

基于单帧四灰阶条纹投影的实时相位测量轮廓术

杨超智, 曹益平*

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

摘要 提出了一种基于单帧四灰阶条纹投影实时测量物体三维面形的新方法。该方法将四灰阶中非零三阶的不同灰度依次等宽循环排列以编码成一帧三灰阶条纹, 将该三灰阶条纹投影到待测物体上, 利用图像采集相机采集相应的四灰阶变形条纹, 其中第四灰阶对应变形条纹图中的阴影区域。采用图像分割方法分别提取该四灰阶变形条纹中的三阶非零条纹, 并通过二值化方法解调出三帧占空比为 $1/3$ 且条纹相对错位 $1/3$ 周期的二值化变形条纹。对上述二值化变形条纹进行基频提取后, 通过傅里叶逆变换处理, 可获得三帧相移量为 $2\pi/3$ 的正弦条纹, 最后利用相位测量轮廓术对物体三维面形进行恢复。实验验证了所提方法的可行性, 所提方法刷新率快, 且对投影仪伽马效应不敏感, 在实时三维测量中具有广阔的应用前景。

关键词 测量; 三维测量; 相位测量; 四灰阶条纹; 二元光栅; 单帧条纹; 实时测量

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1812003

Real-Time Phase Measuring Profilometry Based on Single-Shot Four-Grayscale Fringe Projection

Yang Chaozhi, Cao Yiping*

College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

Abstract A new real-time three-dimensional (3D) measuring method is proposed based on single-shot four-grayscale fringe projection, in which different non-zero three-scale grays in the four gray levels are cyclically arranged in equal width to encode a frame of three-grayscale fringe pattern. When the three-grayscale fringe pattern is projected onto the measured object, the corresponding four-grayscale deformed pattern is captured by the imaging camera, and the fourth grayscale corresponds to the shadow area in the deformed pattern. By the image segmentation method, non-zero three-grayscale fringes in the four-grayscale deformed pattern can be extracted respectively. After binarization, three frames of binary deformed patterns with $1/3$ duty cycle and relative displacement of $1/3$ period can be demodulated. So three frames of sinusoidal fringes with a $2\pi/3$ shifted phase can be extracted by the inverse Fourier transform after filtering the corresponding fundamental frequency of the three frames of binary deformed patterns, and the 3D shape of the object can be reconstructed by phase measuring profilometry (PMP). The experimental results confirm the feasibility of the proposed method. Because of the fast refreshing rate and the insensitivity to the gamma effect of the projector, the proposed method has a potential application prospect in real-time 3D measurement.

Key words measurement; three-dimensional measurement; phase measurement; four-grayscale fringe; binary grating; single frame stripe; real-time measurement

OCIS codes 120.5050; 150.6910; 120.6650

收稿日期: 2021-02-02; 修回日期: 2021-03-12; 录用日期: 2021-04-13

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX02204-008)

通信作者: *ypcao@scu.edu.cn

1 引言

随着数字投影技术以及图像传感技术的迅速发展,基于结构光投影的三维面形测量技术由于具有高速率、高精度和非接触等优势而被广泛应用于机器视觉、人脸识别和工业检测等领域^[1-8]。其中,三维物体实时检测技术备受关注^[9-12]。目前常用的实时三维面形检测技术包括傅里叶变换轮廓术(FTP)^[13-14]、基于高速投影的相位测量轮廓术(PMP)^[15]以及单帧彩色条纹轮廓术^[16]等。1983年,Takeda等^[17]提出的傅里叶变换轮廓术采用正弦光栅获取单帧正弦变形条纹,实现了实时测量,但测量精度受到空间频域滤波的限制。基于高速投影的相位测量轮廓术虽然具备较高的测量精度^[18-19],但单帧投影速度相对较慢。单帧彩色条纹轮廓术通过投影一帧由红(R)、绿(G)、蓝(B)三通道组成的三个相移量为 $2\pi/3$ 的正弦条纹^[16],获得被物体调制的变形条纹后,分别从R、G、B分量中捕获对应的三帧正弦变形条纹,进而完成物体的实时三维面形重建。但是彩色条纹轮廓术中三色正弦条纹之间的颜色串扰以及灰度不平衡在一定程度上影响了物体的三维面形重建精度。苏显渝等^[20]提出了一种罗奇光栅离焦投影 FTP,通过数字光投影(DLP)投影二元罗奇光栅并结合离焦技术,得到了正弦分布光场。该方法可以避免投影仪非线性因素的影响,提高了投影速度及三维光学测量系统的灵活性。但罗奇光栅在离焦情况下仍存在高次谐波,这会影响到光栅的正弦特征,且投影仪的离焦量难以精确控制,导致对比度较低。

为了提升罗奇光栅离焦投影 FTP 的精度,陈雨婷等^[21]改进了罗奇光栅离焦投影 FTP,提出了一种基于不等占空比二元光栅的相位轮廓术,投影 N 帧($N \geq 3$)条纹间隔为 $1/N$ 周期的不等占空比二元光栅至待测物体上,根据其频谱分布采取合适的低通滤波器^[22]进行滤波并进行傅里叶逆变换,得到 N 张相移量为 $2\pi/3N$ 的正弦变形条纹,进而采取 N 步 PMP 实现了物体的三维面形重建。该方法通过滤波的方式避免了离焦导致的对比度下降现象,并减少了实际数字投影系统中伽马非线性效应的影响,提高了投影系统的刷新率,但该方法采用多帧投影,测量速度较慢。因此,Fu等^[23]提出了一种基于彩色二元光栅的实时三维面形测量术,将R、G、B三通道的二元光栅条纹混合编码至一帧相对错位为 $1/3$ 周期的彩色条纹,通过对采集得到的变形条纹中的

