

# 基于彩色条纹投影术的三维形貌测量\*

白雪飞<sup>1</sup>, 张宗华<sup>1,2</sup>

(1. 河北工业大学机械工程学院 天津 300130; 2. 哈德斯菲尔德大学精密技术中心 哈德斯菲尔德 HD13DH)

**摘要:**物体表面三维形貌数据的获取在智能制造、航空航天、文物保护、医疗卫生、远程教育等领域有着广泛的应用。三维形貌数据的获取受限于系统硬件的性能,特别是现有数字投影系统的投影速度,无法快速测得物体面形的三维形貌。彩色成像和投影系统的出现,为并行多颜色通道三维成像系统提供了新的研究方向。详细综述了基于彩色条纹投影术的三维形貌数据测量研究的现状。具体包括彩色条纹投影术的基本原理、彩色条纹调制和解调相关技术、三维成像系统的标定、以及未来的研究方向。接着给出几个利用彩色条纹投影术获取物体表面三维形貌和彩色纹理的实例。为彩色条纹投影术测量物体表面三维形貌数据提供了详尽的综述,并指明了未来潜在的研究新方向。

**关键词:**彩色条纹投影;三维标定;相位计算;三维测量;色差

**中图分类号:** TH701 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4035

## 3D shape measurement based on colour fringe projection techniques

Bai Xuefei<sup>1</sup>, Zhang Zonghua<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. Centre for Precision Technologies, University of Huddersfield, Huddersfield HD13DH, UK)

**Abstract:** 3D shape acquisition of object surface has been widely used in the fields of intelligent manufacturing, aerospace, cultural relics protection, health care, remote education, and so on. Due to the limitation of hardware performance, especially the projection speed of existing digital projection system, 3D shape of object can not be obtained quickly. Hence, the appearance of color imaging and projection system provides a new research direction for 3D imaging system of parallel color channel. This paper reviews the status of 3D shape measurement techniques by projecting and capturing colour fringe pattern images on the object surface in detail. The principle of colour fringe projection technique, the modulation and demodulation of colour fringe pattern, the calibration of 3D imaging system and the directions for future research are analyzed. Moreover, several case studies are illustrated to obtain the 3D shape and colour texture using colour fringe projection techniques. This paper summarizes the 3D shape measurement techniques based on colour fringe pattern images on the object surface elaborately, and the challenging issues and future research directions are also discussed to advance the 3D measurement techniques.

**Keywords:** colour fringe projection; 3D calibration; phase calculation; 3D measurement; chromatic aberration

## 0 引言

彩色条纹投影技术用于三维形貌测量由于具有非接触操作、快速全场采集、高精度和自动数据处理等优势,

在学术界和工业界得到广泛研究和应用<sup>[1-3]</sup>。条纹可为正弦形状<sup>[4]</sup>、二值化形状<sup>[5-6]</sup>,三角形<sup>[7-8]</sup>、梯形<sup>[9]</sup>以及锯齿形<sup>[10]</sup>等,其中正弦和二值化条纹应用最多。折叠相位可由一幅或多幅条纹图获得,采用多幅进行测量时条纹图数目需多于3幅。这种方法测量精度较高,但是易受

收稿日期:2017-04 Received Date: 2017-04

\* 基金项目:国家自然科学基金(51675160,61171048)、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(GCC2014049)、河北省人才工程培养经费(A201500503)、天津市科技计划项目(15PTSYJC00260)、江苏省双创人才资助项目、European Horizon 2020 through Marie Skłodowska-Curie Individual Fellowship Scheme (707466-3DRM)项目资助

震动以及拍摄间隙图像位移的干扰。一些研究者尝试通过采用高速电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)相机和基于数字微反射镜(digital micromirror device, DMD)的数字投影仪快速采集3幅相移条纹图解决这个问题<sup>[11]</sup>。虽然折叠相位可以通过3步相移算法计算得到,但是对于动态物体而言,即使微小移动也会使得实际相移值偏离设定值,降低相位及三维形貌数据的精度。因此,为了避免震动以及被测物体位移的干扰,可以采集单幅条纹图像,减少图像数目,提高采集效率。

单幅条纹图编码可以分为离散编码方法和连续编码方法<sup>[12-13]</sup>。离散编码条纹一个编码占据多个像素,分辨率低,且对于具有复杂表面的被测物体不能得到精准的三维形貌数据。反之,连续编码条纹每个编码对应一个像素,因此可密集重建被测物体三维形貌,具有较高精度。在连续编码方法中,由于被测相位图精度要求高,相位计算的方法得到广泛研究。例如多步相移算法<sup>[14]</sup>、傅里叶变换算法<sup>[10,15]</sup>、窗式傅里叶变换算法<sup>[16-19]</sup>等。这些算法可通过计算得到折叠相位,还需进一步展开得到与三维形状相对应的展开相位。然而,实际变形条纹可能具有大梯度或不连续性,因此相位展开算法也得到广泛研究。

随着彩色CCD相机和彩色投影仪,特别是基于DMD的投影设备的发展,彩色图像的红、绿、蓝颜色通道可以作为载体编码条纹<sup>[20-29]</sup>。每个颜色通道的条纹图都可以作为灰度条纹独立存在,因此一幅复合彩色RGB图像包含3幅条纹图。为了避免颜色视觉盲区,大多数彩色CCD相机和投影仪都会设计成光谱重叠,因此颜色通道间的串扰就不可避免。彩色条纹投影中另一个值得研究的问题就是成像和投影系统光学镜头造成的色差。最近,彩色条纹投影技术也被用来测量彩色物体表面的三维形貌和颜色<sup>[30-31]</sup>。

本文详细综述了基于彩色条纹投影术的三维形貌测量技术发展现状。首先介绍彩色条纹投影术的基本原理,包括硬件系统、数字条纹投影技术、红绿蓝彩色条纹投影、条纹图提取、串扰消除、色差补偿以及相位计算方法;然后根据条纹投影基本原理介绍三维形貌数据获取的方法,包括相机标定、投影仪标定以及系统标定;讨论了彩色条纹投影术未来的发展方向并列出了用彩色条纹投影术获取物体表面三维形貌和彩色纹理的一些实例。

## 1 彩色条纹投影术的原理

彩色条纹投影术测量物体的三维形貌基于三角测量原理,系统几何模型如图1所示。 $E_p$ 和 $E_c$ 分别代表投影仪镜头出瞳和相机针孔模型镜头入瞳的中心,其间距离为 $L$ 。 $R$ 代表参考平面, $L_0$ 为工作距离 $OE_c$ 的长度, $E$ 为被

测物体表面任意一点。从投影仪投出的光线通过点 $E$ 交于参考平面 $R$ 上一点 $F$ ,因此点 $E$ 和点 $F$ 具有相同的相位信息。根据三角形 $E_pEE_c$ 和 $FED$ 相似,得到如下关系:

$$\frac{DF}{L} = \frac{\Delta z}{L_0 - \Delta z} \quad (1)$$

式中: $\Delta z$ 是被测物体上点 $E$ 相对于参考平面 $R$ 的深度值, $DF$ 可以根据 $DF = \Delta\varphi P_0/2\pi$ 求得,其中 $\Delta\varphi$ 是相位变化, $P_0$ 是条纹周期。因此当条纹均匀分布于参考平面时,深度与相位间的关系可表示如下:

$$\Delta\varphi = 2\pi L\Delta z/P_0(L_0 - \Delta z) \quad (2)$$

当 $L_0 \gg \Delta z$ 时,式(2)可以简化为:

$$\Delta z = P_0 L_0 \Delta\varphi / 2\pi L \quad (3)$$

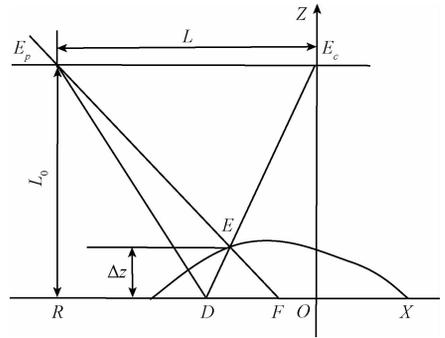


图1 三维测量系统结构

Fig.1 Schematic diagram of 3D imaging system

由此可知,彩色条纹投影术的基本原理包括条纹图产生和投影、被测物体表面变形彩色条纹图采集、折叠相位和展开相位计算、三维标定、绝对相位和三维形貌转换。首先通过离焦原理、光栅、激光干涉仪或计算机生成条纹图像,利用投影设备投射彩色条纹到被测物体表面;条纹图像由于受到被测物体表面形状的调制产生变形,彩色成像设备从另一个角度采集变形的条纹图;通过相位解算得到展开相位;标定系统得到相位图与三维数据间对应关系,最终得到物体的三维形貌数据。彩色条纹投影术由于同时采用多个颜色通道,具有单次获取信息量大、测量速度快等优点。

