

# 基于并行四颜色通道条纹投影的三维测量术

王张颖<sup>\*\*</sup>, 高楠, 张宗华<sup>\*</sup>

河北工业大学机械工程学院, 天津 300130

**摘要** 提出一种基于红、绿、蓝和红外并行 4 颜色通道的条纹投影三维测量技术, 实现单次测量获得物体的表面三维形貌。该技术克服了传统方法投影多帧条纹图像而造成测量速度慢的缺点, 在保证精度的同时提高了测量速度。结合两步相移、傅里叶变换法和最佳三条纹选择法的相位求解方法, 独立计算各个像素点的绝对相位, 从单次同时采集的复合彩色图像和红外图像中获得非连续物体等复杂面形的三维形貌数据。利用半透半反镜实现了可见光和红外两个投影仪的光轴同路, 并建立它们之间的投影变换, 实现了两个投影仪像素间的精确对应。利用所研制的系统, 测量了非连续的静态物体和动态物体, 获取了它们的表面三维形貌数据。结果显示, 所研制的方法适用于三维形貌的快速测量。

**关键词** 机器视觉; 三维传感; 并行四颜色通道; 条纹投影; 相位测量; 快速三维面形测量

中图分类号 TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0815022

## Three-Dimensional Shape Measurement Based on Parallel Four Color Channels Fringe Projection

Wang Zhangying<sup>\*\*</sup>, Gao Nan, Zhang Zonghua<sup>\*</sup>

School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China

**Abstract** We present a three-dimensional (3D) shape measurement technique based on parallel four-color channels (red, green, blue and infrared) fringe projection, which only needs one-time measurement to reconstruct the 3D surface shape of an object. The proposed technique overcomes the shortcomings of slow measurement speed caused by multi-frame fringe images projection in the traditional fringe projection, and possesses high accuracy. Two-step phase shift, Fourier transform with the optimum three-frequency method are combined to calculate the absolute phase point-by-point independently and recover 3D shape measurement of complex objects, such as discontinuities, from the deformed composite color fringe pattern and infrared fringe pattern captured simultaneously. A beam splitter has been used to realize coaxial design and to build the projecting transformation between the visible light projector and the infrared light projectors, so that they build up the accurate pixel-to-pixel correspondence. Several experiments on static and dynamic objects are performed to obtain the 3D shape, and experimental results show that the proposed method is suitable for fast 3D shape measurement.

**Key words** machine vision; three-dimensional sensing; parallel four-color channels; fringe projection; phase measurement; fast 3D shape measurement

**OCIS codes** 150.6910; 120.5050; 110.6880

## 1 引 言

随着智能制造技术的发展, 物体的三维形貌数据在工业在线检测、虚拟现实、文物保护、逆向工程等领域得到广泛应用<sup>[1]</sup>。与传统的采用三坐标测量机获得物体表面形貌的技术相比, 光学三维测量具

有非接触、无损性、测量速度快等优点<sup>[2]</sup>。三维形貌数据是计算物体表面多种属性信息的核心, 快速精确获取被测量物体表面三维形貌数据, 是提高生产效率和产品质量的保证, 对工业制造过程中各个环节的质量保障具有重要的理论意义和应用价值。

光学三维测量中的条纹投影以其高精度、非扫

收稿日期: 2018-02-01; 修回日期: 2018-03-31; 录用日期: 2018-04-13

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2017YFF0106404)、国家自然科学基金(51675160)、河北省应用基础研究计划重点基础研究(15961701D)、河北省高层次人才资助项目(GCC2014049)、河北省人才工程培养经费(A201500503)

<sup>\*</sup> E-mail: zhzhangtju@hotmail.com; <sup>\*\*</sup> E-mail: wangzy990@126.com

描、全场测量等优点成为最可靠的技术之一<sup>[3]</sup>。传统的基于条纹投影的快速三维测量技术可以分为两类:一类是投射多帧相移条纹图像<sup>[4-8]</sup>;另外一类是投射单帧图像<sup>[9-18]</sup>。

第一类方法根据采集的多个相移条纹图在同一像素点的强度值来计算相位,测量精度高,空间分辨率高,但需要投射多张图像。Zhang等<sup>[5-6]</sup>拆掉投影仪上的色轮,编码彼此间有 $2\pi/3$ 相移的幅条纹图来获取物体的相位信息,但所使用的相位展开方法只适用于曲面连续的物体。Liu等<sup>[7]</sup>提出一种双频条纹恢复物体三维形貌的方法,选用高频条纹计算相位信息,低频条纹决定条纹级次,需要投射6幅条纹图像完成测量。Zuo等<sup>[8]</sup>采用改装的投影仪和现场可编程门阵列投影4幅条纹图像完成物体三维面形的测量。

