

基于旋转光栅投影的动态三维面形测量方法

张海花^{1,2}, 李勇², 张启灿^{1*}¹四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064;²浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华 321004

摘要 针对动态孤立场景三维形貌测量难题, 提出了时域傅里叶条纹分析方法, 充分利用被测动态场景对多周期相移投影条纹在时间域上的调制, 对携带被测面形变化信息的系列变形条纹沿时间轴作傅里叶条纹分析, 提取相位进行对应的三维重建, 有效保留了复杂场景的空间高频信息。为了保证相位信息准确可靠, 设计了三频条纹复合的圆盘光栅, 经电机带动进行旋转投影, 在被测场景表面产生多周期相移条纹。该方法不在空域进行滤波操作, 三频条纹解算出对应相位信息后进行时间相位展开, 适用于孤立物体的测量。拍摄记录的每一帧条纹图像均能对应重建一个三维结果, 适用于动态场景测量。搭建系统完成了验证实验, 结果证实了本研究提出方法和系统的可行性。

关键词 测量; 动态三维面形测量; 傅里叶条纹分析; 三频复合光栅; 条纹投影

中图分类号 O438.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2312005

Dynamic 3D Shape Measurement Based on Rotating Grating Projection

Zhang Haihua^{1,2}, Li Yong², Zhang Qican^{1*}¹ College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China;² Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China

Abstract To overcome the difficulty in 3D shape measurement of dynamic isolated scenes, this paper proposed a method of temporal Fourier fringe analysis. The temporal modulation of the multi-period phase-shifted projection fringes by the measured dynamic scene was given full play in this study. On this basis, a temporal Fourier fringe analysis was carried out on these deformed fringes loaded with information of changes in the measured surface shape. Phase extraction was then conducted, and the corresponding 3D reconstruction of the dynamic isolated scene was achieved. The spatial high-frequency information of the complex scene was well retained by this method. Meanwhile, for the accuracy and reliability of the phase information, a disc grating of three-frequency composite fringes was designed. The grating, driven by a motor, began rotation projection, producing multi-period phase-shifted fringes on the measured scene surface. No spectrum filtering operation was performed in the spatial domain. Temporal phase unwrapping was carried out after the corresponding phase information was solved for the three-frequency fringes. The proposed method is suitable for isolated object measurement. Only one frame of a deformed fringe pattern is required for the retrieval of its corresponding 3D shape, so this method is applicable to dynamic scene measurement. Verification experiments were conducted on a newly developed measurement system. The results demonstrate the feasibility of the proposed method and system.

Key words measurement; dynamic 3D shape measurement; Fourier fringe analysis; three-frequency composite grating; fringe projection

OCIS codes 120.3940; 120.2650; 110.6880; 100.6890

收稿日期: 2021-04-06; 修回日期: 2021-05-06; 录用日期: 2021-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(61675141, 62075143)

通信作者: *zqc@scu.edu.cn

1 引言

光学三维测量技术是人类感知真实世界、定量分析物体三维轮廓的主要手段之一,目前已经被应用于工业产品质量检测、医学整形、虚拟现实、文物保护等多个领域^[1-8]。当前基于面结构光投影的三维测量技术主要有相位测量轮廓术(PMP)和傅里叶变换轮廓术(FTP)。PMP 技术采用正弦光栅投影与数字相移技术相结合,获取多帧相移的条纹图,在时序上对携带被测物体高度信息的条纹图进行解调^[9-10]。该技术采用点对点运算来求解初始相位,相位值不受相邻点光强值的影响,能有效避免物体表面反射率不均匀引起的测量误差。但因其需要三帧及以上携带物体高度信息的变形条纹,才能重建物体三维形貌,更多地适用于静态场景测量。传统 FTP 技术仅需一帧变形条纹图即可恢复被测物体的三维面形,适用于动态场景测量^[11-16]。然而 FTP 技术需要在空域将零频分量(对应条纹背景和变化平缓部分)和低频分量(对应条纹噪声,被测物体细节、边缘突变等信息)滤除,仅留下包含被测物体面形信息的基频分量,三维重建后物体通常因丢失了高频细节信息,看起来比较光滑。因此 FTP 在测量复杂物体时,重建精度一般不高。

受同行们时域信号傅里叶分析工作的启发^[17-18],针对动态孤立场景三维形貌测量的难题,研究提出了时间傅里叶变换轮廓术(TFTP),前期也发表了阶段研究成果^[19]。该技术沿时间轴对光强信号进行傅里叶分析,点对点计算截断相位,不在空域执行滤波操作,能有效保留被测物体的高频成分,且每帧变形条纹图均可重建被测物体的三维面形,因此适用于动态孤立物体测量。然而,在文献^[19]中报道的工作,要求整个测量过程中有一个时刻的对应截断相位能够在二维空间正确展开,致使该技术的使用范围受到限制。

20 世纪 90 年代,Huntley 等^[20-21]提出了基于多频率光栅投影的时间相位展开方法,其基本思想是将投影光栅看作沿时间轴分布的信号序列,光栅条纹的频率沿时域发生改变,记录多频条纹图像后对应计算得到三维截断相位场分布,在时域逐像素进行线性、拟合线性或者指数拟合等时间相位展开操作,从而获取连续相位。这些算法在解决复杂物体三维面形重建时提供了有效思路。但是时间相位展开算法用于测量时,所需的数据量较大,数据处理时间较长,目前多用于静态复杂物体的三维测量。

2008 年,徐珍华等^[22]提出了一种时间相位展开算法—三频法,测量过程中只需投影三套不同频率的条纹图,有效降低了数据量,缩短了数据处理时间。该方法需投影 3 倍于相移步数的多幅(即至少 9 幅)相移条纹图到被测物体表面,才能对应重建一个三维结果,不适用于动态场景测量。2020 年,Wan 等^[23]将单周期条纹与低频条纹复合,依次投影三幅相移复合光栅和三幅高频相移条纹并获取变形结构光场。利用相移和平均光强计算三组截断相位,用三频法恢复绝对相位,实现孤立物体的三维面形测量。该方法将投影条纹数降到 6 幅,适用于静态场景测量。

本文将投影光栅设计成三频条纹复合的圆盘光栅,电机带动该圆盘旋转投影多周期相移条纹到被测物体表面,并记录受物体三维轮廓调制的变形条纹序列,利用高度对多周期相移条纹时域分布的调制,逐像素沿时域对光强信号进行傅里叶分析提取相位用于三维重建,不在空域进行滤波操作,有效保留了被测物体空间高频信息,适用于动态孤立物体的三维测量。