### 1.1 三维测量硬件系统

根据上述基于彩色条纹投影术的三维形貌测量原理,系统硬件组成主要包括计算机、彩色相机、数字投影仪,其中影响系统精度的两个关键因素是用于图像采集的彩色相机以及用于图像投影的数字投影仪。

#### 1.1.1 彩色相机(CCD、CMOS)

相机应用光学成像原理,通过镜头将被摄物体成像在感光材料上,主要问题成为感光材料的速度、分辨率、动态范围以及精度。19世纪以来,以银盐胶片为感光材料的传统相机实现了摄影速度和成像清晰度的发展和统一<sup>[32]</sup>。而随着科技的发展,传统相机进入数字化时

代。数字相机使用特殊的光敏芯片 CCD 和互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 取代传统相机的卤化银感光胶片, 将被景物反射回来的光信号转化为电信号, 经相机内部的微处理器处理后产生数字图像, 使相机从纯光学、机械结构演变为光学、机械和电子三位一体的架构<sup>[33]</sup>。相较于传统相机, 数字相机易存储、易处理、可复现、经济环保且图像分辨率仍在不断提高<sup>[34]</sup>, 在商业生产和科研领域得到了广泛应用。

### 1.1.2 数字投影仪 (DLP, LCoS)

在光学三维形貌测量系统中, 通常需要改变光栅频率, 投影多幅条纹图, 故投影仪对于系统的总体精度非常重要, 其主要参数包括均匀性、调制度、速度、亮度以及强度剖面。液晶显示屏 (liquid crystal display, LCD) 采用非相干光使得每个像素都得以定位, 优势在于相移的高速度和光栅频率的可变性, 不足在于其低分辨率以及光源的浪费。为了解决这些问题, 出现了气体等离子显示器 (gas plasma display, GPD)、硅基液晶 (liquid crystal on silicon, LCoS) 以及 DMD<sup>[35]</sup>。由于投影仪的实际性能决定于芯片的技术特点, 故相对 LCD 和 GPD 来讲, LCoS 和基于 DMD 的数学光处理技术 (digital light processing, DLP) 数字投影仪色彩丰富、画面亮度高、网格化较少且更加节能; 然而, 相较 LCoS, DLP 在对比度上更具优势。DLP 具有 RGB 三颜色通道, 可以同时投影 3 幅条纹图像, 或 3 幅相移图像, 使得相移技术对环境扰动不敏感<sup>[36]</sup>。

### 1.2 数字条纹投影技术

数字条纹投影技术, 即利用数字投影仪来投射光栅条纹的技术。进行三维形貌测量时, 计算机控制投影仪生成条纹图并投影至被测物体表面, 受被测物体表面高度调制, 条纹产生变形, 彩色 CCD 相机采集变形条纹图。通过对条纹图进行解析, 得到物体表面的三维信息。由于投影条纹经由计算机产生, 故其形状可以根据实际需要自主变换, 较常用的包括正弦波<sup>[4]</sup>、三角波<sup>[7-8]</sup>、梯形波<sup>[9]</sup>、锯齿波<sup>[10]</sup>等。总之, 数字条纹投影技术具有如下优点: 1) 测量原理简单, 测量的方法基于三角测量原理, 易于理解运算; 2) 所需设备成本低, 只需投影仪、CCD 相机以及计算机即可; 3) 测量速度快, 随着投影和成像技术的高速发展, 投影切换速度与图像获取速度越来越快, 完全可以满足快速实时测量的需求。同时数字条纹投影术也存在不足, 比如相机投影的视场大小有限制, 且其光学镜头会引进畸变, 影响测量精度。

### 1.3 红绿蓝彩色条纹投影

彩色成像和投影系统的出现, 为并行多颜色通道三维成像系统提供了新的研究方向。一幅彩色图像包含红、绿、蓝 3 个颜色通道, 可以作为编码条纹图的载体。

从一个颜色通道提取的条纹图可以看作一幅灰度图像, 因此一幅彩色条纹图像包含的信息是一幅灰度图像的 3 倍。

Sitnik R<sup>[37]</sup> 假设三维形貌随时间变化, 提出一个基于单幅图像的四维形貌测量系统。投影条纹由一个正弦灰度条纹和一个彩色编码图案构成, 正弦灰度条纹用来计算相位信息, 彩色编码图案用来决定条纹级次。Chen H. Y. 等人<sup>[27]</sup> 和 Su W. H.<sup>[28]</sup> 提出编码彩色条纹图案和正弦灰度条纹到同一幅图像。彩色条纹图案决定每个正弦条纹的绝对级次, 正弦条纹决定相位信息。但是条纹图案和正弦条纹在每个像素点的重叠性使得提取出来的彩色条纹图案和正弦条纹调制度较低, 难以识别出彩色条纹边缘, 获取精确的相位信息。为了测量动态和表面不连续物体, Su W. H.<sup>[26]</sup> 提出通过重叠每个像素位置的正弦条纹、二值条纹和彩色网格到一幅彩色图像进行编码。然而, 二值条纹和彩色网格的应用使得灰度级更低, 边缘也更难识别。为了解决这些问题, Wust C 等人<sup>[20]</sup>、Huang P. S. 等人<sup>[23]</sup> 和 Su W. H.<sup>[28]</sup> 提出编码 3 个具有  $2\pi/3$  相移的正弦条纹到彩色图像的红、绿、蓝颜色通道<sup>[20,23,38]</sup>, 通过 3 步相移算法计算得到折叠相位信息。Zhang Z. H. 等人<sup>[29]</sup> 提出编码满足最佳 3 条纹选择数目的 3 组正弦条纹到彩色图像的 3 个通道, 利用傅里叶变换 (Fourier transform, FT) 算法得到折叠相位图。最佳 3 条纹选择算法解决了条纹级次模糊问题, 得到展开相位图, 同时从三通道的零频提取出被测物体的颜色信息。Karpinsky N 等人<sup>[39]</sup> 提出调制正弦和余弦条纹图到红色和绿色通道得到折叠相位, 蓝色通道作为阶梯函数决定条纹级次, 得到展开相位, 因此即使被测物体表面不连续, 也可以得到准确的展开相位。彩色条纹投影术中两个突出问题是颜色通道间的色差与串扰。

### 1.4 条纹图提取

在彩色条纹投影中, 红、绿、蓝颜色通道作为载体编码独立的条纹, 需要将正弦条纹从所采集彩色图像的 3 个颜色通道中提取出来, 进行相位解算。然而, 为避免颜色盲区的出现, 许多 DLP 投影仪和 CCD 相机在颜色通道间设计光谱重叠, 因此 3 个颜色通道间存在耦合现象, 即串扰不可避免, 不能从三颜色通道提取到保持正弦形状的条纹图。另外, 由于相机和投影仪镜头对不同波长光线的折射率不同, 彩色条纹的每一种色光无法聚焦在光轴同一点, 图像存在色差。串扰和色差都会对相位计算产生影响。

#### 1.4.1 串扰消除

彩色 CCD 相机和彩色 DLP 投影仪是条纹投影系统中不可或缺的硬件构成, 大多数彩色 CCD 相机和 DLP 投影仪为了避免出现盲区, 将红、绿、蓝 3 个颜色通道的光谱设计为相互重叠, 这就使得在进行测量时, 3 个通道的信息相互干扰, 严重影响了所采集变形条纹图的正弦形状以及测量精度<sup>[29-30]</sup>。

由于彩色 CCD 相机和彩色 DLP 投影仪的颜色通道设计为固定重叠,所以可以通过补偿干扰部分消除其对测量结果的影响。根据以上思想,颜色通道间相互影响的关系需要预先确定。邹海华等人<sup>[40]</sup>提出采用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)解决串扰问题。由于其信号分解的依据是数据本身的时间尺度,不需提前设定基函数,故在非平稳和非线性数据的处理上,具有特别明显的优势。但是当串扰模型较为复杂时,很难判断造成串扰的本征模函数,因而影响分离效果。Huang P. S. 等人<sup>[23]</sup>假设某一颜色通道泄露到其他颜色通道的能量与该通道自有的能量呈一定的比例关系,提出一种串扰系数标定法,通过计算颜色通道间的串扰系数进行串扰补偿。此法每次测量不同物体均需进行串扰标定,且环境改变、物体颜色纹理改变都会影响补偿效果。Hu Y. S. 等人<sup>[41]</sup>基于盲信号分离算法提出一种标定方法来计算颜色分层矩阵。然而,由于需要额外的图像来确定颜色耦合系数或分层矩阵,比较费时。而且,如果被测物体或者系统环境有所改变,标定过程需要重新进行。为了解决这些问题,其又提出一种盲颜色隔离方法(blind color isolation, BCI),在没有任何系统先验知识,也不使用测试信号的情况下自适应确定分层矩阵<sup>[42]</sup>。然而,这种算法运算复杂度高,由于迭代技术的应用造成的收敛稳定性差。Ma S 等人<sup>[43]</sup>基于各向同性的  $n$  维条纹图归一化(isotropic  $n$ -dimensional fringe pattern normalization, INFPN)和载体挤压干涉法(carrier squeezing interferometry, CSI)提出一种方法来补偿由于串扰引起的幅值和相位误差,然而其测量精度有待提高。Zhang Z. H. 等人<sup>[44]</sup>提出将不同波长的条纹调制到不同的颜色通道,从而将各颜色通道的信息分离开来。此方法不需要对串扰系数进行提前标定,因此非常适合动态物体的实时三维测量,但是只有两个颜色通道的频率具有较大间隔时,才能保证测量范围足够大,才有可能避免信号混叠<sup>[45]</sup>。

