

基于高速 LED 阵列的条纹结构光三维测量方法

耿协辉¹, 宋镜明¹, 张蕾², 左超³, 孙鸣捷^{1*}

¹北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;

²中国电子科技集团第十一研究所, 北京 100015;

³南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

摘要 针对数字光处理(DLP)投影仪投影速度低从而限制结构光三维测量速度的问题,采用具有兆赫兹量级切换速度的LED阵列作为投影光源,提出一种基于高速LED阵列的条纹结构光三维测量方法。具体地,使用高速LED阵列投影二值条纹图案,通过对投影系统的镜头进行轻微离焦从而在被测三维物体表面获得正弦条纹,然后结合相移法和多频外差法对物体三维高度进行解算重建。使用所提实验系统在21000 frame/s的投影速度下对旋转速度为3000 r/min的阶梯物体进行三维测量,系统对动态物体的测量速度达到6000 Hz,测量精度达到0.1 mm,实现了对高速运动物体的三维形貌重建,同时展现出高速LED阵列作为投影光源提升三维测量速度至兆赫兹量级的可行性。

关键词 成像系统; 三维测量; 高速LED; 结构光; 离焦投影

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223404

Three-Dimensional Measurement System of Fringe-Structured Light Based on High-Speed LED Array

Geng Xiehui¹, Song Jingming¹, Zhang Lei², Zuo Chao³, Sun Mingjie^{1*}

¹*School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;*

²*The Eleventh Research Institute of China Electronics Technology Group, Beijing 100015, China;*

³*School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China*

Abstract Projection speed of a digital light processing projector is low, which limits the three-dimensional (3D) measurement speed of structured light. To solve this problem, a 3D measurement system of fringe-structured light based on a high-speed light emitting diode (LED) array is proposed using the LED array with terahertz switching speed as the projection light source. Particularly, the high-speed LED array is used to project a binary fringe pattern, and a sinusoidal fringe is obtained on a measured 3D object's surface by slightly defocusing the lens of the projection system, and the object's height is calculated. Afterward, the object is reconstructed by combining phase-shifting and multifrequency heterodyne methods. As an experiment, the proposed system was used for 3D measurement of a stepped object with a rotation speed of 3000 r/min at a projection speed of 21000 frame/s. The proposed system can measure a dynamic object at a speed of 6000 Hz, and the measurement accuracy reaches 0.1 mm, which realizes 3D shape reconstruction of high-speed moving objects. In addition, it shows the feasibility of using a high-speed LED array as a projection light source to improve 3D measurement speed to megahertz.

Key words imaging systems; three-dimensional measurement; high-speed LED; structured light; defocus projection

1 引言

高速三维测量技术能够获取动态物体在高速运动情况下的三维形貌信息,可以分析破碎物体、振动物体

或旋转物体等高速场景,这在工业领域和科学研究方面都有着非常重要的意义^[1-5]。由于基于正弦相移法的三维测量方式在精度上的优势,相移法已经在光学三维测量领域获得了广泛的应用。采用相移法实现

收稿日期: 2022-12-27; 修回日期: 2023-01-24; 录用日期: 2023-02-06; 网络首发日期: 2023-02-16

通信作者: *mingjie.sun@buaa.edu.cn

1次三维测量一般需要对未发生动态变化的场景投射出多幅图案(至少3幅),使得其相对于单帧投影的三维测量方式来说,并不具备速度优势。为了提升基于正弦相移法的三维测量速度,前人做了大量的研究。具体地,Huang等^[6]将数字光处理(DLP)投影仪3个颜色通道分别编码成不同相移的正弦条纹图案,通过提高图案的投影速度,进而提高三维成像速度。Huang等^[7]在其基础上进行了算法的改进和优化,将三维测量速度提升到40 Hz。此时的实验系统仍采用普通DLP投影仪来投影8 bit的标准正弦条纹,严格的正弦条纹投影能达到的最大投影速度只有100 Hz量级,难以测量高速运动的物体。

为了解决DLP投影仪投影标准正弦条纹的速度限制,Lei等^[8-10]提出二值离焦的投影方式。具体地,他们使用DLP投影仪投影出二值条纹图像,并利用镜头的轻微离焦操作对条纹图案进行高斯低通滤波,移除二值条纹信号中的高次谐波分量,在离焦情况下生成符合正弦灰度分布的条纹投影图案。为了让投影图案更逼近理想的正弦条纹图案,有关学者提出相关的调制技术^[11-20]。在Hyun等^[21]提出的离焦投影三维测量方法中,由于只需投影1 bit二值条纹,图案的投影和采集速率可达到3333 Hz,动态三维测量速度可达到667 Hz。后续有关学者也进一步利用二值离焦技术进行相关研究^[22-25],实现了测量系统各性能的提升。同时,在测量速度提高的情况下,发展出许多补偿高速运动引起的测量误差的方法^[26-30]。更有学者将深度学习技术应用于条纹分析实现了旋转扇叶的高速三维测量^[31-32]。但是,基于二值条纹图案离焦的三维测量方法的测量速度仍受限于DLP投影仪的最大投影速度。即使目前最先进的DLP Discovery技术也只能达到数千赫兹的二值图像切换速度^[9],远低于帧率动辄上万的高速相机。因此,正弦相移方法的三维测量速度的进一步提高,亟须投影器件投影速度的进一步突破,要寻求一种切换速度更快的结构光投影光源。