R、G、B三通道进行分离与二值化处理以及正弦特征提取,利用三步 PMP 实现对物体的实时重建。该方法巧妙地运用彩色二元光栅在各颜色通道中的特征,实现了基于不等占空比二元光栅的相位轮廓术的单帧实时应用,但该方法采用彩色数字光栅进行投影,在使用彩色 CCD(charge-coupled device)相机对变形条纹进行采集时,速度相对较慢。

因此,本文提出一种基于单帧四灰阶条纹投影的实时相位测量轮廓术。使用数字投影系统对由非零三阶的不同灰度等宽循环排列而成的条纹图进行投影,通过边缘提取与动态阈值选取,对拍摄的变形条纹进行分割。二值化处理后从单帧四灰阶变形条纹图中分解出三帧占空比为 $1/3$ 的二值化变形条纹,对其进行正弦特性条纹提取,生成三帧相移量为 $2\pi/3$ 的正弦变形条纹,进而使用三步相位测量轮廓术即可对物体进行三维重建。由于采用单帧四灰阶条纹进行投影,当采用 DLP 4500 投影仪投影时,可实现单帧条纹高达 1428 Hz 的刷新率,如果采用较高帧率的单色相机,即可实现快速实时的三维测量。与传统 FTP 以及基于罗奇光栅的 FTP 相比,本文所提方法无需离焦处理。虽然正弦化导致部分高频信息丢失,但三帧相移技术使部分丢失的信息得到弥补,因此精度较高。与基于不等占空比二元光栅的相位轮廓术相比,本文所提方法仅需单帧投影,具备更好的实时性。与基于彩色二元光栅的实时三维面形测量术相比,本文所提方法可以采用价格低廉、刷新率更快的单色 CCD 相机,整体测量速度更快。

2 基于单帧四灰阶条纹投影的 PMP 原理

基于单帧四灰阶条纹投影的 PMP 的测量系统光路结构如图 1 所示,其中 AO 为图像采集 CCD 相机的光轴,BO 为数字投影仪 DLP 的光轴,O 点为被测

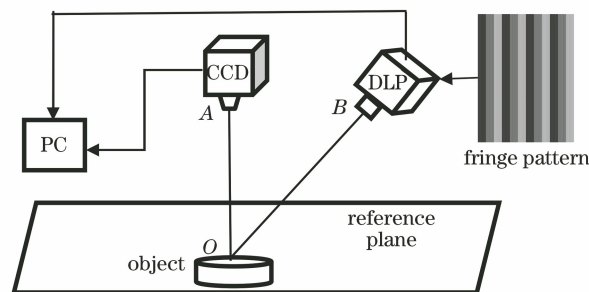


图 1 基于四灰阶条纹投影的 PMP 的实时测量系统
Fig. 1 Real-time measuring system of PMP based on four-grayscale fringe pattern projection

通常商用投影仪采用 RGB 三色实现 2^{24} 种颜色投影显示,同时其 8 bit 位深使投影仪的刷新率基本上控制在 60 Hz 左右。本文采用的投影仪是 DLP 4500 科学研究型投影仪,可以自行设置 1~8 bit 位深,当设置 1 bit 位深时刷新率可以高达 4225 Hz,所投信息为二值化信息。这里将 DLP 4500 科学研究型投影仪的位深设置为 2 bit,刷新率依然可以高达 1428 Hz。为了满足快速实时的三维测量需求,投影的信息为四值化信息,四灰阶条纹投影使用的数字投影图由图 2(a)所示的矩阵周期编

码完成,即将灰阶为 1、2 和 3 的三个非零灰阶依次等宽循环排列并进行编码,形成剖面如图 2(b)所示的三灰阶条纹,其中 x 为像素点在水平方向上的坐标。当该三灰阶条纹经 DLP 4500 灰度扩展后,被投影至参考面以及物体表面,PC 控制高帧率模式的 CCD 相机对参考面以及被物体调制的变形条纹进行采集,所获取的受环境光与参考面及待测物体表面反射率影响的条纹分布图如图 2(c)、(d)所示。可以看出,在变形条纹中,阴影的灰度对应未被编码入条纹的 0 值灰阶。