#### 1.4.2 色差补偿

为了测量彩色物体,结合不同颜色通道间的数据从而精确量化测量结果非常重要。然而,传统镜头存在色散,从而导致色差。色差可以分为径向色差和横向色差。径向色差影响条纹的清晰度,横向色差影响采集条纹图像的条纹数。颜色通道间条纹的任何畸变都会引起重建三维形貌的误差。

对于彩色条纹投影系统而言,投影仪和 CCD 相机的镜头是产生色差的主要原因。采用具有高质量透镜的相机和投影仪可以减少色差,但是不能消除横向色差以及由此引入的相位计算偏差。这个问题可以分别通过硬件或软件的方法进行补偿<sup>[22-24, 29]</sup>。Dollond J 等人<sup>[46]</sup>通过结合正透镜和负透镜提出第 1 个消色差透镜。目前,可

以利用复消色差透镜(apochromatic lens, APO)聚焦 3 种波长到成像平面上同一点<sup>[47]</sup>。然而,昂贵的低色散萤石、精确的光学计算和镜头组装使得 APO 镜头的结构更加复杂,研究周期长,而且这种方法不能完全消除色差。哈佛大学工程与应用科学学院最近制作了一种完全平整、超薄的镜头,可以在超薄、小型化的设备上实现即时色差校正,可应用到三维形貌测量的色差矫正。软件方法方面,Stec P 等人<sup>[48]</sup>采用带有标识点的标定板作为参考面来计算不同颜色参考点的位移差,根据特定的修正比例来修正色差;然而其精度依赖于标识点的数目。Zhang Z. H. 等人<sup>[49]</sup>提出一种线性补偿方法来补偿由彩色条纹投影系统中投影和成像镜头引起的横向色差,但是其只适用于最佳 3 条纹选择算法。Willson R. G. 等人<sup>[50]</sup>设计了一种光学防抖镜头控制系统标定色差,可以得到红绿蓝通道最好的聚焦距离和相对放大系数,但是由于系统很复杂,很难保证精度。Boult T. E. 等人<sup>[51]</sup>将图像变形技术运用到色差补偿。这个方法需要外部的参考物体作为变形标准,特征点越多,处理效果越好。Kaufmann V 等人<sup>[52]</sup>借助黑色和白色三角网格确定像素位置和颜色通道偏差之间的关系,采用最小二乘拟合来有效补偿径向色差,其精度受到三角网格频率的影响。Mallon J 等人<sup>[53]</sup>通过利用高密度标定板标定不同颜色通道间的横向色差,但是不能实现全场标定。Chang J 等人<sup>[54]</sup>提出利用伪彩色滤波来解决横向色差和径向色差引起的图像模糊问题。虽然这个方法可以矫正色差造成的重影,但其过程非常复杂,一些参数还需靠经验进行取值。为此 Liu X. H. 等人<sup>[55]</sup>提出采用满足最佳 3 条纹选择数目的闭合圆环正弦条纹图通过展开相位来全场标定颜色通道间的横向色差。

#### 1.5 相位计算

相位测量法的基本原理是解算受到被测物体表面形状调制的变形条纹图的相位,并通过相位与高度的映射关系,从条纹图中恢复出被测物体的三维形貌。包括折叠相位计算和展开相位计算。

##### 1.5.1 折叠相位

据引言所述,存在许多相位解算方法。目前成熟的技术主要包括莫尔条纹法、相移法和属于频域变换法的傅里叶变换法<sup>[56]</sup>。

Takasaki H<sup>[57]</sup>于 1970 年首次提出莫尔条纹法。该方法通过基准条纹光栅和被测物体高度调制的变形条纹光栅重合形成的莫尔条纹,描绘物体的等高线,解算物体的三维形貌。缺陷在于硬件结构调整困难,而且莫尔条纹的质量会严重影响三维形貌测量精度<sup>[58]</sup>。另外,莫尔条纹映射的距离无正负之分,因此不能自动识别物体表面的凹凸性,需要操作人员人为确定,不能满足现代化自动测量技术要求。

相移技术最早应用于激光干涉测量领域。Srinivasan

V 等人<sup>[59]</sup>于1984年首次将相移干涉术(phase-shift interferometry, PSI)应用于物体三维形貌测量,即相位测量轮廓术(phase-shift profilometry, PSP),也称相移法。目前主要包括标准 $N$ 步相移法或等间距满周期法、 $N$ 帧平均算法、 $N+1$ 步相移算法以及任意等步长相移算法<sup>[60-63]</sup>。相移法通过获取多幅全场条纹图像和相移时序解算相位,稳定性和抗噪声能力强,是精度最高的相位解算算法之一。但相移机构会影响测量精度,并且由于需要连续采集多幅条纹图,被测物体需要在采集过程中保持静止,故不适用于动态物体的形貌测量。为了避免这个问题,提高采集效率,Zhang Z. H. 等人提出将其应用到彩色条纹投影技术,即将彩色图像的红、绿、蓝颜色通道作为载体编码3幅存在相移的条纹图到一幅彩色图像<sup>[20,23,38]</sup>。

Takeda M 等人<sup>[64]</sup>于1983年首次将傅里叶变换法引入条纹图相位解算,并将这种三维形貌测量技术称为傅里叶变换轮廓术。其只需一幅条纹图,通过提取一次谐波的频谱,采用傅里叶逆变换重建相位信息<sup>[15,65]</sup>。与其他相位解算方法相比采集速度快,所需设备简单,可广泛应用于实时及动态测量领域。但频谱泄露和频谱混叠使其不适合测量具有大梯度表面以及高度不连续的物体,为了从其他频谱中分离出基频,必须限制物体高度调制引起的相位测量梯度<sup>[66]</sup>。为了克服局限性,傅里叶变换被广泛研究以提升测量精度<sup>[67-69]</sup>。Chen W. J. 等人<sup>[66]</sup>通过采用窗式函数来消除傅里叶中的零频,使得测量范围扩大到传统傅里叶的3倍。Vander R 等人<sup>[67]</sup>利用两幅互补的干涉图与传统傅里叶相结合,通过两个因子来提高重建图像的空间分辨率。

窗式傅里叶变换法(windowed Fourier transform, WFT)作为傅里叶变换法的理论延伸,可以解决傅里叶变换缺乏局域信息处理能力和频谱混叠等问题<sup>[70]</sup>。Kemaq Q 等人<sup>[16-19]</sup>提出采用窗式傅里叶变换来解调条纹图。通过窗口函数遍历图像,截取局部条纹图像进行傅里叶变换,更好的体现信号的时频性能。虽然可以有效抑制频谱混叠和条纹图噪声,得到很好测量精度,但是窗口大小需预先设定,使得时/空-频域的分辨率固定。为了弥补上述不足,研究人员提出多种方法来自动选择窗口尺寸<sup>[17,19,71-73]</sup>。比如郑素珍等人<sup>[74-75]</sup>实现了小波脊引导以及 $S$ 变换引导的自适应窗口调整。翁嘉文等人<sup>[76]</sup>提出了窗口尺度因子与条纹周期分布相关的伸缩窗追踪技术(regularized phase tracking, RPT)。针对窗口在图像边缘时条纹不完整引起的计算误差,其后又研究提出了 Gerchberg 迭代法<sup>[77]</sup>对条纹外插,提升了测量精度。

小波变换(wavelet transform, WT)具有多分辨率的特点,可自主选择窗口形状分析信号,在时域和频域都具有很强的局部分析能力。在具有缩放平移特性的小波函数的作用下,图像的相位或频率信息可以转换到频谱的小

波脊中。Zhong J. G. 等人<sup>[78]</sup>首先将此方法引入到条纹相位解算。经过多年研究发展,目前已存方法主要包括直接相位计算方法<sup>[79]</sup>和梯度累加方法<sup>[80]</sup>等。Gdeisat M. A. 等人<sup>[81]</sup>已经证明前者效果更好。对于提取小波脊的问题,最具代表性的方法是最大值提取法<sup>[82]</sup>和代价函数法<sup>[83]</sup>。在噪声环境下,代价函数法具有更好的稳定性和精度<sup>[84]</sup>。为了得到鲁棒的相位信息,多种改进的小波变换算法被广泛研究<sup>[85-87]</sup>。

