

# 基于三通道二值条纹离焦投影的快速三维测量

张鑫<sup>1,2</sup>, 盖绍彦<sup>1,2\*</sup>, 达飞鹏<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>东南大学自动化学院, 江苏 南京 210096;

<sup>2</sup>东南大学复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室, 江苏 南京 210096

**摘要** 提出了一种基于三通道二值条纹离焦投影的三维测量方法。将相移条纹编码到三个彩色通道中,在投影仪处,用三通道分离的二值数字图像作为输入,在单个相机帧时间内顺序投影三通道的离焦条纹,用彩色相机获得三通道融合的彩色条纹图像。对彩色三通道条纹进行解耦,用黑白相机标定测量系统中彩色通道的混叠效应。用三通道解耦的条纹信息进行相位计算和三维重建,结果表明,相比传统彩色投影测量,本方法的速度和重建精度有明显提升,且适用于测量彩色物体和动态物体。

**关键词** 测量与计量; 三维形貌测量; 彩色条纹投影; 离焦条纹投影; 动态测量

**中图分类号** O439 **文献标志码** A

**doi:** 10.3788/LOP57.231201

## Fast Three-Dimensional Measurement Based on Three Channel Binary Fringe Defocused Projection

Zhang Xin<sup>1,2</sup>, Gai Shaoyan<sup>1,2\*</sup>, Da Feipeng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Automation, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Measurement and Control of CSE, Ministry of Education, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China

**Abstract** A three-dimensional measurement method based on three channel binary fringe defocused projection is proposed in this work. The phase-shifting fringes are encoded into three color channels. At the projector, the binary digital images separated from three channels are used as input. The defocusing fringes of three channels are projected sequentially in a single camera frame time, and the fusion color fringe images of three channels are obtained by color camera. The color three channel fringes are decoupled and the aliasing effect of color channels in the measurement system is calibrated with a black and white camera. Phase calculation and three-dimensional reconstruction are performed based on decoupled fringe information. The results suggest that compared with the traditional color projection measurement, the speed and rebuilding accuracy of the proposed method are greatly improved, and the proposed method is suitable for measuring color objects and dynamic objects.

**Key words** measurement and metrology; three-dimensional shape measurement; color fringe projection; defocused fringe projection; dynamic measurement

**OCIS codes** 120.2650; 120.2830; 120.5050

## 1 引言

由于相机、投影仪技术的快速发展以及计算机并行处理能力的提高,高速度的结构光投影三维测量技术得到了广泛的关注。三维结构光投影具有高速、高分辨率、无破坏、非接触等优点,在工业检

测、机器视觉、生物医学、虚拟现实等多种领域有广泛应用<sup>[1-2]</sup>。为了将结构光测量技术应用于连续测量和动态测量的场景中,人们提出了多种减少光栅数和提高投影速度的方法。傅里叶变换轮廓术(FTP)<sup>[3]</sup>可在单张光栅图像中进行相位解码,获取三维信息,但局部误差的扩散导致测量精度较低。

收稿日期: 2020-03-11; 修回日期: 2020-03-24; 录用日期: 2020-03-30

基金项目: 国家自然科学基金(51475092,61462072)、江苏省自然科学基金(BK20181269)

\* E-mail: qxxymm@163.com

相移测量轮廓术(PSP)<sup>[4-7]</sup>将一系列光栅进行投影,通过解算的相位信息进行重建,精度较高。由于PSP需要投影多张数字条纹图像,对测量系统的速度要求较高。测量速度较低时,相邻相机帧之间的设备震动、物体移动都会增大测量误差<sup>[8]</sup>。为了提高测量速度,人们使用彩色多通道编码<sup>[9-14]</sup>将多张编码条纹融合为一张彩色图像进行投影,再对拍摄的条纹图像进行分解,还原出每个通道的图像。但彩色多通道编码方法的分解还原存在彩色通道串扰、颜色饱和度高和反射率高等难点,如果不引入辅助信息,难以进行应用。传统彩色投影使用256位彩色投影,一方面引入了投影仪的Gamma畸变<sup>[15]</sup>,另一方面,投影速率较低,钳制了系统的测量速度。

针对上述问题,本文提出了一种基于离焦二值RGB(Red, Green, Blue)三通道顺序投影的结构光测量方法。由于数字光处理(DLP)投影仪投影二值图像的速度远远高于投影256位图像的速度,相比用计算机求解三通道融合的图像后再进行投影,将三通道的二值条纹图像离焦后进行顺序投影可以提升条纹投影的速度<sup>[16]</sup>。首先在单个相机帧时间内顺序投影三通道的条纹,然后对曝光得到的彩色图像进行串扰分解。用一台与彩色相机具有相同感光芯片的黑白相机标定三通道的串扰矩阵,无需对标定物的反射率做出假设。实验结果表明,相比传统的彩色条纹投影方法,本方法不仅提高了投影速度,

且在不同色彩条件的场景中均能实现准确测量。

## 2 实验原理

### 2.1 二值彩色编码离焦投影

结构光测量系统包含DLP投影仪、彩色相机和计算机。首先,将计算机编码得到的数字条纹输入投影仪进行条纹投射,由相机采集被物体调制过的光栅图案,再输入计算机;然后,通过数字图像处理技术求解数字图像中编码的相位信息,通过三角法原理理解物体的三维形貌信息。