第二类方法只需要投射一帧图像,对物体运动不敏感,测量速度快。Zhang<sup>[9]</sup>对该类方法进行了详细的综述,其中,最常用的方法有傅里叶变换法<sup>[10-11]</sup>、复合条纹法<sup>[12-13]</sup>、彩色条纹编码<sup>[14-18]</sup>等。傅里叶变换法(FT)只需要一幅图像即可获得包含物体高度的相位信息,测量速度快,但是其相位计算依赖空间邻近点的相位信息,不适于测量不连续的表面,会因产生的频谱泄露、混频等问题影响测量精度。复合条纹法是将多个正弦条纹以不同的载波空间频率合成一幅复合条纹图像,但存在相位分辨率低等问题。随着数字光处理(DLP)投影仪和彩色CCD相机的出现,研究者们开始用颜色编码标识条纹级次<sup>[14-15]</sup>或是用作并行通道承载相位信息<sup>[16-18]</sup>,以提高测量速度。Huang等<sup>[17]</sup>采用红、绿、蓝三颜色通道分别编码三幅相移条纹合成一幅彩色图像。Zhang等<sup>[18]</sup>编码三幅不同频率的条纹图像到红、绿、蓝三颜色通道,对三颜色通道的条纹图选用傅里叶变换法获得折叠相位,用最佳三条纹选择法获得绝对相位,解决了相位展开中的条纹级次模糊、不能测量非连续大梯度物体等问题,但是相位计算因选用傅里叶变换而精度不高。Xu等<sup>[19]</sup>提出利用可见光和红外投影系统同时获得多个条纹测量物体三维面形的方法。此方法需要投射4组条纹图像,由于两个投影系统从不同角度投影条纹到被测物体的表面,在测量场内不同深度存在两个投影系统间投影像素无法一一对应的问题;因此,最佳条纹选择法<sup>[20]</sup>等差频方法<sup>[21]</sup>不能应用于此系统。

综上,既有的测量方法或是不能测量非连续物

体,或是投射的条纹图像数量多、测量速度慢。为解决上述问题,在探讨并行多颜色通道获取物体三维形貌的基础上,本文提出红、绿、蓝和红外并行4颜色通道测量物体表面的三维形貌技术,搭建可见和红外投影系统同光轴光路系统。4个正弦条纹图调制在投影系统的4个颜色通道,合成一幅复合彩色条纹图和一幅红外图像,同时投射到被测物体的表面。2CCD相机同时采集受被测物体表面调制的变形条纹图,结合两步相移、傅里叶变换法和最佳三条纹选择法的相位求解方法,实现了从单次同时采集的变形复合彩色条纹和红外条纹图中独立计算各个像素点的绝对相位,提高了测量速度和精度。

## 2 基本原理

### 2.1 测量原理

利用半透半反镜将可见光和红外两个投影仪搭建成同光轴投射系统。可见光投影仪的红、绿、蓝三颜色通道和红外投影仪的红外通道组成并行4颜色投射通道。图1为研制的基于并行4颜色通道全场条纹投影物体三维形貌测量系统示意图。调制到可见光投影仪的红、绿、蓝三颜色通道的三幅条纹图合成一幅复合彩色图像。结合两步相移、傅里叶变换法和最佳三条纹选择法<sup>[20]</sup>,从2CCD相机单次同时采集的变形复合彩色条纹和变形红外条纹图像中即可独立计算各个像素点的绝对相位信息。

使用串扰系数标定法<sup>[17]</sup>计算颜色通道之间的串扰系数,补偿从其他通道泄漏的能量。对可见光投影仪红和蓝通道中的条纹应用两步相移法获得折叠相位,用于展开相位的计算。对可见光投影仪的绿通道和红外投影仪通道中的条纹应用傅里叶变换,获得折叠相位。应用最佳三条纹选择法,从单次采集的两幅条纹图像中获得各个像素点的绝对相位信息。

### 2.2 相位解算

选用一种改进的两步相移法<sup>[22-24]</sup>计算红和蓝通道中的两幅正弦条纹图的折叠相位。2CCD相机采集到复合彩色条纹图的红和蓝通道中的两幅正弦条纹图可以分别表示为

$$I_r(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[2\pi f_0 x + \varphi(x, y)], \quad (1)$$

$$I_b(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos\left[2\pi f_0 x + \varphi(x, y) + \frac{\pi}{2}\right], \quad (2)$$

