

频闪激光光栅条纹实时投射系统

杨国威 孙长库 王 鹏*

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要 设计了一种高速扫描频闪激光光栅条纹实时投射系统。系统通过现场可编程门阵列(FPGA)实时监测光电探测器信号并控制激光器的调制输出,使高速旋转的多面棱镜与线激光器调制信号精确配合产生稳定、清晰、精密的频闪激光光栅条纹。系统结合了光栅条纹整体投射和线激光光源高精度的特性,具有刷新速度快、条纹分布精度高的特点,且亮度、频率、脉宽、相移可动态编程实时控制。应用该系统对微小尺寸器件进行了测量,获得了准确反映被测器件三维形貌的相位和特征点数据。该系统在高精度快速三维形貌测量中,尤其是工业现场精密器件在线三维检测场合具有广泛的应用前景。

关键词 光学器件;三维形貌测量;结构光;频闪投射

中图分类号 TH741 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1112002

Real-Time Stroboscopic Laser Fringe-Pattern Projection System

Yang Guowei Sun Changku Wang Peng

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University,
Tianjin 300072, China)

Abstract A high-speed scanning real-time stroboscopic laser fringe-pattern projection system is designed. A high-speed rotating polygon mirror and a line-structured laser cooperate to produce stable and unambiguous stroboscopic fringe patterns. The system is realized by using field programmable gate array (FPGA) to monitor photoelectric-detector signal and control the output modulation signal of laser accurately in real time. The system combines the overall projection of grating with the high accuracy of the line-structured laser light source. The projected fringe patterns have high refresh rate and high precision. In addition, the intensity, frequency, pulse width and phase shift can be controlled in real time by dynamic programming. A small size device is measured by using the proposed system, and the corresponding accurate phase and characteristic points that can show the three-dimensional shape are obtained. The proposed system shows a broad application prospect for fast three-dimensional shape precision measurements, particularly in the industrial field of three-dimensional online detection for precision devices.

Key words optical devices; three-dimensional shape measurement; structure light; stroboscopic projection

OCIS codes 120.2650; 110.6880; 110.2650

1 引 言

三维形貌测量技术向着高精度、高速、全视场、复杂环境方向发展。结构光深度视觉传感技术作为主动光学测量技术,具有非接触、精度高、速度快等优点,因而广泛应用于物体的三维形貌检测中,如产品质量检测、生物医学、逆向工程等。基于数字光处

理技术(DLP)的数字投影系统常用来产生光栅条纹,利用相位解算方法能够一次性快速获取能达到视频帧率、像素级分辨率、全视场的三维(3D)数据^[1]。但基于白光光源和投影光学系统的光栅条纹投射方法难以获得高空间分辨率、高精度、连续的正弦光栅条纹^[2],限制了其在微小器件精密测量场合

收稿日期: 2014-05-25; 收到修改稿日期: 2014-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(51105273)

作者简介: 杨国威(1988—),男,博士研究生,主要从事激光与光电测试技术方面的研究。E-mail: yangguowei@tju.edu.cn

导师简介: 孙长库(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事激光与光电测试技术方面的研究。

E-mail: sunck@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: wang_peng@tju.edu.cn

下的应用。同时受投影仪内部数字微镜器件(DMD)刷新帧率(典型的在 120 Hz 左右)的影响,系统的测量速度也受到限制^[3]。对于小尺寸、金属器件的精密检测(如电路板印刷锡膏等半导体封装,或精密零件^[4]表面测量),由于受工业现场环境以及被测物表面反射率影响较大,基于线激光光源的结构光扫描系统常被应用在这些场合。但测量时只能对单条激光线进行特征提取,测量速率有限。

针对上述问题,国内外学者提出很多新的方法用来提高 DLP 投影系统的投射速度和测量精度。Lei 等^[5-6]提出了二值散焦方法大大提高了 DLP 的刷新速率。张启灿等^[7]将条纹投影的调制和解调技术应用到动态过程(物体)的三维形貌测量和重建中。其他提高 DLP 精度的方法如改善正弦条纹投射质量^[8-11],提高相位解算精度^[12-14]或进行相位误差补偿^[15]等也是目前三维形貌测量的研究热点。同时,一些新的原理和装置用于投射光栅条纹的方法也被提出用于三维形貌测量,通过压电陶瓷^[16]或声光调制器^[17-18]等实现激光干涉条纹的相移和频率改变。但基于干涉原理产生的条纹的对比度和精细度并不理想,从工业应用角度而言,系统结构也稍复杂,适应性较差。利用多面旋转棱镜^[19]或微机电系统(MEMS)反射镜^[20]通过扫描的方式将时间调制信号转换为空间条纹的方法能够充分利用激光的特性,能利用简单的系统和原理产生出快速、高精度的光栅条纹。

为了解决三维形貌在线测量在测量速度、精度和测量适应性之间的矛盾。本文结合频闪效应^[21]提出了一种利用多面旋转棱镜设计的高速激光光栅条纹投射系统,介绍了其频闪扫描投射原理。通过扫描的方式将时间调制的精密线激光信号转换为具有高帧率、高亮度、高密度、高精密度精密光栅条纹。使用专门设计的现场可编程门阵列(FPGA)硬件电路模块完成了激光光栅条纹的频闪投射以及条纹频率、脉宽、相位的变化的柔性编程和实时控制。并应用该系统对微小尺寸器件进行了测量,获得了反映三维形貌的相位和特征点数据。

2 频闪激光光栅条纹投射原理

如图 1 所示,利用激光器发出一束激光,经过聚焦透镜在横向聚焦,并利用柱面镜在纵向发散形成精细的线激光平面,通过高速旋转的多面棱镜反射扫描到被测物体表面。通过 FPGA 设计的驱动电路控制并同步电机的转速和激光器点亮、关断并配