其他解算相位的方法还很多,比如归一化相位追踪<sup>[88-90]</sup>、空间相移技术(spatial phase-shifting, SPS)<sup>[37,91]</sup>、局部模型拟合技术(local model fitting, LMF)<sup>[92-94]</sup>,在此不再做详细阐述。

### 1.5.2 展开相位

相位法三维测量技术均采用复数域内的反正切函数获取相位信息,所获得的相位信息被截断在 $[-\pi, \pi]$ ,是不连续的折叠相位。要与三维形貌相对应,需要采用相位展开算法将不连续的折叠相位恢复成连续的相位分布。

相位展开算法分为时间相位展开算法和空间相位展开算法<sup>[95-97]</sup>。例如最小二乘法、多频相位展开法等。经典的空间相位展开算法通过将相邻点的折叠相位简单作差进行相位展开,是逐点累积的过程,会造成展开相位误差的累积和传播<sup>[98]</sup>。此外,由噪声或阴影等干扰造成的不可靠数据点可能会被误认为相位间断点,空间相位方法无法准确辨识。与空间相位展开算法不同,时间相位展开算法投射可差频的条纹图到被测物体表面。通过拍摄不同空间频率下的变形条纹图,将各点的相位在时间序列上分别展开。此种方法不受相邻点与展开路径的影响,有效避免了空间相位展开算法中误差的积累和传播,且其适用于具有不连续表面物体的相位测量。但是如果差频法的波长比过大,会将随机噪声误差放大。为了获得精确的展开相位,在差频过程中,必须将波长比控制在允许变化范围内。为解决此问题,Towers C. E. 等人<sup>[24]</sup>提出最佳三条纹选择算法。3组条纹图的频率需分别设定为 $N, N-1, N-\sqrt{N}$ 。差频产生的条纹可以覆盖整个视场,可以很好地解决条纹级次模糊的问题,而且在相位解调过程中,各个像素的相位展开运算是相互独立的,可以使得所获条纹级次具有最大的可靠性。

## 2 三维形貌数据

光学三维成像系统的建立是为了获得被测物体的三维形貌。这就需要首先对系统进行标定,即确立已知物点和像点之间的对应关系模型,进而将二维坐标对应到物点的空间三维坐标,因此,系统标定是三维成像系统进行形貌测量不可缺少的一个部分。然而,系统标定之前,首先需要确定 CCD 相机和投影仪的内部参数和外部参

数,以矫正采集过程中由像差引起的图像畸变,即对 CCD 相机和投影仪进行标定。

## 2.1 相机标定

相机标定,顾名思义,就是建立相机成像的几何模型,以获得被测物体的空间三维几何信息。相机成像的几何模型是光学成像几何关系的简化,针孔成像模型由于原理简单成为相机标定算法的基本模型<sup>[99]</sup>。若适当考虑相机透镜自身的畸变,即能较精确地反映成像过程,满足很多应用的精度要求。相机成像的几何模型包括外部参数和内部参数,外部参数是指相机在参考坐标系中的空间位置和取向,内部参数是指相机自身具有的几何光学参数,而确定参数的过程即相机标定。在三维成像系统的标定过程中,相机标定的精度直接影响到所采集图像的准确性与可靠性,因此相机标定是之后其他工作顺利进行的前提。

进行相机标定时,所有需要标定物体作参考的方法都需要预先得知标定物体的结构及尺寸,通过估算标定物体上面已知标识点的三维坐标与像素坐标之间的约束关系,得到相机模型的内参以及外参。Hammarstedt P 等人<sup>[100]</sup>提出使用由若干个距离已知点构成的一维物体进行相机标定的技术。在标定时固定某一个定点,变换位姿拍摄至少 6 幅图像,使用最大似然和闭合解估计算法进行计算,标定出相机的内外部参数。此方法不仅标定物体简单,在多摄像机环境下,更是便于多个相机同时在不同的角度进行拍摄,不存在互相遮挡问题。然而,其对一维物体的位姿变换有一定要求,加大了标定的复杂度。

以针孔成像模型为基础,Zhang ZH. Y. 等人<sup>[101]</sup>提出一种介于自标定与传统标定之间的相机标定方法。基于此原理,发展了 MATLAB 相机标定工具箱,标定精度 0.03 像素,可以满足一般高精度三维测量的需求<sup>[102]</sup>。

Zhang Z. H. 等人<sup>[103]</sup>设计并制作了表面具有等间距圆环标识点以及黑白棋盘格的瓷质标定平板。分别将其在相机视场范围内摆放几个位置,通过提取棋盘格角点及圆环中心,计算相机内参,修正相机镜头产生的畸变,完成标定。以上所述均以张正友相机标定法为基础,标定精度取决于标定板的制作精度及提取标识点中心或角点算法的准确度。采用圆环标定板进行相机标定的方法需要椭圆拟合算法来提取标识点中心,但由于相机的透视投影误差,提取的中心会产生偏差,且提取的过程相当复杂。而基于棋盘格的标定方法仅需提取棋盘格的 4 个角点,可以满足三维测量的高精度需求。

## 2.2 投影仪标定

在结构光测量系统中,数字投影仪镜头光学畸变引起的误差会影响到整个系统的性能和精度,因此数字投影仪在测量之前应当进行标定。

投影系统的光学结构可以看作成像系统的逆向结

构,那么已有的相机标定方法就不能直接应用于标定投影仪。为了估计投影镜头的畸变参数,通常采用提前标定好的 CCD 相机来采集白色平板上的投影条纹<sup>[104]</sup>。然而,投影仪的标定结果会受到相机标定精度的严重影响。文献[105-107]采用标定板上标识点在投影仪图像空间中的位置作参考,由此计算投影仪和相机间的单应性,进而求解投影仪参数。文献[108]投影条纹到具有标识点的标定板上,通过条纹分析得到单应性。最近,文献[109-110]采用分光器建立虚拟共轴结构,通过表面带有离散圆环的标定板以及相位解算方法,独立计算投影仪像素的畸变。另外,一些多投影仪成像系统的标定方法也有所研究<sup>[103,111-113]</sup>。已有标定投影仪畸变的方法依赖于标定平板和摄影测量法,因此标定的性能受到平板质量和成像系统的影响,而且传统成像镜头畸变模型对投影镜头并不适用,最终影响测量结果。为了避免上述不足,Liu M 等人<sup>[114]</sup>通过利用二极管直接检测投影仪发射出来的光提出一种投影仪标定方法。通过分析光电模块的输出序列,寻找成像面上的理想点和其对应的物面上点之间的关系。这种方法不仅可以避免传统方法的诸多不足,达到一个更高的精度,也可以应用到评价其他光学投影系统的几何光学性能上。

Drareni J 等人<sup>[108]</sup>利用投影仪和相机成像面之间的单应矩阵提出一个基本的投影仪标定方法。Orghidan R 等人<sup>[115]</sup>通过计算消失点提出一个相似的方法。基于虚拟特征提取,一些经典的投影仪标定方法被提出(考虑了非线性投影畸变)<sup>[104,106,116]</sup>。为了防止相机畸变影响标定误差,基于空间相位分析的许多方法也被提出并加以研究<sup>[105,110,117]</sup>。也有一些隐式标定方法将投影仪和相机看作一个整体系统来获取更精确的结果<sup>[103,118]</sup>。除去基于多项式失真表示的方法<sup>[103,114]</sup>和查找表表示的方法<sup>[118]</sup>,几乎全部的标定方法都会引入投影仪畸变。

## 2.3 系统标定

三维标定是基于彩色条纹投影的三维形貌测量中至关重要的一步。三维系统标定分为深度方向标定,以及横向标定,深度方向标定建立绝对相位和深度 Z 间的关系,横向标定建立像素点和 XY 坐标的关系。

已有基于条纹投影系统的三维标定方法可以分为三大类:基于模型的方法<sup>[119]</sup>、基于多项式的方法<sup>[120-121]</sup>和基于最小二乘的方法<sup>[122-123]</sup>。已有建立绝对相位和三维形貌数据之间关系的方法大多需要高精度水平移动台或标准三维量块。当采用移动台时,标定板需要在水平移动台上精确放置,因此标定过程非常繁琐,大多在实验室的光学平台上实现;当采用三维量块时,量块的放置应当满足特定的条件,很难在特定场合中完成标定程序。因此,已有的三维标定计算受限于测量环境的复杂性,难以实现实际现场的标定和测量。为解决这个问题,Du H 等人<sup>[124]</sup>基于非均匀条纹投影,提出一种采用表面带有已知