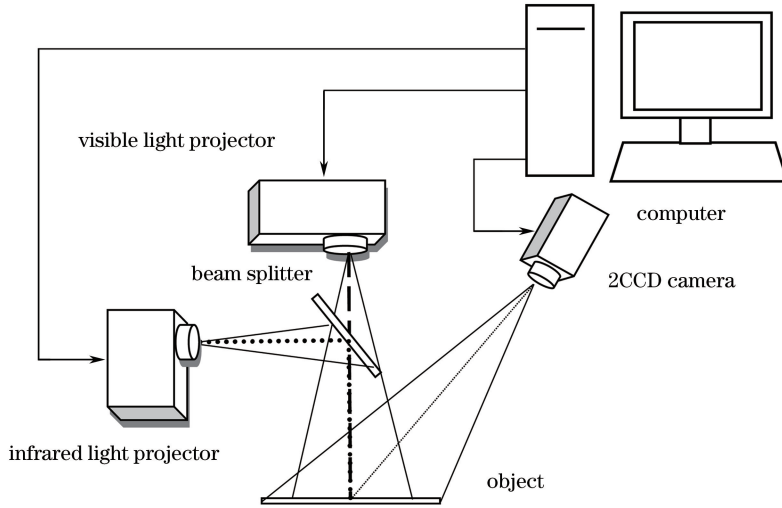


图 1 基于并行 4 颜色通道条纹投影的三维测量系统示意图

Fig. 1 Schematic of fringe projection 3D shape measurement system based on parallel four color channels

式中  $I'(x, y)$  为点  $(x, y)$  处的背景光强,  $I''(x, y)$  为点  $(x, y)$  处条纹幅值,  $f_0$  为条纹基频,  $\varphi(x, y)$  为包含物体深度信息的预测相位。

基于均值包络法<sup>[25]</sup>去除背景光强  $I'(x, y)$ , 红和蓝通道中的两幅正弦条纹图可表示为

$$I_r(x, y) = I''(x, y) \cos [2\pi f_0 x + \varphi(x, y)], \quad (3)$$

$$I_b(x, y) = I''(x, y) \cos \left[ 2\pi f_0 x + \varphi(x, y) + \frac{\pi}{2} \right]. \quad (4)$$

两式相比可得:

$$\frac{I_b(x, y)}{I_r(x, y)} = \frac{I''(x, y) \cos \left[ 2\pi f_0 x + \varphi(x, y) + \frac{\pi}{2} \right]}{I''(x, y) \cos [2\pi f_0 x + \varphi(x, y)]} = -\tan[\varphi(x, y)]. \quad (5)$$

因此, 获得的折叠相位可以表示为

$$2\pi f_0 x + \varphi(x, y) = \arctan \left[ -\frac{I_b(x, y)}{I_r(x, y)} \right]. \quad (6)$$

2CCD 相机采集到的受被测物体调制的变形复合彩色条纹图中的绿通道条纹图和变形红外条纹图, 用傅里叶级数可以表示为

$$G(x, y) = R(x, y) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n \exp\{j[2\pi n f_0 x + n\varphi(x, y)]\}, \quad (7)$$

式中  $R(x, y)$  表示被测物体表面反射率分布,  $A_n$  是傅里叶级数的系数,  $\varphi(x, y)$  为包含物体深度信息的欲测相位。

绿通道和红外通道的条纹图像采用基于均值包络<sup>[25]</sup>提取的傅里叶变换法获得折叠相位。基于均值包络法去除变形条纹图的背景项, 即去除零频分量后, 对变形条纹图应用傅里叶变换, 此时的傅里叶频谱只有基频分量和高频分量, 只需要抑制基频和高频分量的频谱混叠, 提取基频, 傅里叶逆变换获得

两组折叠相位, 此时傅里叶变换法的测量范围扩大为原来的三倍。

为了获得绝对相位  $\phi(x, y)$ , 选用最佳条纹选择法<sup>[20, 26]</sup>。它是一种时间相位展开算法, 可以有效解决条纹级次不确定的问题, 获得的结果非常可靠, 通过对像素逐个进行相位展开, 可以测量非连续和大梯度的物体。最佳条纹相位展开算法所用到的条纹数目满足:

$$N_{fi} = N_{f_0} - N_{f_0} \frac{(i-1)}{(n-1)}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad (8)$$

式中  $N_{fi}$  代表第  $i$  组的条纹数目,  $N_{f_0}$  代表最大的条纹数目,  $n$  为所用条纹的组数。本文算法选用三组条纹 ( $n=3$ ), 称为最佳三条纹选择法。设最大条纹个数为  $N$ , 则另外两组条纹个数分别为  $N-1, N-\sqrt{N}$ 。

