

引用格式: WEN Hao, MENG Zhao-zong, GAO Nan, *et al.* Error Measurement and Compensation of Multi-channel Fringe Projection System[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(7):0712004

温豪,孟召宗,高楠,等.多光通道条纹投影系统误差测量与补偿[J].光子学报,2020,49(7):0712004

## 多光通道条纹投影系统误差测量与补偿

温豪,孟召宗,高楠,张宗华

(河北工业大学 机械工程学院,天津 300130)

**摘要:**基于相位计算的多通道三维测量技术由于同时使用多个光通道,通道间串扰和色差、镜头畸变以及器件非线性响应等多种误差耦合在一起,影响测量效果和检测精度.针对该问题,从采集图像的误差类型出发,将误差分为图像像素亮度与实际亮度之间的光强误差和图像像素空间分布的位置偏差,以此分别构建了光强误差关系和位置偏差关系并对检测系统进行定量测量.最后提出一种系统误差补偿方法,利用建立的误差关系修正了采集图像光强亮度和像素位置偏差,同时补偿了上述误差对测量结果的影响.实验结果表明,利用本文提出的误差补偿方法对标准台阶进行多通道三维形貌测量,测量误差从 0.678 mm 减小到 0.031 mm,该方法对此类系统的高精度三维测量具有实用价值.

**关键词:**计量学;光学测量;误差补偿;光学系统;图像分析;相位测量;测量误差

中图分类号:TH741

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204907.0712004

## Error Measurement and Compensation of Multi-channel Fringe Projection System

WEN Hao, MENG Zhao-zong, GAO Nan, ZHANG Zong-hua

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

**Abstract:** Multi-channel three-dimensional measurement based on phase calculation uses multiple optical channels at the same time, which results in the coupling of crosstalk, chromatic aberration, lens distortion and nonlinear response of devices, and affects measurement results and detection accuracy. Aiming at this problem, based on the error types of the collected images, the errors are divided into the light intensity error between the image pixel brightness to the actual brightness and the position deviation of spatial position distribution of image pixels. Then the light intensity error relation and the position deviation relation are constructed respectively and carry on the quantitative measurement to the detection system. Finally, a systematic error compensation method is proposed, which corrects the errors of intensity and pixel position of the collected image by using the established error relation, and compensates the influence of the above errors on the measurement results. The error compensation method proposed in this paper is used in multi-channel three-dimensional measurement of a standard step, the experimental results show that the measurement error can be reduced from 0.678 mm to 0.031 mm, and the method has practical value for the high-precision three-dimensional measurement of such a system.

**Key words:** Metrology; Optical measurements; Error compensation; Optical systems; Image analysis; Phase measurement; Measurement errors

**基金项目:**重大科学仪器设备开发重点专项(No.2017YFF0106404),国家自然科学基金(No.51675160),河北省应用基础研究计划重点基础研究资助项目(No.15961701D)

**第一作者:**温豪(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向为多光通道三维测量.Email:1090042110@qq.com

**导师:**张宗华(1974-),男,教授,博士,主要研究方向为光学检测、三维数字成像和造型、条纹自动分析和三维生物测定等.Email:zhzhang@hebut.edu.cn

**通讯作者:**高楠(1982-),男,副教授,博士,主要研究方向为光学测量与光谱检测.Email:ngao@hebut.edu.cn

**收稿日期:**2020-02-25;**录用日期:**2020-04-30

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

当今世界随着科技发展,对于物体三维测量的需求越来越高,如在手机上使用人脸识别和工业检测中车辆缺陷检测等,非接触式三维测量方法广泛应用于工业检测、服装设计、身份识别、文物保护等多个领域<sup>[1]</sup>.随着基于数字微反射镜(Digital Micromirror Device, DMD)的数字投影仪和基于高速电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)的彩色相机等光学器件的快速高精度发展,彩色条纹投影技术<sup>[2]</sup>通过编码条纹到红绿蓝三颜色通道,提高了测量效率,得到国内外学者的广泛关注.为了避免颜色通道串扰,又出现了基于红外通道和可见光通道的三维测量方法<sup>[3]</sup>.这种同时使用多个光通道的三维测量方法减少图像采集时间,提高了测量效率.然而由于同时使用多个光通道,测量系统中存在串扰和色差误差;使用的光学器件和镜头,也存在非线性响应和畸变误差.这些系统误差耦合在一起,严重影响了三维测量精度,因此对系统误差进行补偿具有重要意义<sup>[4]</sup>.LIU X H等<sup>[5]</sup>提出使用闭合圆环正弦条纹图来计算展开相位,在极坐标系下计算不同光通道每一像素点的像素偏差,补偿了横向色差对相位测量结果的影响.QIAO Nao-sheng等<sup>[6]</sup>提出一种基于系统非线性校正与滤波的相位测量方法,校正了由投影仪中伽马畸变产生的系统非线性,补偿了光强误差对相位测量结果的影响.WANG Z Y等<sup>[7]</sup>提出建立虚拟条纹投影系统,通过预先生成的变形条纹来校正同轴系统的位置偏差,补偿了对系统误差的影响.目前对于系统内存在的串扰、色差、非线性和畸变等各项误差的研究很多<sup>[8]</sup>,但缺少一种简单有效的系统整体误差补偿方法.

本文首先对多通道三维测量系统结构和测量原理分析,发现系统误差有串扰、色差、非线性和畸变误差等,通过对各项误差进行分析,从采集图像误差类型出发将系统误差分为光强误差和像素位置偏差,并分别构建了系统光强误差关系和位置偏差关系,基于此提出一种简单有效的系统误差补偿方法,修正了采集图像的光强亮度和像素分布,有效补偿了多通道三维测量系统误差对测量结果的影响.