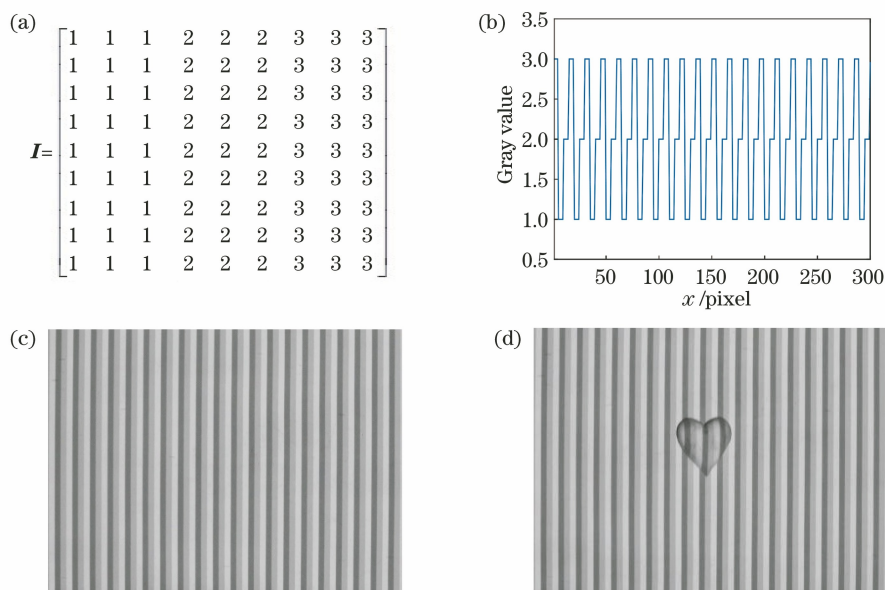


图 2 四灰阶编码条纹的投影与采集。(a)条纹投影矩阵;(b)条纹投影图的灰度分布;(c)参考面条纹的采集图;(d)变形条纹的采集图

Fig. 2 Projection and capturing of four-grayscale encoded fringe pattern. (a) Fringe pattern projection matrix; (b) grayscale distribution of fringe pattern projection; (c) capturing of reference fringe; (d) capturing of deformed fringe

对采集得到的两张条纹图进行分割,分别获得参考面与变形条纹的三帧占空比为 1/3 的二值化条纹图像。但在四灰阶条纹投影过程中,由于条纹相邻边缘的光学邻近效应(OPE),条纹边缘处存在数

个像素的灰度过渡区域,如图 3(a)所示。最高灰阶与最低灰阶的边界处的数个像素点与第二阶灰阶的灰度值接近,使用全局多阈值分割将导致该边界处的错误分割,如图 3(b)所示。在沿 x 方向的每个条

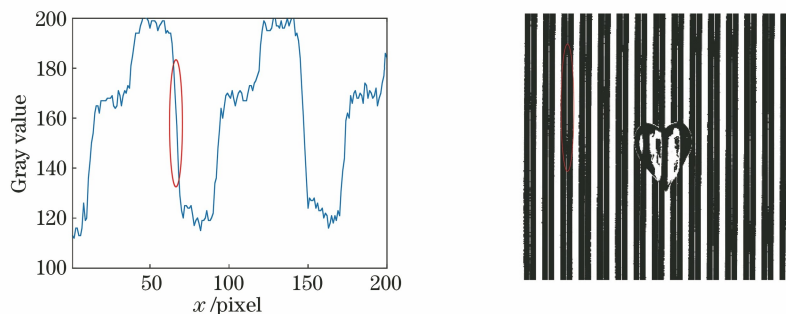


图 3 条纹周期边界的光学邻近效应。(a)条纹周期边界处的灰度分布图;(b)条纹的错误分割图

Fig. 3 OPE on periodic boundary of fringe pattern. (a) Gray-scale distribution on periodic boundary of fringe pattern; (b) inaccurate segmentation of fringe pattern

纹周期内,对于最高灰阶与最低灰阶邻近区域都有数个像素点的区域,其像素点的灰阶被判定为中间灰阶。因此,我们提出了一种基于条纹边缘检测以及区域动态阈值检测的条纹分割方法。

图 4 所示为从参考面所采集的四灰阶参考面条

纹图的第 513 行灰度分布图与该行沿 x 方向的微分分布图,其中 T_0 为一个条纹周期。可以发现,沿 x 方向的微分分布图中有清晰可见的波谷,波谷处对应条纹图中最高灰阶与最低灰阶的相邻边界,即周期边界。

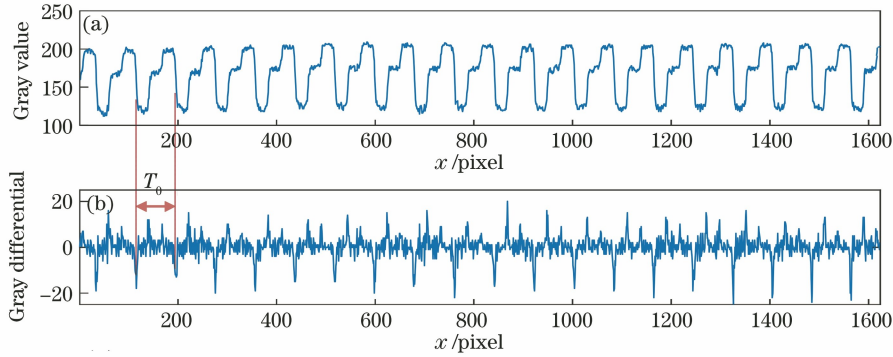


图 4 条纹周期边界寻找。(a)条纹灰度分布;(b)条纹灰度的微分分布

Fig. 4 Periodic boundary searching of fringe patterns. (a) Gray value of fringe pattern; (b) gray differential of fringe pattern

通过边缘检测寻找到单行的数个周期边界后,即可对单个周期进行处理,条纹分割的整个过程如图 5 所示。首先通过对沿水平方向的灰度进行微分处理,寻找到单行的数个周期,分离周期并对单个周期进行单独处理。对每个周期进行聚类分析,由于聚类分析的簇与实际变形条纹的灰阶无法完全对应,比如簇 1 代表某一周期的最低灰阶,即阴影信息,但在另一周期中,阴影像素的数量可能大于第二个灰阶的像素数量,在该周期中簇 1 表示的是第二个灰阶,显然这是错误的,因此,我们必须通过读取每个簇的真实灰度值范围来进行簇元素下标的调