### 3 系统的构成及标定

#### 3.1 系统研制

根据所提出的方法, 研制了基于并行 4 颜色通

道的条纹投影三维形貌测量系统,如图 2 所示。系统主要包括计算机、可见光投影仪、红外投影仪、2CCD 相机和半透半反镜。可见光投影仪与红外投影仪均为 lightcrafter4500,分辨率为  $912 \text{ pixel} \times 1140 \text{ pixel}$ 。两个投影仪投影光学系统构成相同,均由发光二极管(LED)光源经过准直透镜,聚光透镜平行入射经过光学积分器和透镜平行出射到数字微镜器件(DMD)上,再经投影仪透镜出射。红外投影仪仅将可见光投影仪的光源和 DMD 分别替换成红外 DMD 和红外光源,通过相同的投影仪透镜出射。半透半反镜的透射率和反射率均为 50%。调节两个投影仪与半透半反镜的位置,使两个投影仪的光轴重合。其中,可见光投影仪经半透半反镜透射到被测物体表面,红外投影仪经半透半反镜反射到被测物体表面,红外投影仪经半透半反镜的虚像和可见光投影仪重合。因此,两个投影仪可同时从相同方向投射条纹到被测物体的表面。2CCD 相机型号为 AD-080GE,分辨率为  $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ 。可见光和近红外光通过镜头进入相机,经过分光棱镜后,沿不同路径分别成像于 2 个 CCD 芯片;因此,2CCD 相机可以同时采集可见光和红外图像。所得到的变形条纹图像用于后续的相位和三维形貌数据计算。

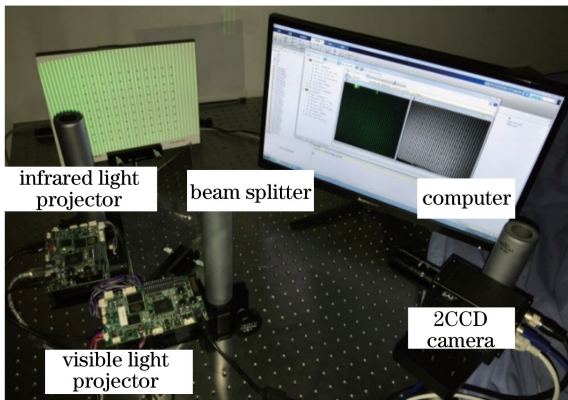


图 2 基于并行 4 颜色通道的条纹投影三维测量系统实物图

Fig. 2 Photograph of fringe projection 3D shape measurement system based on parallel four colour channels

### 3.2 两个投影仪的匹配

为了使两个投影仪投影像素间精确对应,提出一种精确建立二者之间对应关系的方法。

1) 建立理想的投影仪成像模型,即建立世界坐标系中的投影仪空间物点  $P(X_w, Y_w, Z_w)$  和投影仪坐标系中的投影仪成像点  $p(u_p, v_p)$  之间的透视投影关系<sup>[27-29]</sup>,如 (9) 式所示:

$$s [u_p \quad v_p \quad 1]^T = \mathbf{M}_p [\mathbf{R}_p \quad \mathbf{T}_p] [X_w \quad Y_w \quad Z_w \quad 1]^T = \mathbf{H}_p [X_w \quad Y_w \quad Z_w \quad 1]^T, \quad (9)$$

式中  $\mathbf{M}_p$  为投影仪的内部参数,  $\mathbf{R}_p$ 、 $\mathbf{T}_p$  为投影仪的外部参数,  $\mathbf{R}_p$  为世界坐标系(即投影仪空间物点坐标系)到投影仪坐标系的旋转矩阵,  $\mathbf{T}_p$  为世界坐标系到投影仪坐标系的平移向量,  $\mathbf{H}_p$  为投影矩阵。

2) 对可见光投影仪和红外投影仪应用(9)式,分别建立世界坐标系中投影仪空间物点  $P(X_w, Y_w, Z_w)$  和可见光投影仪成像点  $p_1(u_{p1}, v_{p1})$  之间的透视投影关系,以及和红外投影仪坐标系中的投影仪成像点  $p_2(u_{p2}, v_{p2})$  之间的透视投影关系分别为

$$s [u_{p1} \quad v_{p1} \quad 1]^T = \mathbf{M}_{p1} [\mathbf{R}_{p1} \quad \mathbf{T}_{p1}] [X_w \quad Y_w \quad Z_w \quad 1]^T = \mathbf{H}_{p1} [X_w \quad Y_w \quad Z_w \quad 1]^T, \quad (10)$$

$$s [u_{p2} \quad v_{p2} \quad 1]^T = \mathbf{M}_{p2} [\mathbf{R}_{p2} \quad \mathbf{T}_{p2}] [X_w \quad Y_w \quad Z_w \quad 1]^T = \mathbf{H}_{p2} [X_w \quad Y_w \quad Z_w \quad 1]^T. \quad (11)$$

