

文章编号 1004-924X(2018)05-1014-14

## 基于全场条纹反射的镜面物体三维面形测量综述

王月敏<sup>1</sup>, 张宗华<sup>1,2\*</sup>, 高楠<sup>1</sup>

- (1. 河北工业大学 机械工程学院, 天津 300130;
2. 赫德斯菲尔德大学 精密技术中心, 英国 赫德斯菲尔德 HD1 3DH)

**摘要:**随着集成电路、汽车行业、先进制造和天文学的发展,条纹反射术被广泛应用于测量镜面物体的三维形貌。条纹反射术通过反射条纹图中的相位信息计算被测镜面物体的局部斜率或深度信息来恢复物体的三维形貌。为全面了解条纹反射术研究的最新进展,本文综述了条纹反射的基本原理、反射条纹产生的方式、相位的计算方法、系统参数的标定和斜率积分获得深度数据,同时介绍了不依赖积分过程的直接条纹反射术。通过具体的应用和实例,指出了条纹反射术的优缺点。最后,指出了条纹反射术未来的研究方向。该综述文章为深入研究镜面反射物体的三维面形测量提供了有益的参考。

**关键词:**三维面形测量;条纹反射术;镜面物体;斜率积分

**中图分类号:**TH741 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182605.1014

## Review on three-dimensional surface measurements of specular objects based on full-field fringe reflection

WANG Yue-min<sup>1</sup>, ZHANG Zong-hua<sup>1,2\*</sup>, GAO Nan<sup>1</sup>

- (1. College of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;
  2. Centre for Precision Technologies, University of Huddersfield, Huddersfield HD1 3DH, UK)
- \* Corresponding author, E-mail: zhzhang@hebut.edu.cn

**Abstract:** With the fast development of integrated circuits, the automotive industry, advanced manufacturing, and astronomy, fringe reflection profilometry (FRP, also called deflectometry) is widely used to measure the three-dimensional (3D) shapes of specular surfaces. FRP reconstructs the 3D shape of an object by calculating the local gradient or depth information of the specular surface using the phase information in the reflected fringe patterns. In order to gain a complete understanding of the recent developments in FRP, this paper reviews the basic principles of fringe reflection, generation of fringe patterns, phase calculation methods, calibration of system parameters, and slope integration to obtain depth data. The paper also introduces direct FRP without the integration procedure. The merits and demerits of FRP are presented through applications and examples. Finally, the future research directions of FRP are highlighted. This review paper provides a useful reference

**收稿日期:**2017-10-19;**修订日期:**2017-12-20.

**基金项目:**国家重点研发计划资助项目(No. 2017YFF0106404);欧盟玛丽居里学者(No. 707466-3DRM);国家自然科学基金资助项目(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);河北省高层次人才资助项目(No. GCC2014049);河北省人才工程培养经费资助项目(No. A201500503)

for understanding and studying the 3D surface measurements of specular reflection objects.

**Key words:** three-dimensional surface measurement; fringe reflection profilometry (FRP); specular objects; gradient integration

## 1 引言

由于具有快速采集、非接触测量、全场、高精度和自动数据处理等特点,光学三维测量技术在逆向工程、工业检测、虚拟现实、医学工程、文物保护等领域中得到了广泛应用<sup>[1-3]</sup>。随着计算机技术的发展,漫反射表面三维形貌测量技术逐渐成熟<sup>[4-10]</sup>。然而,在实际生产生活中存在着大量表面为镜面的物体和部件<sup>[11-13]</sup>,例如汽车制造领域中的抛光车、加工领域中的抛光模具、通讯和微电子等高科技领域中的高反射曲面零件以及航空航天领域中的高精密镜片等等,对镜面物体的三维形貌测量有着巨大的需求。由于镜面的反射特性,其反射光线完全受制于物面法线,相机难以像漫反射物体那样测量镜面的三维形貌,因此,镜面物体表面形貌三维数据的获取一直是光学测量中的难点。