## 1 多通道三维测量技术基本原理

### 1.1 多通道三维测量原理

多通道三维测量技术由条纹投影技术发展而来,是基于三角测量原理的一种三维测量方法<sup>[9-10]</sup>.通过投影设备、采集设备和被测物体构成的三角关系,利用相位与深度之间的关系即可得到被测物体表面的三维数据,继而恢复物体的三维形貌<sup>[11]</sup>.多通道三维测量技术测量原理过程如图1.

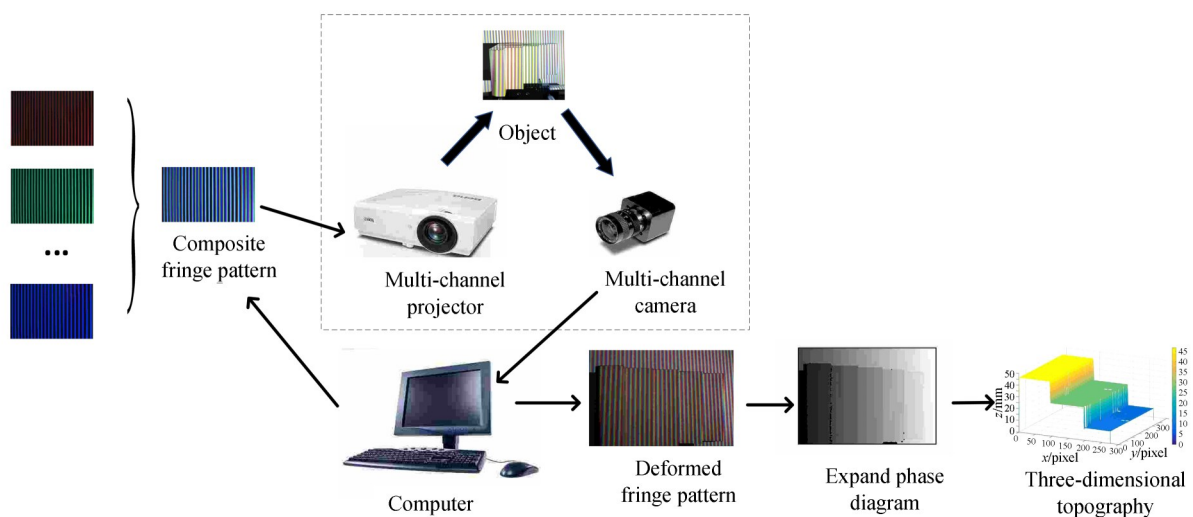


图1 多通道三维测量原理过程  
Fig.1 Multi-channel 3D measurement principle process

## 1.2 相位计算方法

多通道三维测量技术的关键是展开相位的准确求取.正弦条纹结构光投影到被测物体表面后,从相机获取的经过被测物体表面高度调制的变形条纹图在点 $(x, y)$ 处的光强分布可表示为

$$I(x, y) = I_0(x, y) + I_1(x, y)\cos\varphi(x, y) + I_n(x, y) \quad (1)$$

式中, $I_0(x, y)$ 为该点 $(x, y)$ 处的背景光强; $I_1(x, y)$ 为条纹幅值,表示条纹明暗变化程度; $I_n(x, y)$ 表示随机噪声; $\varphi(x, y)$ 为物体在参考平面内待求的展开相位值.

### 1.2.1 折叠相位计算方法

相移法是一种求取折叠相位的计算方法<sup>[12]</sup>.通过投影一系列相位差固定的正弦条纹图,并用相机获取这些变形的条纹图,然后比较条纹图中同一像素点的光强变化,从而求解该点实际产生的相位信息<sup>[13]</sup>.假设投影 $N$ 幅正弦条纹图,相移步数为 $N$ ,每幅条纹图像的相移量为 $2\pi/N$ ,则相机采集的条纹图的光强分布依次为

$$I_n(x, y) = I_a(x, y) + I_b(x, y)\cos\left[\varphi(x, y) + \frac{2\pi n}{N}\right] \quad (n=0, 1, \dots, N-1) \quad (2)$$

式中, $I_a(x, y)$ 是平均亮度, $I_b(x, y)$ 是调制亮度, $\varphi(x, y)$ 为待求的折叠相位值,折叠相位的计算式为

$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y) \sin \frac{2\pi n}{N}}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y) \cos \frac{2\pi n}{N}} \quad (3)$$

### 1.2.2 展开相位计算方法

由于通过反正切函数求得的折叠相位,因此相位值分布在区间 $[-\pi, \pi]$ 内,整个测量过程内存在多个条纹周期,如图2所示,折叠相位 $\varphi_1$ 会呈锯齿状分布,因此必须对相位主值进行相位展开得到连续的展开相位 $\varphi_2$ .

英国利兹大学的TOWERS C等<sup>[14]</sup>提出一种最佳频率条纹选择方法,使用三组不同频率的相移条纹图即可求解得到展开相位.三组相移条纹图的频率应满足 $N - \sqrt{N}$ ,  $N - 1$ 和 $N$ 的几何序列,以确保随机噪声误差在差频过程中始终保持在很小的变化范围.这种方法可以确定图像上每一点处的条纹级次,从而得到相位连续的展开相位图.