本文针对正弦条纹结构光三维测量速度受到投影器件DLP投影仪投影速度限制的问题,通过寻找更快切换速度的结构光光源LED,利用LED超高速切换频率的特性,搭建基于高速LED阵列的条纹结构光三维测量系统,极大提高了原有的结构光三维测量速度。实验验证了通过LED阵列投影二值离焦条纹图案进行高速三维测量的可行性与准确性。实验中投影系统使用的高速LED阵列投影二值条纹图案的切换频率最高可达5 MHz,在高速相机采集帧率允许的情况下,所提方案相比于当下最快的DLP投影仪的投影速度可以高出两个数量级,达到MHz级别的三维测量速度。

2 基本原理

使用LED阵列投影模块来代替常规正弦条纹结构光三维测量系统中的DLP投影仪,图1为所提三维

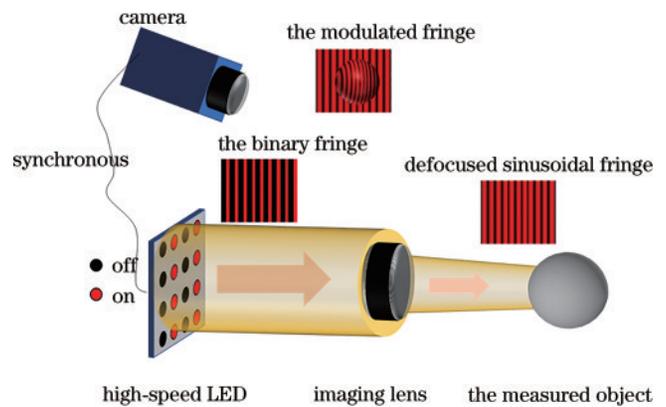


图1 基于高速LED阵列的结构光三维测量系统原理示意图
Fig. 1 Principle schematic diagram of structured light 3D measurement system based on high-speed LED array

测量系统原理示意图。该测量系统主要由高速LED阵列、成像透镜、被测三维物体、高速相机及其附属控制模块组成。LED阵列提前载入主动照明的二值条纹图案,通过调整成像镜头轻微离焦,在被测物体表面得到近似的正弦条纹图案。由于被测物体的表面高低不平,正弦条纹被表面高度调制而发生形变。同步电路控制高速相机从另一角度拍摄物体上被调制变形的正弦条纹图案。使用计算机对调制条纹图案进行处理,利用相移算法获得图案的包裹相位,由多频外差法求取绝对相位分布,根据标定得到的相位高度映射关系恢复出物体的高度信息,实现物体的三维形貌测量。

所用的LED阵列分辨率为 32×32 ,每行每列具有32个LED灯珠,排列成二维灯珠点阵。每一个LED灯珠是 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 大小的正方形,各个LED灯珠之间的间距为 0.375 mm ,LED阵列总体尺寸为 $44 \text{ mm} \times 44 \text{ mm}$ 。使用现场可编程门阵列(FPGA)和驱动电路控制每行或每列灯珠的开关。二值条纹的存储及信号的控制由FPGA实现,由驱动电路进行控制信号的传递和LED阵列的驱动。软件部分用Verilog语言编写二值编码图案的控制程序,然后烧录至FPGA中,利用并行控制来降低传输信号的时间,将控制信号传输到LED阵列的行和列控制端,最后由LED阵列来高速显示二值条纹。

基于高速LED阵列的结构特点以及提高系统测量速度的目的,采用三步相移图案和四步相移图案进行投影。相位移动通过LED阵列点亮二值条纹图案的空间变化来实现,使用LED阵列向被测物体投影7幅相移图案实现对物体的1次三维形貌测量。

相移法通过投射不同相移的正弦条纹图实现对物体的三维测量,该方法可独立计算出正弦条纹图像每个像素点的相位值,从而计算每个像素点的深度信息,具有对表面反射率变化和環境光不太敏感等优势。因此,相移法在光学三维测量领域中的运用非常广泛^[1]。相移法包括多种算法,如标准 N 步相移、 $N+1$ 步相移、

任意等步长相移等,不同相移算法各有优劣。相比于其他算法,标准 N 步相移算法应用最为广泛,具有良好的随机噪声抑制效果以及对低频谐波敏感度低的优点^[33]。本实验基于高速 LED 阵列的条纹结构光三维测量系统,选择标准三步和四步相移法来获得物体的相位信息。