2 基本原理

2.1 TFTP 原理

TFTP 原理图如图 1(a)所示,投影装置投影多周期相移条纹到被测物体表面,条纹受物体表面高度调制发生变形并被位于另一视角的高速成像设备记录。在动态场景测量过程中,高速成像设备沿时间轴对被测物体进行采样,捕获 n 帧受物体面形调制的变形条纹。如图 1(b)所示,空间任一点 $P(x, y)$ 沿时间轴的光强分布是携带物体三维形貌信息、有固定载频(时域归一化频率 f_t)的周期信号。如图 2(a)所示,在 t 时刻,该点的光强分布可表示为

$$g(x, y, t) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_0 x + \delta(x, y, t) + 2\pi f_t t], \quad (1)$$

式中, $a(x, y)$ 为背景光强, $b(x, y)$ 为调制度, f_0 为空间频率, $\delta(x, y, t)$ 为受物体高度调制的相位信息, $2\pi f_t t$ 为多周期相移引起的时域上相位调制。

沿时间轴对图 2(a)所示的像素 $P(x, y)$ 光强分布进行傅里叶条纹分析,对应的频谱分布如图 2(b)所示。如果采用的高速相机帧频够高,时域信号满足采样定理,对应正负基频分别分布在零频分量的两侧,没有频谱混叠现象,基频分量很容易滤出,对其进行傅里叶逆变换操作,计算可得三维截断相位场。

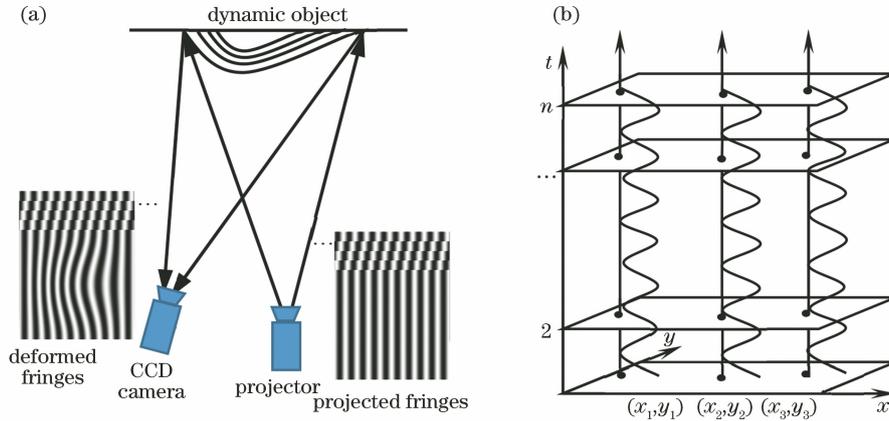


图 1 TFTP 原理。(a)系统光路图；(b)同一空间点光强沿时域分布

Fig. 1 Principle of TFTP. (a) Optical geometry; (b) intensity distribution along temporal axis at the same point

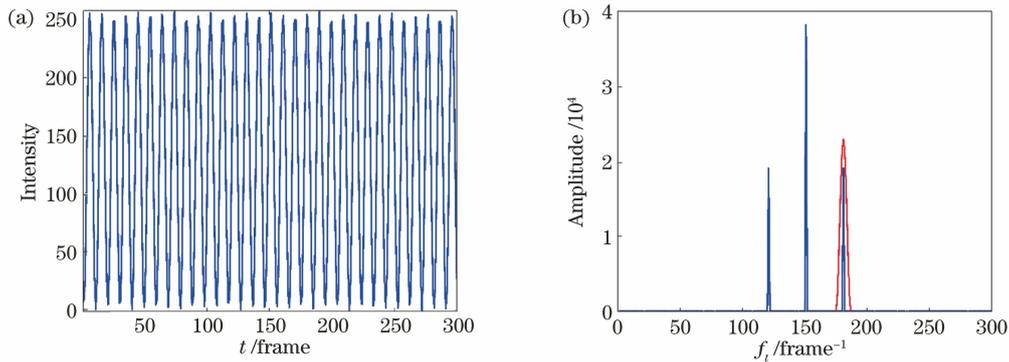


图 2 单频光栅点 $P(x, y)$ 时域信号及对应傅里叶频谱分布。(a)光强分布；(b)频谱分布

Fig. 2 Intensity (a) and Fourier spectrum (b) distribution of point $P(x, y)$ along temporal axis of single frequency fringe

在文献[19]报道的 TFTP 技术,因在多周期相移条纹的时域进行傅里叶条纹分析获取相位,只要相机速度够快,在图像的时间采样上满足抽样定理,就能有效保留待测场景的空间高频信息,重建对应的动态三维面形分布。但是,该方法需要选择一个时刻 t_0 ,保证其对应截断相位能在二维空域内成功进行相位展开,获取准确的连续相位,再以 t_0 时刻连续相位值为起始点,逐像素沿时间轴进行相位展开,最终获得三维连续相位场。

2.2 基于三频复合光栅旋转投影的 TFTP 原理

TFTP 技术要求测量过程中有一个 t_0 时刻对应的截断相位在空间可正确展开,为各点时域相位展开提供准确的初始相位,致使其应用范围受到一定限制。本节将借鉴时间相位展开和复合光栅投影的思想,采用三频复合光栅作为投影光栅,将 TFTP

方法的旋转投影光栅由三套不同频率的光栅复合而成,有望解决该问题。

设三套单频条纹的频率分别为 f_1, f_2, f_3 ,且 $f_1 < f_2 < f_3$ 。对应空域条纹周期分别为 p_1, p_2, p_3 ,相机采集到的第 t 幅复合光栅光强分布为

$$g(x, y, t) = A(x, y) + B(x, y) \sum_{j=1}^3 \cos[2\pi f_j x + 2\pi f_j t + \delta_j(x, y, t)], \quad (2)$$

式中, $A(x, y)$ 为背景光场分布, $B(x, y)$ 为调制度分布, f_j 为三组单频条纹的空间频率, $\delta_j(x, y, t)$ 为 t 时刻三组单频条纹受物体高度调制的相位信息, $f_{ij} (j=1, 2, 3)$, 即 f_{i1}, f_{i2}, f_{i3} , 分别为时域归一化频率, $2\pi f_{ij} t$ 分别为三组单频条纹多周期相移引起的相位调制。(2)式可扩展改写为

$$g(x, y, t) = A(x, y) + \frac{B(x, y)}{2} \sum_{j=1}^3 \exp(i2\pi f_j x) \exp[i\delta_j(x, y, t)] \exp(2\pi f_j t) + \frac{B(x, y)}{2} \sum_{j=1}^3 \exp(-i2\pi f_j x) \exp[-i\delta_j(x, y, t)] \exp(-2\pi f_j t), \quad (3)$$

