮廓；(b)三维面形截面；(c)右部分轮廓

Fig. 15 Cross-section of reconstructed three-dimensional surface shapes of object. (a) Profile chart of left circled ROI; (b) cross-sections of three-dimensional surface shapes; (c) profile chart of right circled ROI

表 3 3 个已知高度平面的测量结果

Table 3 Measured results of three planes at known altitudes

Parameter	Experimental result					
	5 mm		10 mm		15 mm	
	Static	Rotating	Static	Rotating	Static	Rotating
h_{avg}/mm	4.974	4.966	9.966	9.952	15.021	15.035
MAE /mm	0.089	0.095	0.093	0.099	0.078	0.095
RMS /mm	0.066	0.068	0.061	0.062	0.069	0.071

5 结 论

提出了一种基于二元编码光栅的高速旋转物体频闪在线 PMP。结果表明,所提方法可以实现高分辨率、高重建精度,具备可重复性。投影新颖的二元编码圆形光栅,降低了旋转运动对物体三维面形测量精度的影响;频闪投影方式降低了运动模糊,并且二元编码光栅减少了频闪投影所需时间;同步控制单元的设计为通过 PMP 进行高速旋转物体三维面形测量提供了可能。所提方法可以避免工件离线检测耗时长的缺点,基本可以同步获取测量数据,不会影响生产周期的连续性,减少了额外的测量时间成本和误差。该方法重建精度较高,可应用于工业流水线。

参 考 文 献

- [1] Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(18): 3105-3108.
- [2] Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes [J]. *Applied Optics*, 1983, 22(24): 3977-3982.
- [3] Toyooka S, Iwaasa Y. Automatic profilometry of 3-D diffuse objects by spatial phase detection[J]. *Applied Optics*, 1986, 25(10): 1630-1633.
- [4] Su L K, Su X Y, Li W S, *et al.* 3-D profilometry based on modulation measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(9): 1257-1262.
苏礼坤, 苏显渝, 李万松, 等. 基于调制度测量的三维轮廓术 [J]. *光学学报*, 1999, 19(9): 1257-1262.
- [5] Li C M, Cao Y P, Chen C, *et al.* Computer-generated moire profilometry [J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 26815-26824.
- [6] Chen Y T, Cao Y P, Chen C, *et al.* Phase measurement profilometry based on binary gratings with unequal duty cycle [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0815021.
陈雨婷, 曹益平, 陈澄, 等. 基于不等占空比二元光栅的相位测量轮廓术 [J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0815021.
- [7] Saxena M, Eluru G, Gorthi S S. Structured illumination microscopy [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(2): 241-275.
- [8] Zuo C, Tao T Y, Feng S J, *et al.* Micro Fourier transform profilometry (μ FTP): 3D shape measurement at 10,000 frames per second [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 102: 70-91.
- [9] Lu L, Xi J T, Yu Y G, *et al.* New approach to improve the accuracy of 3-D shape measurement of moving object using phase shifting profilometry [J]. *Optics Express*, 2013, 21(25): 30610-30622.

- [10] Wang P, Cao Y P, Yang X, *et al.* On-line phase measuring profilometry for a rotating object [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(11): 114112.
- [11] Chen Y T, Cao Y P, Yuan H, *et al.* A stroboscopic online three-dimensional measurement for fast rotating object with binary dithered patterns [J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2018, 40(8): 2660-2668.
- [12] Yang G W, Sun C K, Wang P. Real-time stroboscopic laser fringe-pattern projection system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1112002.
杨国威, 孙长库, 王鹏. 频闪激光光栅条纹实时投射系统[J]. *光学学报*, 2014, 34(11): 1112002.
- [13] Ding S W, Zhang X H, Yu Q F, *et al.* Overview of non-contact 3D reconstruction measurement methods [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 070003.
丁少闻, 张小虎, 于起峰, 等. 非接触式三维重建测量方法综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 070003.
- [14] Zheng D L, Da F P. Double-step phase-shifting algorithm for fringe projection measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0512004.
郑东亮, 达飞鹏. 双步相移光栅投影测量轮廓术[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0512004.
- [15] Zuo C, Huang L, Zhang M L, *et al.* Temporal phase unwrapping algorithms for fringe projection profilometry: a comparative review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 85: 84-103.
- [16] Han Y, Zhang Q C, Wu Y S. Performance comparison of three basic phase unwrapping algorithms and their hybrid algorithms [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0826002.
韩宇, 张启灿, 吴应山. 三种基本相位展开算法及其融合算法的性能比较[J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0826002.
- [17] Zhang Q C. Technical study of three-dimensional shape measurement for dynamic process [D]. Chendu: University of Sichuan of China, 2005: 20-25.
张启灿. 动态过程三维面形测量技术研究[D]. 成都: 四川大学, 2005: 20-25.
- [18] Ma Q N, Cao Y P, Chen C, *et al.* Intrinsic feature revelation of phase-to-height mapping in phase measuring profilometry [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 108: 46-52.
- [19] Floyd R W, Steinberg L. An adaptive algorithm for spatial gray scale [J]. *Proceedings of Society for Information Display*, 1976, 17(2): 75-77.
- [20] Lei S Y, Zhang S. Digital sinusoidal fringe pattern generation: defocusing binary patterns VS focusing sinusoidal patterns [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(5): 561-569.
- [21] Li Y M, Sui S, Tong S C. Adaptive fuzzy control design for stochastic nonlinear switched systems with arbitrary switchings and unmodeled dynamics [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, 47(2): 403-414.
- [22] Li J L, Yang G H. Development and prospect of adaptive fault-tolerant control [J]. *Control and Decision*, 2014, 29(11): 1921-1926.
李俊领, 杨光红. 自适应容错控制的发展与展望[J]. *控制与决策*, 2014, 29(11): 1921-1926.
- [23] Yin S, Shi P, Yang H Y. Adaptive fuzzy control of strict-feedback nonlinear time-delay systems with unmodeled dynamics [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, 46(8): 1926-1938.
- [24] Yin S, Yang H Y, Gao H J, *et al.* An adaptive NN-based approach for fault-tolerant control of nonlinear time-varying delay systems with unmodeled dynamics [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2017, 28(8): 1902-1913.
- [25] Liu J J, Liao X S, Yuan Y H. Method studies in improving accuracy of zero-crossing detection [J]. *Industrial Control Computer*, 2009, 22(10): 80-81, 88.
刘俊俊, 廖小松, 袁嫣红. 提高过零检测精度的方法研究[J]. *工业控制计算机*, 2009, 22(10): 80-81, 88.