整,簇元素与每个周期中的真实灰阶有适当的映射。通过逐行逐周期的聚类处理,将变形条纹图以灰度为特征分为四个灰度子簇,按照簇元素的下标对条纹图中子簇的灰度进行重新赋值,获得仅具有四个灰度(存在阴影)或三个灰度(不存在阴影)的变形条纹。最后利用重新赋值后的四值变形条纹的灰度特征进行分解,获得三帧间隔为 $1/3$ 周期的二值条纹以及一帧代表阴影信息的图片。需要指出的是,一些零星的像素点可能被错误地聚类,因此需要一个适当的空间滤波器来优化变形条纹。

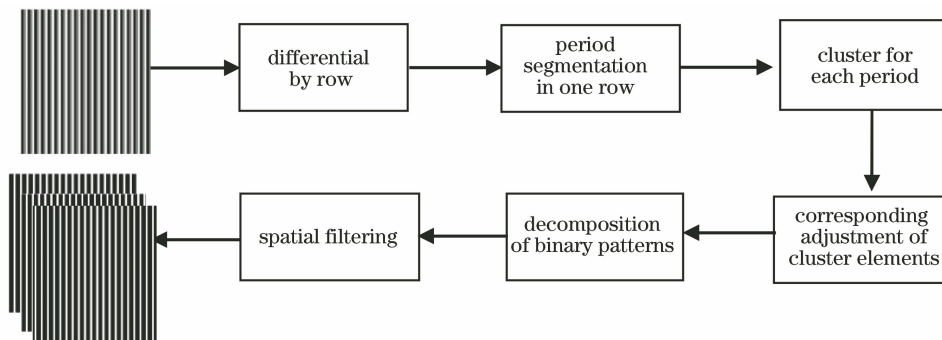


图 5 条纹分割流程图

Fig. 5 Flow chart of fringe segmentation

采用所提方法进行分解,可得到三帧占空比为 $1/3$ 、间隔为 $1/3$ 周期的二值化条纹,如图 6 所示。

获得三帧占空比为 $1/3$,间隔为 $1/3$ 周期的二值化条纹后,采用基于不等占空比二元光栅的 PMP 对物体三维面形进行重建。经灰度编码的二元光栅

可以被视为矩形窗函数 $\text{rect}(\cdot)$ 与梳状函数 $\text{comb}(\cdot)$ 的卷积,其灰度分布 $g(x, y)$ 可以表示为

$$g(x, y) = A_0 \text{rect}\left(\frac{x}{w_1}\right) * \text{comb}\left(\frac{x}{T_0}\right), \quad (1)$$

式中: A_0 为灰度分布中的非零常量; w_1 为光栅非

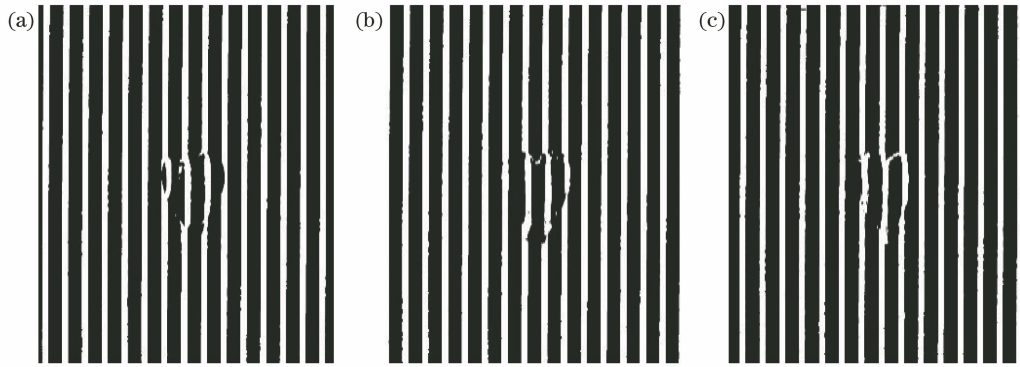


图 6 条纹分割得到的间隔为 $1/3$ 周期的二值化条纹。(a) 第一帧二值化条纹;
(b) 第二帧二值化条纹;(c) 第三帧二值化条纹

Fig. 6 Binary fringe patterns with $1/3$ period displacement after fringe segmentation. (a) 1st frame of binary fringe pattern;
(b) 2nd frame of binary fringe pattern; (c) 3rd frame of binary fringe pattern

零的宽度; y 为像素点在垂直方向上的坐标; $*$ 表示卷积。占空比可表示为 $P_{dc} = \frac{\omega_1}{T_0}$ 。

在不等占空比二元光栅中, 占空比 $P_{dc} < 1/2$ 。在对二元光栅灰度分布进行傅里叶变换后, 其傅里叶频谱为

$$G(f_x, f_y) = A_0 \omega_1 \sum_{j=-\infty}^{j=\infty} \text{sinc}(\omega_1 f_x) \cdot \delta(f_x - j f_0), \quad (2)$$

式中: G 为频谱分布函数; f_x, f_y 分别为水平和垂直方向上的频率分量; $\text{sinc}(\cdot)$ 为辛格函数; $\delta(\cdot)$ 为冲激函数; j 为高次谐波的阶数; $f_0 = 1/T_0$ 为频谱中的基频。选择适当的低通滤波器对其进行滤波, 滤波后的频谱分布为

$$G(f_x, f_y) = A_0 \omega_1 \left[\delta(f_x) + \text{sinc}\left(\frac{\omega_1}{T_0}\right) \delta(f_x + f_0) + \text{sinc}\left(\frac{\omega_1}{T_0}\right) \delta(f_x - f_0) \right]. \quad (3)$$