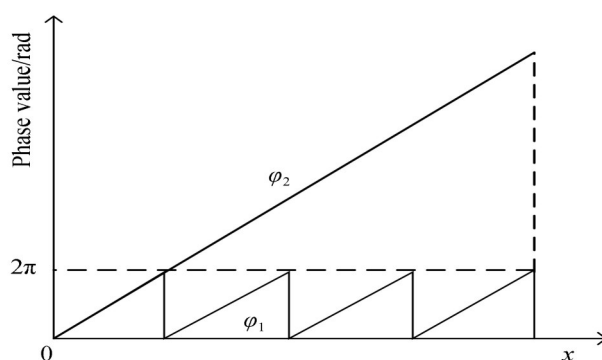


图2 折叠相位示意图

Fig.2 Schematic diagram of folded phase

## 2 系统误差补偿方法的构建过程

### 2.1 多通道三维测量系统结构

多光通道三维测量方法是一种基于三角测量原理的光学三维测量方法,通过投影系统、图像采集系统和被测物体构成的三角测量关系完成对被测物体的三维形貌测量.因此系统主要由多通道投影仪、多通道相机以及计算机构成,系统结构如图3.

多通道投影仪可以投影多个光通道的复合图像,投影出的图像包含多个光通道信息.如彩色数字投影仪、可同时投影可见光和红外光的数字投影仪等,投影仪内光源发出复合光,经过分光棱镜或色

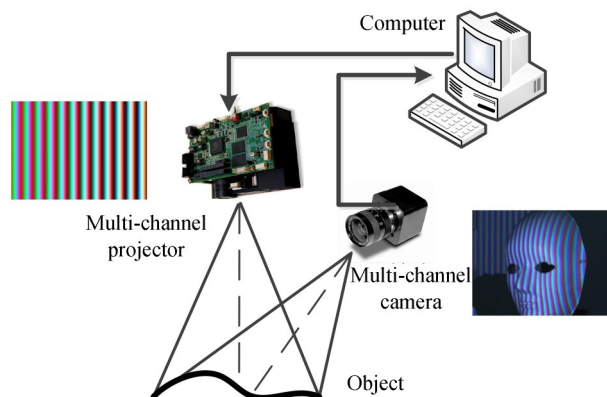


图3 多通道三维测量系统结构

Fig.3 Multi-channel 3D measurement system structure

轮等分成多种单色光,经过透镜投影出包含多个光通道信息的复合图像;多通道相机采集一幅复合图像即可得到多幅不同光通道的图像信息.如彩色3-CCD相机、可同时采集可见光和红外光的CCD相机等,包含多个光通道信息的复合图像由相机采集,复合光经过CCD相机镜头后通过分光棱镜或其他结构将分离得到的不同单色光采集在相应光通道的图像采集单元阵列中,实现了采集一幅复合图像即可得到多组不同光通道图像信息,大大提高了图像采集效率,节省了图像采集时间.

计算机负责控制多通道投影仪投影图像和多通道相机采集图像并对采集数据进行处理.通过计算机编码不同图案到多个光通道合成一幅复合图像,控制多通道投影仪投影复合图像到被测物体表面,复合图像经被测物体表面高度调制发生变形,计算机控制多通道相机采集变形图像,通过对包含多通道图像信息的复合图像进行数据处理,得到被测物表面的三维数据.

## 2.2 系统误差关系的构建

### 2.2.1 光强误差关系

投影仪光源发出一定规律的光强,经过投影和采集过程,每个光通道采集光强信息产生误差,图4为采集光强误差关系构建过程示意图.

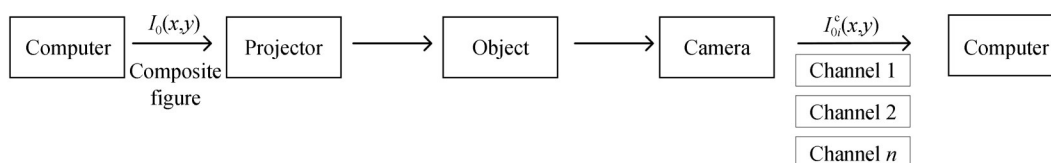


图4 采集光强误差关系构建示意图

Fig.4 Schematic diagram of the error relation of the collected light intensity

由于通道间串扰和非线性响应误差的影响,导致每个光通道采集光强信息不准确,因此系统每个光通道实际采集光强为

$$I_{0i}^c(x, y) = F_c \left\{ F_p \left[ P_i I_0(x, y) \right] \right\} + I_i^r(x, y) \quad (4)$$

式中,  $F_c$ 、 $F_p$  分别为相机和投影仪由于器件 gamma 效应引起的非线性响应函数,  $P_i$  是为投影仪设定的不同颜色光分量大小,  $I_i^r(x, y)$  为因串扰误差引起的其它光通道泄漏到该光通道的光强能量. 该式表示了每个光通道相机实际采集光强和计算机输入理想光强之间的关系. 通过测量可以得到每个光通道的非线性响应关系, 通过非线性修正可以得到理想光强与实际光强之间的关系

$$I_c = F_n^3(n_0 I_n + n_1) \quad (5)$$

式中,  $F_n^3(\cdot)$  为通过三阶拟合得到的光强响应函数,  $n_0$ 、 $n_1$  为线性修正系数,  $I_c$  为实际采集光强. 对于多光通道三维测量, 每个光通道采集光强误差关系为

$$I_{nc} = \frac{I_{1n}}{I_{11}} \left[ F_1^3(a_0 I_1 + a_1) \right] + \frac{I_{2n}}{I_{22}} \left[ F_2^3(b_0 I_2 + b_1) \right] + \dots + F_n^3(n_0 I_n + n_1) \quad (6)$$

式中,  $I_{nc}$  为相机实际采集的第  $n$  个光通道的原始光强,  $\frac{I_{1n}}{I_{11}}$  为第 1 个光通道对第  $n$  个光通道的串扰系数<sup>[15]</sup>, 是经过串扰误差测量后得到的校正系数, 其误差源为通道之间的串扰;  $n_0$ 、 $n_1$  为非线性补偿系数,  $F_n^3(\cdot)$  为第  $n$  个光通道的光强响应函数, 是经过系统非线性误差测量得到的参数, 其误差源为非线性响应.  $I_n$  为第  $n$  个光通道理想采集光强, 该式表示了多通道三维测量系统每个光通道采集光强误差关系.