为解决这一实际问题,多种镜面物体三维形貌光学测量方法被提出,主要分为接触法<sup>[14]</sup>和非接触法两类<sup>[15]</sup>。接触测量法易操作,精度高,但测量时间长且易对非刚性物体表面造成划痕。非接触测量方法以现代光学为基础,结合图像处理、计算机视觉等技术在测量时无需接触被测物体,弥补了接触式测量存在的缺陷。现有的光学非接触式镜面物体三维形貌测量方法主要分为干涉法和偏折术(也称为条纹反射术)。

干涉法测量精度高,但无法测量具有大量程或大曲率表面的物体且需要昂贵的辅助设备<sup>[16]</sup>。而偏折术通过光线的偏折与待测物体间的几何关系恢复物体的三维形貌,不存在上述局限性。多位学者对此展开了研究,多种偏折术应运而生,如莫尔偏折术<sup>[17-20]</sup>、激光扫描偏折术<sup>[21]</sup>、朗奇法<sup>[22]</sup>和基于相位偏转的测量方法<sup>[23-25]</sup>等。这些技术根据条纹图案的变形计算光线的偏折程度直接得到待测物面的深度数据,或通过光线的偏折计算

物面的梯度分布后对其积分来恢复镜面的三维形貌。本文综述了基于全场条纹反射的镜面物体测量方法。首先介绍了条纹反射术的基本原理,包括产生条纹的基本方法、相位计算、系统标定以及斜率积分;然后介绍直接条纹反射术,以避免积分过程带来的误差;最后列举了条纹反射术的具体应用并讨论了条纹反射术的未来发展方向。

## 2 条纹反射术

### 2.1 条纹反射术基本原理

条纹反射术的基本原理如图1所示,首先将编码的条纹图案传输到显示设备,然后待测镜面通过反射成像调制显示器上的条纹图,再由图像采集设备从另一个方向捕捉变形的条纹图虚像,通过相位计算得到展开相位。由于待测物面的高度和梯度决定了相位的偏折量,因此可根据事先标定好的系统参数建立展开相位图与物面梯度和高度间的关系。又因为物面梯度是高度的一阶导数,可以通过梯度积分来表征物面高度。上述相位与梯度、高度的关系式可转化为相位与物面梯度间的映射,根据展开相位得到梯度值后对其积分即可重建物体的三维面形。根据条纹反射术的基本原理,这里详细综述了条纹图产生的基本方法、相位计算、系统标定和斜率积分的整个镜面物体测量过程,如图2所示。