三频复合光栅投影时,点 $P(x, y)$ 在时域内光强分布如图 3(a) 所示,对其进行傅里叶条纹分析,得到频谱分布如图 3(b) 所示,同样,如果满足采样定理,同时采样总帧数和三频条纹周期选择得当,

(3) 式最后两项所示的 3 个基频分量分别分布在零频分量的两侧,没有频谱混叠现象,蕴含高度信息的基频分量容易滤出,并对其进行傅里叶逆变换操作,得到的复分布可以表示为

$$\hat{g}_j(x, y, t) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F} \left\{ \frac{B(x, y)}{2} \exp(i2\pi f_j x) \exp[i\delta_j(x, y, t)] \exp(2\pi f_j t) \right\} \right\}, \quad (4)$$

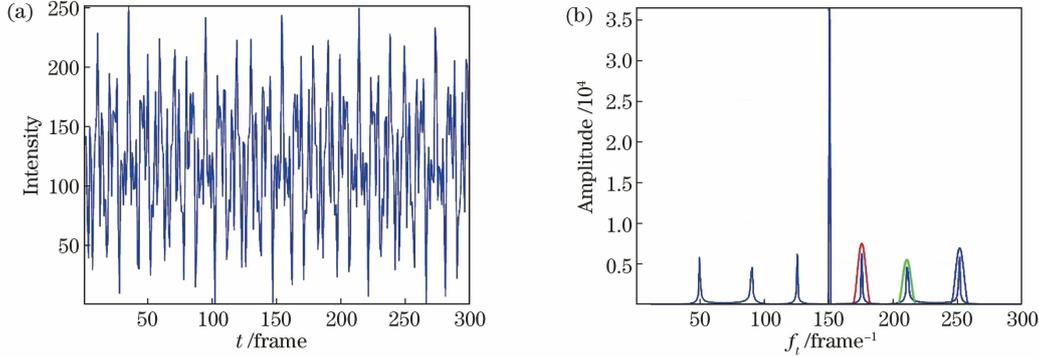


图 3 复合光栅点 $P(x, y)$ 的时域强度分布。(a) 时域条纹光强分布; (b) 对应频谱分布

Fig. 3 Intensity (a) and Fourier spectrum (b) distribution of point $P(x, y)$ along temporal axis of three-frequency phase-shifting composite fringe

式中, $\mathcal{F}\{\#\}$ 为傅里叶变换操作符, $\mathcal{F}^{-1}\{\#\}$ 为傅里叶逆变换操作符。对(4)式作求相角运算,得到该点截断相位分布 $\varphi_j(x, y, t)$ 。至此,分别得到了构成复合光栅的三组单频条纹对应的截断相位场 φ_1, φ_2 和 φ_3 。

2.3 3D 面形恢复原理

以时刻 t 为例,在空域用三频法进行相位展开,任一位置 (x, y) 的相位值可以表示为

$$\begin{cases} \varphi_1 = 2\pi f_1 x \\ \varphi_2 = 2\pi f_2 x, \\ \varphi_3 = 2\pi f_3 x \end{cases} \quad (5)$$

由外差原理合成的光栅条纹距离 p_{12}, p_{23} 可以表示为

$$\begin{cases} p_{12} = \frac{p_1 p_2}{p_1 - p_2} \\ p_{23} = \frac{p_2 p_3}{p_2 - p_3} \end{cases}, \quad (6)$$

(5)、(6) 式整理可得到复合条纹对应的三个截断相位分布 $\varphi_{12}, \varphi_{23}, \varphi_{123}$:

$$\begin{cases} \varphi_{12} = \varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi x(f_2 - f_1) = 2\pi x/p_{12} \\ \varphi_{23} = \varphi_3 - \varphi_2 = 2\pi x(f_3 - f_2) = 2\pi x/p_{23}, \\ \varphi_{123} = \varphi_{23} - \varphi_{12} = 2\pi x/p_{123} \end{cases} \quad (7)$$

式中, p_{123} 为三频复合光栅条纹距离。对于任意位置 x , 有

$$x = p_{23}(m_{23} + \Delta m_{23}) = p_3(m_3 + \Delta m_3), \quad (8)$$

式中, m_{23}, m_3 为条纹频率整数部分, $\Delta m_{23}, \Delta m_3$

为相应的小数部分。

假设 φ_{123} 只有一个周期,此时相位无需展开,将它作为基准逐一判断级次向上展开,只需两次展开运算即可完成 t 时刻空间相位展开。

$$\begin{cases} m_{23} = \text{round}[(\varphi_{123} - \varphi_{23} p_{23}) / (2\pi p_{23})] \\ \phi_{23}(x, y, t) = 2\pi m_{23} + \varphi_{23} \end{cases}, \quad (9)$$

式中, $\text{round}[\#\]$ 为四舍五入运算, ϕ_{23} 为 φ_{23} 的对应绝对相位分布。

$$\begin{cases} m_3 = \text{round}[(\phi_{23} p_{23} - \varphi_3 p_3) / (2\pi p_3)] \\ \phi(x, y, t) = 2\pi m_3 + \varphi_3(x, y, t) \end{cases}, \quad (10)$$

得到 t 时刻连续的二维绝对相位分布 $\phi(x, y, z)$ 后,逐像素将三维截断相位沿时间轴进行展开,可以对应获得连续的三维绝对相位分布。同样地计算出参考平面绝对相位分布 $\phi_0(x, y)$, 则相位差为

$$\Delta\phi(x, y, t) = \phi(x, y, t) - \phi_0(x, y), \quad (11)$$

由文献[24-26]可知,实际测量系统的相位—高度映射方程可以描述为

$$\frac{1}{h(x, y, t)} = a_0(x, y) + \frac{a_1(x, y)}{\Delta\phi(x, y, t)} + \frac{a_2(x, y)}{\Delta\phi^2(x, y, t)}, \quad (12)$$