合控制高速相机的曝光时刻和曝光时间以采集到激光光栅条纹图像。图中的光电探测器为 FPGA 控制电路提供同步信号,同时也为实时监测多面旋转棱镜电机的转速,保证投射的条纹的稳定性。

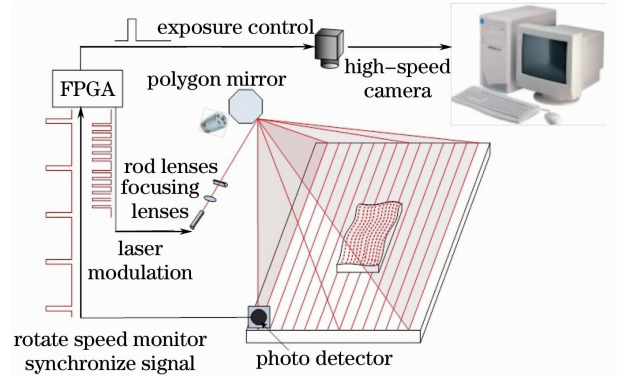


图 1 频闪激光光栅条纹实时投射系统

Fig. 1 Real-time stroboscopic laser fringe-pattern projection system

高速旋转的多面棱镜实现了调制信号时空转换。在本系统中,激光器的控制频率、占空比、点亮关断时刻,电机的转速,棱镜的面数、工作距离这些参数决定了投射的激光光栅条纹的模式和特性,如条纹的空间频率,线宽和相移等。由于时间信号是目前工程上可以精确控制的物理量,因此利用本频闪系统可以瞬时精确地控制光栅条纹的投射和模式改变。

图 2 为多面棱镜在转动过程中所产生的频闪条纹的原理图,图中 L 表示光源投射范围, d 表示棱镜

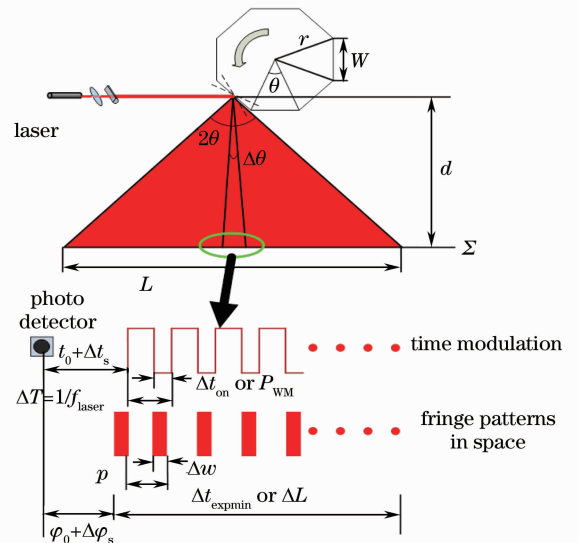


图 2 频闪激光光栅条纹的投射范围、密度、线宽、相位示意图

Fig. 2 Scheme of the stroboscopic laser fringe-pattern projection range, density, line width and phase

投射距离(光源的工作距离), θ 为棱镜的工作角, W 为棱镜一个面的宽度, r 为棱镜的旋转半径。

从图2可知,光源投射范围 L 由转镜的工作角 θ (面数 N_{face})和工作距离 d 决定:

$$L = 2d \tan \theta, \quad (1)$$

光线投射到工作平面 Σ 上时,由于(1)式的正切效应,得到条纹间距 p 不均匀,对此问题,在大范围光源投射时,利用平场聚焦镜(f - θ)镜进行校正可实现在工作面 Σ 上线性投射:

$$L = 2d\theta, \quad (2)$$

对于小尺寸的测量,测量范围 ΔL 选取为从整个扫描/投射范围内取的很小一部分,当测量范围对应的扫描角度 $\Delta\theta$ 较小时,则可直接线性近似为

$$\Delta L = d\Delta\theta = d\omega\Delta t, \quad (3)$$

式中 ω 为电机的转速(角速度), Δt 为激光器的时间调制信号, ΔL 为测量范围内的空间条纹分布。

因此激光器的调制频率 f_{laser} ($1/\Delta T$)和电机的转速(角速度) ω 共同决定了空间条纹周期 p :

$$p = d\omega\Delta T = d\omega/f_{\text{laser}}, \quad (4)$$

光条密度受限于激光器的调制频率和转镜的转速,激光器的点亮时间 Δt_{on} 决定了条纹的线宽 Δw :

$$\Delta w = d\omega\Delta t_{\text{on}}. \quad (5)$$

点亮时间 Δt_{on} 越短,线宽越细。最细线宽 Δw_{min} 受光学系统聚焦特性的限制,本系统采用的聚焦透镜,聚焦线宽约为 $40 \mu\text{m}$ 。光条点亮时间为 $\Delta t_{\text{on}0} = \Delta w_{\text{min}}/(\omega d)$,因此在达到最细线宽线下,继续减小点亮时间 $\Delta t_{\text{on}} \leq \Delta t_{\text{on}0}$ 线宽不会变,但光条点亮时间减少,亮度会降低。

此时条纹的亮暗分布特性,(亮条纹分布的空间占空比 p_{wm} 为调制线宽和空间周期之比)时间占空比 p_{tm} :

$$p_{\text{wm}} = \begin{cases} \Delta w/p = \Delta t_{\text{on}}/\Delta T (\Delta t_{\text{on}} > \Delta t_{\text{on}0}) \\ \Delta w_{\text{min}}/p = \Delta t_{\text{on}0}/\Delta T (\Delta t_{\text{on}} \leq \Delta t_{\text{on}0}) \end{cases}. \quad (6)$$

通过光电探测器探测信号同步控制改变调制信号初始时刻

$$\begin{aligned} t_0 &\rightarrow t_0 + \Delta t_s, \Delta t_s = n\Delta T/N_s, \\ (n &= 0, 1, \dots, N_s - 1), \end{aligned} \quad (7)$$