### 2.2.2 位置偏差关系

由于通道间色差和镜头畸变的影响, 相机采集图像中成像像素点会发生偏离, 影响相位信息的计算, 图5为位置偏差关系构建过程示意图.

首先由计算机生成一幅复合图像, 经投影仪投影到被测物表面, 由于投影仪镜头畸变, 图像像素点发生偏移, 图像像素位置关系为

$$p_1' = \delta_p(p_1) \quad (7)$$



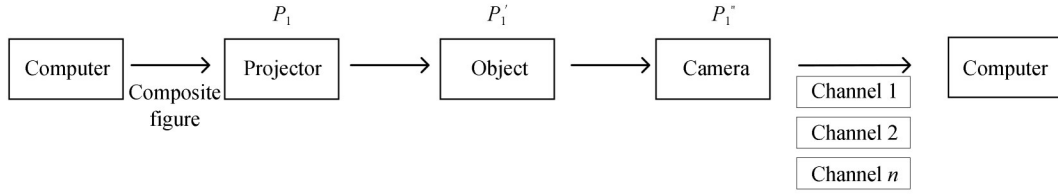


图5 位置偏差关系构建过程示意图

Fig.5 Construction process diagram of the position deviation relation

式中,  $\delta_p(\bullet)$  为由于投影仪镜头畸变引起的畸变点与理想点的对应关系,  $p_1'$  为畸变点,  $p_1$  为理想点. 投影图像经被测物表面反射由相机采集, 由于相机镜头畸变, 采集图像像素点发生偏移, 图像像素位置关系为

$$p_1'' = \delta_c(p_1') \quad (8)$$

式中,  $\delta_c(\bullet)$  为由于相机镜头畸变引起的畸变点与理想点的对应关系,  $p_1''$  为相机采集图像的畸变像素点. 由于使用多个光通道, 通道间色差误差对图像像素位置产生影响, 对于多光通道三维测量系统, 每个光通道的图像像素位置关系为

$$p_n'' = \delta_c[\delta_p(p_n)] + \Delta_{n1} \quad (9)$$

式中,  $\delta_p$ 、 $\delta_c$  分别为投影仪和相机中理想点与畸变点的对应关系,  $p_n$  为采集图像第  $n$  个光通道理想像素点,  $\Delta_{n1}$  为第  $n$  个光通道采集图像对第 1 个光通道采集图像的像素位置偏差,  $p_n''$  为相机采集第  $n$  个光通道实际像素点, 该式表示了每个光通道理想像素点与实际像素点的关系.

对于多光通道三维测量系统, 相机镜头畸变对测量结果影响较大<sup>[16]</sup>, 引入投影仪镜头畸变会使模型更加复杂, 因此利用 WANG Z Y 等<sup>[17]</sup> 提出的投影仪畸变校正方法对投影仪畸变预先进行修正, 本文只考虑相机镜头畸变. 通过将标定板在相机视场内沿光轴对称地任意摆放几个不同的位置, 对相机进行标定, 得到包含畸变系数在内的相机的相关参数. 对于一般的相机镜头考虑一阶径向畸变即可, 根据标定好的畸变系数  $k_1$ , 可得到理想成像点与实际成像点的关系

$$\begin{cases} X = X_d(1 + k_1 r_d^2) \\ Y = Y_d(1 + k_1 r_d^2) \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $(X_d, Y_d)$  为理想成像点,  $(X, Y)$  为实际成像点,  $r_d = \sqrt{X_d^2 + Y_d^2}$  为畸变半径. 由于色差的存在, 使得同一个物点在不同光通道成像在不同的位置, 因此可以通过像素的位置偏移来表示色差误差, 通过匹配像素点找到两光通道中的相对于同一个点的两个位置, 将偏移点的信息补偿回原来的位置, 从而完成两光通道间的色差补偿.

色差至少存在于两个光通道之间, 因此以通道 1 和通道 2 之间的色差补偿为例. 首先在两个光通道分别投影水平方向和垂直方向的条纹, 水平方向的条纹用于计算像素点在垂直方向的绝对相位  $\varphi_j$ , 垂直方向的条纹用于计算像素点在水平方向的绝对相位  $\varphi_i$ , 如图 6 所示, 利用展开相位值相等匹配两通道图像对应像素点. 其中,  $p_1(i_1, j_1)$ 、 $p_2(i_2, j_2)$  为两个光通道中的一对相对应像素点.  $\varphi_{i1}$ 、 $\varphi_{i2}$  和  $\varphi_{j1}$ 、 $\varphi_{j2}$  分别为两光通道水平和垂