距离离散圆环的白色平板标定三维成像系统的方法。由于投影在垂直成像光轴平面上的条纹具有相同条纹周期,故可将每行的系统参数设置成相同值,降低了查找表的复杂性。之后,采用相同的白色平板和棋盘格,研究了基于均匀条纹投影的三维成像系统的精确标定,建立绝对相位和深度数据之间的关系<sup>[125]</sup>。虽然白色平板和棋盘格可在测量区域任意放置,但还是具有诸多不足:首先,所有标识点中心通过手动操作提取,使得此法费时费力;其次,像素位置和横向坐标之间的关系没有确定,因此不是完全意义上的三维标定;最后,需要两个标定板,即一个棋盘格和一个表面带有已知距离标识的白色平板。这样,此标定方法不能在实际应用现场自动建立相位图和三维形貌之间的关系。

为解决这些问题,Zhang Z. H. 等人<sup>[103]</sup>提出采用一个表面带有已知距离离散圆环标识的白色标定板来确定相机参数、绝对相位和深度之间以及像素位置和XY坐标之间的关系。不仅实现了完全意义上的三维标定,而且操作过程简易灵活,适用于非实验室环境。

### 3 未来发展方向

虽然研究者们已经在基于彩色条纹投影术的三维形貌测量领域做了大量工作,但还有一些问题需要更深入的研究。主要包括非可见光通道的应用、彩色纹理数据的获取、颜色通道间的串扰以及色差。

#### 3.1 串扰

对于彩色 CCD 相机和 DLP 投影仪,已存的方法可以在一定程度上减少串扰。但是目前完全消除颜色通道间串扰的方法效果并不理想,仍然缺乏一种简单、有效的串扰消除方法。

#### 3.2 色差

DLP 投影仪和彩色 CCD 相机的镜头是彩色条纹投影系统产生色差的主要原因,运用具有高质量镜头的投影仪和相机可以减少,但是目前还不能消除色差。随着加工精度的提高,镜头的颜色差异主要由横向色差引起。这样,当需要高精度和高速度的时候,研究如何有效减少甚至消除横向色差就非常必要。

#### 3.3 非可见光通道

彩色条纹投影术利用红、绿、蓝3个颜色通道同时获取多幅条纹图,大大提高了采集效率,但是,实际应用中制约该项技术发展的因素一直存在:首先,当红、绿、蓝3种颜色的条纹被同时投射到物体表面时,物体表面的颜色以及纹理会影响物体三维形貌的整体测量精度;另外,大多投影仪和 CCD 相机的3个颜色通道间存在串扰,目前难以将其中的信息完全独立分开。因此,为了解决上述问题,可以考虑采用非可见光通道,比如对环境光不敏感的红外通道作为调制条纹的载体。

### 3.4 彩色纹理数据的获取

三维形貌测量技术飞速发展,有些物体具有彩色的表面,同时获取其三维形貌及彩色纹理在诸如3D游戏、逆向工程以及文物保护等领域具有极大的需求。尽管研究人员已经成功从条纹图中提取得到彩色纹理,但是相比物体具有的真实纹理,还是有很大差距<sup>[25,29-31]</sup>。另外,可通过调整白平衡,投影单色光获得物体表面自然的彩色纹理信息。但彩色条纹投影系统具有3个通道,投射单色光需要关闭其他两个通道,因此不适合对运动物体进行测量,故需要结合系统硬件条件,发展获取运动物体颜色纹理的方法。

## 4 具体实例

彩色条纹投影术可用以获取物体表面的三维形貌及彩色纹理,本文以手掌和台阶为例进行说明。

#### 4.1 三维手掌测量

以手掌形状的三维形貌测量为例,通过计算机软件产生一幅复合彩色条纹图,经由DLP红绿蓝颜色通道将其投影到被测手掌表面。编码3幅满足最佳条纹选择个数64、63、56的条纹图到彩色图像的红绿蓝颜色通道,同一通道条纹彼此间有 $\pi/2$ 相移的复合彩色条纹图,如图2所示,产生的条纹图像经由DLP投影仪投射到人体手掌表面,受到手掌表面高度的调制,条纹产生变形,处于另一角度的CCD相机采集变形的条纹图,如图3所示。各个颜色通道间的串扰和色差补偿之后<sup>[24,49]</sup>,可以从采集的彩色图像中提取12幅条纹图。分别运用4步相移算法进行处理,得到3幅折叠相位图,如图4所示。图5所示为通过最佳3条纹选择算法得到的展开相位图<sup>[126-128]</sup>。图6所示为手掌表面的三维形貌图,图7所示为对应的纹理图。

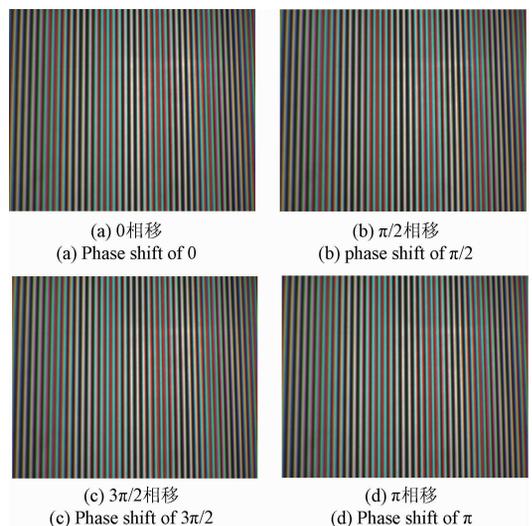


图2 四幅复合彩色条纹图,彼此间存在 $\pi/2$ 相移  
Fig. 2 Four composite RGB fringe pattern, in which phase shift of  $\pi/2$  exists each other

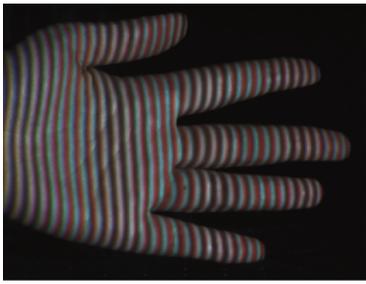


图 3 经手掌表面高度调制的复合彩色条纹图  
Fig. 3 A composite colour fringe pattern image on the palm surface



图 7 三维手掌纹理显示图  
Fig. 7 3D palm texture display chart with texture mapping method

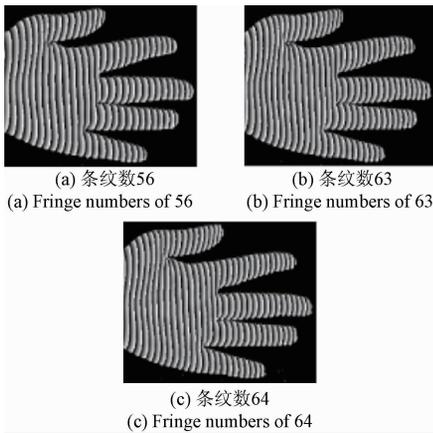


图 4 对应不同投影条纹数的手掌折叠相位图  
Fig. 4 Wrapped phase maps of palm corresponding to different projected fringe numbers



图 5 手掌展开相位图  
Fig. 5 Unwrapped phase map of palm

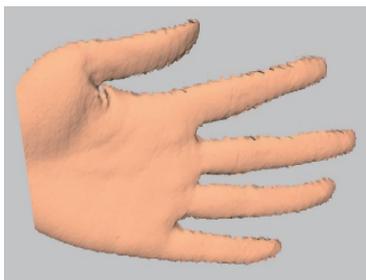


图 6 三维手掌光照显示图  
Fig. 6 3D palm light display chart with gradient shading method

### 4.2 台阶测量

在对已标定彩色条纹投影系统进行三维手掌测量的定性评价之后,另取刚性物体为例,对其进行定量评价。本文所用刚性物体是经过精密加工的具有 5 个平行面的台阶,采用具有  $1\ \mu$  精度的三坐标测量机对相邻台阶间距进行测量,将所得数据作为标准,与系统测量得到的台阶间距进行对比。

将被测台阶平面垂直于相机光轴放置,投影仪投射复合彩色条纹到台阶表面,相机采集的条纹图如图 8 所示。采用 4 步相移算法及最佳 3 条纹选择算法得到台阶面的绝对相位信息,如图 9 所示。台阶面上所有点的相对深度如图 10 所示。将所得值与三坐标测量机测得的标准值进行对比,结果如表 1 所示,可见最大绝对误差  $0.043\ \text{mm}$ ,体现了彩色条纹投影测量术的高精度,可以满足大多实际场合的需要。

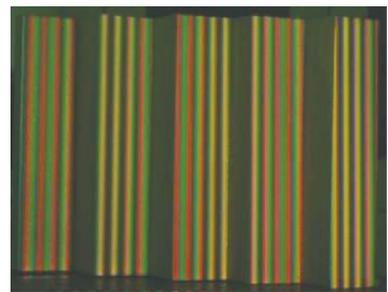


图 8 经台阶表面高度调制的复合彩色条纹图  
Fig. 8 A composite colour fringe pattern image on the step