来改变调制信号的相位

$$\begin{aligned} \varphi_0 &\rightarrow \varphi_0 + \Delta\varphi_s; \Delta\varphi_s = 2n\pi/N_s, \\ (n &= 0, 1, \dots, N_s - 1), \end{aligned} \quad (8)$$

式中 N_s 为相移的次数,以实现控制条纹的相移。

通过上述扫描过程知,不同位置的激光条纹其实是在不同时刻产生的,为使相机在一帧图像中同

时采集到布满整个测量面的条纹,相机应在需要在电机扫描的测量范围 $\Delta\theta$ 这段时间内累积曝光,故曝光时间 Δt_{exp} 为

$$\Delta t_{\text{exp}} \geq \Delta t_{\text{expmin}} = \Delta\theta/\omega. \quad (9)$$

实际使用时以光电探测器探测时间周期(即多面棱镜扫过一面时间)为曝光时间:

$$\Delta t_{\text{exp}} = \theta/\omega, \quad (10)$$

曝光时刻和相移控制一样需要光电探测器的同步控制。

3 FPGA 实时控制

FPGA 电路控制为系统的控制核心,结合系统的频闪投射原理,设计的电路控制的实现流程框图如图3所示。系统控制主要分为5个模块,包括计时模块,通信模块,参数计算模块,状态/输出控制模块和节拍控制。

光电探测电路探测的脉冲信号 photosignal 通过防抖处理后进入 FPGA 控制电路。计时模块采用时钟计数的方法对脉冲间隔进行计时得到代表转镜扫过一面的时间的时钟计数 countclk。计时模块实时监测并将电机转速的变化量引入到后面的计算和控制中,以使调制信号匹配电机转速的变化,保证投射条纹的稳定性。为调制信号的输出提供基础的时间信息。

通信模块是为方便 FPGA 硬件控制电路与上位机通信以实现通过编程控制投射的光栅条纹的模式,以方便地获取不同频率、相位、脉宽的条纹图像。通过 USB 转 UART 串口和 FPGA 内部的串口模块进行通信,接收上位机发送的包含频率(freq)、脉宽(pw)、相移(phase)信息的数据(rxdata),按照预先设定的通信协议结合计时模块得到的 countclk 计算出控制激光器调制输出的参数计数值: phasenum, freqnum, pwnum, freqcount, 分别表示空间条纹相移、频率、脉宽和空间条纹数量对应的计数值。

状态/输出控制模块为控制输出的关键部分,利用了状态机,表示了激光器的输出状态,通过三个计数器(countphase, counttime, countfreq)的计数变化与控制参数(phasenum, freqnum, pwnum, freqcount)比较来控制激光器的输出控制状态statey。状态转移图如图3显示,激光器通过 counttime 来和 pwnum 及 freqnum 比较来切换激光器开关状态。pwnum 和 freqnum 决定了条纹的脉宽和频率。countfreq 和 freqcount 来比较判断条

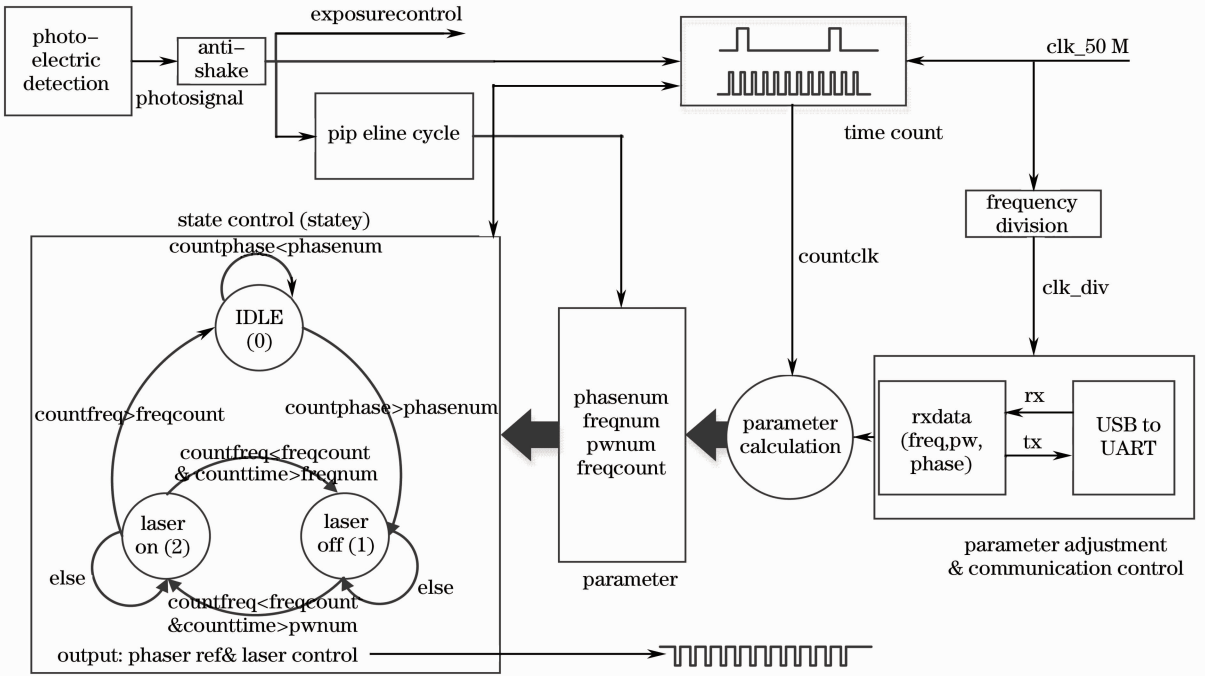


图 3 FPGA 电路控制流程

Fig. 3 Control flow of FPGA circuit

纹数量是否达到设定值 freqcount, 达到后停止激光器开关状态切换进入空闲状态。整个状态机设置为 3 个状态, 空闲 (0)、激光器关闭 (1)、激光器输出 (2), 空闲状态时激光器的控制也为关闭, 引入空闲状态原因是可以在不影响激光器开关状态切换的条件下通过 countphase 与 phasenum 比较实现相移控制, 可以简化状态转移条件的控制。