式中, $\Delta\phi(x, y, t)$ 为同一像素上被测物体相对于参考平面的相位差异, a_0, \dots, a_2 为多项式方程每项系数, $h(x, y, t)$ 为对应待重建的高度分布。方程有 3 个未知常数系数,因此至少需要 4 个高度的平面来求解这些系数。

拍摄记录三频复合光栅在被测动态场景表面的变形条纹图像后,采用 TFTP 时域傅里叶条纹分析方法提取出三频光栅的相位,并按照前述方法进行三维空间的相位展开,最后通过(12)式所示的相位—高度映射关系,完成待测动态场景在相机每一个采样时刻的三维面形重建。

3 计算机模拟

为了验证本文方法的可行性,计算机模拟了分

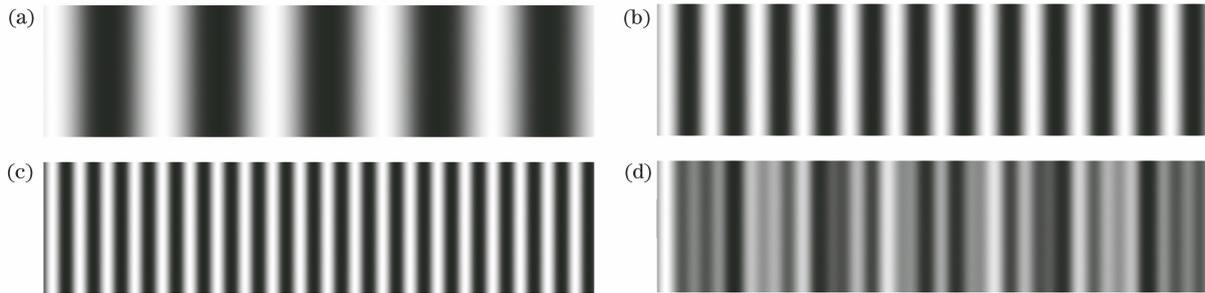


图 4 计算机模拟复合光栅。(a) $f_1 = 5$; (b) $f_2 = 12$; (c) $f_3 = 20$; (d) composite fringes

Fig. 4 Simulated composite grating. (a) $f_1 = 5$; (b) $f_2 = 12$; (c) $f_3 = 20$; (d) composite fringes

计算机模拟测量系统成像过程,相机在仿真物体运动变化全过程中一共获取了 300 帧受被测物体高度调制的变形条纹图,图 6 给出了 $t = 200$ 时刻相机记录的变形条纹图像。

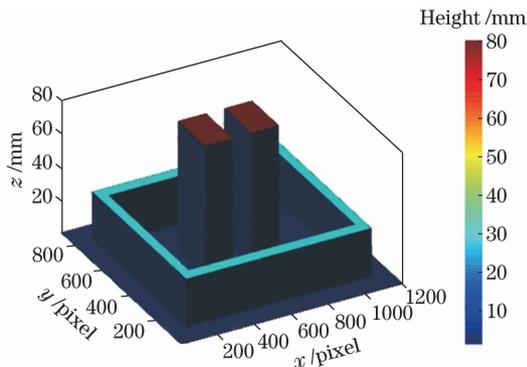


图 5 $t = 200$ 时刻的被测物体

Fig. 5 Measured object at $t = 200$

按照前述方法对 300 帧图像进行处理,重建出被测物体的形貌变化。图 7(a)为图 6 对应时刻的三维重建结果,图 7(b)为绝对误差分布情况,7(c)上图是其第 450 行数据,下图是对应的绝对误差分布,面形重建均方根误差 (R_{MSE}), $R_{MSE} = 6.7835 \times 10^{-4}$ mm。可以看出,本文方法因利用时域傅里叶分析和三频相位展开方法,模拟被测物体的边缘高频信息较好地保留下来。

4 实际实验的测量结果

如图 8 所示,本文基于三频复合光栅投影的

分辨率为 $1200 \text{ pixel} \times 900 \text{ pixel}$ 的三频复合正弦光栅,单频及复合光栅的图像局部如图 4 所示,三频光栅频率分别为 $f_1 = 5$, $f_2 = 12$, $f_3 = 20$,对应周期为 $t_1 = 240 \text{ pixel}$, $t_2 = 100 \text{ pixel}$, $t_3 = 60 \text{ pixel}$ 。以频率最高的条纹图为基准,隔 $t_3/3$ 周期采样一幅变形条纹图,此时时域相移步数分别为 $N_1 = 12$, $N_2 = 5$, $N_3 = 3$ 。由上述三组条纹合成的投影光栅如图 4(d)所示。仿真实验的被测物体为如图 5 所示的高度随时间变化的孤立物体。



图 6 $t = 200$ 时刻的变形条纹图

Fig. 6 Deformed fringe at $t = 200$

TFTP 实验装置类似于传统的 FTP 系统,主要由一个投影设备、成像设备和被测物体组成。为提高测量系统的投影速度,测量系统采用辐射状光栅旋转投影,实际搭建的机械投影装置如图 9 所示,由照明模块、电机、旋转光栅、同步触发模块及投影镜头组成。图 10 是制作好的辐射状二值复合光栅圆盘,电机控制该圆盘旋转,将多周期相移复合光栅投射至被测物体表面,投影速度可达 3200 Hz 。圆盘边缘有 32 个相移标记块,红外计数传感模块检测并实时触发位于另一视角的图像采集装置 (Mars800 — $545 \mu\text{m}$, 分辨率 $600 \text{ pixel} \times 800 \text{ pixel}$) 拍摄图像。投影系统与图像采集系统光轴之间的夹角约为 25° 。

由于光栅投影区域约占整个辐射状圆盘的 $1/10$,

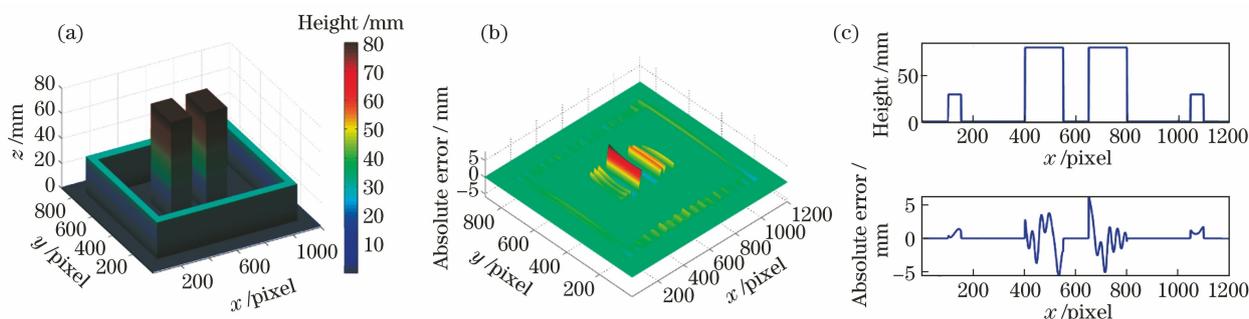


图 7 $t=200$ 时刻的重建结果。(a) 3D 重建结果;(b)绝对误差分布;(c)第 450 行高度及误差分布
Fig. 7 Measurement result at $t=200$. (a) 3D reconstructed result; (b) absolute error distribution; (c) height distribution and absolute error on row 450