DLP技术对投影速度和精度的提升使离焦投影技术广泛应用于PSP中<sup>[16]</sup>。DLP的核心元件数字微反射镜是一种二元开关式器件,投影二值图像时,DLP的投影速度可达到 $10^4$  frame/s,使用超过两位色彩的数字图像投影时,投影速度会减小。Lei等<sup>[17]</sup>提出了二值离焦投影方法,利用DLP高速二值投影的特性,将具有周期性的二值条纹进行离焦投影,得到正弦光栅场,并通过相移算法得到图像中的编码相位信息。由于二值投影的投影速度超过了一般工业相机的抓取速度,用投影仪信号触发相机拍摄时,可将相机帧率设为最大值。将投影、抓取一张条纹图像的单位时间帧作为一个测量帧,在相同条纹图像组数下,系统的测量速度由测量帧率决定,二值条纹投影的测量帧率和相机帧率一致。

将二值离焦投影的条纹映射到RGB通道中,条纹投影方式如图1所示。传统彩色条纹投影在计算

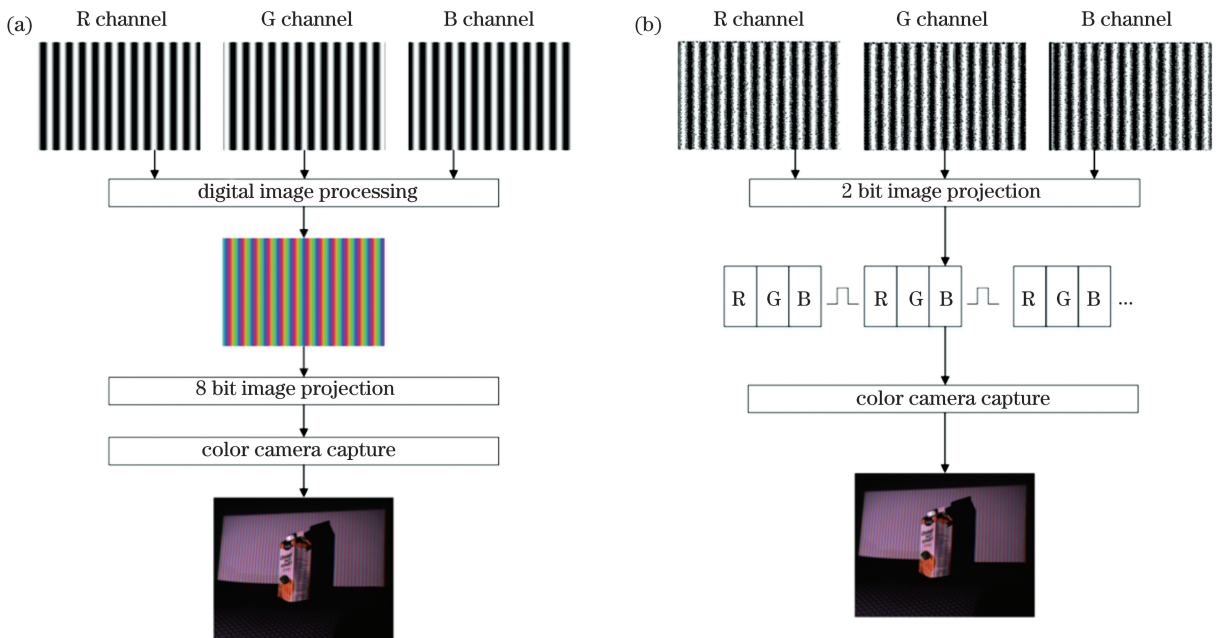


图1 彩色条纹投影的流程图。(a)传统彩色条纹投影;(b)彩色离焦二值投影

Fig. 1 Flow chart of color fringe projection. (a) Traditional color fringe projection; (b) color defocusing binary projection

机中将 RGB 三通道条纹进行融合,得到大小为 8 bit 的数字图像,并输入 DLP 投影仪中进行投影。本方法中投影仪在一个测量帧内输入 3 张单色二值数字图像,3 张图像平分曝光时间,离焦后采用顺序投影方式,触发相机连续曝光后得到一张彩色图像。使用三通道二值投影,可以提高 DLP 的投影速度,同时增加一个测量帧内的条纹信息,在不改变测量设备性能的前提下,达到减少测量帧数、提高测量速度的目的。此外,三通道二值投影方式可以避免投影仪的 Gamma 非线性误差,得到的正弦条纹中不会掺杂高次谐波,相比传统彩色条纹投影方式,三维重建精度更高。

基于离焦二值 RGB 三通道顺序投影的结构光测量方法整体流程:1)将三通道二值条纹输入投影仪,在每个测量帧内顺序投影三通道图像,调整投影仪的焦距使投射出的三通道条纹具有良好的正弦性;2)相机采集被物体形貌调制过的条纹图像,并通过标定的彩色混叠和反射率信息,分解出三通道的正弦条纹;3)使用三步三频外差法解算出编码相位,通过三角法重建三维点云模型。

## 2.2 投影编码

在三个彩色通道中用二值条纹进行编码,并使用离焦投影技术产生正弦条纹。传统的彩色条纹投影技术采用三步相移法,得到的投影图像是一张混合三通道的 256 位图像,使用相位变化量为  $120^\circ$  的三步正弦条纹,其条纹强度可表示为

$$I_1(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos[\varphi(x, y)], \quad (1)$$

$$I_2(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos[\varphi(x, y) + 2\pi/3], \quad (2)$$

$$I_3(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos[\varphi(x, y) + 4\pi/3], \quad (3)$$