节拍控制是由于脉冲计数与激光器输出控制是

并行进行的, 因此需要在对当前转镜转过一面的时间进行计时和参数计算的同时, 利用上一个面的计数值和状态控制模块来控制激光器输出。为实时同步准确地完成这一过程, 节拍控制模块利用输入的探测信号形成节拍周期, 通过乒乓操作使计数、参数计算和控制输出按节拍、相互配合的切换, 完成对输入探测信号与输出控制信号的连续流水线式实时处理。

此外, 为精确保证探测电路的上升沿的获取, 系

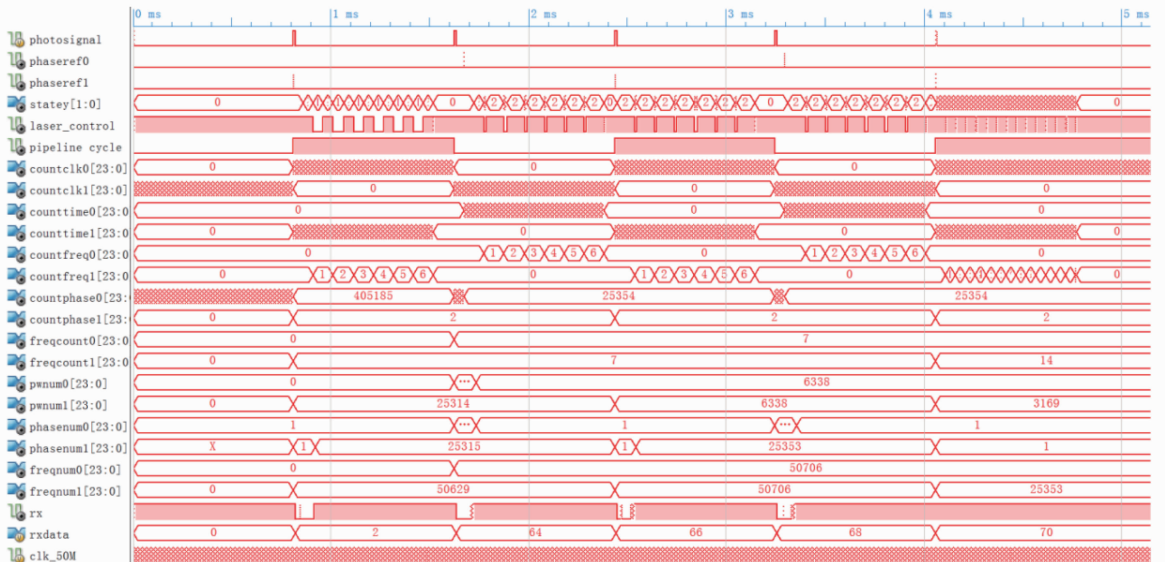


图 4 FPGA 控制电路的时序图

Fig. 4 Time sequence of FPGA circuit

统采用了具有高灵敏度和响应速度快的 PIN 型光敏二极管并专门设计了高速放大整形电路,来获取光电探测器的脉冲信号。

按照上述流程设计,利用 verilog 语言实现了 FPGA 硬件控制电路,控制电路的时序信号输出如图 4 所示。图中 photosignal 为输入的光电探测器接收的信号,串口接收端(rx)接收到上位机发送的数据(rxdata),通过计算得到控制参数变化,并通过状态(statey)的变化控制实现了激光器输出调制信号(laser_control)的变化。控制流程中提到的计数器和计算参数等都是根据节拍周期实现实时控制的。计时模块中利用两个计数器 countclk0 和 countclk1 相互切换配合,按照节拍周期的高低,其中一个用于对输入脉冲计数时,另一个用于计算参数控制输出。其他参数的节拍控制原理雷同。从激光器输出调制信号(laser_control)的变化能看出,频率,脉宽,相移都能根据上位机通信实现实时编程控制。图中的 phaseref 信号是为能分析相移的变化的参考信号。

4 实验及结果分析

4.1 测量实验装置

系统选用的激光光源波长为 650 nm,最高调制频率能到 200 MHz,在工作距离 $d=65$ mm 出聚焦最细,多面棱镜为 $N_{\text{face}}=8$ 。

为适应小尺寸器件的精密测量,系统采用相机镜头焦距 $f'=100$ mm,相机像素为 768 pixel \times 576 pixel;像元尺寸为 8.6 μm ;测量物距为 $L=220$ mm;像距为 $l=150$ mm;测量范围为 10 mm \times 7.5 mm;激光聚焦在工作距离 $d=65$ mm;光源投射范围 $L=2d\tan\theta=130$ mm。根据相机测量范围,因此 $\Delta L=10$ mm, $\Delta\theta\approx\Delta L/d=0.15$ rad=8.7°,工作距离 d 和电机转速 ω

选择固定后,实现设计的条纹分布的频率、脉宽、占空比、相移等参数 $p, \Delta\omega, p_{\text{wm}}, \varphi_0 + \Delta\varphi_s$ 需要的激光器调制时点亮和关断的时间和时刻 $\Delta T(f_{\text{laser}}), \Delta t_{\text{on}}, t_0 + \Delta t_s$ 由 FPGA 控制模块根据频率、脉宽和相位控制信号可根据(4)~(8)式自动计算得到。

搭建的系统实物图如图 5(a)和 5(b)所示,图 5(c)显示了频闪光栅条纹投射区域与测量采集区域(矩形框内区域)。为验证条纹的实际效果,拟对投射到如图 5(d)所示内外半径分别是 5 mm,7.5 mm 厚度为 0.5 mm 的薄铝片上的光栅条纹进行分析。