3) 利用相同的世界坐标系中投影仪空间物点  $P(X_w, Y_w, Z_w)$ , 对可见光投影仪和红外投影仪成像公式(10)、(11)式作运算,得到从红外投影仪到可见光投影仪的变换,完成可见光投影仪和红外投影仪之间的匹配:

$$[u_{p1} \quad v_{p1} \quad 1]^T = \mathbf{H}_{p1} \mathbf{H}_{p2}^{-1} [u_{p2} \quad v_{p2} \quad 1]^T. \quad (12)$$

4) 匹配效果的验证。以可见光投影仪的绿通道为基准,红外通道的图像通过步骤 3) 的变换,完成红外投影仪到可见光投影仪的匹配。

可见光通道投射满足最佳条纹个数的一组条纹图像和红外通道投射经投影匹配变换得到的一组条纹图像到一白板表面,2CCD 相机同时采集这两组条纹图像,分别对采集的两组图像解调相位,得到两幅绝对相位图。比较所得到的两幅绝对相位图对应像素点间的差别,得到的最大相位差在 0.08 rad 之内。在并行 4 通道条纹解调技术中,相位主值的求解选用两步相移法,需要两幅图像,故选用可见光投影仪的红、蓝两通道。红外通道中的图像用于决定条纹级次,此相位差在最佳条纹选择所要求的误差范围之内,不影响相位展开的精度。如此,实现了可见光和红外通道的匹配。可见光和红外通道匹配前后同时使用两个通道获得的绝对相位图中同一行的剖面,如图 3 所示。其中,蓝线表示可见光和红外通道未匹配前同时

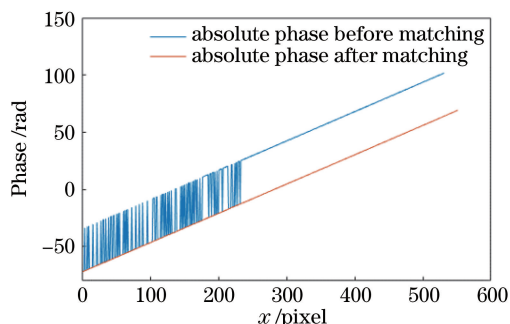


图 3 可见光和红外通道匹配前后使用两个通道获得的绝对相位剖面图

Fig. 3 Profile of one line in absolute phase map achieved by using two channels before and after matching

使用两个通道获得的绝对相位图,红线表示匹配后获得的绝对相位图。

### 3.3 三维测量系统标定

利用表面带有圆环标识的标定板标定三维测量系统,建立绝对相位图和三维数据间的关系。在投影仪和相机景深范围内选取成像最清晰的位置作为参考面,通过精密水平移动台,将标定板在参考面前后分别移动 10 个位置。在每一个标定位置,投影仪投射一组符合最佳三条纹选择法的正弦条纹图到标定板表面。相机采集变形条纹图及纹理图,变形条纹图用于计算每个标定板所在位置处的绝对相位,纹理图用于提取圆环中心,结合已知的相机内参得到每个位置处的相对深度。通过解超定方程即可得到每个像素点的标定系数。同时,根据标识点间的已知距离,可标定像素和横向 X、Y 间的对应关系<sup>[30]</sup>,最终完成系统的三维标定。

为定量评价所标定系统在深度方向的精度,在深度范围内选取 -25, -10, 10, 25 mm 位置进行验证。利用精密水平移动台将平板定位至以上位置,计算各位置处平板的绝对相位,并根据所标定的系数计算出相对深度。精密水平移动台的精度为 1 μm,可将其移动距离作为相对深度的真值。取相

对深度多次测量值的平均值为测量深度,则 4 个测试位置的深度误差结果如表 1 所示。可以看出,该标定结果可以较为精确地实现绝对相位与深度数据之间的转换。

表 1 各验证位置标定平板中间一行的深度测量结果

Table 1 Depth measurements of one row in the middle of four test positions mm

Position	Measured distance	Absolute error	Standard deviation
-25	-24.973	0.027	0.039
-10	-10.021	0.021	0.046
10	10.024	0.024	0.047
25	25.017	0.017	0.053