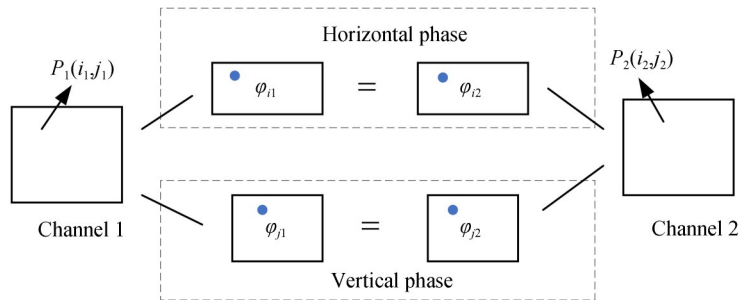


图6 匹配像素点

Fig.6 Matching pixels

直方向的绝对相位值.由于同一点在不同光通道的相位信息相同,因此利用两通道展开相位值相等来匹配两通道间的像素点

$$\begin{cases} \varphi_{i1} = \varphi_{i2} \\ \varphi_{j1} = \varphi_{j2} \end{cases} \quad (11)$$

利用垂直条纹图的展开相位信息计算每个像素点在水平方向的像素位置偏差 $\Delta i$ ,利用水平条纹图的绝对相位信息计算每一像素点在垂直方向的像素位置偏差 $\Delta j$ ,这样就完成了两光通道间的像素点匹配.

然而畸变误差导致每个光通道图像像素产生偏差,因此对于多光通道三维测量系统,每个光通道图像像素位置关系为

$$\begin{cases} i_{n1} = i_n(1 + k_1 r_d^2) + \Delta i \\ j_{n1} = j_n(1 + k_1 r_d^2) + \Delta j \end{cases} \quad (12)$$

式中, $(i_n, j_n)$ 为通道 $n$ 的理想成像点, $(i_{n1}, j_{n1})$ 为通道 $n$ 以通道1为基准的实际成像点, $k_1$ 为相机一阶径向畸变系数, $r_d^2 = i_n^2 + j_n^2$ , $(\Delta i, \Delta j)$ 为由于色差引起的像素位置偏差.该式表示了多通道三维测量系统每个光通道像素位置偏差关系.

### 2.3 系统误差补偿方法

通过对多光通道三维测量系统各项误差测量以及误差分析,将误差分为图像像素亮度与实际亮度之间的光强误差和图像像素空间分布的位置偏差,并以此分别构建了光强误差关系和像素位置偏差关系,包含了串扰误差、色差误差、非线性响应误差和畸变误差对测量结果的影响.接下来对系统误差进行补偿,系统误差补偿方法如图7.

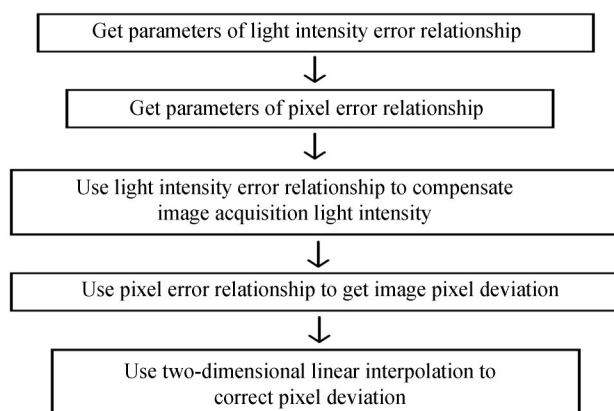


图7 系统误差补偿方法

Fig.7 System error compensation method

首先通过事先测量得到系统光强误差和位置偏差关系等相关参数;然后利用构建的光强误差关系补偿图像像素上采集光强值,获得每个位置准确的光强值,利用位置偏差关系得到图像每个像素的位置偏差;最后利用二维线性插值补偿像素位置偏差,将产生位置偏差的像素点的信息补偿到理想成像位置,完成系统误差的补偿.

## 3 实验

彩色条纹投影技术是一种典型的多通道三维测量方法,搭建彩色条纹投影系统,通过实验验证系统误差补偿方法对测量结果的影响.本次实验使用到的多通道投影设备为明基公司生产的型号为BenQCP270DLP彩色数字投影仪,分辨率为 $1024 \times 768$ .多通道图像采集设备为德国生产的型号为SVS-eco455CVGE彩色相机,分辨率为 $656 \times 492$ .实验系统如图8.

通过每个光通道中分别投影和采集0~255纯灰度图像可以得到各光通道的光强响应函数和非线性补偿系数,利用光强调制强度可以计算得到通道间串扰系数.以红通道为例,光强响应函数的三阶拟合系数为

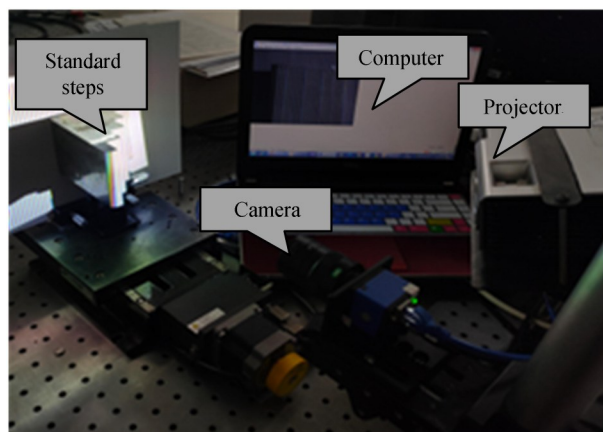


图8 实验系统  
Fig.8 Experimental system

$-4.196 \times 10^{-5}$ 、0.019 65、 $-1.011$ 、21.28,非线性补偿系数为0.712、16.736,绿蓝通道对红通道的串扰系数为0.210、0.028.