具体地,以标准三步相移算法为例介绍相移法求解正弦条纹相位的过程。标准三步相移正弦条纹的相位每次固定偏移 $2\pi/3$,它们的光强分布可分别描述为

$$I_1(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y) - 2\pi/3], \quad (1)$$

$$I_2(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y)], \quad (2)$$

$$I_3(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y) + 2\pi/3], \quad (3)$$

式中: $A(x, y)$ 表示平均光强; $B(x, y)$ 表示调制光强; $\phi(x, y)$ 为待求的相位。联立式(1)~(3),可得到正弦条纹相位值 $\phi(x, y)$:

$$\phi(x, y) = \arctan\left[\frac{\sqrt{3}(I_1 - I_3)}{2I_2 - I_1 - I_3}\right]. \quad (4)$$

实际投影的正弦条纹包含多个相位周期,根据式(4)计算得到的相位值 $\phi(x, y)$ 被包裹在 $[-\pi, \pi)$ 中,导致所提取的相位具有 2π 相位跳跃,要用相位展开操作将包裹相位转换为连续的绝对相位^[34-36]。目前,相位展开方法根据不同的操作域分为3大类:空间相位展开^[37-38]、时间相位展开^[39-40]和立体相位展开^[41-49]。结合 LED 阵列的控制特点,所提方法采用时间相位展开方式中的多频外差法进行相位展开。

将展开得到的连续分布相位称为绝对相位,并用 $\Phi(x, y)$ 来表示,包裹相位用 $\phi(x, y)$ 来表示,则二者之间的关系可表示为

$$\Phi(x, y) = \phi(x, y) + 2k(x, y)\pi, \quad (5)$$

式中: $k(x, y)$ 为正整数,表示像素点 (x, y) 处的相位跳变阶数。

多频外差法通过合成多个频率相接近的包裹相位,得到一个频率更低的相位,再在合成的低频范围内将高频包裹相位展开。考虑到绝对相位测量速度的获取,使用两个不同频率的正弦条纹进行相位解包裹。

设两个不同频率正弦条纹的绝对相位值分别为 $\Phi_1(x, y)$ 和 $\Phi_2(x, y)$,对应的包裹相位为 $\phi_1(x, y)$ 和 $\phi_2(x, y)$, k_1, k_2 分别为对应包裹相位的跳变阶数, λ_1 和 λ_2 分别为两个频率正弦条纹的波长,则这两个不同频率的正弦条纹有如下关系:

$$\begin{cases} \Phi_1(x, y) = \phi_1(x, y) + 2k_1(x, y)\pi \\ \Phi_2(x, y) = \phi_2(x, y) + 2k_2(x, y)\pi \end{cases}, \quad (6)$$

$$\phi_{\text{eq}}(x, y) = \phi_1(x, y) - \phi_2(x, y), \quad (7)$$

$$\lambda_{\text{eq}} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}, \quad (8)$$

$$k_1(x, y) = \left\lfloor \frac{\left(\frac{\lambda_{\text{eq}}}{\lambda_1}\right) \phi_{\text{eq}}(x, y) - \phi_1(x, y)}{2\pi} \right\rfloor, \quad (9)$$

式中: $\phi_{\text{eq}}(x, y)$ 表示两个频率的正弦条纹的合成相位; λ_{eq} 表示合成波长。当两种频率波长 λ_1 和 λ_2 满足 $\lambda_1 < \lambda_2 < 2\lambda_1$ 时,则合成波长 λ_{eq} 满足 $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_{\text{eq}}$ 。因此,合成波长大于原本两个频率的正弦条纹的波长。当合成波长对应宽度可以覆盖全场测量范围时,求得高频条纹跳变阶数后代入(6)式即可求解得到该范围内高频条纹的绝对相位值。

在得到绝对相位之后,通过绝对相位分布图与物体高度的对应关系即可解出物体的深度信息,而绝对相位与物体高度的对应关系需要提前通过系统标定获得。采用文献^[50]的多项式拟合方法,也即多项式相位高度映射模型:

$$h(x, y) = \sum_{i=0}^n a_i(x, y) \Delta\phi(x, y)^i, \quad (10)$$

式中: $h(x, y)$ 为物体高度; $\Delta\phi(x, y)^i$ 为相位差;多项式系数 $a_i(x, y)$ 需要逐像素标定,系数在标定后保存以供测量期间使用。该模型可以通过增加多项式的项数减轻相机、投影仪的透镜畸变对表面重构的影响。