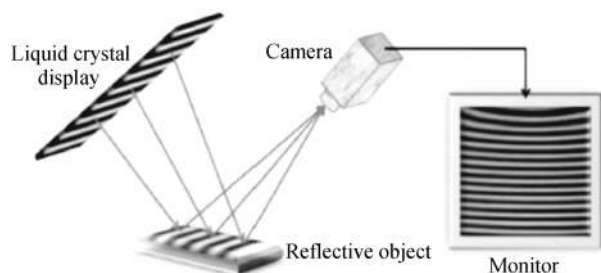


图1 条纹反射术基本原理

Fig. 1 Principle of fringe reflection profilometry

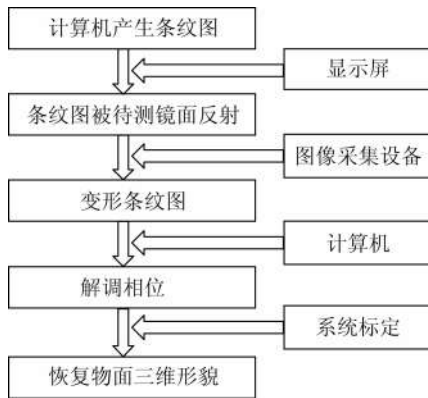


图 2 镜面物体测量流程图

Fig. 2 Flow chart of specular object measurement

### 2.1.1.1 条纹产生方法

如图 2 所述,经待测物面反射的变形条纹图中包含物面的梯度和高度两个未知量,而单幅变形条纹图仅可建立一个关于相位和梯度、高度的表达式,无法得到物面形貌的唯一解。通常需要增加一组条纹图来解决上述问题。由于物面梯度是高度的一阶导数,可以通过梯度积分来表征高度,即在测量中将梯度视为一个中间量,将相位和梯度、高度的表达式转化为相位和梯度的对应关系,通过相位解得梯度后对其积分即可重建物面的三维形貌<sup>[26]</sup>。而物面同一点在  $x, y$  方向对入射光线的偏折角度不同,即同一物点  $x, y$  方向的梯度不同,因此可以增加一幅与原图正交的条纹图来计算物点的梯度。根据条纹产生方式的不同,又可分为三种情况。

#### 2.1.1.1.1 顺序产生两个正交方向的条纹

这种方法最为简单,在单通道中顺序产生两个方向正交的条纹图并依次显示,如图 3 所示。经待测镜面反射后成像系统分别采集经镜面调制的变形条纹图。刘元坤<sup>[27]</sup>使用两组方向正交的正弦条纹图,建立两方向上相位变化与物面梯度的关系,解得梯度信息后对其积分恢复待测面形。宋雷<sup>[28]</sup>顺序产生两组正交的条纹图,通过变形条纹图重建物面的三维形貌,但在建立相位与梯度的几何关系时忽略了高度对相位变化的影响,所以该方法只能用于类平面的测量。

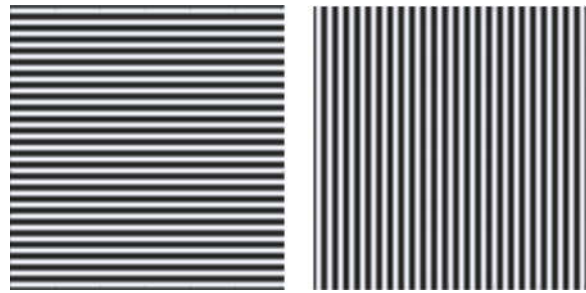


图 3 顺序显示的条纹图

Fig. 3 Sequential displayed fringe patterns

#### 2.1.1.2 同时显示交叉条纹

此种方法同时显示交叉条纹是将两幅方向正交的条纹图编码到同一幅灰度图中,如图 4 所示。刘元坤等人<sup>[29]</sup>提出了双频正交光栅相移法,即水平、垂直两方向的载波频率不同,使用相移法计算相位时将正交条纹图沿侧向一维移动来实现两个方向的二维相移,避免了两方向分别移动时产生的固定低强度区域。Xie 等人<sup>[30]</sup>将正交条纹编码到一幅图像上显示,使用二维傅里叶变换得到相位差后计算物面梯度,减少了测量时间,但易造成频谱混叠。Huang 等人<sup>[31]</sup>使用正交条纹图和二维傅里叶窗口变换测量了动态水面的三维形貌。

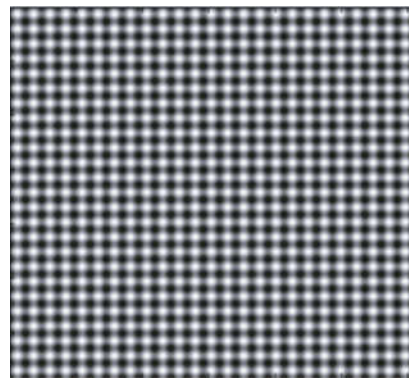


图 4 交叉显示的条纹图

Fig. 4 Crossed fringe pattern

#### 2.1.1.3 彩色条纹

一幅彩色图像包含红色、绿色、蓝色通道,它们可以作为三种条纹编码的载体,编码突出方向的条纹图如图 5 所示(彩图见期刊电子版)。用于镜面测量的彩色条纹图是将两正交条纹图分别编