投影红绿蓝单一彩色正弦条纹图到白色平板上并由相机采集,提取由相机采集的彩色条纹图各颜色通道的条纹信息,如图9.图9(a)中第二到四列分别代表单一彩色条纹图中红、绿、蓝三颜色通道条纹信息,可以看出在相邻颜色通道间串扰影响较为严重.通过构建的光强误差关系进行补偿后,单一彩色条纹图各颜色通道条纹信息如图9(b),明显看出其他颜色通道条纹信息大大减少,能有效提取单颜色通道条纹光强信息.

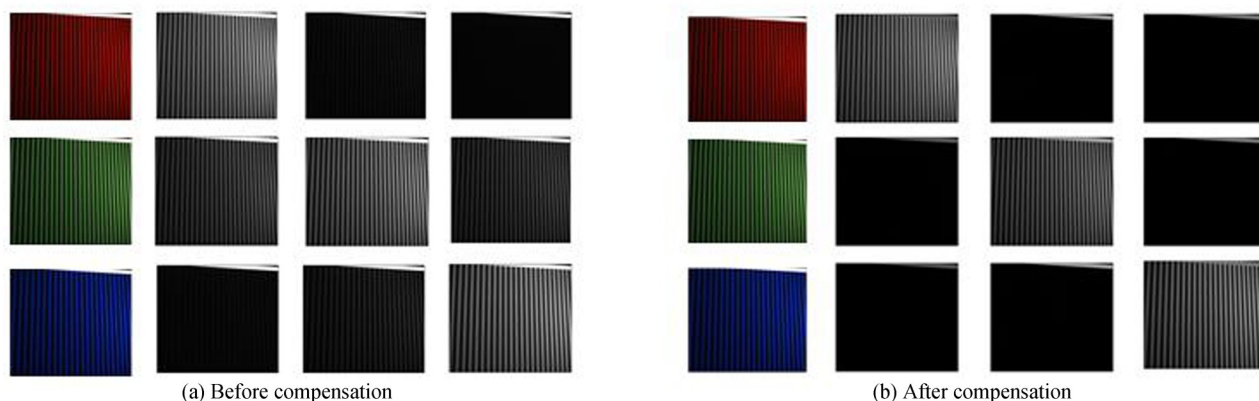


图9 单一彩色条纹图各颜色通道条纹光强分布  
Fig.9 Intensity distribution of each color channel in a single-color fringe image

分别投影水平方向和垂直方向的满足三步相移的纯色红绿蓝条纹图案到白色平板上,通过构建的位置偏差关系以绿通道为基准计算得到红绿通道和绿蓝通道的像素位置偏差,图10为红绿通道间垂直条纹某一行和水平条纹某一列的像素位置偏差.通过计算整幅条纹图像,红绿通道间水平条纹的平均像素位置偏差为0.972 0个像素,垂直条纹的平均像素位置偏差为0.414 8个像素.

由于畸变和色差误差的影响,彩色条纹投影系统通道间像素分布发生偏离,展开相位值产生偏差,通过位置偏差关系得到像素位置偏差分布,然后进行补偿.图11为误差补偿前后红绿通道某一行的相位差分布,图11(a)为补偿前红绿通道间某一行的相位差分布,整幅图像平均相位差值为0.103 8 rad;图11(b)为经过位置偏差关系计算得到像素位置偏差分布,然后通过二维线性插值补偿得到红绿通道间某一行的相位差分布,整幅图像平均相位差值为0.008 rad,大大减少了由畸变和色差误差造成像素位置偏差对测量结果的影响.