4.2 频率、脉宽、相移调制实验

图 6 显示在不同调制频率、脉宽、相移下采集的光电探测器的探测脉冲信号(上通道 CH1)和激光器输出信号(下通道 CH2)。从图中显示探测的信号频率为 254 Hz,多面镜为 8 面,相应测得电机转速为 1905 r/min。图 6(a)~(c)中激光器调制频率 $f_{\text{laser}}=1.78$ kHz,图 6(a)与图 6(b)之间存在 π 的相位差,图 6(a),图 6(b)与图 6(c)的区别是脉宽 P_w 由 1/2 变为 1/8。图 6(d)则是在图 6(a)~(c)基础上完成了倍频 $f_{\text{laser}}=3.56$ kHz。类似地,图 6(e)、(f)也显示了不断根据上位机发送的频率、脉宽和相移参数的输出信号。

相应地,利用设计的成像系统对系统投射条纹进行采集,采集得到的频率、脉宽和相移变化的图像如图 7 和图 8 所示。图 8 条纹图像下方显示为条纹图像中第 200 行图像灰度值的分布,曲线图显示出当脉宽 $P_w=1/2$ 时灰度分布成准正弦光栅的形式,虽然电路调制为方波调制,但由于半导体激光器的高斯光束分布以及投射系统和成像系统镜头起到散焦和低通滤波的作用,使得投射的条纹可以作为准正弦条纹运用到相位轮廓测量中。

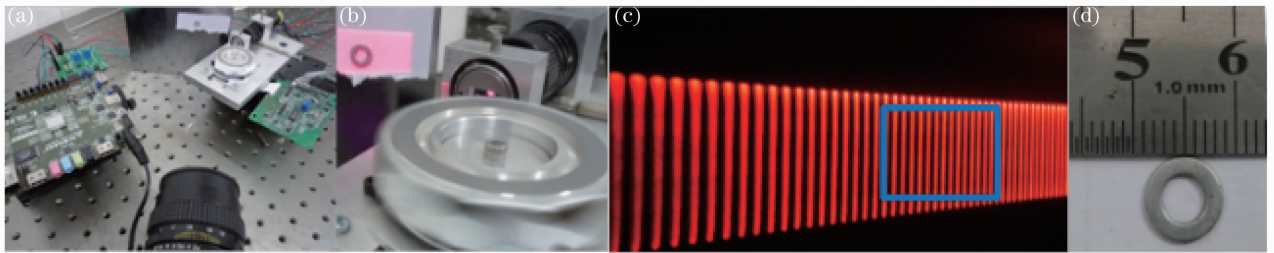


图 5 测量系统图。(a)系统结构;(b)光源投射;(c)投射的频闪光栅条纹与测量采集区域;(d)被测薄铝片

Fig. 5 Measurement system. (a) System setup; (b) light source projection; (c) fringe patterns and the measurement range; (d) thin aluminum plate

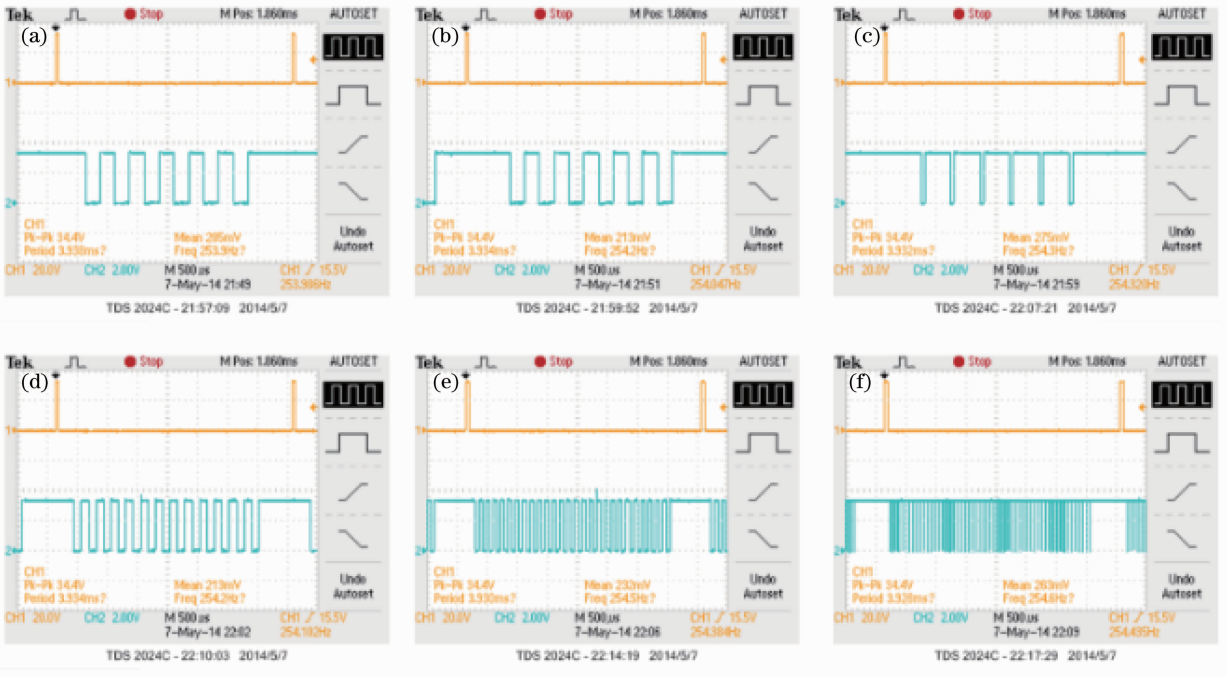


图 6 示波器显示的光电探测信号(CH1)和激光器调制信号(CH2)

Fig. 6 Photo-electric detector signal (CH1) and the laser modulation signal (CH2) displayed on oscillograph