式中, $a(x, y)$ 和 $b(x, y)$ 分别为像素 $(x, y)$ 处的平均强度和调制幅度, $I_1(x, y)$ 、 $I_2(x, y)$ 、 $I_3(x, y)$ 分别为编码到 R、G、B 三个通道的像素强度, $\varphi(x, y)$ 为包裹相位值,可表示为

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

Lei 等<sup>[17]</sup>的研究表明,适当的使投影仪产生离焦,可用生成的二值图案投影出正弦条纹。为了使同一离焦程度下生成的条纹保持正弦性,不同二值条纹的宽度差距不应过大。因此,用三频外差法<sup>[18]</sup>

对条纹进行相位解包裹,在三通道中分别投影宽度为 18, 23, 28 pixel 的条纹,并用 Sierra Lite 方法进行抖动调制<sup>[19]</sup>,以提高离焦投影的正弦性,得到的条纹如图 2 所示。

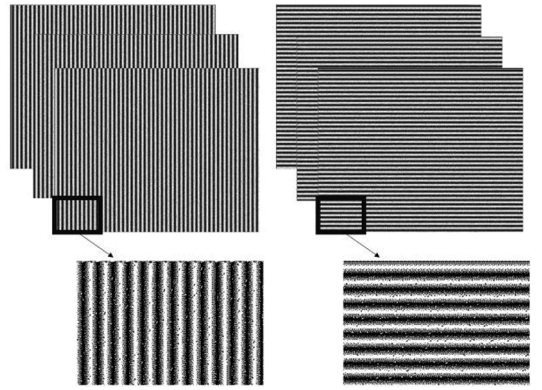


图 2 抖动调制的二值条纹图像

Fig. 2 Binary fringe image obtained by dither modulation

## 2.3 彩色串扰消除

彩色 CCD 相机为避免产生颜色上的盲区,三通道存在光谱重叠区域,导致采集的图像三通道之间存在串扰<sup>[20]</sup>。Caspi 等<sup>[21]</sup>提出了一种包含彩色串扰关系的颜色模型,在不考虑背景光照的情况下,相机采集的图像像素值和投影图像像素值的关系可表示为

$$\begin{bmatrix} I_{cR} \\ I_{cG} \\ I_{cB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{RR} & m_{GR} & m_{BR} \\ m_{RG} & m_{GG} & m_{BG} \\ m_{RB} & m_{GB} & m_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_R & 0 & 0 \\ 0 & k_G & 0 \\ 0 & 0 & k_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{pR} \\ I_{pG} \\ I_{pB} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{M}\mathbf{K}\mathbf{P}, \quad (6)$$

式中, $\mathbf{C}$ 为相机采集图像的像素值矩阵, $\mathbf{M}$ 为 $3 \times 3$ 的三通道串扰矩阵, $\mathbf{I}_c$ 为相机单通道图像像素的强度矩阵, $m$ 为对应两通道间的串扰系数, $k$ 为物体表面的单通道反射率, $\mathbf{I}_p$ 为投影仪投影像素的强度矩阵, $\mathbf{K}$ 为拍摄物体表面的反射率矩阵, $\mathbf{P}$ 为投影仪的投影强度矩阵。由于 DLP 投影仪进行二值投影时不存在 Gamma 效应,投影强度 $\mathbf{P}$ 与投影仪二值条纹对应的正弦条纹像素强度 $\mathbf{p}$ 的关系为一个线性函数,可表示为

$$\mathbf{P} = \mathbf{F}(\mathbf{p}) = a \times \mathbf{p}, \quad (7)$$

式中, $\mathbf{F}$ 为投影仪的输入输出响应关系, $\mathbf{P}$ 可用于相移法的相位计算, $a$ 为比例系数,不影响相位计算。

为求解投影强度矩阵 $\mathbf{P}$ ,需计算串扰矩阵 $\mathbf{M}$ 和反射率矩阵 $\mathbf{K}$ 。反射率矩阵由实际投影测量的物体表面反射率决定,可在实际测量中解算。串扰矩阵 $\mathbf{M}$ 只与测量系统有关,与所拍摄的物体无关,可提

前标定。传统标定方法通常在白色平板上分别投影三通道纯色光进行标定<sup>[22-23]</sup>,该方法假设白色平板各位置的三通道反射率均为1,投影纯色光时,投影强度矩阵  $\mathbf{P}$  分别为  $[255, 0, 0]^T, [0, 255, 0]^T, [0, 0, 255]^T$ ,根据(8)式可反解出

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} I_{cRR} & I_{cRG} & I_{cRB} \\ I_{cGR} & I_{cGG} & I_{cGB} \\ I_{cBR} & I_{cBG} & I_{cBB} \end{bmatrix} / 255, \quad (8)$$