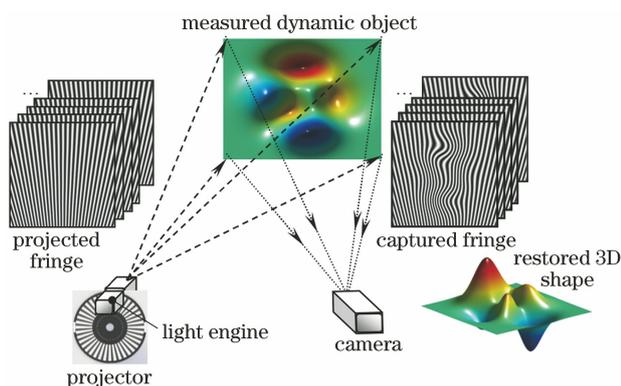


图 8 三频复合光栅的 TFTP 装置示意图
Fig. 8 Schematic diagram of a TFTP setup

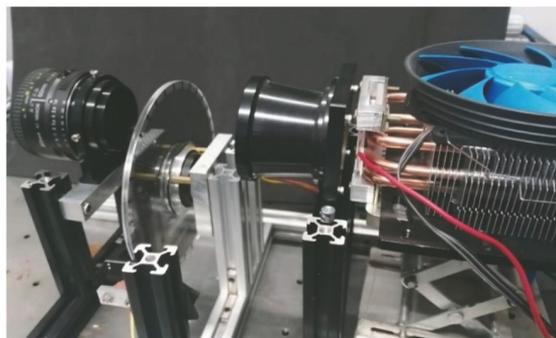


图 9 旋转投影系统
Fig. 9 Rotating projector

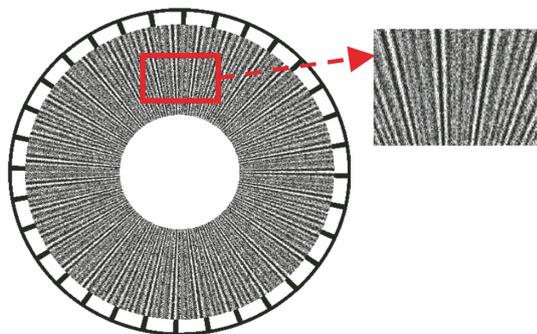


图 10 辐射状光栅
Fig. 10 Radial grating

若投影区域条纹数 f_1, f_2, f_3 要满足 ϕ_{123} 只有一个周期的绝对相位, 则圆盘上辐射条纹数 F_1, F_2, F_3 需满足 $F_{123}/10 \approx 1$ 。实验系统制作时选取的三个单频光栅条纹数分别为 130, 161, 200, 以 $F_3=200$ 的单频光栅为基准, 4 步相移, 每隔 6 个周期采样一次, 此时 $F_2=161$ 的单频光栅对应相移量为 $T_2/32, F_1=130$ 的单频光栅对应相移量为 $T_1/16$ 。

4.1 系统标定

用于标定测量系统的标准件如图 11(a)所示, 在一个标准平面上有 6 个标准圆柱台, 每个圆柱台由 4 个高度和直径均不相同的圆柱组成, 圆柱的顶面为标准平面。圆柱上相邻标准平面的距离分别为 150, 200, 200, 250 mm, 与安装底板一起可以构造 4 个高度差。三频复合光栅投射到标定标准块上后, 条纹受标准块面形调制发生形变, 如图 11(b)所示。用同样方法获得图 11(c)所示的相位信息, 在每个高度对应的 6 个平面上提取用于完成系统标定的足够数据, 即可利用(12)式完成该系统的标定工作。

4.2 mini 气缸运动过程的三维测量

实验选取两个薄型 mini 气缸(型号: 亚德客 SDA50X60)作为被测物体, 两个气缸运动状态相反, 传动轴一进一出作往复运动, 最大运动速度为 0.18 m/s, 气缸面形复杂且运动过程中不存在对应截断相位在二维空间能正确展开的时刻。图像采集装置帧速 480 Hz, 整个 1.67 s 的测量过程中共获取 800 幅变形条纹, 选取其中 4 个时刻图像序号 $s=288, 400, 691, 758$ (对应拍摄记录时间分别为 0.6, 0.83, 1.44, 1.58 s), 实验获取的变形条纹图及对应的三维重建结果如图 12 所示。

从图 12(b)所示的三维重建结果可以看出, 气缸面形本身较为复杂, 传动轴又在往复运动, 这样的动态过程用传统的 FTP, 或者文献[19]报道的单一

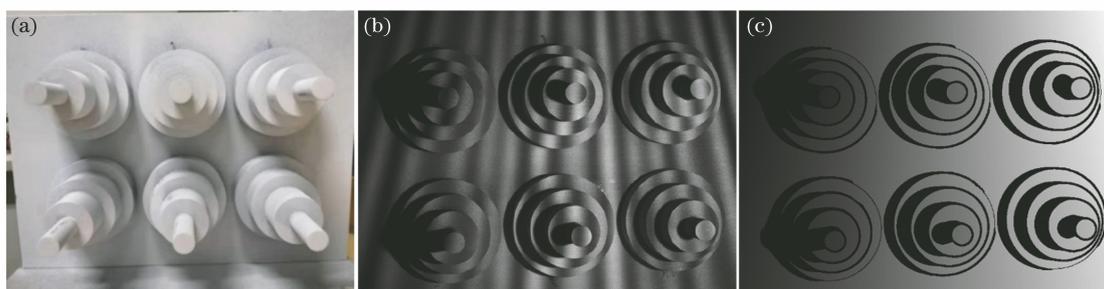


图 11 系统标定过程。(a) 标定块; (b) 变形条纹图; (c) 标定块连续相位分布

Fig. 11 System calibration process. (a) Standard block; (b) deformed fringes; (c) unwrapped phase distribution