3 分析与讨论

依据基于高速 LED 阵列的结构光三维测量原理,搭建的三维测量系统如图 2 所示。它由基于高速 LED 阵列的投影设备、高速 CMOS 相机和同步电路以及被测动态物体组成。基于高速 LED 阵列的投影设备包括控制板、LED 阵列和成像镜头。该系统使用的高速相机是 COMS 相机(Vision Research Phantom V611),相机的采集帧率为 6242 frame/s,图像分辨率为 1280×800 。在本次实验中,采用 512×512 的图像分辨率来拍摄图案,此时相机的最高采集帧率为 21000 frame/s。实验中使用的相机镜头(Nikon AF-S Nikkor 24-70mm f/2.8G ED)的焦距 f 为 70 mm,光圈数 F 为 2.8。投影系统镜头综合考虑成像质量与系统结构的机械距离。首先,成像透镜需要将编码的二值条纹无畸变地投影到被测物体表面,同时需要尽可能提高经过透镜后成像的条纹亮度。其次,应尽量使得像距较大,以免机械距离对相机的拍摄采集范围带来限制,选择焦距为 85 mm、光圈数为 1.4 的镜头作为投影系统的成像透镜。同步电路接收投影定时信号,发送触发信号给高速相机进行同步图像采集。被测物体为四级台阶状的阶梯形物体(物体长宽均为 20 mm,每级台阶高度差为 2 mm),固定在光学斩波器上随斩波器进行高速转动。所提系统使用的光学斩波器型号为 BOCIC OE3001,旋转速度为 120~6000 r/min。在斩波器的斩波片上固定一个转接面,用于固定参考平面和被测阶梯物体。

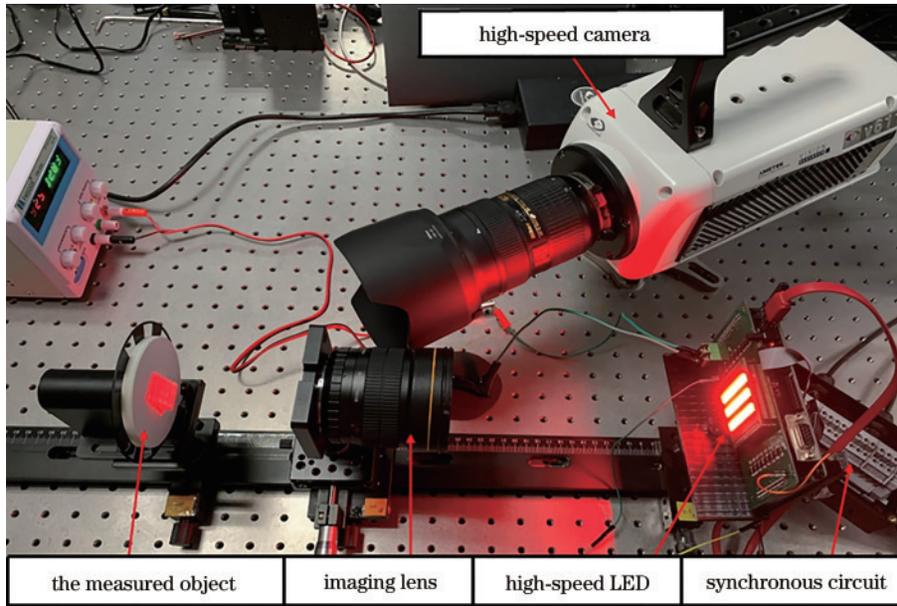


图 2 基于高速 LED 阵列的三维测量系统实物图

Fig. 2 Physical picture of 3D measurement system based on high-speed LED array

首先,对静态物体进行三维测量。具体地,对投影系统的成像镜头进行轻微离焦操作,在被测物体表面得到近似正弦条纹图案,载入FPGA程序代码,使LED阵列循环投影二值条纹图案并同步触发相机拍摄,获取被测物体条纹图案。实验中由相机拍摄获取的图像如图3所示。其中,图3(a)为被测物体,图3(b)~(h)为2组不同频率的7幅相移条纹图。使用计算机处理获得的条纹图像,分别应用三步相移和四步相移算法计算出包裹相位,如图4(a)、(b)所示。然后,利用多频外差法展开高频相位以获得连续的绝对相位图,如

图4(c)所示。通过多项式相位高度映射模型,结合绝对相位图可恢复出物体的三维形状。图5为当条纹图像投影与采集速度为50 frame/s时被测阶梯物体的三维测量结果。可以看到,物体表面轮廓被很好地恢复,除左上角个别LED灯珠亮度过暗和边缘阴影的遮挡,造成小部分恢复效果欠佳,大部分区域的三维重建形状具有较高质量。实验结果表明,通过使用高速LED阵列投影二值条纹图案实现高速三维形状测量是可行的。应该注意的是,三维形状由 3×3 高斯滤波器平滑以减小最显著的随机噪声。