式中,  $I_{cA}$  为投影 B 通道纯色图像时,相机 A (R、B、G) 通道中采集的图像。实际标定过程中,白色平板标定物表面的反射率不均匀,且不能保证反射率为1,串扰矩阵  $\mathbf{M}$  的标定误差较大,从而在实际测量中传递到反射率矩阵、投影强度矩阵  $\mathbf{P}$  中,影响重建精度。因此,提出了一种无需标定物体反射率的标定方法。用三光源 DLP 投影仪对三通道进行顺序投影,每次投射时,只有一个纯色光源被点亮。彩色串扰主要来源于相机感光芯片的光谱响应,在使用环境、镜头等条件一致的情况下,如果两个相机感光芯片的光谱响应相同,则相机产生的混叠效应也几乎一致。用与彩色相机感光芯片相同的黑白相机,且拍摄时使用相同的镜头。为保证两相机视场重合,先在固定位姿支架上安装黑白相机,投影三张纯色图像并采集。在黑白相机视场对应位置的四角粘贴标志点;将黑白相机拆下,安装彩色相机,通过标志点保证位姿一致后,取下标志点,投影三张纯色图像并采集。黑白相机采集的图像像素值矩阵为

$$\mathbf{C}_{\text{mono}} = \mathbf{K}\mathbf{P}. \quad (9)$$

$\mathbf{C}_{\text{mono}}$  包含了投影仪调制和标定物反射的影响,因此无需对标定物的反射率进行假设。将(11)式代入(8)式,得到

$$\mathbf{C} = \mathbf{M}\mathbf{C}_{\text{mono}}. \quad (10)$$

对白色平板投影三通道纯色光,用彩色相机分别抓取三张图像。用一架与彩色相机感光芯片相同的黑白相机,确保相机位姿、镜头等条件一致,分别抓取三张图像,得到

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} I_{cRR} & I_{cRG} & I_{cRB} \\ I_{cGR} & I_{cGG} & I_{cGB} \\ I_{cBR} & I_{cBG} & I_{cBB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{mR} & 0 & 0 \\ 0 & I_{mG} & 0 \\ 0 & 0 & I_{mB} \end{bmatrix}^{-1}, \quad (11)$$

式中,  $I_{mR}, I_{mG}, I_{mB}$  为黑白相机拍摄得到的三通道像素值。两个相机拍摄时视场内的像素点一一对应,可建立超定方程,解出串扰矩阵  $\mathbf{M}$ 。

由于拍摄物体表面的反射率分布不均匀,反射率矩阵  $\mathbf{K}$  在每个像素点上的值不同。在每帧拍摄中加入一张纯白色投影,得到相机视场内所有像素点的投影强度矩阵  $\mathbf{P}$  为  $[255, 0, 0]^T, [0, 255, 0]^T, [0, 0, 255]^T$ ,逐像素得到当前测量帧内的反射率矩阵

$$\mathbf{K} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}/255. \quad (12)$$

将  $\mathbf{M}$  和  $\mathbf{K}$  代入(8)式,从相机拍摄的彩色图像中恢复出所需的条纹信息,可表示为

$$\mathbf{P} = (\mathbf{M}\mathbf{K})^{-1}\mathbf{C}. \quad (13)$$

完整的投影序列流程如图3所示,其中,  $i$  为相机拍摄的帧序号,  $\psi$  为某一通道的相位偏移量,  $p_i$  为第  $i$  帧图像中正弦相移图像的像素宽度。三步相移三频法的条纹在三个投影帧内完成,三频法得到的条纹宽度  $p_i$  分别为 18, 23, 28 pixel,三通道顺序投影相移条纹,每个宽度的条纹投影时间为 2 ms。最后追加一帧纯白色投影,得到单个测量帧的时间为 8 ms。

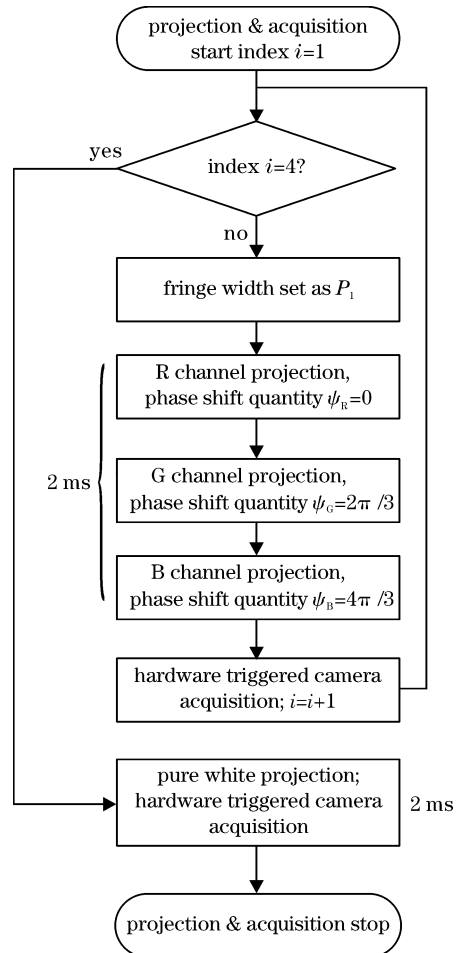


图3 单个测量帧的完整流程

Fig. 3 Complete flow of a single measurement frame

### 3 实验与分析

实验使用的测量系统由 DLP4500 (分辨率为 1140 pixel×912 pixel) 和 BasleracA800-510uc 彩色相机(分辨率为 800 pixel×600 pixel) 组成, 如图 4 所示。DLP4500 提供三通道 LED 光源, RGB 光源可独立或同步运行, 二值投影帧率为 4 kHz; BasleracA800-510uc 相机的最大拍摄帧率为 500 Hz。使用彩色离焦条纹投影方法时, 测量速率可匹配相机的最大帧率, 在 2 ms 内完成对三张条纹图像的抓取, 重建三维模型时用 NVIDIA 1060 GPU 做并行加速计算。在硬件速率和条纹编码相同时, 彩色投影方法、二值投影方法及本方法的每秒重建帧数如表 1 所示, 可以发现, 本方法的重建速度有明显提高。