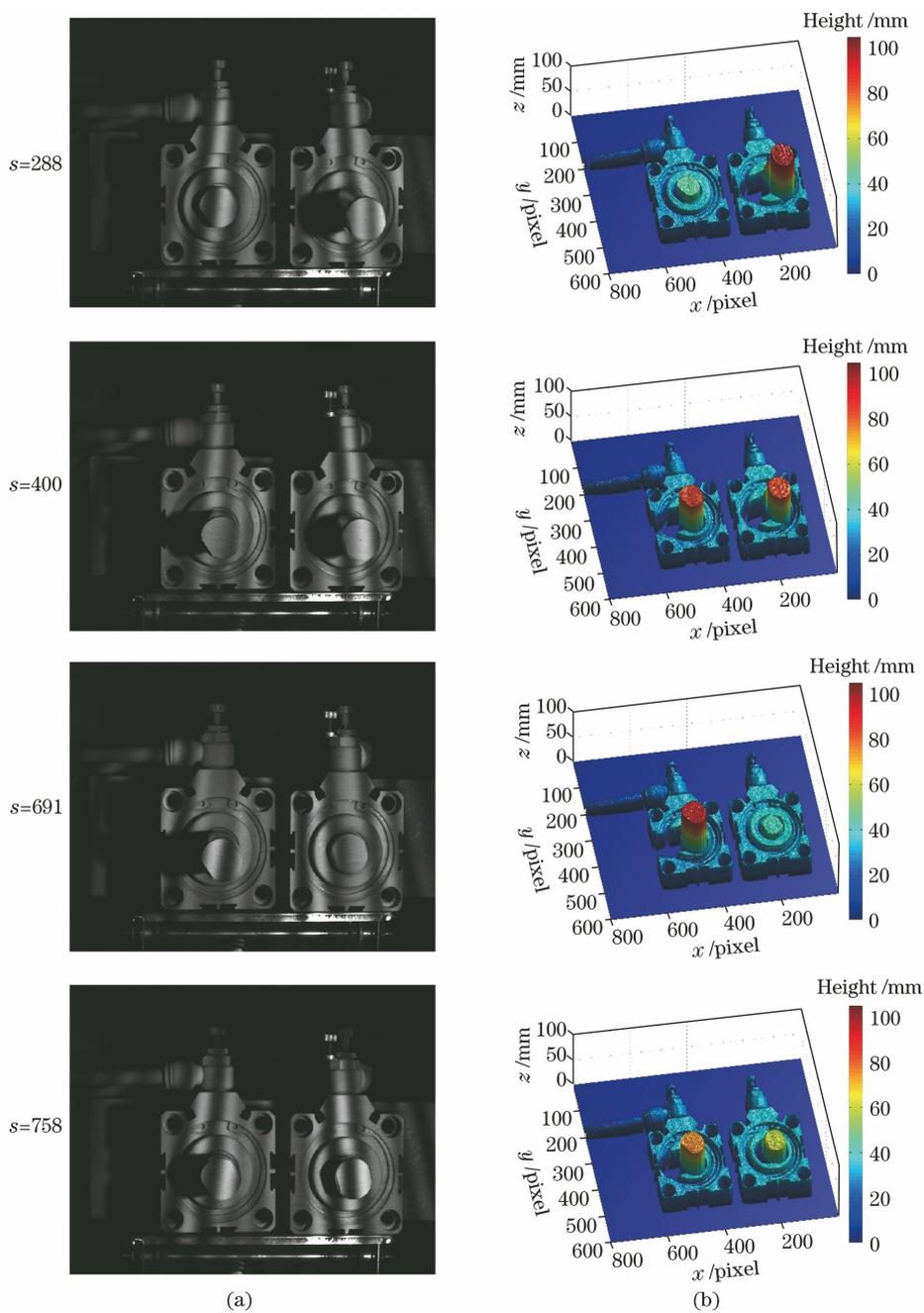


图 12 不同时刻 mini 气缸往复运动测量。(a) 变形条纹图; (b) 3D 重建结果

Fig. 12 Motion reconstruction of the mini cylinders at different moments. (a) Deformed fringes; (b) 3D reconstructed shape of (a)

频率条纹 TFTP 方法难以实现三维测量,但本文方法却成功重建了各个时刻的对应三维面形分布。

4.3 手掌握拳过程测量

选取成人手掌握手成拳的过程为待测动态场

景,图像采集装置帧速 400 Hz,测量过程获取 800 幅变形条纹。选取 3 个时刻 $s=400, 600, 700$, 测量当前时刻手势的姿态变化。实验获取的变形条纹图及对应的三维重建结果如图 13 所示。