表 1 台阶测量结果

Table 1 The results of measured step (mm)

标准间距	测量间距	绝对误差	标准误差
18.212	18.216	0.004	0.034
13.258	13.215	0.043	0.029
18.422	18.437	0.015	0.010
17.603	17.630	0.027	0.063

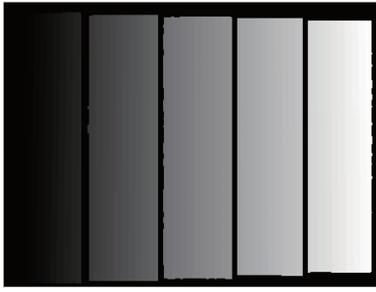


图9 台阶展开相位图

Fig.9 Unwrapped phase map of step

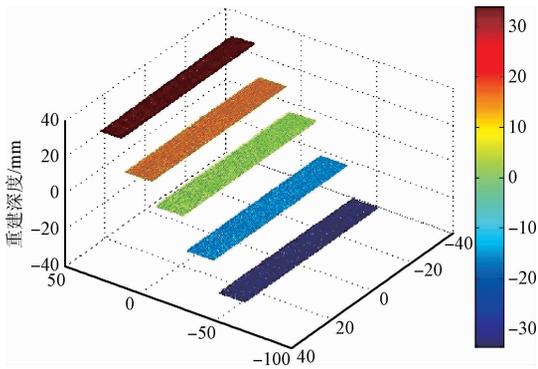


图10 台阶三维形貌图

Fig.10 3D shape of step

## 5 结 论

由于一些实际应用的巨大需求,比如医学成像、智能制造、航空航天、文物保护、医疗卫生以及安全行业,基于彩色条纹投影术的三维形貌测量方法越来越引人注目。三维形貌数据的获取受限于系统硬件的性能,无法精确获得物体的三维形貌。彩色投影成像系统以及彩色条纹投影术的出现为并行多颜色通道三维成像系统提供了新的研究方向。由于其所需采集条纹图像数量少,对震动噪声不敏感,因此适合精确测量运动物体。本文详细论述了基于彩色条纹投影术的三维形貌数据测量研究现状,包括彩色条纹投影术的基本原理、彩色条纹调制和解调时的相关技术、三维成像系统的标定。同时,本文也指出未来的研究方向,推进彩色条纹投影术测量三维形貌到实际应用领域的发展。随着彩色成像器件的飞速发展,如果色差和串扰能够彻底消除,结合非可见光获取物体表面三维形貌数据和彩色纹理,彩色条纹投影技术将是一个很有前景的研究方向。

## 参考文献

[1] CHEN F, BROWN G M, SONG M. Overview of 3-D shape measurement using optical methods [J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(1):10-22.

- [2] BLAIS F. Review of 20 years of range sensor development[J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2004, 13(1):228-240.
- [3] GORTHI S S, RASTOGI P. Fringe projection techniques; Whither we are? [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2010, 48(2):133-140.
- [4] ZHANG Z H, ZHANG D, PENG X. Performance analysis of a 3D full-field sensor based on fringe projection[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2004, 42(3):341-353.
- [5] SU X Y, ZHOU W S, BALLY G V, et al. Automated phase-measuring profilometry using defocused projection of a Ronchi grating[J]. *Optics Communications*, 1992, 94(6):561-573.
- [6] LEI SH Y, ZHANG S. Flexible 3-D shape measurement using projector defocusing [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(20):3080-3082.
- [7] JIA P R, KOFMAN J, ENGLISH C. Two-step triangular-pattern phase-shifting method for three-dimensional object-shape measurement [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(8):083201.
- [8] JIA P R, KOFMAN J, ENGLISH C. Multiple-step triangular-pattern phase shifting and the influence of number of steps and pitch on measurement accuracy[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(16):3253-3262.
- [9] HUANG P S, ZHANG S, CHIANG F P. Trapezoidal phase-shifting method for three-dimensional shape measurement[J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(12):123601.
- [10] CHEN L J, QUAN CH G, TAY C J, et al. Shape measurement using one frame projected sawtooth fringe pattern[J]. *Optics Communications*, 2005, 246(4-6):275-284.
- [11] ZHANG S. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2010, 48(2):149-158.
- [12] SALVI J, FERNANDEZ S, PRIBANIC T, et al. A state of the art in structured light patterns for surface profilometry[J]. *Pattern Recognition*, 2010, 43(8):2666-2680.
- [13] 张越一. 基于结构光的快速高精度深度感知[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2015.  
ZHANG Y Y. Structured light based fast and high accuracy depth sensing[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.
- [14] CREATH K. V Phase-measurement interferometry techniques[J]. *Progress in Optics*, 1988(26):349-393.
- [15] SU X Y, CHEN W J. Fourier transform profilometry: A

- review [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2001, 35(5):263-284.
- [16] KEMAO Q. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(13):2695-2702.
- [17] QIAN K. Two-dimensional windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: Principles, applications and implementations [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2007, 45(2):304-317.
- [18] QIAN K, FU Y, LIU Q, et al. Generalized three-dimensional windowed Fourier transform for fringe analysis [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(14):2121-2123.
- [19] FERNANDEZ S, GDEISAT M A, SALVI J, et al. Automatic window size selection in Windowed Fourier Transform for 3D reconstruction using adapted mother wavelets [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(12):2797-2807.
- [20] WUST C, CAPSOM D W. Surface profile measurement using color fringe projection [J]. *Machine Vision and Applications*, 1991, 4(3):193-203.
- [21] PFORTNER A, SCHWIDER J. Red-green-blue interferometer for the metrology of discontinuous structures [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(4):667-73.
- [22] HUANG P S, ZHANG CH P, CHIANG F P. High-speed 3-D shape measurement based on digital fringe projection [J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(1):163-168.
- [23] HUANG P S, HU Q Y, JIN F, et al. Color-encoded digital fringe projection technique for high-speed three-dimensional surface contouring [J]. *Optical Engineering*, 1999, 38(6):1065-1071.
- [24] 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.
- [25] ZHANG Z H, TOWERS C E, TOWERS D P. Phase and colour calculation in colour fringe projection [J]. *Journal of Optics A Pure & Applied Optics*, 2007, 9(6):S81-S86.
- [26] SU W H. Color-encoded fringe projection for 3D shape measurements [J]. *Optics Express*, 2007, 15(20):13167-13181.
- [27] CHEN H J, ZHANG J, LV D J, et al. 3-D shape measurement by composite pattern projection and hybrid processing [J]. *Optics Express*, 2007, 15(19):12318-12330.
- [28] SU W H. Projected fringe profilometry using the area-encoded algorithm for spatially isolated and dynamic objects [J]. *Optics Express*, 2008, 16(4):2590-2596.
- [29] 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.
- [30] ZHANG Z H, TOWERS C E, TOWERS D P. Robust color and shape measurement of full color artifacts by RGB fringe projection [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(2):160-168.
- [31] CHEN L C, LOC N X, ZHANG F H, et al. High-speed Fourier transform profilometry for reconstructing objects having arbitrary surface colours [J]. *Journal of Optics*, 2010, 12(9):095502.
- [32] 徐景毅. 十九世纪摄影技术发展及图像观念变化 [D]. 哈尔滨:黑龙江大学, 2007.
- XU J Y. The development of photography technology and the change of image concept in nineteenth century [D]. Harbin: Heilongjiang University, 2007.
- [33] 徐华, 周雅. 数字相机技术与发展—数字成像技术进步(二) [J]. *影像技术*, 2001(4):1-5.
- XU H, ZHOU Y. The development of digital camera—achievements of digital imaging technology [J]. *Image Technology*, 2001(4):1-5.
- [34] 岳优兰, 王琛. 摄影技术的发展与展望—从传统摄影到数字摄影 [J]. *焦作大学学报*, 2009, 23(1):82-83.
- YUE Y L, WANG SH. The development and prospect of photographic technology—from traditional photography to digital photography [J]. *Journal of Jiaozuo University*, 2009, 23(1):82-83.
- [35] ZHANG S. Handbook of 3D machine vision: Optical metrology and imaging [M]. CRC Press: Taylor & Francis Group, 2013.
- [36] ZHANG Z H. Review of single-shot 3D shape measurement by phase calculation-based fringe projection techniques [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2012, 50(8):1097-1106.
- [37] SITNIK R. Four-dimensional measurement by a single-frame structured light method [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(18):3344-3354.
- [38] 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.
- [39] KARPINSKY N, ZHANG S. Composite phase-shifting algorithm for three-dimensional shape compression [J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(6):402-402.
- [40] 邹海华, 赵宏, 周翔. 基于经验模式分解的三频彩色条纹投影轮廓术 [J]. *光学学报*, 2011, 31(8):