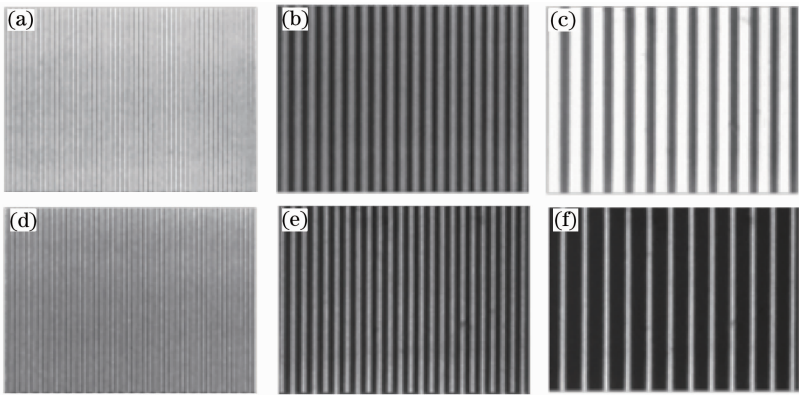


图 7 频率变化和脉宽变化的条纹图。(a) $f_{\text{laser}} = 56.9 \text{ kHz}$, $P_w = 1/2$; (b) $f_{\text{laser}} = 28.5 \text{ kHz}$, $P_w = 1/2$; (c) $f_{\text{laser}} = 14.2 \text{ kHz}$, $P_w = 1/2$; (d) $f_{\text{laser}} = 56.9 \text{ kHz}$, $P_w = 1/8$; (e) $f_{\text{laser}} = 28.5 \text{ kHz}$, $P_w = 1/8$; (f) $f_{\text{laser}} = 14.2 \text{ kHz}$, $P_w = 1/8$

Fig. 7 Fringe patterns changed with frequency and pulse-width modulation. (a) $f_{\text{laser}} = 56.9 \text{ kHz}$, $P_w = 1/2$; (b) $f_{\text{laser}} = 28.5 \text{ kHz}$, $P_w = 1/2$; (c) $f_{\text{laser}} = 14.2 \text{ kHz}$, $P_w = 1/2$; (d) $f_{\text{laser}} = 56.9 \text{ kHz}$, $P_w = 1/8$; (e) $f_{\text{laser}} = 28.5 \text{ kHz}$, $P_w = 1/8$; (f) $f_{\text{laser}} = 14.2 \text{ kHz}$, $P_w = 1/8$

图 6~8 中的控制输出信号以及采集条纹图像验证了设计的 FPGA 控制系统可以通过改变频率、脉宽和相位参数实现不同模式的激光光栅条纹的投射的特性。

4.3 条纹分析

将系统产生的激光光栅条纹应用在三维形貌测量中,为验证本系统的可行性和实用性,采用两种常用的结构光三维形貌测量方法对投射的条纹进行分析:

1) 当 $P_w = 1/2$ 时,与朗奇光栅散焦投影类似,

投射的条纹如图 8 所示的准正弦光栅,对光栅条纹采用解算相位的方法来分析。相移法(PSP)和傅里叶变换法(FTP)是常用的相位解算方法。利用投射系统的相移特性,分析时采用了四步相移计算相位的方法。图 9(a)为四步相移中投射到被测物体薄铝片表面被调制的条纹图像中的一幅($f_{\text{laser}} = 28.5 \text{ kHz}$),图 9(b)为利用相移法得到的包裹相位图,图 9(c)为通过减去图 8 采集的参考平面图像得到的相位分布以去除调制条纹基频信息,进而得到反映被测件轮廓信息的相位分布。从得到的相位分

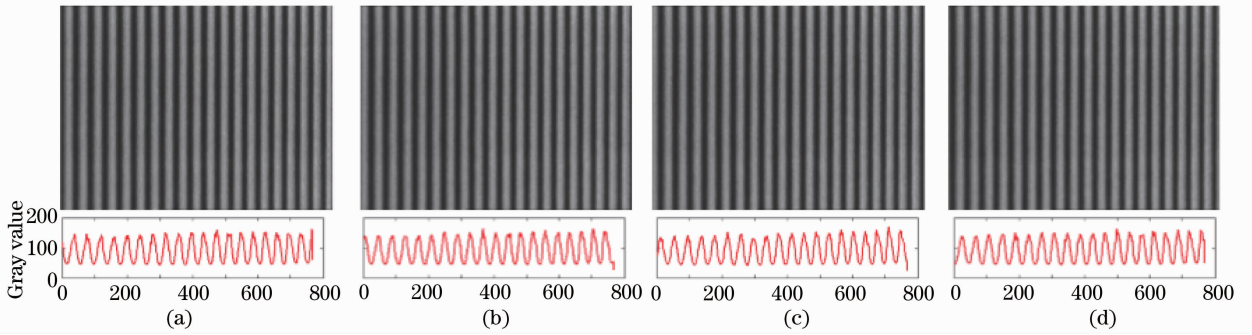


图 8 四步相移光栅条纹图像 $f_{\text{laser}}=28.5 \text{ kHz}$, $P_w=1/2$ 。(a) $\delta=0$; (b) $\delta=\pi/2$; (c) $\delta=\pi$; (d) $\delta=3\pi/2$

Fig. 8 Fringe patterns with four-step phase shifting $f_{\text{laser}}=28.5 \text{ kHz}$, $P_w=1/2$. (a) $\delta=0$; (b) $\delta=\pi/2$; (c) $\delta=\pi$; (d) $\delta=3\pi/2$