最后对系统误差补偿方法进行验证.首先编码相移量为 $2\pi/3$ 的三幅条纹图像到红绿蓝三颜色通道,通

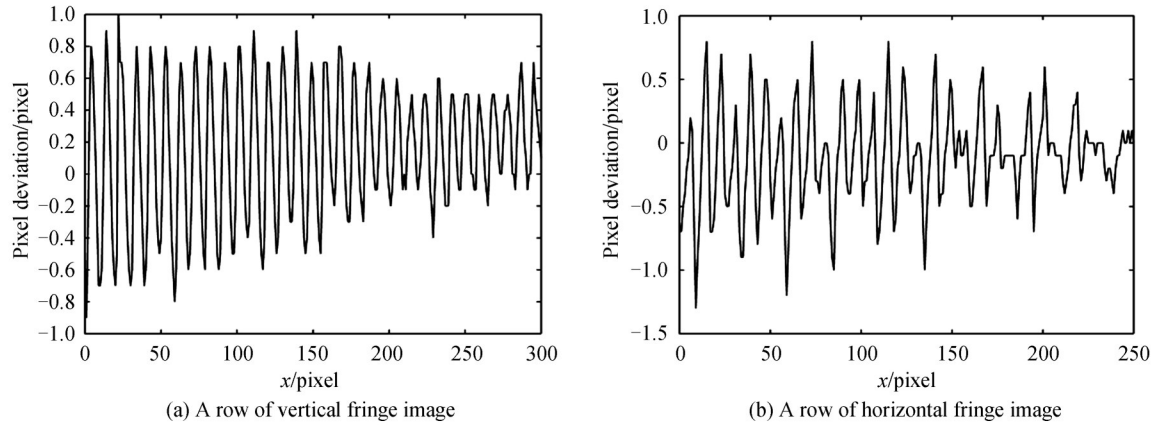


图10 红绿条纹图像像素偏差分布

Fig.10 Pixel deviation distribution of red and green fringe image

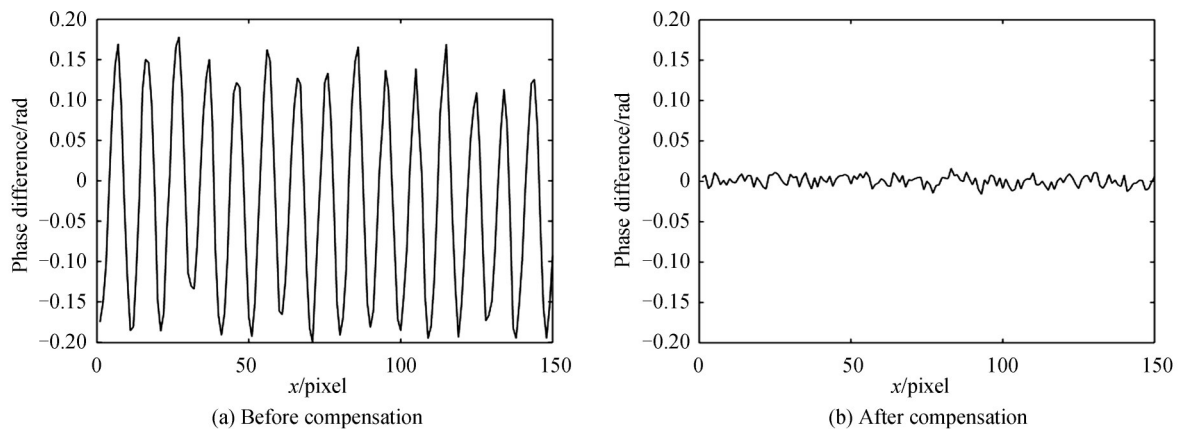


图11 红绿垂直条纹图某一行相位差分布

Fig.11 Phase difference distribution of a row in the red and green vertical fringe image

过投影仪投影到白色平板上,由相机采集彩色条纹图像,通过采集条纹数目分别为36、35和30的三组条纹图像计算可得到展开相位.图12为利用本文所构建的误差关系和补偿方法对展开相位计算的影响结果.

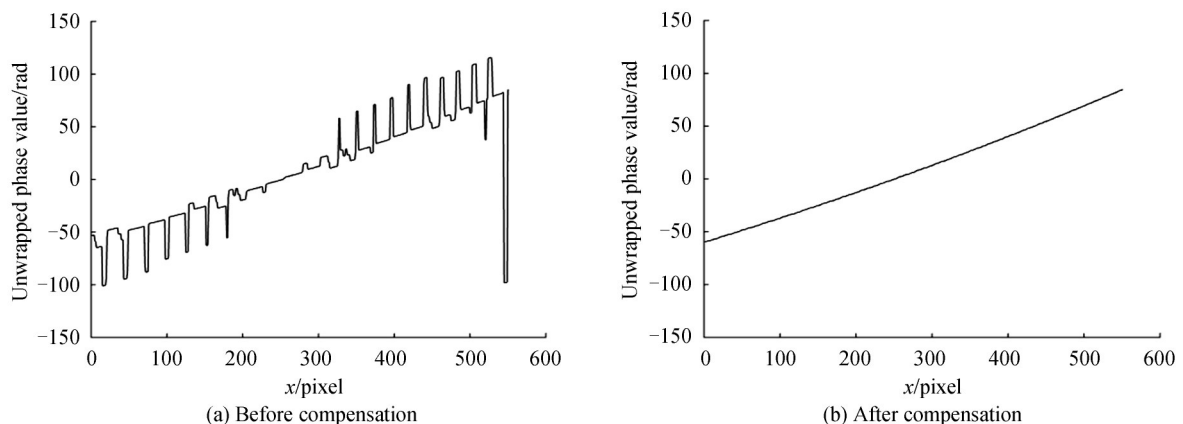


图12 彩色条纹图某一行展开相位分布

Fig.12 Unwrapped phase distribution of a row in a color fringe image

通过彩色条纹投影系统恢复标准台阶量块的三维形貌,验证利用本文建立的误差关系和系统误差补偿方法对三维测量精度的影响.图13(a)为误差补偿前恢复的台阶三维形貌,图13(b)为通过系统误差补偿恢复得到的台阶三维形貌,台阶面数据更加平滑、准确.



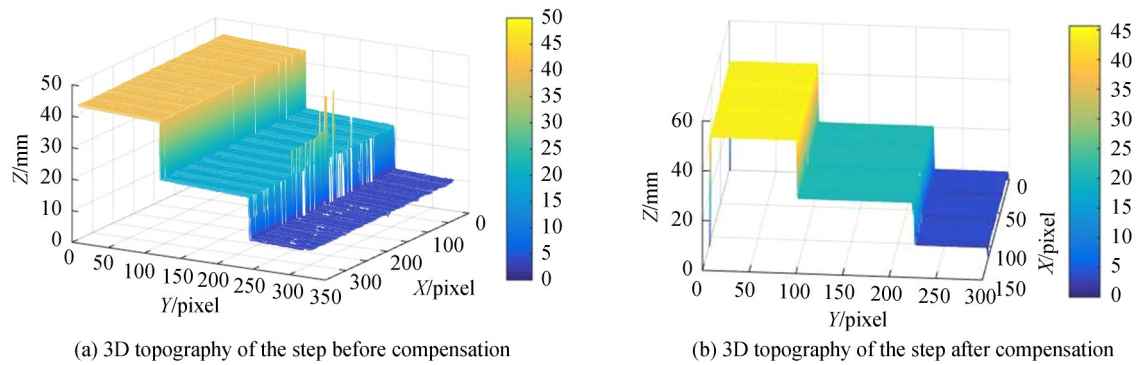


图13 彩色条纹投影系统测量三维形貌

Fig.13 3D topography measured by the color fringe projection system

对系统误差补偿前后得到的三维深度数据进行处理,表1为该三维测量系统误差补偿前后对台阶面距离测量的测量精度,补偿前后台阶距的测量误差从0.678 mm减少到0.031 mm,彩色条纹投影系统测量精度大大提高,验证了误差关系和修正方法的有效性.