通过傅里叶逆变换, 得到包含正弦信息的光场分布:

$$I_F(x, y) = A_0 P_{dc} T_0 + 2A_0 P_{dc} T_0 \text{sinc}(P_{dc}) \cos(2\pi f_0 x). \quad (4)$$

从(3)、(4)式中可以看出, 正弦信息仅与原二元光栅的基频信息 f_0 相关, 二元光栅的占空比大小不会影响正弦信息中的相位分布。

因此, 通过分割得到的三帧占空比为 $1/3$ 、间隔为 $1/3$ 周期的二元变形条纹可表示为

$$\begin{cases} g_1(x, y) = A_0 \text{rect}\left(\frac{x}{\omega_1}\right) * \text{comb}\left(\frac{x}{T_0}\right) \\ g_2(x, y) = A_0 \text{rect}\left(\frac{x}{\omega_1}\right) * \text{comb}\left(\frac{x - T_0/3}{T_0}\right) \\ g_3(x, y) = A_0 \text{rect}\left(\frac{x}{\omega_1}\right) * \text{comb}\left(\frac{x - 2T_0/3}{T_0}\right) \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $g_1(x, y)$ 、 $g_2(x, y)$ 和 $g_3(x, y)$ 分别为第一帧、第二帧和第三帧二元变形条纹。

通过傅里叶变换、低通滤波和傅里叶逆变换, 得到正弦相移变形条纹:

$$\begin{cases} I_{1F}(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos\left[\frac{2\pi x}{T_0} + \varphi(x, y)\right] \\ I_{2F}(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos\left[\frac{2\pi x}{T_0} + \varphi(x, y) + \frac{2\pi}{3}\right] \\ I_{3F}(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos\left[\frac{2\pi x}{T_0} + \varphi\left(x, y + \frac{4\pi}{3}\right)\right] \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $I_{1F}(x, y)$ 、 $I_{2F}(x, y)$ 、 $I_{3F}(x, y)$ 分别为第一帧、第二帧和第三帧正弦条纹; 背景光强 $A(x, y) = A_0 P_{dc} T_0$; 条纹对比度 $B(x, y) = 2A_0 P_{dc} T_0 \times \text{sinc}(P_{dc})$; φ 为截断相位信息。

由(6)式得到 $\varphi(x, y)$ 的表达式为

$$\varphi(x, y) = \arctan\left\{\frac{\sqrt{3}[I_{1F}(x, y) - I_{3F}(x, y)]}{2I_{2F}(x, y) - I_{1F}(x, y) - I_{3F}(x, y)}\right\}. \quad (7)$$

由于 $\varphi(x, y)$ 被截断在 $(-\pi, \pi]$ 区间, 需要采用相位展开算法求取连续相位 $\Psi_d(x, y)$ 。如果用同样的方法得到参考平面的连续相位 $\Psi_r(x, y)$, 则表征物体高度的连续相位为

$$\Psi(x, y) = \Psi_d(x, y) - \Psi_r(x, y)。 \quad (8)$$

随后, 通过高度映射关系^[24] 恢复物体三维面形:

$$\frac{1}{h(x, y)} = a(x, y) + b(x, y) \frac{1}{\Psi(x, y)} + c(x, y) \frac{1}{\Psi^2(x, y)}, \quad (9)$$

式中: $h(x, y)$ 为三维面形的高度分布; 系统常量 $a(x, y), b(x, y), c(x, y)$ 可以通过数个已知高度的平面进行标定。

3 实验与分析

实验装置如图 7 所示, 主要由 DLP 4500 投影仪和 CCD 相机组成。DLP 4500 在投影深度为 2 bit 的条纹时投影频率为 1428 Hz, 满足高速投影的需求。

为了验证所提方法的可行性, 我们进行了不同

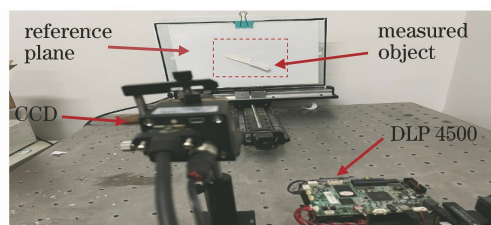


图 7 实验装置系统图

Fig. 7 Schematic of experimental setup

物体的三维面形测量实验, 图 8 是一个小刀的实验结果。图 8(a)、(b) 分别为放置在参考面上的小刀模型与对应的单帧四灰阶变形条纹, 图 8(c)、(d) 分别为从单帧四灰阶变形条纹中分解出的三帧二值化变形条纹和对应的正弦相移变形条纹, 图 8(e) 为受小刀高度调制的截断相位, 图 8(f) 为小刀的三维重建结果。从图 8 可见, 所提方法能较好地重构物体, 所提方法的可行性得到了较好的验证。由于采用单帧四灰阶条纹进行投影, DLP 4500 投影时仅需 2 bit 编码条纹, 投影条纹的刷新率高达 1428 Hz, 所提方法在实时、快速的在线测量中具有广阔的应用前景。