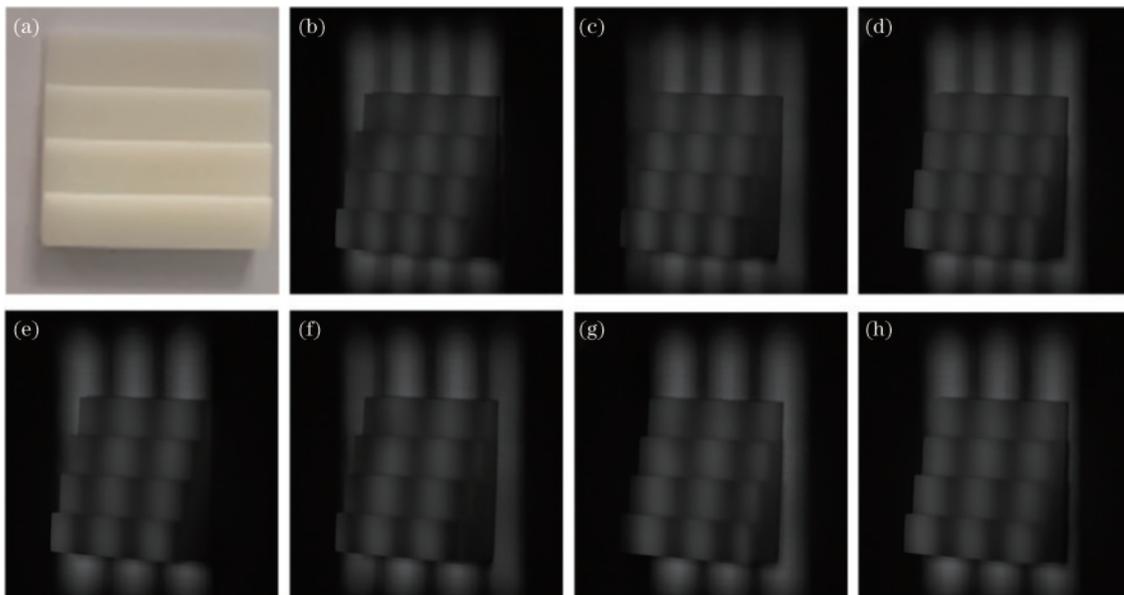


图 3 被测物体和静态相移条纹图。(a)被测阶梯物体;(b)(c)(d)三步相移条纹图案;(e)(f)(g)(h)四步相移条纹图案

Fig. 3 Measured object and static phase shift fringe patterns. (a) Measured ladder object; (b)(c)(d)three-step phase-shifting fringe pattern; (e)(f)(g)(h) four-step phase-shifting fringe pattern

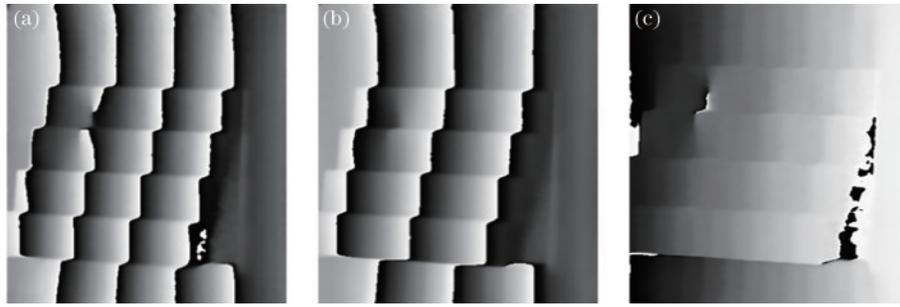


图 4 相移法与多频外差法处理图像结果。(a)(b)包裹相位;(c)绝对相位

Fig. 4 Results of image processing by phase-shift method and multi-frequency heterodyne method. (a)(b) Wrapped phase; (c) absolute phase

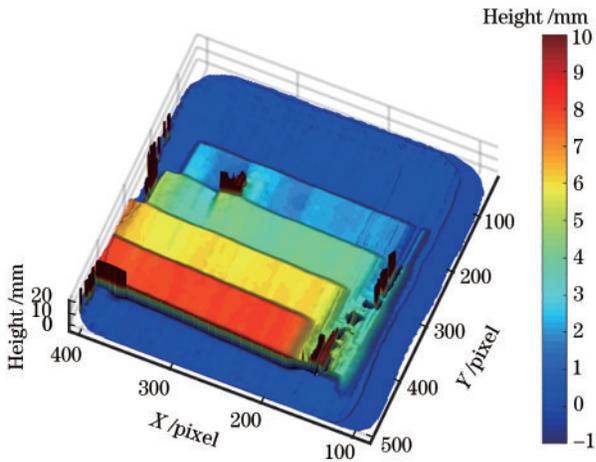


图 5 静态阶梯物体三维测量结果

Fig. 5 3D measurement result of static ladder objects

然后,对高速运动的物体进行三维测量。为了明确所提系统的高速三维测量效果,将条纹图像投影和采集速度设置为 21000 frame/s,并将被测阶梯

物体的旋转速度调整至 3000 r/min,重新对物体进行三维测量,某一时刻拍摄的三步相移与四步相移图案如图 6 所示。测量过程中某一时刻的瞬间三维形貌测量结果如图 7 所示,图中标出了各个阶梯面的均方根误差(RMSE)和平均高度差值计算结果。从图 6 可以看出,由于动态测量使用的 LED 阵列中,个别灯珠因破损造成二值条纹局部亮度不均匀,投影在被测物体上的条纹有缺陷,所以图 7 的测量结果中阶梯面完整性不足,但整体阶梯平面呈现较好的三维测量效果,并且后续可通过更换无损的 LED 阵列解决该问题。表 1 为各个阶梯面的测量高度的绝对高度误差大小。可以看出,各个阶梯面的均方根误差小于等于 0.31 mm,不同平面高度存在一定区别。通过分析可知,误差主要来源为离焦投影形成的条纹与理想正弦条纹的偏差,使得展开后的绝对相位存在误差,后续可以通过矫正相位误差和提升正弦条纹质量来进一步减小误差值。同时可以看到,所提系统的测量精度在 0.1 mm 左右。