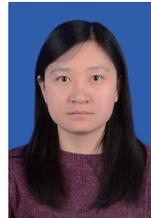
- 157-165.
- ZOU H H, ZHAO H, ZHOU X. Triple-frequency color-encoded fringe projection profilometry based on empirical mode decomposition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8):157-165.
- [41] HU Y S, XI J T, LI E B, et al. A calibration approach for decoupling colour cross-talk using nonlinear blind signal separation network [C]. *IEEE OMMAD*, 2005: 265-268.
- [42] HU Y S, XI J T, CHICHARO J, et al. Blind color isolation for color-channel-based fringe pattern profilometry using digital projection [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2007, 24(8):2372-2382.
- [43] MA S, ZHU R, QUAN C, et al. Blind phase error suppression for color-encoded digital fringe projection profilometry [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(7): 1662-1668.
- [44] ZHANG Z H, XU Y J, LIU Y. Crosstalk reduction of a color fringe projection system based on multi-frequency heterodyne principle [C]. *SPIE/COS Photonics Asia*, 2013, 9046: 904607-904607-8.
- [45] 徐永佳. 彩色三维成像系统的快速采集及颜色通道串扰消除研究[D]. 天津:河北工业大学, 2014.
- XU Y J. Research on fast color 3D imaging system and crosstalk compensation between color channels [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014.
- [46] DOLLOND J, SHORT J. An account of some experiments concerning the different refrangibility of light. By Mr. John Dollond. With a Letter from James Short, M. A. F. R. S. Acad. Reg. Suec. Soc [J]. *Philosophical Transactions (1683-1775)*, 50 (1757-1758):733-743.
- [47] HARIHARAN P. Achromatic lens combinations: A novel design approach [J]. *Optics & Laser Technology*, 1997, 29(4):217-219.
- [48] STEC P, MURRAY L, DRIMBAREAN A. Methods and apparatuses for addressing chromatic aberrations and purple fringing: EP, US8786709 [P]. 2014.
- [49] ZHANG Z H, TOWERS C E, TOWERS D P. Compensating lateral chromatic aberration of a colour fringe projection system for shape metrology [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2010, 48(2):159-165.
- [50] WILLSON R G, SHAFER S A. Active lens control for high precision computer imaging [C]. *IEEE Robotics and Automation*, Sacramento, 1991:2063-2070.
- [51] BOULT T E, WOLBERG G. Correcting chromatic aberrations using image warping [C]. *IEEE CVPR*, Champaign, 1992:684-687.
- [52] KAUFMANN V, LADSTADTER R. Elimination of color fringes in digital photographs caused by lateral chromatic aberration [C]. *International CIPA Symposium*, 2005: 403-408.
- [53] MALLON J, WHELAN P F. Calibration and removal of lateral chromatic aberration in images [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2007, 28(1):125-135.
- [54] CHANG J, KANG H, KANG M G. Correction of axial and lateral chromatic aberration with false color filtering [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(3): 1186.
- [55] LIU X H, HUANG SH J, ZHANG Z H, et al. Full-field calibration and compensation of lateral chromatic aberration based on unwrapped phase [C]. *SPIE/COS Photonics Asia*, 2016: 1002119.
- [56] 吕昌荣. 基于正弦相位调制光纤干涉条纹投射三维形貌测量方法研究[D]. 天津:天津大学, 2015.
- LV CH R. 3D shape measurement using Fiber optic interference fringe projection with integrating bucket modulation [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.
- [57] TAKASAKI H. Moiré topography [J]. *Applied Optics*, 1970, 9(6): 1467-1472.
- [58] SUZUKI M, KANAYA M. Applications of moiré topography measurement methods in industry [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 1988, 8(3-4): 171-188.
- [59] SRINIVASAN V, LIU H C, HALIOUS M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(18): 3105-3108.
- [60] SURREL Y. Phase stepping: A new self-calibrating algorithm [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(19): 3598-3600.
- [61] 侯立周, 强锡富. 几种任意步距干涉相移算法的误差分析与对比 [J]. *光学技术*, 1999(5): 7-10.
- HOU L ZH, QIANG X F. Analysis and comparison of errors in several phase-stepping algorithm with an arbitrary step [J]. *Optical Technique*, 1999(5): 7-10.
- [62] CARRE P. Installation et utilisation du comparateur photoélectrique et interférentiel du Bureau International des Poids et Mesures [J]. *Metrologia*, 1966, 2(1):13.
- [63] QIAN K, SHU F J, WU X P. Determination of the best phase step of the Carré algorithm in phase shifting interferometry [J]. *Measurement Science & Technology*, 2000, 11(8):1220-1223.
- [64] TAKEDA M, MUTOH K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes [J]. *Applied Optics*, 1983, 22(24): 3977-3982.
- [65] ESTEVE-TABOADA J J, MAS D, GARCIA J. Three-dimensional object recognition by fourier transform