## 4 测量实验

利用所研制的系统,实际测量了面具、台阶和移动人手的三维形貌。实验前使用串扰系数标定法,计算颜色通道之间的串扰系数,补偿从其他通道泄漏的能量。软件产生补偿串扰的条纹个数为 64、63 和 56 的三组正弦条纹到 DLP 投影仪的红、绿、蓝和红外通道,并投射到待测物体的表面。其中:可见光投影仪的红和蓝通道分别编码条纹个数为 64、彼此间有 90°相移的正弦条纹图;绿通道编码条纹个数为 63 的正弦条纹图,合成的复合彩色条纹图如图 4(a)所示;红外通道编码条纹个数为 56 的正弦条纹图,如图 4(b)所示。2CCD 相机同时采集面具表面变形的复合条纹图和红外条纹图像,如图 5(a)和(b)所示。对复合条纹图中红和蓝通道中的条纹应用两步相移法,得到折叠相位,如图 6(a)所示。对绿通道和红外通道中的条纹图应用傅里叶变换,获得两个折叠相位图,如图 6(b)、(c)所示。应用最佳三条纹选择法,从三幅折叠相位图中获得各个像素点的绝对相位信息,如图 6(d)所示。最后,根据标定好的系统,计算出面具的三维形貌数据,如图 7 所示。同理,利用相同方法对台阶和人手进行三维

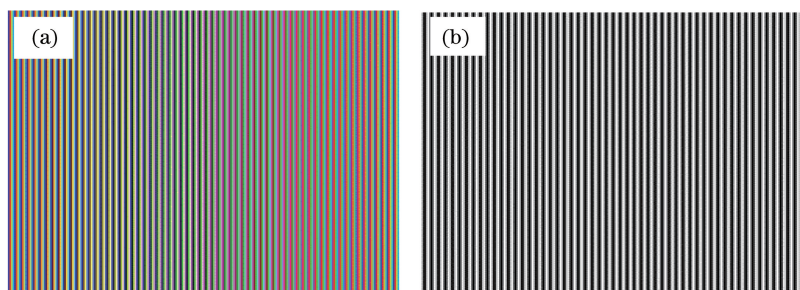


图 4 投影条纹图。(a)复合彩色条纹图;(b)红外条纹图

Fig. 4 Projected fringe patterns. (a) Composite color fringe pattern; (b) infrared fringe pattern

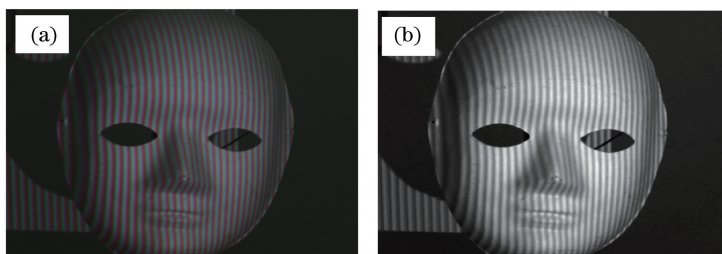


图 5 相机采集到的变形条纹图。(a)变形复合条纹图;(b)变形红外条纹图

Fig. 5 Deformed fringe patterns obtained by camera. (a) Deformed composite color fringe pattern; (b) deformed infrared fringe pattern

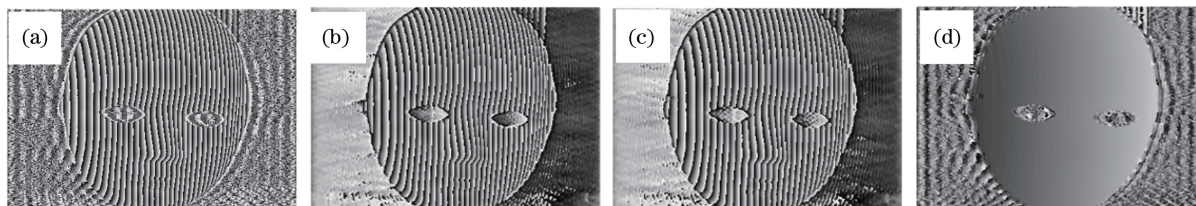


图 6 面具的相位图。(a)红蓝通道折叠相位;(b)绿通道折叠相位;(c)红外通道折叠相位;(d)绝对相位图

Fig. 6 Phase map of mask. (a) Wrapped phase in red and blue channel; (b) wrapped phase in green channel; (c) wrapped phase in infrared channel; (d) absolute phase map