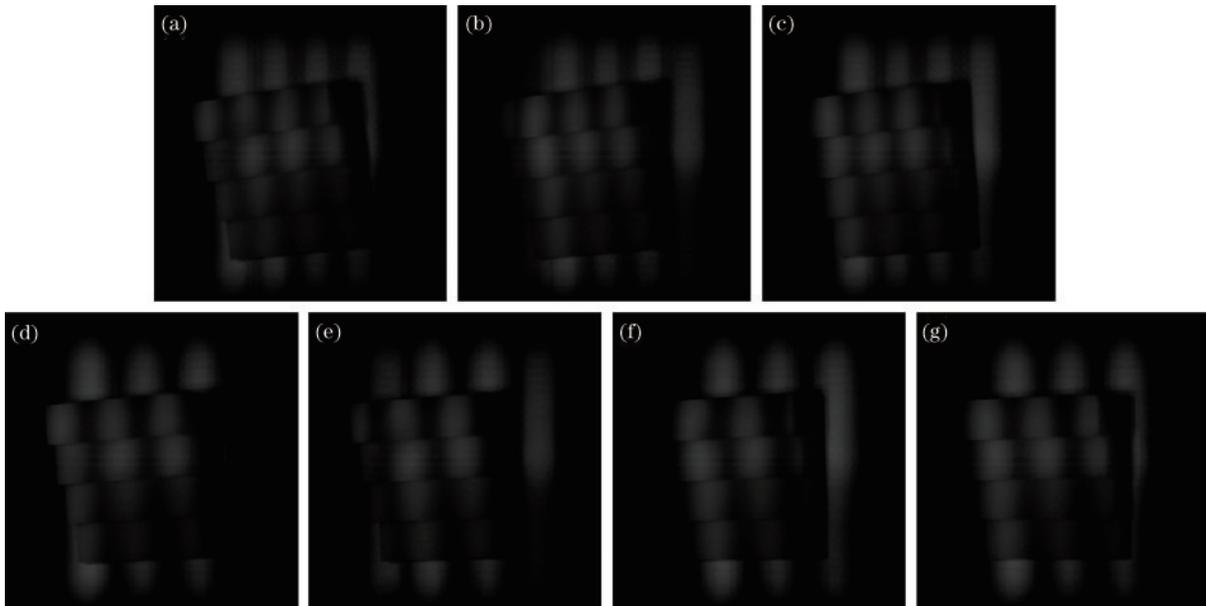


图 6 动态相移条纹图。(a)(b)(c)三步相移条纹图案;(d)(e)(f)(g)四步相移条纹图案

Fig. 6 Dynamic phase shift fringe patterns. (a) (b)(c) Three-step phase-shifting fringe patterns; (d) (e)(f)(g) four-step phase-shifting fringe patterns

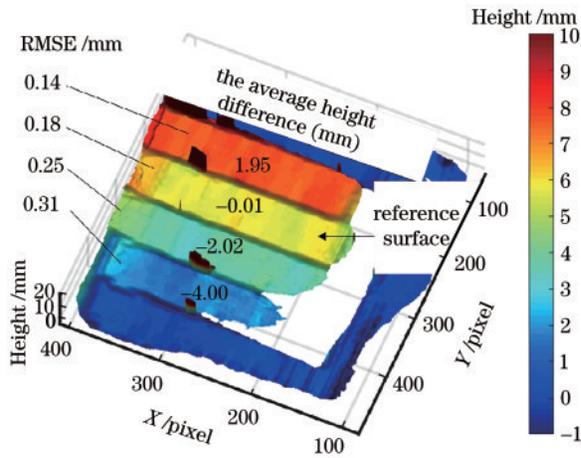


图 7 动态阶梯物体三维测量结果

Fig. 7 3D measurement result of dynamic ladder objects

表 1 动态阶梯物体各阶梯面的绝对高度误差

Table 1 Absolute height error of each step face of the dynamic step object

unit: mm

| Step surface No. | Step surface 1 | Step surface 2 | Step surface 3(benchmark) | Step surface 4 |
|-----------------------|----------------|----------------|---------------------------|----------------|
| Absolute height error | 0 | -0.02 | -0.01 | -0.05 |