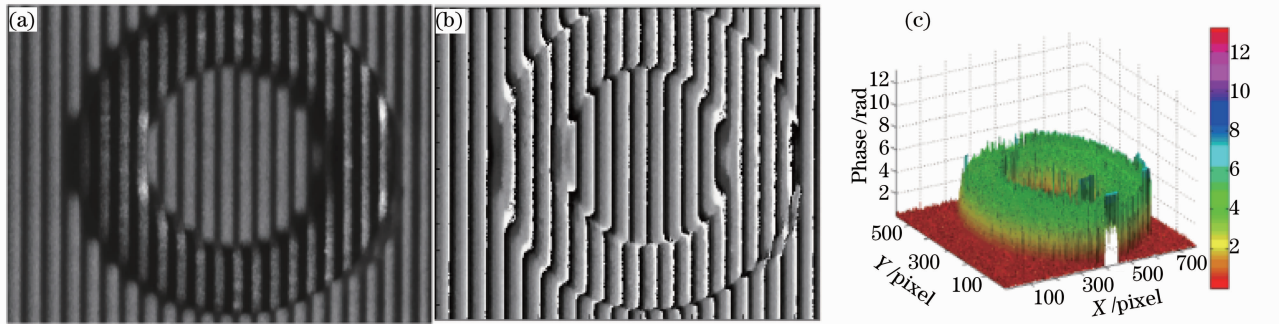


图 9 相位解算的结果。(a)采集的条纹图像;(b)相移法解算的包裹相位;(c)去除基频信息的被测物的相位展开分布
Fig. 9 Result of phase analysis. (a) Captured fringes; (b) wrapped phase using phase-shift algorithm; (c) distribution of the unwrapped free phase removed the carrier frequency

布来看,投射的条纹结合相位分析方法能够很好地得到被测器件的三维形貌。

值得注意的是,图 9(b)中所计算的相位分布在主值范围 $[-\pi, \pi]$ 内,因而是截断的,需要进行相位展开,得到反映被测物实际高度起伏变化的连续相位分布。分析时采用的相位展开的算法为 GoldStein 空间相位解包裹算法。如果利用系统的频率调制特性,也可以通过时间域的相位展开的方法来实现,但这需要采集更多幅的图像会降低测量

速度。

2) 当脉宽为窄脉宽 $P_w \ll 1/2$ 时,此时投射的条纹更接近多线结构光,利用重心法提取条纹中心的方法来分析投射到被测物表面薄铝片表面变形的条纹图像。图 10(a)和图 10(b)为采集的相位差为 π 的条纹。多次相移可以获取尽量多的特征点使得到的三维形貌更为细腻。图 10(c)为相位差为 π 的两次采集的条纹共同解算得到相对参考平面的条纹中心坐标偏移值。通过激光三角原理知,条纹的偏移值



图 10 窄脉宽调制的条纹图及条纹中心提取分析。(a)和(b)为采集的相位差为 π 的条纹;(c)光条中心偏移量分布
Fig. 10 Narrow pulse-width modulation fringe patterns and the center extraction analysis. (a) and (b) are captured fringes with π phase shift; (c) pixels offset distribution of the fringe center

反应了物体的高度变化,得到的特征点数据准确地反映了被测物体的三维形貌。

在对光栅条纹采用解算相位的方法 1) 中, $P_w = 1/2$ 是一种可行的方案,受高斯光束散焦效果的影响,实际中 $P_w = 1/2$ 并不一定是最优值。如需要得到更接近标准正弦分布的光栅条纹,可在 $P_w = 1/2$ 左右,通过分析不同脉宽调制下条纹分布对采用相位轮廓术测量误差的影响,选取最优的脉宽调制^[6,8](OPWM)方案。在方法 2) 中, $P_w \ll 1/2$ 窄脉宽时,此时投射的条纹更接近多线结构光,利用重心法提取条纹中心的方法来分析,更能利用线激光的特性。 P_w 越小,条纹越细,测量分辨率越高,当然线宽不会无限小,会受光学聚焦系统约束。当达到最细线宽后,继续减小 P_w ,线宽不变,但条纹亮度会降低,为保证条纹的亮度,图 10 的实验中, P_w 实际值设置为 $1/8$ 。

4.4 讨论

由于激光器调制可到达 200 MHz,条纹的密度不受调制影响,主要受激光聚焦线宽的限制,本投射系统的性能使得线激光聚焦在 $40 \mu\text{m}$ 左右,因而光栅条纹的周期可以达到很高密度、高精细度的分布,这对于应用于微小尺寸精密测量场合非常有优势。

此外,电机的旋转扫描,转速最高可达到 10000 r/min,由于电路调制的频率可以很高,调节电机的转速,光栅条纹投射最高可达 1300 frame/s 的刷新帧率。相比基于投影仪的光栅条纹投射方法刷新帧率大幅提高,测量速度主要受相机采集速度的限制。

本系统可以实现激光光栅条纹频率、脉宽和相位的改变以得到不同模式的条纹,该特性使得既可以用解相位的方法解算三维形貌,也可以采用对条纹提取中心的方法。还利用了半导体激光的特性,可以方便实现光强的调整。为方便实现脉宽调制,系统目前采用的方波和脉冲调制,不能得到标准的正弦光栅的投射,但由于激光光强分布是成高斯分布的,对投射的条纹有一种自然地散焦作用,可以作为准正弦光栅。同时激光的散斑效应等使得投射的光栅条纹存在高次谐波误差,但这些误差可以通过对条纹图像的滤波^[22]或校正(如 γ 校正^[9-11]技术)是可以补偿的。在后续研究中,如需要得到更准确的相位解算,也可以通过将方波调制改为线性调制来改善条纹正弦分布的质量。

本系统主要由可调制的半导体激光光源配合旋转多面棱镜即可实现,相对干涉条纹投射系统而言,

光学系统硬件搭建并不复杂。除了应用于小尺寸器件测量外,通过修改光学参数,也可以方便地应用在快速大范围的三维形貌测量中。这些优点都是依赖本系统投射的方便性,可以直接通过改变电路调制信号方便地实现光栅条纹投射模式的改变。