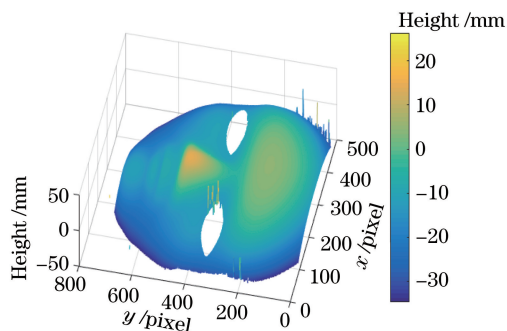


图 7 面具的三维形貌图

Fig. 7 3D shape data of mask

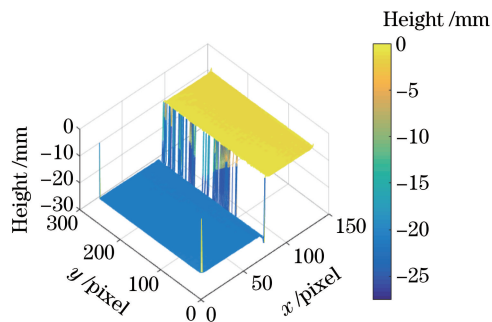


图 8 台阶的三维形貌图

Fig. 8 3D shape data of artificial step

形貌测量,获得三维形貌数据,分别如图 8 和图 9 所示,其中,图 9 来源于相机采集人手移动的动态过程的三维视频。这些测量结果说明本文所研制的系统

既可测量非连续的物体,也可测量动态物体的表面三维形貌。串扰补偿后彩色图像某一行的条纹强度如图 10 所示。

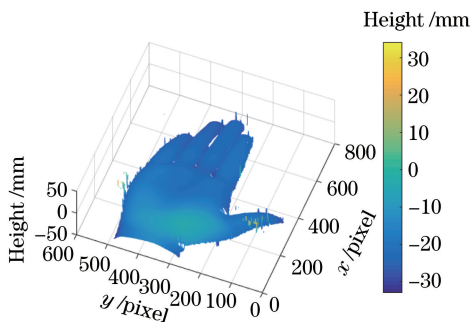


图 9 人手的三维形貌图

Fig. 9 3D shape data of a human hand

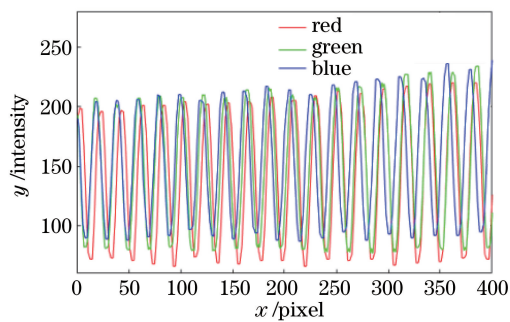


图 10 补偿后的彩色图像某一行的条纹强度

Fig. 10 Intensity at a row of color fringe after coupling compensation

## 5 分析与讨论

与传统条纹投影测量物体三维形貌相比,提出的基于并行4颜色通道条纹投影三维形貌测量技术具有以下特点:

1) 速度快。只需要单次测量即可获得物体的三维形貌。与传统投射多帧条纹图像相比,只需要同时投射两幅图像即可完成测量,投射的条纹数目少,不易受物体运动影响。

2) 测量精度高。与以往的投射单帧条纹图像相比,本文方法相位主值由两步相移法获得,相比传统傅里叶变换获取相位精度高。相位展开选用最佳三条纹选择法,独立计算各个像素点的绝对相位,可以获得非连续物体等复杂面形的三维形貌数据。

3) 适用性强,应用范围广。本文方法可以广泛应用于复杂面型的测量,测量范围广。同时,本文提出的两投影仪的同光轴设计和匹配算法也可广泛地适用于投影系统之间的精确匹配。

## 6 结 论

提出一种红、绿、蓝和红外并行4颜色通道条纹投影测量技术,通过单次测量即可获得物体表面的三维形貌,克服了投射多帧条纹图像造成测量速度慢,投射单帧条纹图像不能测量大梯度和非连续物体、测量精度不高等缺点,在保证精度的同时,提高了测量速度。相位解算方面,结合两步相移、傅里叶变换法和最佳三条纹选择法,实现了对各个像素点绝对相位的独立计算,可获得非连续物体等复杂面形的三维形貌数据。系统标定实验验证了本文方法的测量精度。同时,也提出了两投影仪的同光轴和匹配算法,适用于其他投影系统之间的精确匹配。