4 结 论

提出一种使用高速 LED 阵列作为投影系统实现三维测量的方案,用来突破 DLP 投影仪进行结构光三维测量时投影速率限制测量速度的瓶颈。根据结构光三维测量的原理和 LED 阵列的控制特点,搭建结构光条纹三维测量系统,使用 LED 阵列投影二值条纹图案,通过镜头轻微离焦获得近似正弦条纹,结合相移法和多频外差法实现了基于 LED 阵列的高速三维测量。所提实验系统能达到 6000 Hz 的三维测量速度与 0.1 mm 的测量精度,但值得指出的是,实验中相机在 512×512 的图像分辨率下的最高采集速度只能达到 21000 frame/s,若高速相机采集帧率允许,系统的三维测量速度将进一步提高。尽管实验未达到 LED 阵列的最大投影帧率,但验证了采用高帧率 LED 阵列来实现 MHz 量级的测量速度是切实可行的。相较于现在的三维测量技术所能达到的测量速度,这是对三维测量速度的巨大提升,并且该系统使用的离焦投影方式导致能够测量的物体高度范围有限,若进一步提升系统能够测量的高度范围,未来将在需要高速三维测量的工业和科研领域上发挥重要的作用,具有非常大的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Zhang S. High-speed 3D shape measurement with structured light methods: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 106: 119-131..
- [2] Fujigaki M, Oura Y, Asai D, et al. High-speed height measurement by a light-source-stepping method using a linear LED array[J]. Optics Express, 2013, 21(20):

综上所述,所提基于高速 LED 阵列的条纹结构光三维测量系统采用相移法和基于多项式的相位高度模型标定方法,完成了对旋转速度为 3000 r/min 的阶梯物体的三维形貌测量。目前系统可以达到 0.1 mm 左右的测量精度,实现了高速运动物体的三维测量。需要指出的是,求解文中运动物体一个时刻的三维信息时,需要 7 幅投影图案,但在实际测量过程中,借鉴四川大学 Wu 等^[51]提出的基于循环投影的测量思路,每循环 3.5 张投影图案即可完成动态阶梯物体的单次三维形貌测量。因此,所搭建的基于高速 LED 阵列的结构光三维测量系统以 21000 frame/s 的相机拍摄速度和 LED 投影速度,实现了对转动速度为 3000 r/min 的动态阶梯物体的三维测量,最终可达到的三维测量速度为 6000 Hz。

23169-23180.

- [3] Tiwari V, Sutton M A, McNeill S R. Assessment of high speed imaging systems for 2D and 3D deformation measurements: methodology development and validation [J]. Experimental Mechanics, 2007, 47(4): 561-579.
- [4] Malamas E N, Petrakis E G M, Zervakis M, et al. A survey on industrial vision systems, applications and tools [J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(2): 171-188.
- [5] Chao Z, Xiaolei Z, Yan H, et al. Has 3D finally come of age? An introduction to 3D structured-light sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 0303001.
- [6] Huang P S, Zhang C P, Chiang F P. High-speed 3-D shape measurement based on digital fringe projection[J]. Optical Engineering, 2003, 42(1): 163-168.
- [7] Huang P S, Zhang S. Fast three-step phase-shifting algorithm[J]. Applied Optics, 2006, 45(21): 5086-5091.
- [8] Lei S Y, Zhang S. Flexible 3-D shape measurement using projector defocusing[J]. Optics Letters, 2009, 34(20): 3080-3082.
- [9] Zhang S, van der Weide D, Oliver J. Superfast phaseshifting method for 3-D shape measurement[J]. Optics Express, 2010, 18(9): 9684-9689.
- [10] Lei S, 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.
- [11] Ayubi G A, Ayubi J A, Di Martino J M, et al. Pulse-width modulation in defocused three-dimensional fringe projection[J]. Optics Letters, 2010, 35(21): 3682-3684.
- [12] Zuo C, Chen Q, Feng S J, et al. Optimized pulse width modulation pattern strategy for three-dimensional profilometry with projector defocusing[J]. Applied Optics, 2012, 51(19): 4477-4490.
- [13] Wang Y J, Zhang S. Superfast multifrequency phase-shifting technique with optimal pulse width modulation