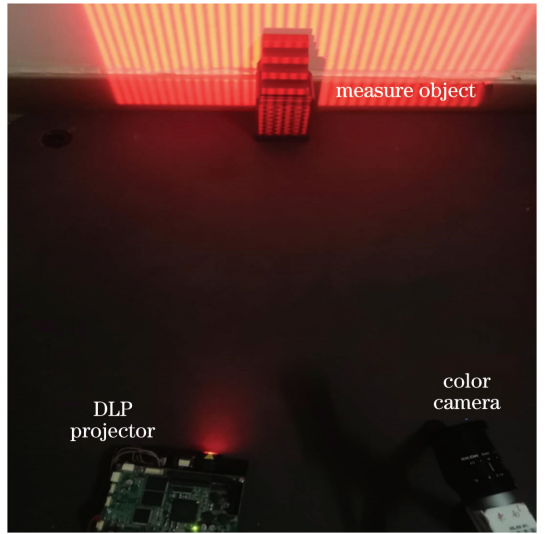


图 4 实验系统的装置图

Fig. 4 Installation diagram of the experimental system

表 1 不同方法的每秒重建帧数

Table 1 Number of reconstructed frames per second for different methods

unit: frame

Method	Color projection	Binary defocused projection	Our method
Reconstructed frames per second	13.3	55.6	125.0

用黑白相机 Basler acA800-510um 辅助标定串扰矩阵, 黑白相机和彩色相机使用的镜头型号均为海康 MF1614M-5MP, 且两相机具有相同的光谱响应, 如图 5 所示。

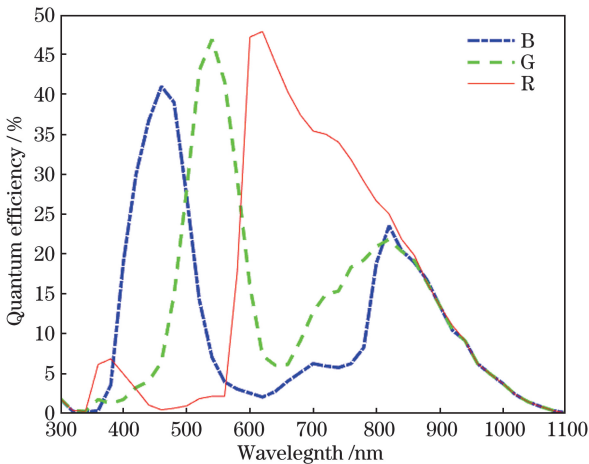


图 5 相机传感器的光谱响应曲线

Fig. 5 Spectral response graph of the camera sensor

在白色平板上, 分别投影三通道纯色图像。在彩色相机和黑白相机上安装相同的镜头, 在固定姿态下, 分别对三通道图像进行拍摄, 逐像素建立方程关系, 得到

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0.9577 & 0.1230 & 0.0056 \\ 0.0729 & 0.4999 & 0.0486 \\ 0.0255 & 0.1806 & 0.7926 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

分别对白色平板和一彩色待测物体进行彩色分解, 结果如图 6 所示。可以发现, 在合理曝光范围内, 解得的串扰信息均能较好地还原出三通道的条纹图像, 且经过调制的二值条纹离焦后有良好的正弦性。

取白色平板图像中 R 通道的第 500 列, 对比 8 bit 彩色投影、8 bit 彩色投影并使用黑白相机解耦、2 bit 彩色投影、2 bit 彩色投影并使用黑白相机解耦四种方法分解出正弦条纹, 结果如图 7 所示。可以发现, 由于 8 bit 彩色投影正弦条纹投影仪存在 Gamma 效应, 投影仪设定值与响应存在非线性关系, 对应条纹的正弦性不如二值条纹。相比传统彩色串扰标定方式, 使用黑白相机辅助三通道解耦方法分解出的条纹图像正弦性更好, 且平滑、准确, 毛刺较少。

对标准阶梯工件进行测量, 每级阶梯的标准高度为 15 mm。图 8 为用三通道二值投影方法得到的重建结果, 图 9 为三维数据中第 34 行与标准高度的对比。8 bit 彩色投影、8 bit 彩色投影并使用黑白相机解耦、2 bit 彩色投影、2 bit 彩色投影并使用黑白相机解耦四种方法解得的阶梯高度平均误差、标准差如表 2 所示。可以发现, 三通道二值投影避免了非线性 Gamma 效应对测量结果的影响, 使用辅助相机的标定方法可提高求解串扰矩阵和三维点云重建的精度。