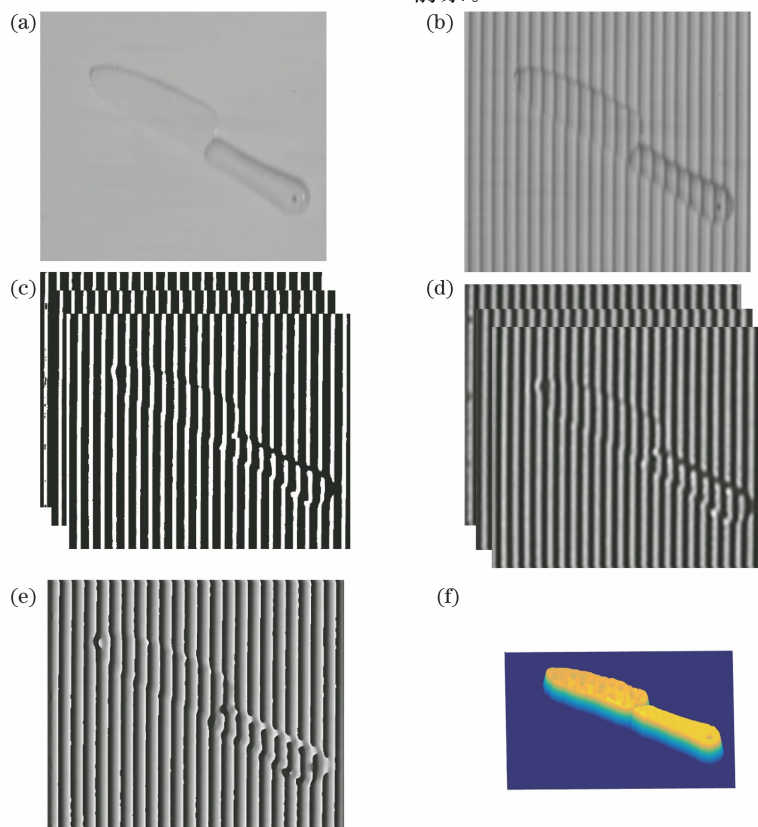


图 8 小刀测试实验。(a)小刀;(b)采集的变形条纹;(c)分割后的二值化变形条纹;(d)提取的正弦变形条纹;(e)截断相位;(f)三维重建结果

Fig. 8 Measuring experiment for knife. (a) Knife; (b) captured deformed fringe pattern; (c) binary deformed fringe pattern after segmentation; (d) extracted sinusoidal deformed fringe patterns; (e) wrapped phase; (f) 3D reconstructed result

为了验证所提方法的实时测量特性,图 9 展示了工件传送过程中的实时测量结果。待测工件以 20 mm/s 的速度传送,CCD 相机以 30 frame/s 的速度拍摄工件运动中的四灰阶变形条纹,图 9(a)、(b)、(c)展示了三张间隔 0.03 s 的实时拍摄的四灰阶变形条纹,图 9(d)、(e)、(f)展示了物体对应的截断相位,图 9(g)、(h)、(i)展示了对应的三维重建结果。可以看出,运用四灰阶条纹投影 PMP,可以完

整地对待测工件进行实时在线三维测量。待测工件表面平整,反射率均匀,在镂空区域存在不均匀的阴影,由于投影的条纹为非零三灰阶编码的四值条纹,镂空处阴影的灰度在采集到的变形条纹图中对应 0 值灰阶,与非阴影处的灰度差距较大,特征明显。因此,在物体的恢复结果中,待测工件的镂空小孔也得到了较为完整的重建。不同传送速度下的测量精度如表 1 所示,其中 RMSE 为均方根误差。