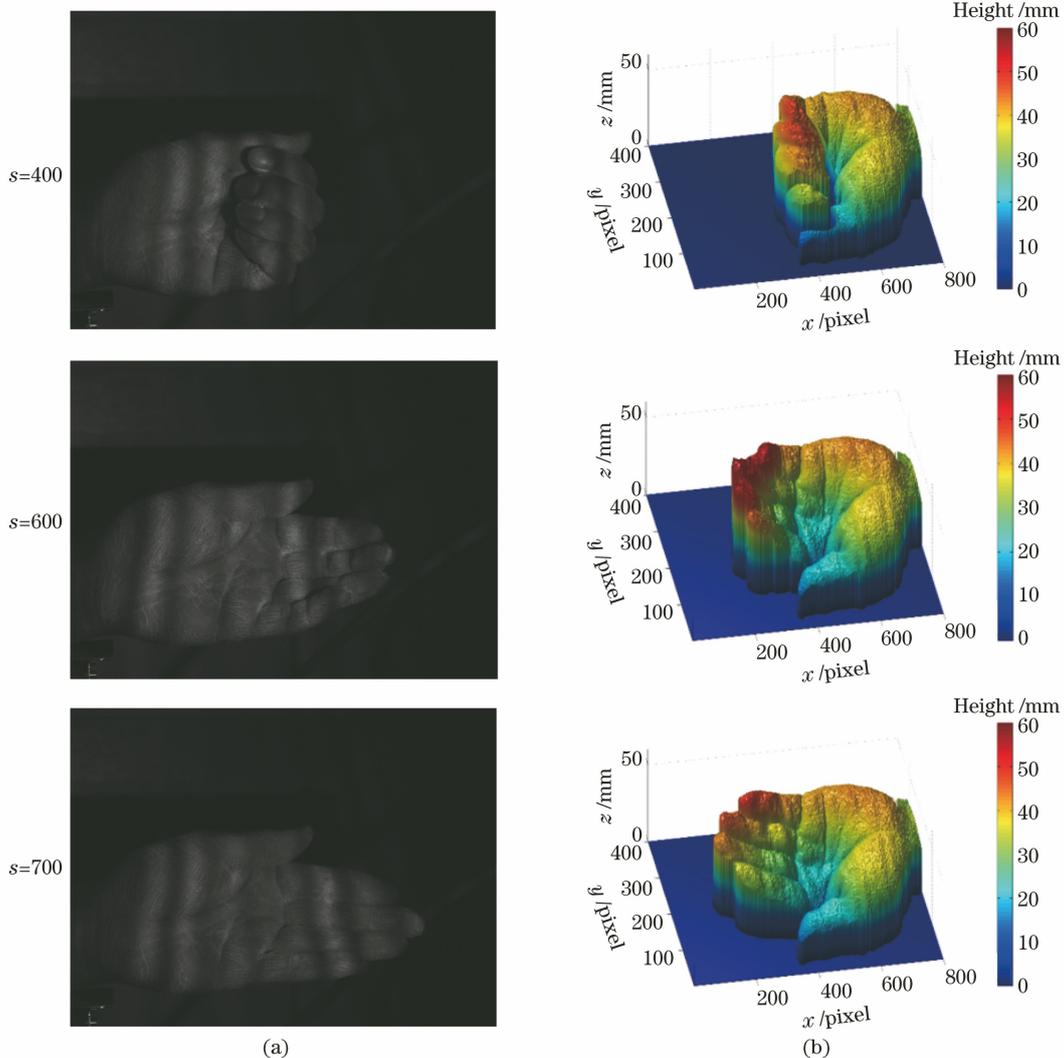


图 13 成人手势测量。(a)变形条纹图;(b) 3D 重建结果

Fig. 13 Measurement of adult gestures. (a) Deformed fringes; (b) 3D reconstructed results of (a)

5 精度评价

为了量化本文方法和系统的测量精度,对一个 00 级大理石标准平面 ($300 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$, 平面度公差 $3 \mu\text{m}$) 进行测量,重建后相位差异分布情况如图 14(a) 所示,本文方法测量得到的相位分布 $R_{\text{MSE}} = 0.0444 \text{ rad}$,面形重建 $R_{\text{MSE}} = 0.2178 \text{ mm}$ 。

同样地,用文献[19]的 TFTP 方法和系统测量了该大理石标准平面,重建后相位差异分布情况如图 14(b) 所示,相位分布 $R_{\text{MSE}} = 0.0380 \text{ rad}$,面形重建 $R_{\text{MSE}} = 0.1066 \text{ mm}$ 。

相应地,用传统 FTP 方法测量同一个标准平面,由于大理石平面边缘处条纹的截止,造成频谱泄露,因而边缘位置的测量误差较大,重建后相位差异的分布情况如图 14(c) 所示,对应相位的 $R_{\text{MSE}} = 1.1792 \text{ rad}$,去除边缘较大疵值区域后,面形重建 $R_{\text{MSE}} = 0.3518 \text{ mm}$ 。

该精度对比实验结果可以看出,本文方法因为引入了三频条纹,并且最高频率的条纹周期数比文献[19]工作所使用的条纹周期数少,导致方法的整体精度下降。如果要进一步提高本文方法的测量精度,可以选择制作 f_3 更大的三频复合光栅盘片。

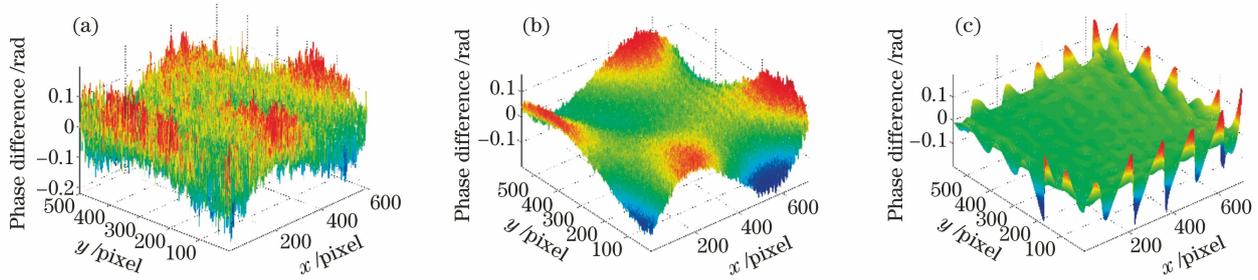


图 14 不同方法和系统测量标准平面的重建相位差异分布。(a)本文方法；(b)单频条纹 TFTP；(c)传统 FTP 方法

Fig. 14 Difference between of reconstructed phase of a standard plane by three methods. (a) Proposed method; (b) TFTP with single-frequency grating; (c) traditional FTP with single-frequency

6 结 论

针对动态孤立场景三维形貌的测量难题,提出了用三种不同频率的辐射状条纹合成制作了三频复合条纹盘片,对动态过程的三维面形及变化过程测量时,系统旋转投影该复合条纹,成像设备记录动态场景表面一系列变形条纹图像,在时域进行傅里叶条纹分析、三频相位计算和展开,最终重建复杂物体的三维形貌。搭建了机械投影装置,实现快速旋转投影多周期相移光栅,通过理论分析、计算机模拟、实验测量等,证实了基于三频复合光栅的 TFTP 适用于测量动态孤立场景。TFTP 是时域条纹分析方法,不在变形条纹图像的二维空间中作傅里叶变换和滤波,能有效保留复杂场景的空间高频信息,同时引入三频复合条纹计算绝对相位,不再受必须有一个时刻的对应截断相位在空间可正确展开的条件约束,可以实现复杂动态场景的三维测量,有望在机械结构组件复杂运动等相关领域的面形检测和运动分析中得到运用。