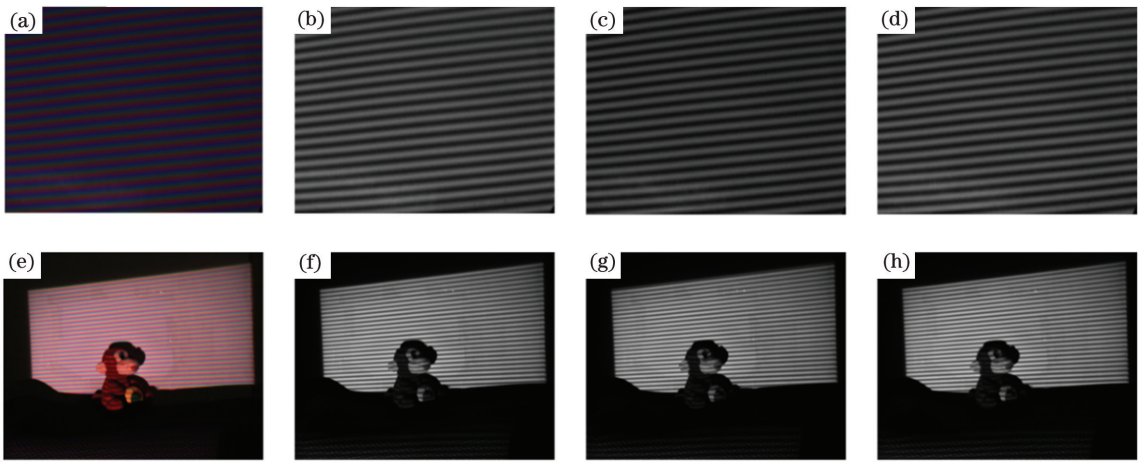


图 6 三通道的分解图像。(a) 白色平板上的彩色条纹图像；(b)~(d) 白色平板上 RGB 通道的条纹图像；  
(e) 玩偶上的彩色条纹图像；(f)~(h) 玩偶的 RGB 通道条纹图像

Fig. 6 Decomposed image of three channels. (a) Color stripe image on white plate; (b)~(d) stripe image of RGB channel on white plate; (e) color stripe image on doll; (f)~(h) RGB channel stripe image of doll

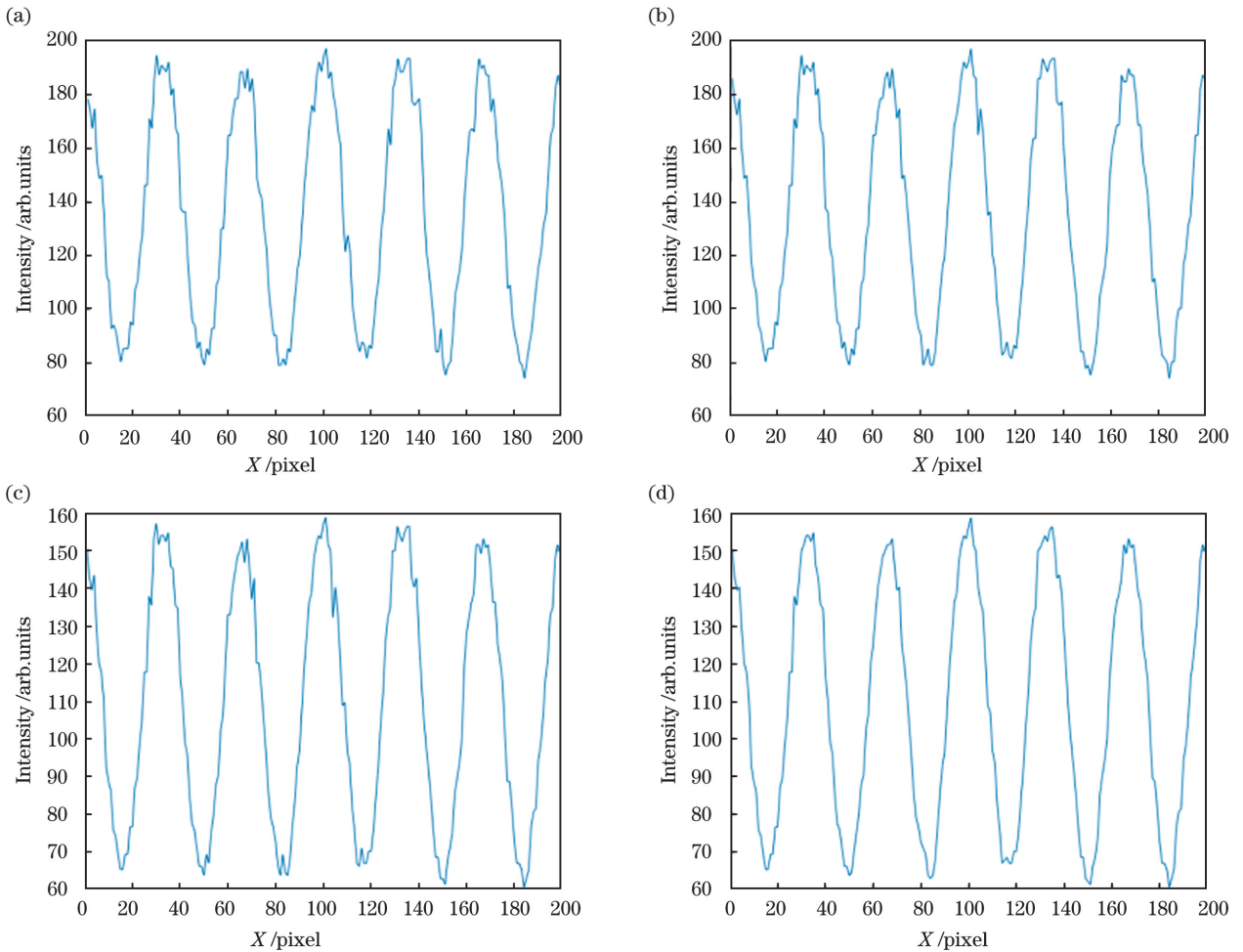


图 7 不同方法得到的条纹正弦性。(a) 8 bit 投影；(b) 用黑白相机辅助解耦的 8 bit 投影；(c) 2 bit 投影；  
(d) 用黑白相机辅助解耦的 2 bit 投影