### 参 考 文 献

- [1] Chen F, Brown G, Song M M. Overview of 3-D shape measurement using optical methods [J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(1): 10-22.
- [2] 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.
- [3] Bai X F, Zhang Z H. 3D shape measurement based on colour 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.
- [4] 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.
- [5] Zhang S, Huang P S. High-resolution, real-time three-dimensional shape measurement [J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(12): 1269-1278.
- [6] Huang P S, Zhang C P, Chiang F P. High-speed 3D shape measurement based on digital fringe projection [J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(1): 163-168.
- [7] Liu K, Wang Y C, Lau D L, *et al.* Dual-frequency pattern scheme for high-speed 3D shape measurement [J]. *Optics Express*, 2010, 18(5): 5229-5244.
- [8] Zuo C, Chen Q, Gu G H, *et al.* High-speed three-dimensional profilometry for multiple objects with complex shapes[J]. *Optics Express*, 2012, 20(17): 19493-19510.
- [9] 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.
- [10] Su X Y, Chen W J. Fourier transform profilometry: a review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, 35(5): 263-284.
- [11] Wu S Q, Zhang Y, Zhang S Y, *et al.* Analysis of three-dimensional measurement system and the coordinates calibration in Fourier transform profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(10): 2780-2785.  
吴双卿, 张引, 张三元, 等. 傅里叶变换轮廓术物体三维形貌测量的系统分析及其坐标校准方法[J]. *光学学报*, 2009, 29(10): 2780-2785.
- [12] Takeda M, Gu Q, Kinoshita M, *et al.* Frequency-multiplex Fourier-transform profilometry: a single-shot three-dimensional shape measurement of objects with large height discontinuities and/or surface isolations[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(22): 5347-5354.
- [13] Sansoni G, Redaelli E. A 3D vision system based on one-shot projection and phase demodulation for fast profilometry [J]. *Measurement Science and Technology*, 2005, 16(5): 1109-1118.
- [14] Su W H. Color-encoded fringe projection for 3D shape measurements[J]. *Optics Express*, 2007, 15(20): 13167-13181.
- [15] Liu W Y, Wang Z Q, Mu G G, *et al.* Color-coded projection grating method for shape measurement with a single exposure[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(20): 3504-3508.
- [16] Chen W J, Su X Y, Cao Y P, *et al.* Improved FTP

- based on bi-color fringe projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(10): 1153-1157.
- 陈文静, 苏显渝, 曹益平, 等. 基于双色条纹投影的快速傅里叶变换轮廓术[J]. *光学学报*, 2003, 23(10): 1153-1157.
- [17] 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.
- [18] Zhang Z H, Towers D P, Towers C E. Snapshot color fringe projection for absolute three-dimensional metrology of video sequences[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(31): 5947-5953.
- [19] Xu Y J, Chen C, Huang S J, *et al.* Simultaneously measuring 3D shape and colour texture of moving objects using IR and colour fringe projection techniques[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 61: 1-7.
- [20] Zhang Z H, Towers C E, Towers D P. Time efficient color fringe projection system for 3D shape and color using optimum 3-frequency selection[J]. *Optics Express*, 2006, 14(14): 6444-6455.
- [21] Chen S L, Zhao J B, Xia R B. Improvement of the phase unwrapping method based on multi-frequency heterodyne principle[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0412004.
- 陈松林, 赵吉宾, 夏仁波. 多频外差原理相位解包裹方法的改进[J]. *光学学报*, 2016, 36(4): 0412004.
- [22] Zhang S, Yau S T. High-speed three-dimensional shape measurement system using a modified two-plus-one phase-shifting algorithm [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(11): 113603.
- [23] Kang X, He X Y. Two-step phase-shifting technique for phase measurement profilometry by grating projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(1): 75-79.
- 康新, 何小元. 两步相移实现投影栅相位测量轮廓术[J]. *光学学报*, 2003, 23(1): 75-79.
- [24] Zheng D L, Da F P. Double-step phase-shifting algorithm for fringe-projection measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0512004.
- 郑东亮, 达飞鹏. 双步相移光栅投影测量轮廓术[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0512004.
- [25] Zhang X X, Wang Y M, Huang S J, *et al.* A two-step phase-shifting algorithm for phase calculation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(3): 0311005.
- 张晓璇, 王月敏, 黄淑君, 等. 一种两步相移相位解算方法[J]. *光子学报*, 2017, 46(3): 0311005.
- [26] Towers C E, Towers D P, Jones J D C. Absolute fringe order calculation using optimised multi-frequency selection in full-field profilometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, 43(7): 788-800.
- [27] Huang S J, Xie L L, Wang Z Y, *et al.* Accurate projector calibration method by using an optical coaxial camera [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(4): 789-795.
- [28] Li Z Y. Research on structured light 3D measuring technology and system based on digital fringe projection [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009: 11-17.
- 李中伟. 基于数字光栅投影的结构光三维测量技术与系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009: 11-17.
- [29] Wang Z Y, Liu M, Yang S R, *et al.* Precise full-field distortion rectification and evaluation method for a digital projector[J]. *Optical Review*, 2016, 23(5): 746-752.
- [30] Zhang Z H, Huang S J, Meng S S, *et al.* A simple, flexible and automatic 3D calibration method for a phase calculation-based fringe projection imaging system[J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12218-12227.