本文使用的 TFTP 技术,因在多周期相移条纹的时域进行傅里叶条纹分析获取相位,为了准确重建物体随时间的运动变化量,需要保证时间轴上信号满足采样定理,即投采频率是运动频率的 2 倍以上,才能准确重建被测场景对应的动态三维面形分布,进而有效保留待测场景的空间高频信息。在实际测量时需要依据物体运动变化速度快慢选择合适的系统投采帧速,以确保时域信号满足采样定理、并在时间轴上形成足以进行傅里叶分析的信号周期(时域条纹频率)。而本文 TFTP 方法的投影条纹,与 PMP 方法类似,其空间域频率与重建结果精度有关,但由于本文方法不在空间中进行傅里叶分析和相位展开,降低了对条纹空间频率的要求,实际测量时可以依据被测场景的复杂程度选择投影空间频

率比传统 FTP 方法低的条纹。

文中三频条纹的引入,是为了解决空域 FTP 难以测量重建复杂陡变面形问题,在实际测量前,应该由被测场景静态面形高度分布的复杂情况,以及三频相位展开算法的原理要求来设计和选取三频条纹的空间频率,保证相机拍摄视场中两次外差后的相位分布在一个周期内,不再需要空间相位展开,才能最终顺利进行三维重建。在满足三频相位展开算法的投影条纹空间三个频率具体数值选定后,可以依据被测场景的运动变化速度选择合适的投采帧率(光栅盘片的旋转速度和相机的对应成像记录速度),用以保证空间最低频率条纹在时间轴上也能获得足够的周期信号进行傅里叶分析、窗口傅里叶分析或者小波分析获得对应相位信息,同时,更快的投采帧率也有益于保证三频条纹的时域信号周期数有明显差异,有效降低时域信号傅里叶频谱的混叠可能,即便实际测量时因为物体空间复杂面形调制、噪声、阴影等因素干扰导致时域条纹不连续和频谱展宽,也能保证时域频谱分析结果的准确可靠。

参 考 文 献

- [1] Gorthi S S, Rastogi P. Fringe projection techniques: Whither we are? [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 133-140.
- [2] 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.
- [3] Su X Y, Zhang Q C, Chen W J. Three-dimensional imaging based on structured illumination [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(2): 0209001. 苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术 [J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209001.
- [4] Xing W, Zhang F M, Feng W, et al. Three-dimensional measurement method of objects with specular surface based on digital micromirror device

- [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(12): 1212002.
邢威, 张福民, 冯维, 等. 基于数字微镜器件的高光面物体三维测量方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(12): 1212002.
- [5] Peng K, Cao Y P, Wu Y C. An on-line three-dimensional measurement method of composite grating projection without filtering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(11): 1112003.
彭旷, 曹益平, 武迎春. 一种无需滤波的复合光栅投影的在线三维测量方法[J]. *光学学报*, 2018, 38(11): 1112003.
- [6] Zhong J Y, Qiu J, Han P, et al. Head pose estimation algorithm based on structured light three-dimensional reconstruction [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(18): 181008.
钟俊宇, 邱健, 韩鹏, 等. 基于结构光三维重建的头部姿态估计算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(18): 181008.
- [7] Lu M T, Su X Y. Vertical measurement method for structured light three-dimensional profilometry based on phase-shifting and modulation ratio[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0704003.
卢明腾, 苏显渝. 基于相移与调制度比的结构光三维面形垂直测量方法[J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 0704003.
- [8] Guo W B, Zhang Q C, Wu Z J. Real-time three-dimensional imaging technique based on phase-shift fringe analysis: a review [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(8): 0800001.
郭文博, 张启灿, 吴周杰. 基于相移条纹分析的实时三维成像技术发展综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(8): 0800001.
- [9] Halioua M, Liu H C. Optical three-dimensional sensing by phase measuring profilometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1989, 11(3): 185-215.
- [10] Zuo C, Feng S J, Huang L, et al. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 109: 23-59.
- [11] Takeda M, Ina H, Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1982, 72(1): 156-160.
- [12] Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes [J]. *Applied Optics*, 1983, 22(24): 3977-3982.
- [13] Su X Y, Chen W J. Fourier transform profilometry: a review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, 35(5): 263-284.
- [14] Su X Y, Zhang Q C. Dynamic 3-D shape measurement method: a review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 191-204.
- [15] Yue H M, Su X Y, Li Z R. Improved fast Fourier transform profilometry based on composite grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(6): 767-771.
岳慧敏, 苏显渝, 李泽仁. 基于复合光栅投影的快速傅里叶变换轮廓术[J]. *光学学报*, 2005, 25(6): 767-771.
- [16] Song L, Yue H M. Fourier transform profilometry of colorful composite grating based on point array projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5): 1368-1373.
宋雷, 岳慧敏. 基于点阵投影的彩色复合光栅傅里叶变换轮廓术[J]. *光学学报*, 2010, 30(5): 1368-1373.
- [17] Zhang W P, Lü X X, Liu S D, et al. Generalized phase-shifting phase retrieval approach based on time-domain Fourier transform [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(9): 0908004.
张望平, 吕晓旭, 刘胜德, 等. 基于时域傅里叶变换的广义相移相位恢复方法[J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0908004.
- [18] Yu Y J, Zhang B H, Jiao Y F. Algorithm of phase-shifting by wavelength tuning based on temporal DFT [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2004(4): 310-313.
于瀛洁, 张本好, 焦云芳. 基于时域傅里叶变换的波长移相算法[J]. *计量学报*, 2004(4): 310-313.
- [19] Zhang H H, Zhang Q C, Li Y, et al. High speed 3D shape measurement with temporal Fourier transform profilometry[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(19): 4123.
- [20] Huntley J M, Saldner H O. Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(17): 3047-3052.
- [21] Huntley J M, Saldner H O. Error-reduction methods for shape measurement by temporal phase unwrapping[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, 14(12): 3188-3196.
- [22] Xu Z H, Su X Y. An algorithm of temporal phase unwrapping [J]. *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)*, 2008, 45(3): 537-540.
徐珍华, 苏显渝. 一种时间相位展开算法[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2008, 45(3): 537-540.
- [23] Wan Y Y, Cao Y P, Kofman J. High-accuracy 3D surface measurement using hybrid multi-frequency composite-pattern temporal phase unwrapping [J]. *Optics Express*, 2020, 28(26): 39165-39180.
- [24] Zhou W S, Su X Y. A direct mapping algorithm for phase-measuring profilometry[J]. *Journal of Modern Optics*, 1994, 41(1): 89-94.
- [25] Su X Y, Song W Z, Cao Y P, et al. Phase-height

mapping and coordinate calibration simultaneously in phase-measuring profilometry [J]. Optical Engineering, 2004, 43(3): 708-712.

- [26] Li W S, Su L K, Su X Y. 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.