Fig. 7 Sine of fringes obtained by different methods. (a) 8 bit projection; (b) 8 bit projection with black-and-white camera auxiliary decoupling; (c) 2 bit projection; (d) 2 bit projection with black-and-white camera auxiliary decoupling

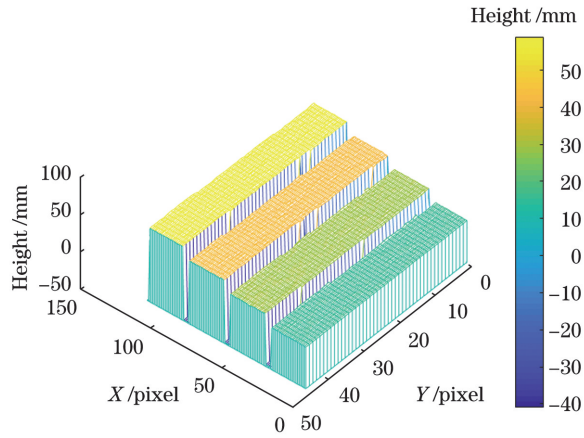


图 8 本方法的测量结果

Fig. 8 Measurement results of our method

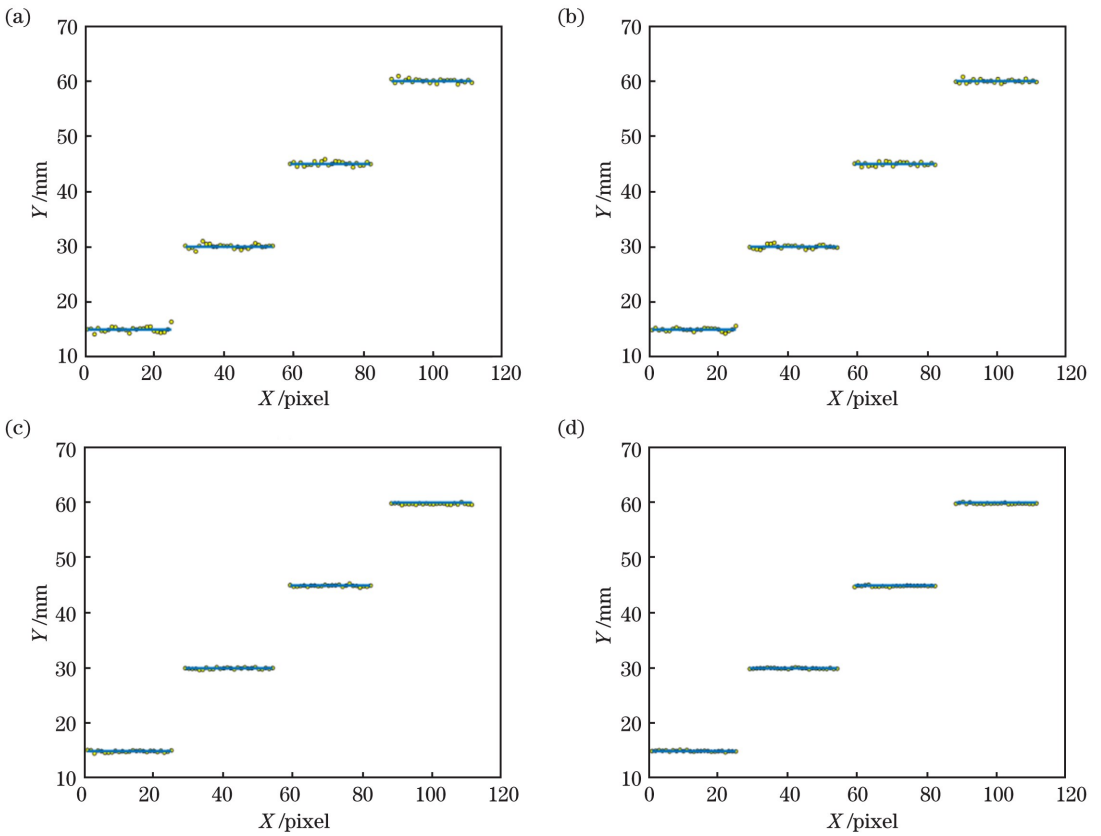


图 9 三维数据第 34 行的高度与标准值。(a) 8 bit 投影;(b) 用黑白相机辅助解耦的 8 bit 投影;

(c) 2 bit 投影;(d) 用黑白相机辅助解耦的 2 bit 投影

Fig. 9 Height and standard value of the 34th row of the 3D data. (a) 8 bit projection; (b) 8 bit projection with black-and-white camera auxiliary decoupling; (c) 2 bit projection; (d) 2 bit projection with black-and-white camera auxiliary decoupling

表 2 重建误差的平均值和标准差

Table 2 Mean and standard deviation of reconstruction error

unit: mm

Method	8 bit projection	8 bit projection (with our decoupling scheme)	2 bit projection	2 bit projection (with our decoupling scheme)
Mean error	0.2981	0.2574	0.1170	0.0825
Standard error	0.3554	0.3213	0.1423	0.1013

本方法对彩色物体的相位求解和重建结果如图10所示,可以发现,本方法可以很好地恢复彩色通道中的相位信息,且重建物体的纹理丰富、表面光滑,满足测量要求,这表明本方法可应用于测量彩色物体。



图10 彩色物体的形貌重建。(a)包裹相位;(b)全局相位;(c)重建结果

Fig. 10 Topography reconstruction of colored objects. (a) Wrapped phase; (b) global phase; (c) reconstruction result