- [J]. *Optics Express*, 2011, 19(6): 5149-5155.
- [14] Zuo C, Chen Q, Gu G, et al. High-speed three-dimensional shape measurement for dynamic scenes using bi-frequency tripolar pulse-width-modulation fringe projection[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(8): 953-960.
- [15] Lohry W, Zhang S. Genetic method to optimize binary dithering technique for high-quality fringe generation[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(4): 540-542.
- [16] Dai J F, Zhang S. Phase-optimized dithering technique for high-quality 3D shape measurement[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(6): 790-795.
- [17] Dai J F, Li B W, Zhang S. High-quality fringe pattern generation using binary pattern optimization through symmetry and periodicity[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 52: 195-200.
- [18] Sun J, Zuo C, Feng S, et al. Improved intensity-optimized dithering technique for 3D shape measurement [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 66: 158-164.
- [19] Dai J F, Zhang S. Intensity-optimized dithering technique for three-dimensional shape measurement with projector defocusing[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 53: 79-85.
- [20] Wang Y J, Zhang S. Three-dimensional shape measurement with binary dithered patterns[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(27): 6631-6636.
- [21] Hyun J S, Zhang S. Superfast 3D absolute shape measurement using five binary patterns[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 90: 217-224.
- [22] Wang Y J, Laughner J I, Efimov I R, et al. 3D absolute shape measurement of live rabbit hearts with a superfast two-frequency phase-shifting technique[J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 5822-5832.
- [23] Gong Y Z, Zhang S. Ultrafast 3-D shape measurement with an off-the-shelf DLP projector[J]. *Optics Express*, 2010, 18(19): 19743-19754.
- [24] Zuo C, Tao T, Feng S, 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.
- [25] Sun M J, Huang J Y, Penuelas J. Suppressing the noise in binarized Fourier single-pixel imaging utilizing defocus blur[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 108: 15-18.
- [26] Cong P Y, Xiong Z W, Zhang Y Y, et al. Accurate dynamic 3D sensing with Fourier-assisted phase shifting [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2015, 9(3): 396-408.
- [27] Lu L, Xi J T, Yu Y G, et al. Improving the accuracy performance of phase-shifting profilometry for the measurement of objects in motion[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(23): 6715-6718.
- [28] Feng S, Zuo C, Tao T, et al. Robust dynamic 3-D measurements with motion-compensated phase-shifting profilometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 103: 127-138.
- [29] Qian J M, Tao T Y, Feng S J, et al. Motion-artifact-free dynamic 3D shape measurement with hybrid Fourier-transform phase-shifting profilometry[J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 2713-2731.
- [30] Li B W, Zhang S. Superfast high-resolution absolute 3D recovery of a stabilized flapping flight process[J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 27270-27282.
- [31] Feng S J, Chen Q, Gu G H, et al. Fringe pattern analysis using deep learning[J]. *Advanced Photonics*, 2019, 1(2): 025001.
- [32] Feng S J, Zuo C, Yin W, et al. Micro deep learning profilometry for high-speed 3D surface imaging[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 121: 416-427.
- [33] Surrel Y. Design of algorithms for phase measurements by the use of phase stepping[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(1): 51-60.
- [34] Ghiglia D C, Pritt M D. Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 1998.
- [35] Herráez M A, Burton D R, Lalor M J, et al. Fast two-dimensional phase-unwrapping algorithm based on sorting by reliability following a noncontinuous path[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(35): 7437-7444.
- [36] Goldstein R M, Zebker H A, Werner C L. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping [J]. *Radio Science*, 1988, 23(4): 713-720.
- [37] Su X Y, Chen W J. Reliability-guided phase unwrapping algorithm: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, 42(3): 245-261.
- [38] Zhao M, Huang L, Zhang Q C, et al. Quality-guided phase unwrapping technique: comparison of quality maps and guiding strategies[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(33): 6214-6224.
- [39] Huntley J M, Saldner H. Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(17): 3047-3052.
- [40] Zuo C, Huang L, Zhang M, et al. Temporal phase unwrapping algorithms for fringe projection profilometry: a comparative review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 85: 84-103.
- [41] Weise T, Leibe B, van Gool L. Fast 3D scanning with automatic motion compensation[C]//2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 17-22, 2007, Minneapolis, MN, USA. New York: IEEE Press, 2007.
- [42] Li Z W, Zhong K, Li Y F, et al. Multiview phase shifting: a full-resolution and high-speed 3D measurement framework for arbitrary shape dynamic objects[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(9): 1389-1391.
- [43] Young M, Beeson E, Davis J, et al. Viewpoint-coded structured light[C]//2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 17-22, 2007, Minneapolis, MN, USA. New York: IEEE Press, 2007.
- [44] Bräuer-Burchardt C, Munkelt C, Heinze M, et al. Using geometric constraints to solve the point correspondence problem in fringe projection based 3D measuring systems [M]//Maino G, Foresti G L. Image analysis and processing-ICIAP 2011. Heidelberg: Springer, 2011,

- 6979: 265-274.
- [45] Guan Y J, Yin Y K, Li A M, et al. Dynamic 3D imaging based on acousto-optic heterodyne fringe interferometry [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(12): 3678-3681.
- [46] Lohry W, Chen V, Zhang S. Absolute three-dimensional shape measurement using coded fringe patterns without phase unwrapping or projector calibration[J]. *Optics Express*, 2014, 22(2): 1287-1301.
- [47] Zhong K, Li Z, Shi Y, et al. Fast phase measurement profilometry for arbitrary shape objects without phase unwrapping[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(11): 1213-1222.
- [48] Gai S Y, Da F P, Dai X Q. Novel 3D measurement system based on speckle and fringe pattern projection[J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 17686-17697.
- [49] 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.
- [50] Feng S J, Zuo C, Zhang L, et al. Calibration of fringe projection profilometry: a comparative review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 143: 106622.
- [51] Wu Z J, Guo W B, Li Y Y, et al. High-speed and high-efficiency three-dimensional shape measurement based on Gray-coded light[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(6): 819-829.