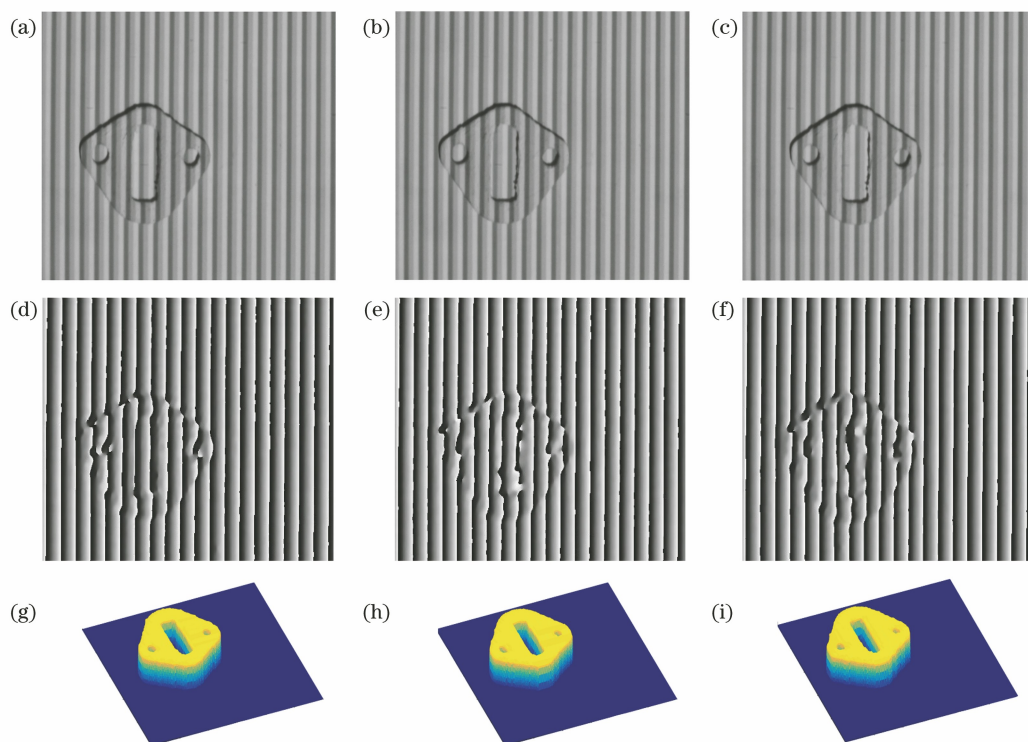


图 9 待测工件的实时测量实验。(a)(b)(c)实时采集的间隔为 0.03 s 的四灰阶变形条纹;
(d)(e)(f)对应的截断相位;(g)(h)(i)对应的重建结果

Fig. 9 Real-time measuring experiment for workpiece. (a)(b)(c) Four-grayscale deformed fringe patterns captured with 0.03 s period; (d)(e)(f) corresponding wrapped phases; (g)(h)(i) corresponding reconstructed results

表 1 不同传送速度下工件重建结果的均方根误差

Table 1 RMSE of reconstruction result of workpiece under each moving speed

Moving speed / (mm · s ⁻¹)	5	10	20	30
RMSE / mm	0.034	0.037	0.045	0.048

从表 1 可见,当传送速度为 5~10 mm/s 时,工件的在线测量精度较高,当传送速度达到 20~30 mm/s 时,测量精度稍有降低,但测量依然具备良好的瞬时性。

为了验证所提方法的精度以及对非平整表面的重建效果,利用人脸模型进行了重建实验。图 10 展示了所提方法、FTP 以及三步 PMP 重建人脸的结果对比。图 10(a)、(b)、(c)分别 FTP、所提方法以

及三步 PMP 的三维重建结果。图 10(d)为三种方法重建结果中截取的第 670 行的剖面图。可以看出,三种方法的重构结果十分接近,但在非平整的陡峭区域,FTP 恢复的轮廓与所提方法以及三步 PMP 稍有区别。FTP 仅使用单帧的正弦条纹进行待测物体的三维重建,在滤波过程中损失了部分高频信息,因此重建的物体轮廓较为平滑,但与三步 PMP 相比,误差较大;所提方法通过条纹分割技术分割一帧四值变形条纹并将其正弦化为三帧相移量为 $2\pi/3$ 的正弦条纹,虽然在正弦化中损失了部分高频信息,但通过相移技术,损失的部分高频信息得到了弥补。因此,从图 10(d)所示的人脸鼻子处的细节可以看出,所提方法的重建结果虽然损失了少量

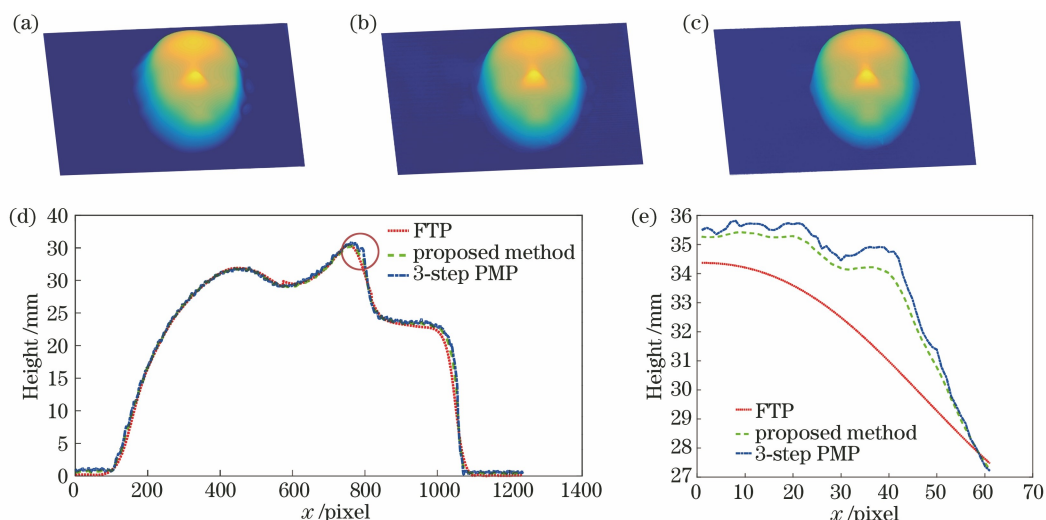


图 10 人脸模型的重建实验。(a) FTP 的重建结果;(b)所提方法的重建结果;(c)三步 PMP 的重建结果;
(d)第 670 行的剖面图;(e)鼻尖处的细节

Fig. 10 Face-model reconstruction experiment. (a) Reconstruction result of FTP; (b) reconstruction result of proposed method; (c) reconstruction result of 3-step PMP; (d) cross section of 670th column; (e) details of nose tip

高频信息,但与三步 PMP 接近。

为了对比所提方法、FTP 以及三步 PMP 的精度,以 PMP 的测量结果为准真值^[10],三种不同算法对人脸重建结果的平均绝对误差(MAE)以及均方根误差如表 2 所示。可以看出,所提方法在精度上优于传统 FTP,与传统 PMP 接近。与三步 PMP 相比,所提方法主要的误差源自三帧二值条纹正弦化过程中滤波导致的少量相位信息的损失。