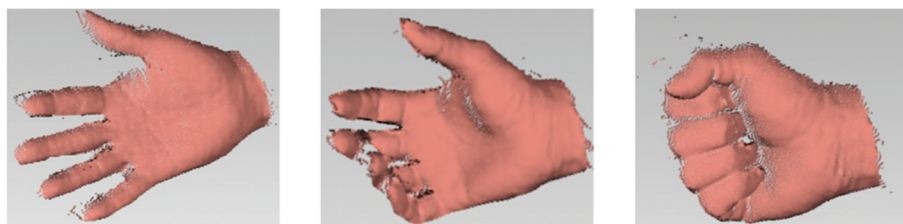


图11 本方法的动态物体重建结果

Fig. 11 Dynamic object reconstruction result of our method

## 4 结 论

提出了一种将二值相移条纹映射到彩色三通道的离焦投影三维测量方法。实验结果表明,相比彩色条纹投影和离焦二值投影方法,本方法的测量速度有明显提升。使用抖动调制的三步相移三频外差法得到条纹图像,在固定投影仪离焦程度下,所有投影条纹均具有较好的正弦性。对于彩色串扰的分解,使用与彩色相机具有相同感光芯片的黑白相机辅助标定,可从彩色通道中很好地还原条纹信息,相比传统彩色条纹投影,提高了相位质量和重建精度。在测量动态物体时,本方法的测量帧率和重建精度较高,但相机曝光时间较短,下一步还需解决物体表面存在阴影时对调制度的影响。

### 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Gorthi S S, Rastogi P. Fringe projection techniques: whither we are?[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(2): 133-140.
- [3] Yun H, Li B W, Zhang S. Pixel-by-pixel absolute three-dimensional shape measurement with modified Fourier transform profilometry[J]. Applied Optics, 2017, 56(5): 1472-1480.
- [4] Guo Y F, Da F P, Yu Y. High-quality defocusing phase-shifting profilometry on dynamic objects[J]. Optical Engineering, 2018, 57(10): 105105.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Liu C, Gai S Y, Da F P. Sub-regional phase error compensation for structural light measurement[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0604002. 刘超, 盖绍彦, 达飞鹏. 结构光测量中分区域相位误差补偿方法研究[J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0604002.
- [8] Feng S J, Zuo C, Tao T Y, et al. Robust dynamic



- 3-D measurements with motion-compensated phase-shifting profilometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 103: 127-138.
- [9] 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.
- [10] Bai X F, Zhang Z H. 3D shape measurement based on color fringe projection techniques [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(8): 1912-1925.  
白雪飞, 张宗华. 基于彩色条纹投影术的三维形貌测量[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(8): 1912-1925.
- [11] Wang L Y, Da F P. Three-dimensional shape measurement technique based on complementary color-encoded fringe projection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(6): 0612004.  
王露阳, 达飞鹏. 基于互补色编码条纹投影的三维形貌测量方法[J]. *光学学报*, 2011, 31(6): 0612004.
- [12] Wu J C, Cao L C, Chen H L, et al. Research progress of texture reconstruction in color three-dimensional scanning [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(11): 110004.  
吴佳琛, 曹良才, 陈海龙, 等. 彩色三维扫描中纹理重建技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(11): 110004.
- [13] Liu J B, Guo P Y, Wu Y, et al. Detection method for color structured light stripe based on hierarchical clustering [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(22): 221201.  
刘进博, 郭鹏宇, 伍越, 等. 基于分层聚类的彩色结构光光条检测方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(22): 221201.
- [14] Yu J, Chen C, Gao N, et al. Camera calibration based on phase target [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(11): 111203.  
于瑾, 陈超, 高楠, 等. 基于相位标靶的相机标定[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(11): 111203.
- [15] Cai W J, Cao Y P, Fu G K, et al. A full-field compensation method for nonlinear phase error [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0312001.  
蔡文娟, 曹益平, 付光凯, 等. 一种非线性相位误差的全场补偿方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0312001.
- [16] 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.
- [17] Lei S, Zhang S. Flexible 3-D shape measurement using projector defocusing [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(20): 3080-3082.
- [18] Mao C L, Lu R S. Inverse error compensation method for improvement of phase recovery accuracy of multi-frequency fringe projection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0412005.  
毛翠丽, 卢荣胜. 提高多频条纹投影相位提取精度的反向误差补偿法[J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 0412005.
- [19] Lü J Z, Da F P, Zheng D L. Projector defocusing profilometry based on Sierra Lite dithering algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0312004.  
吕江昭, 达飞鹏, 郑东亮. 基于 Sierra Lite 抖动算法的离焦投影光栅测量[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0312004.
- [20] Zhang Z H, Lian X J, Gao N. Crosstalk elimination method for color composite fringe projection measuring systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0815005.  
张宗华, 连晓洁, 高楠. 彩色复合条纹投影测量系统串扰消除方法[J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0815005.
- [21] Caspi D, Kiryati N, Shamir J. Range imaging with adaptive color structured light [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1998, 20(5): 470-480.
- [22] Pan J H, Huang P S, Chiang F P. Color phase-shifting technique for three-dimensional shape measurement [J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(1): 013602.
- [23] Li H, Yang F, Yang H M, et al. Separation and clustering of structured light stripe color [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(5): 1206-1214.  
李华, 杨帆, 杨华民, 等. 条纹颜色分离与聚类[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(5): 1206-1214.