表1 补偿前后台阶测量精度(单位:mm)

Table 1 Measurement accuracy of step before and after compensation (unit: mm)

| Step distance | Standard value | Before compensation | After compensation | Error before compensation | Error after compensation |
|---------------|----------------|---------------------|--------------------|---------------------------|--------------------------|
| 1 and 2       | 17.602         | 17.005              | 17.636             | -0.597                    | 0.034                    |
| 2 and 3       | 18.422         | 19.135              | 18.435             | 0.713                     | 0.013                    |
| 3 and 4       | 13.258         | 13.982              | 13.213             | 0.724                     | -0.045                   |

## 4 结论

本文针对多通道三维测量技术,从采集图像的误差类型出发,将系统误差分为图像像素亮度与实际亮度之间的光强误差和图像像素空间分布的位置偏差,以此分别构建了光强误差关系和位置偏差关系并对检测系统进行定量测量.最后提出一种简单有效的系统误差补偿方法,同时补偿了串扰、色差、非线性和畸变等误差对测量结果的影响.与之前研究相比,从系统层面上补偿了多项误差耦合的结果.实验表明,对比多通道三维测量方法典型应用的彩色条纹投影系统误差补偿前后得到标准台阶的三维数据,台阶面距离测量误差从0.678 mm减少到0.031 mm,有效提高了三维测量精度.系统误差受多个因素的影响,因此准确地从误差源建立非定量误差关系在系统层面误差研究中具有重要的意义.

## 参考文献

- [1] SU Xian-yu, ZHANG Qi-can, CHEN Wen-jing. Structured light 3D imaging[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(2): 9-18.  
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): 9-18.
- [2] CHENG T, DU Q Y, JIANG Y X, *et al.* Color fringe projection profilometry using geometric constraints[J]. *Optics Communications*, 2017, **398**: 39-43.
- [3] WANG Zhang-ying, GAO Nan, ZHANG Zhong-hua. Three-dimensional measurement based on parallel four-color channel fringe projection[J]. *Journal of Optics*, 2018, **38**(8): 217-224.  
王张颖,高楠,张宗华.基于并行四颜色通道条纹投影的三维测量术[J].光学学报,2018,**38**(8): 217-224.
- [4] ZHANG Jian-long, PAN Xin, HE Lei, *et al.* Research on error analysis of optical system for high precision 3D measuring instrument with full viewing angle[J]. *Applied Optics*, 2018, **39**(3): 392-399.  
张建隆,潘鑫,贺磊,等.全视角高精度三维测量仪光学系统误差分析研究[J].应用光学,2018,**39**(3): 392-399.
- [5] LIU X H, HUANG S J, ZHANG Z H, *et al.* Full-field calibration of color camera chromatic aberration using absolute phase maps[J]. *Sensors*, 2017, **17**(5): 1048.
- [6] QIAO Nao-sheng, LONG Yong-fu, YAN Bo, *et al.* Phase measurement based on system nonlinear correction and filtering[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(10): 100-106.  
乔闹生,龙永福,严波,等.基于系统非线性校正与滤波的相位测量[J].光子学报,2019,**48**(10): 100-106.

- [7] WANG Z Y, ZHANG Z H, GAO N, *et al.* Single-shot 3D shape measurement of discontinuous objects based on a coaxial fringe projection system[J]. *Applied Optics*, 2019, **58**(5): 169-178.
- [8] YU X, LIU Y K, LIU N Y, *et al.* Flexible gamma calculation algorithm based on probability distribution function in digital fringe projection system[J]. *Optics Express*, 2019, **27**(22): 32047-32057.
- [9] LI F, ZHANG B Y, SHI G M, *et al.* Single-shot dense depth sensing with color sequence coded fringe pattern [J]. *Sensors*, 2017, **17**(11): 2558.
- [10] QIAN J M, FENG S J, LI Y X, *et al.* Single-shot absolute 3D shape measurement with deep-learning-based color fringe projection profilometry[J]. *Optics Letters*, 2020, **45**(7): 1842-1845.
- [11] 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.
- [12] BAI Xue-fei, ZHANG Zong-hua. Three-dimensional topography measurement based on color fringe projection [J]. *Journal of Instrumentation*, 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.
- [13] 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.
- [14] TOWERS C, TOWERS D. Absolute fringe order calculation using optimised multi-frequency selection in full-field profilometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, **43**(7): 788-800.
- [15] PAN J H, HUANG P S, CHIUANG F P. Color phase-shifting technique for three-dimensional shape measurement[J]. *Optical Engineering*, 2006, **45**(1): 013602.
- [16] 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.
- [17] 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.

**Foundation item:** The National Key Research and Development Program of China (No.2017YFF0106404), the National Natural Science Foundation of China (No.51675160), the Key Basic Research Project of Applied Basic Research Programs Supported by Hebei Province (No.15961701D)