5 结 论

介绍了频闪激光光栅条纹投射的原理,并设计了基于 FPGA 的频闪激光光栅条纹投射的硬件控制、调制系统。系统投射的光栅条纹具有高帧率,高亮度,高密度,高精细度;且亮度、频率、脉宽可调,相移可控。电路调制使得光源系统柔性可调,易方便实时地控制投射出各种条纹模式的光栅条纹。实验数据验证了这些特性。通过对采集的条纹图像进行相位和特征点提取结果分析,能够利用投射的系统进行小尺寸器件的形貌测量。既可以作为典型的光栅条纹光源应用于相位轮廓术形貌测量中,也可以作为高速的多线结构光源,结合了光栅条纹整体投射的快速和线激光光源高精度的特性。实验结果表明该系统在微小尺寸器件的实时在线检测上是一种有效且有应用前景的技术。

参 考 文 献

- 1 S S Gorthi, P Rastogi. Fringe projection techniques: whither we are? [J]. *Opt & Lasers in Eng*, 2010, 48(2): 133-140.
- 2 Z Wang, D A Nguyen, J C Barnes. Some practical considerations in fringe projection profilometry [J]. *Opt & Lasers in Eng*, 2010, 48(2): 218-225.
- 3 S Zhang. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques [J]. *Opt & Lasers in Eng*, 2010, 48(2): 149-158.
- 4 Bin Liu, Peng Wang, Yong Zeng, *et al.*. Measuring method for micro-diameter based on structured-light vision technology [J]. *Chin Opt Lett*, 2010, 8(7): 666-669.
- 5 S Lei, S Zhang. Digital sinusoidal fringe pattern generation: Defocusing binary patterns versus focusing sinusoidal patterns [J]. *Opt & Lasers in Eng*, 2010, 48(5): 561-569.
- 6 Y Wang, S Zhang. Comparison of the squared binary, sinusoidal pulse width modulation, and optimal pulse width modulation methods for three-dimensional shape measurement with projector defocusing [J]. *Appl Opt*, 2012, 51(7): 861-872.
- 7 Zhang Qican, Su Xianyu. Research progress of dynamic three-dimensional shape measurement [J]. *Laser & Optoelectronic Progress*, 2013, 50(1): 010001.
张启灿, 苏显渝. 动态三维面形测量的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(1): 010001.
- 8 Y Wang, S Zhang. Optimal pulse width modulation for sinusoidal fringe generation with projector defocusing [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(24): 4121-4123.
- 9 S Ma, C Quan, R Zhu, *et al.*. A fast and accurate γ correction based on Fourier spectrum analysis for digital fringe projection profilometry [J]. *Opt Commun*, 2012, 285(5): 533-538.
- 10 Xiao Yanshan, Cao Yiping, Wu Yingchun, *et al.*. Gamma

- nonlinearity correction based on Fourier spectrum analysis for phase measuring profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1212004.
- 肖焱山, 曹益平, 武迎春, 等. 基于傅里叶频谱分析的相位测量轮廓术系统 Gamma 非线性校正方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1212004.
- 11 Zheng Dongliang, Da Feipeng. Gamma correction method for accuracy enhancement in grating projection profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0512003.
- 郑东亮, 达飞鹏. 提高数字光栅投影测量系统精度的 Gamma 校正技术[J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0512003.
- 12 L Huang, Q Kema, B Pan, *et al.*. Comparison of Fourier transform, windowed Fourier transform, and wavelet transform methods for phase extraction from a single fringe pattern in fringe projection profilometry [J]. *Opt & Lasers in Eng*, 2010, 48(2): 141–148.
- 13 E H Kim, J Hahn, H Kim, *et al.*. Profilometry without phase unwrapping using multi-frequency and four-step phase-shift sinusoidal fringe projection [J]. *Opt Express*, 2009, 17(10): 7818–7830.
- 14 Wang Tao, Chen Wenjing, Zhong Min, *et al.*. 2D S-transform profilometry based on the structured light projection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1207002.
- 王焱, 陈文静, 钟敏, 等. 基于结构光投影的二维 S 变换轮廓术[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1207002.
- 15 B Pan, Q Kema, L Huang, *et al.*. Phase error analysis and compensation for nonsinusoidal waveforms in phase-shifting digital fringe projection profilometry [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(4): 416–418.
- 16 D Xiao-jie, D Fa-jie, L Chang-rong. Phase stabilizing method based on PTAC for fiber-optic interference fringe projection profilometry [J]. *Opt & Laser Technol*, 2013, 47: 137–143.
- 17 M Schaffer, M Große, B Harendt, *et al.*. Coherent two-beam interference fringe projection for highspeed three-dimensional shape measurements [J]. *Appl Opt*, 2013, 52(11): 2306–2311.
- 18 Zhao Huijie, Zeng Junyu, Lei Yanzhang. Frequency-varying fringes projector based on acoustic grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(2): 355–360.
- 赵慧洁, 曾俊钰, 雷彦章. 基于声光栅的变频条纹投射系统[J]. *光学学报*, 2008, 28(2): 355–360.
- 19 Y C Park, S J Ahn, M H Kang, *et al.*. Ultra high-speed 3-dimensional profilometry using a laser grating projection system [J]. *J Opt Soc Korea*, 2009, 13(4): 464–467.
- 20 T Wakayama, T Yoshizawa. Compact camera for three-dimensional profilometry incorporating a single MEMS mirror [J]. *Opt Eng*, 2012, 51(1): 013601.
- 21 Zhang Qichan, Su Xianyu, Cao Yiping, *et al.*. Three-dimensional shape measurement for rotating blade using stroboscopic structured illumination [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(2): 207–211.
- 张启灿, 苏显渝, 曹益平, 等. 利用频闪结构光测量旋转叶片的三维面形[J]. *光学学报*, 2005, 25(2): 207–211.
- 22 Zhang Rui, Cao Yiping, He Dinggao. New method for improving the accuracy of real-time three-dimensional measurement based on a composite grating [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(10): 1008005.
- 张睿, 曹益平, 何定高. 一种提高复合光栅实时三维测量精度的方法[J]. *中国激光*, 2011, 38(10): 1008005.

栏目编辑: 何卓铭