表 2 不同算法对人脸重建结果的误差分析

Table 2 Error analysis for face-model reconstruction results by different algorithms

Algorithm	FTP	Proposed method	3-step PMP
MAE /mm	0.183	0.082	0.067
RMSE /mm	0.204	0.128	0.089

4 结 论

提出了一种基于四灰阶条纹投影实时 PMP。将四灰阶中的非零三灰阶循环编码的条纹投影至物体表面,0 值灰阶对应投影中物体的阴影。通过条纹分割获得三帧间隔为 1/3 周期的等宽二值化条纹,其傅里叶频谱包含完整的正弦条纹信息。通过投影位深度仅为 2 bit 的条纹,实现高速投影,同时使用单色 CCD 相机,以相应的高帧率模式进行图像采集。所提方法具有单帧投影单帧采集特性,完全具备实时在线测量能力,虽然无法恢复待测物体的色彩复杂区域以及有明显斑点的区域,但对表面平整、反射率均匀的物体具有一定的重建优势。相比

传统的基于不等占空比二元光栅的 PMP,所提方法具有较高的检测速度以及较好的实时性;相比基于彩色编码的二元光栅的实时 PMP,所提方法不会出现颜色混叠现象,采集效率较高,成本较低。因此,所提方法在快速实时的在线三维检测领域有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Geng J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, 3(2): 128-160.
- [2] Zhan G M, Tang H W, Zhong K, et al. High-speed FPGA-based phase measuring profilometry architecture [J]. *Optics Express*, 2017, 25 (9): 10553-10564.
- [3] Chen F, Brown G M, Song M M. Overview of 3-D shape measurement using optical methods [J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(1): 10-22.
- [4] Lee H, Kim M Y, Moon J I. Three-dimensional sensing methodology combining stereo vision and phase-measuring profilometry based on dynamic programming [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56 (12): 124107.
- [5] Xu J, Xi N, Zhang C, et al. Rapid 3D surface profile measurement of industrial parts using two-level structured light patterns [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(7): 907-914.
- [6] Vázquez M A, Cuevas F J. A 3D facial recognition system using structured light projection [M] // Polycarpou M, de Carvalho A C P L F, Pan J S, et

- al. Hybrid artificial intelligence systems. Lecture notes in computer science. Cham: Springer, 2014, 8480: 241-253.
- [7] Jiang C F, Lim B, Zhang S. Three-dimensional shape measurement using a structured light system with dual projectors [J]. Applied Optics, 2018, 57(14): 3983-3990.
- [8] Xu X F, Cao Y P, Peng K. Pixel matching method in on-line three-dimensional measurement based on phase prediction [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(6): 0612005
许幸芬, 曹益平, 彭旷. 基于相位预测的在线三维测量像素匹配方法 [J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0612005.
- [9] Chen C X. Discussion of: testing strategy with multiple performance measures: evidence from a balanced scorecard at store24 [J]. Journal of Management Accounting Research, 2015, 27(2): 67-73.
- [10] Zhang S. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(2): 149-158.
- [11] van der Jeught S, Dirckx J J J. Real-time structured light profilometry: a review [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 87: 18-31.
- [12] Tao T Y, Chen Q, Da J, et al. Real-time 3-D shape measurement with composite phase-shifting fringes and multi-view system [J]. Optics Express, 2016, 24(18): 20253-20269.
- [13] Su X Y, Chen W J, Zhang Q C, et al. Dynamic 3-D shape measurement method based on FTP [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2001, 36(1): 49-64.
- [14] Li B W, An Y T, Zhang S. Single-shot absolute 3D shape measurement with Fourier transform profilometry [J]. Applied Optics, 2016, 55(19): 5219-5225.
- [15] Zhang S, van der Weide D, Oliver J. Superfast phase-shifting method for 3-D shape measurement [J]. Optics Express, 2010, 18(9): 9684-9689.
- [16] Huang P S, Hu Q Y, Jin F, et al. Color-encoded digital fringe projection technique for high-speed 3-D surface contouring [J]. Optical Engineering, 1999, 38(6): 1065-1071.
- [17] Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes [J]. Applied Optics, 1983, 22(24): 3977-3982.
- [18] Zhang Z H. Review of single-shot 3D shape measurement by phase calculation-based fringe projection techniques [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(8): 1097-1106.
- [19] Chong Q, Cao Y P, Chen Y T. Stroboscopic online phase measurement profilometry for high-speed rotating objects [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(8): 0812003.
种晴, 曹益平, 陈雨婷. 高速旋转物体频闪在线相位测量轮廓术 [J]. 光学学报, 2019, 39(8): 0812003.
- [20] Su X Y, Zhou W S. Phase-measuring profilometry using defocused projection of the Ronchi grating [J]. Opto-Electronic Engineering, 1993, 20(4): 8-16.
苏显渝, 周文胜. 采用罗奇光栅离焦投影的位相测量轮廓术 [J]. 光电工程, 1993, 20(4): 8-16.
- [21] 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.
- [22] An H H, Cao Y P, Li H M, et al. A composite grating phase-measuring profilometry based on mixed filtering window [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0604007.
安海华, 曹益平, 李红梅, 等. 一种基于混合滤波窗口的复合光栅相位测量轮廓术 [J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0604007.
- [23] Fu G K, Cao Y P, Wang Y P, et al. Real-time three-dimensional shape measurement based on color binary fringe projection [J]. Optical Engineering, 2019, 58(4): 044102.
- [24] 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.