- profilometry [J]. *Applied Optics*, 1999, 38 (22): 4760-4765.
- [66] CHEN W J, SU X Y, CAO Y, et al. Method for eliminating zero spectrum in Fourier transform profilometry[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2005, 43(11):1267-1276.
- [67] VANDER R, LIPSON S G, LEIZERSON I. Fourier fringe analysis with improved spatial resolution [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(34):6830-6837.
- [68] FU Y J, JIANG G Y, CHEN F Y. A novel Fourier transform profilometry based on dual-frequency grating [J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2012, 123(10):863-869.
- [69] 粟银, 范琦, 王云飞, 等. 干涉条纹的高准确度傅里叶变换分析[J]. *光子学报*, 2015, 44(11):94-99.  
SU Y, FAN Q, WANG Y F, et al. Fourier transform method for interferogram analysis with high accuracy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(11):94-99.
- [70] 张玉恒, 吴启晖, 王金龙. 基于时频加窗短时傅里叶变换的 LFM 干扰抑制[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(6):1361-1364.  
ZHANG Y H, WU Q H, WANG J L. LFM interference suppression using time-frequency windowed short-time fourier transform [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(6):1361-1364.
- [71] ZHENG S ZH, CHEN W J, SU X Y. Adaptive windowed Fourier transform in 3-D shape measurement[J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(6):063601-063601-4.
- [72] ZHONG J G, ZENG H P. Multiscale windowed Fourier transform for phase extraction of fringe patterns [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(14):2670-2675.
- [73] 李兴龙, 李峰, 赵冉, 等. 无阈值窗口傅里叶变换滤波法[J]. *光子学报*, 2014, 43(9):166-169.  
LI X L, LI F, ZHAO R, et al. Non-threshold windowed Fourier filter algorithm[J]. *Acta photonica sinica*, 2014, 43(9):166-169.
- [74] 郑素珍, 陈文静, 苏显渝. 自适应窗口傅里叶变换三维面形检测技术[J]. *光电工程*, 2005, 32(9):51-54.  
ZHENG S ZH, CHEN W J, SU X Y. 3D measurement techniques using adaptive window Fourier transform[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(9):51-54.
- [75] 郑素珍. S 变换引导的窗口傅里叶变换相位提取[J]. *光学技术*, 2011, 37(2):217-219.  
ZHENG S ZH. Phase extraction on S-transform guiding Windowed Fourier Transform [J]. *Optical Technique*, 2011, 37(2):217-219.
- [76] 翁嘉文, 钟金钢. 伸缩窗口傅里叶变换在三维形貌测量中的应用[J]. *光学学报*, 2004, 24(6):725-729.  
WENG J W, ZHONG J G. Application of dilating Gabor transform to three-dimensional shape analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(6):725-729.
- [77] GERCHBERG R W. Super-resolution through error energy reduction [J]. *Journal of Modern Optics*, 2010, 21(9):709-720.
- [78] ZHONG J G, WENG J W. Spatial carrier-fringe pattern analysis by means of wavelet transform; Wavelet transform profilometry [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(26):4993-4998.
- [79] FEDERICO A, KAUFMANN G H. Phase retrieval in electronic speckle pattern interferometry using the continuous wavelet transform [C]. *SPIE MIPPR*, 2001, 4419(8):162-165.
- [80] DURSUN A, OZDER S, ECEVIT F N. Continuous wavelet transform analysis of projected fringe patterns [J]. *Measurement Science & Technology*, 2004, 15(9):1768-1772.
- [81] GDEISAT M A, ABID A, BURTON D R, et al. Spatial and temporal carrier fringe pattern demodulation using the one-dimensional continuous wavelet transform; Recent progress, challenges, and suggested developments [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2009, 47(12):1348-1361.
- [82] CARMONA R A, HWANG W L, TORRESANI B. Characterization of signals by the ridges of their wavelet transforms [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1997, 45(10):2586-2590.
- [83] HENG L, CARTWRIGHT A N, CEMAL B. Moiré interferogram phase extraction: A ridge detection algorithm for continuous wavelet transforms [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(4):850-857.
- [84] 刘春媛, 佟佳颖, 李丹, 等. 基于代价函数的脊提取动态优化算法研究 [J]. *煤矿机械*, 2013, 34(6):266-268.  
LIU CH Y, TONG J Y, LI D, et al. Dynamic optimization algorithm of extract ridge based on cost functions [J]. *Coal Mine Machinery*, 2013, 34(6):266-268.
- [85] GDEISAT M A, BURTON D R, LALOR M J. Spatial carrier fringe pattern demodulation by use of a two-dimensional continuous wavelet transform [J]. *Applied Optics*, 2010, 45(34):8722-8732.
- [86] MA J, WANG ZH Y, PAN B, et al. Two-dimensional continuous wavelet transform for phase determination of complex interferograms [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(16):2425-2430.
- [87] HUANG L, QIAN K, PAN B, 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]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2010, 48(2):141-148.
- [88] SERVIN M, MARROQUIN J L, CUEVAS F J. Demodulation of a single interferogram by use of a two-dimensional regularized phase-tracking technique [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(19):4540.
- [89] LEGARDASAENZ R, OSTEN W, JUPTNER W. Improvement of the regularized phase tracking technique for the processing of nonnormalized fringe patterns [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(26):5519-5526.
- [90] LEGARDA-SAENZ R, RIVERA M. Fast half-quadratic regularized phase tracking for nonnormalized fringe patterns[J]. *Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision*, 2006, 23(11):2724-2731.
- [91] CHAN P H, BRYANSTON-CROSS P J, PARKER S C. Spatial phase stepping method of fringe-pattern analysis[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 1995, 23(5):343-354.
- [92] MORI S, SUGIYAMA M, OGAWA H, et al. Automatic parameter optimization of the local model fitting method for single-shot surface profiling [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(21):3773-3780.
- [93] YOKOTA T, SUGIYAMA M, OGAWA H, et al. Interpolated local model fitting method for accurate and fast single-shot surface profiling [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(18):3497-3508.
- [94] KURIHARA N, SUGIYAMA M, OGAWA H, et al. Iteratively-reweighted local model fitting method for adaptive and accurate single-shot surface profiling [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(22):4270-4277.
- [95] HUNTLEY J M, SALDNER H. Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(17):3047-3052.
- [96] 刘今越, 刘佳斌, 郭志红, 等. 一种基于面结构光的刀具三维测量系统[J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(12):1884-1891.
- LIU J Y, LIU J B, GUO ZH H, et al. A three-dimensional tool measurement system based on surface structured light [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(12):1884-1891.
- [97] 黄昊, 达飞鹏. 小波变换轮廓术中快速相位展开方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(2):397-404.
- HUANG H, DA F P. Novel phase unwrapping method for wavelet profilometry [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(2):397-404.
- [98] 王新, 贾书海, 陈光德. 相位去包裹技术进展[J]. *仪器仪表学报*, 2005, 26(增刊2):665-668.
- WANG X, JIA SH H, CHEN G D. A review of the study on phase unwrapping [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, 26(Suppl. 2):665-668.
- [99] 汤明, 达飞鹏, 盖绍彦. 基于光栅投影的多摄像机标定方法[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(9):2149-2155.
- TANG M, DA F P, GE SH Y. Multi-cameras calibration approach based on fringe projection [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(9):2149-2155.
- [100] HAMMARSTEDT P, STURM P, HEYDEN A. Degenerate cases and closed-form solutions for camera calibration with one-dimensional objects [C]. *IEEE CV*, 2005:317-324.
- [101] ZHANG ZH Y. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations [C]. *IEEE International Conference on Computer Vision*, 1999:666.
- [102] BOUGUET J Y. Camera calibration toolbox for matlab [OL]. [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/).
- [103] ZHANG Z H, HUANG SH J, MENG SH SH, 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.
- [104] ANWAR H, DIN I, KANG P. Projector calibration for 3D scanning using virtual target images [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, 13(1):125-131.
- [105] HUANG ZH R, XI J T, YU Y G, et al. Accurate projector calibration based on a new point-to-point mapping relationship between the camera and projector images [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(3):347-356.
- [106] ZHANG S, HUANG P S. Novel method for structured light system calibration [J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(8):083601.
- [107] LI Z W. Projector calibration algorithm for the structured light measurement technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(11):3061-3065.
- [108] DRARENI J, ROY S, STURM P. Geometric video projector auto-calibration [C]. *IEEE CVPR*, 2009:39-46.
- [109] XIE L, ZHANG Z, GAO F, et al. Projector calibration method based on optical coaxial camera [C]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2014, 9301(11):93012M-93012M-10.
- [110] HUANG SH J, XIE L L, WANG ZH Y, et al. Accurate projector calibration method by using an optical coaxial camera [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(4):789-795.

- [111] BHASKER E, JUANG R, MAJUMDER A. Registration techniques for using imperfect and partially calibrated devices in planar multi-projector displays [J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics, 2007, 13(6):1368-1375.
- [112] JOHNSON T, WELCH G, FUCHS H, et al. A distributed cooperative framework for continuous multi-projector pose estimation[C]. IEEE VR, 2009:35-42.
- [113] ZHOU J, WANG L, AKBARZADEH A, et al. Multi-projector display with continuous self-calibration [M]. ACM, 2008:1-7.
- [114] LIU M, SUN CH K, HUANG SH J, et al. An accurate projector calibration method based on polynomial distortion representation [J]. Sensors, 2015, 15(10):26567-26582.
- [115] ORGHIDAN R, SALVI J, GORDAN M, et al. Structured light self-calibration with vanishing points[J]. Machine Vision and Applications, 2014, 25(2):489-500.
- [116] DIN I, ANWAR H, SYED I, et al. Projector calibration for pattern projection systems [J]. Journal of Applied Research & Technology, 2014, 12(1):80-86.
- [117] CHEN X B, XI J T, JIN Y, et al. Accurate calibration for a camera - projector measurement system based on structured light projection [J]. Optics & Lasers in Engineering, 2009, 47(3-4):310-319.
- [118] LIU H Y, SU W H, REICHARD K, et al. Calibration-based phase-shifting projected fringe profilometry for accurate absolute 3D surface profile measurement [J]. Optics Communications, 2003, 216(1-3):65-80.
- [119] HU Q Y, HUANG P S, FU Q L, et al. Calibration of a three-dimensional shape measurement system [J]. Optical Engineering, 2003, 42(2):487-493.
- [120] JIA P R, KOFMAN J, ENGLISH C E. Comparison of linear and nonlinear calibration methods for phase-measuring profilometry [J]. Optical Engineering, 2007, 46(4):043601-043601-10.
- [121] VO M, WANG ZH Y, HOANG T, et al. Flexible calibration technique for fringe-projection-based three-dimensional imaging [J]. Optics Letters, 2010, 35(19):3192-3194.
- [122] HUANG L, CHUA P S K, ASUNDI A. Least-squares calibration method for fringe projection profilometry considering camera lens distortion [J]. Applied Optics, 2010, 49(9):1539-1548.
- [123] ZHANG Z H, MA H Y, GUO T, et al. Simple, flexible calibration of phase calculation-based three-dimensional imaging system [J]. Optics Letters, 2011, 36(7):1257-1259.
- [124] DU H, WANG ZH Y. Three-dimensional shape measurement with an arbitrarily arranged fringe projection profilometry system [J]. Optics Letters, 2007, 32(16):2438-2440.
- [125] ZHANG Z H, MA H Y, ZHANG S X, et al. Simple calibration of a phase-based 3D imaging system based on uneven fringe projection [J]. Optics Letters, 2011, 36(5):627-629.
- [126] TOWERS D P, TOWERS C E, ZHANG Z H. Optical imaging of physical objects: US, EP2049869 [P]. 2009.
- [127] TOWERS C E, TOWERS D P, JONES J D C. Generalized frequency selection in multifrequency interferometry [J]. Optics Letters, 2003, 28(11):887-889.
- [128] 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 & Lasers in Engineering, 2005, 43(7):788-800.

### 作者简介



白雪飞, 2013年于天津职业技术师范大学获得学士学位, 现为河北工业大学硕博连读博士研究生, 主要研究方向为光学三维测量和生物特征识别。

E-mail: 535980157@qq.com

**Bai Xuefei** received her B. Sc. degree from Tianjin University of Technology and Education in 2013. Now she is a Ph. D. candidate in Hebei University of Technology. Her main research interests include 3D optical measurement and biometric technology.



张宗华 (通讯作者), 分别在1996年、1998年、2001年于天津大学获得学士、硕士和博士学位, 现为河北工业大学教授, 主要研究方向为光学三维测量、三维成像和造型、三维生物测定。

E-mail: zhzhangtju@hotmail.com

**Zhang Zonghua** (Corresponding author) received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Tianjin University in 1996, 1998 and 2001, respectively. Now he is a professor in Hebei University of Technology. His main research interests include 3D optical measurement, 3D imaging and modeling and biometric technology.