码到一幅图案不同的颜色通道中,从一个颜色通道中提取出来的条纹图可以看作一个灰度图。Wu 等人<sup>[32]</sup>提出使用彩色复合正交条纹图与傅里叶变换相结合的方法测量动态镜面物体,改善了灰度复合条纹中常见的频谱混叠。之后,作者分析了使用彩色条纹带来的串扰、相机响应以及待测物体为彩色时的影响<sup>[33]</sup>。

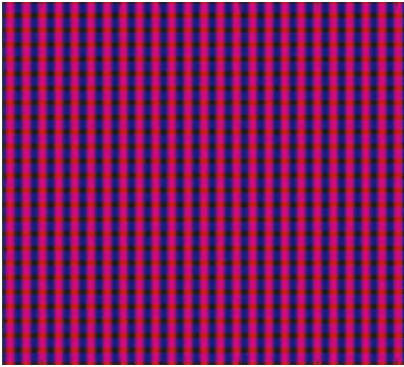


图5 彩色条纹图。水平方向条纹编码到蓝色通道,垂直方向条纹编码到红色通道

Fig. 5 Color fringe pattern. The horizontal fringe is encoded into the blue channel, and the vertical fringe is encoded into the red channel

### 2.1.2 相位计算方法

由第一部分可知,得到变形条纹图后需要解算相位来表征光线的偏折量,包括折叠相位计算和展开相位计算。

目前,存在多种折叠相位计算方法,其中应用最广泛的有傅里叶变换法<sup>[34-35]</sup>和多步相移法<sup>[36-39]</sup>。前者仅需单幅图像即可提取相位,计算速度快,但易造成频谱混叠和频谱泄露,不适合测量具有大梯度表面或高度不连续的物体。多步相移法使用多幅存在相移的条纹图来计算相位,稳定性和抗噪能力强,可以得到准确的相位信息,但不适用于动态物体的测量。

通过折叠相位计算方法获得的相位信息被截断在 $[-\pi, \pi]$ 内,需要采用相位展开算法将其恢复成连续的相位分布。相位展开算法<sup>[40-44]</sup>分为空间展开算法和时间展开算法。前者借助相邻像素点相位值的连续性进行展开,易造成误差的积累和传播;后者根据一系列不同频率的条纹图独立计算每点的相位,可用于非连续物体的测量。但条纹频率相差过大会放大随机噪声。为解决这一问题,

Tower 等人<sup>[45]</sup>提出最佳三条纹选择法以确保计算过程中的随机噪声在很小的范围内变化。

此外,在上述相位差的计算过程中,通常需要将参考镜面和待测物体放在同一位置测量两次相位,由此增加了测量的不确定性,且若参考镜面的放置位置无法与待测物面重合也会引进误差。Song 等人<sup>[46]</sup>和 Yue 等人<sup>[47]</sup>提出一种无需参考镜的载频去除法,简化了系统,提高了测量精度,但只能用于类平面测量。

### 2.1.3 系统几何参数标定

通过相位解调得到条纹的相位信息后需要根据系统的几何参数建立相位图和梯度数据间的对应关系,此过程称为系统标定,标定在镜面测量中起着重要的作用。

在进行系统标定前要先标定相机,确定空间点位置与其在相机图像中对应的像素位置之间的关系,其标定精度直接影响采集图像的准确性,是其他测量步骤顺利进行的前提。目前,相机标定技术已经比较成熟,本文不做详述,感兴趣的读者可参阅相关文献<sup>[48-51]</sup>。完成相机标定后,需要统一测量系统的坐标系来标定系统的几何参数。现有的系统标定方法可根据辅助设备的复杂程度分成三类:基于激光追踪系统和光学坐标测量机等辅助设备确定相机光圈和显示器的实际位置<sup>[52]</sup>;使用有基准点的平面镜标定设备之间的相对位置关系<sup>[53-54]</sup>;使用无基准点的平面镜标定设备之间的相对位置关系<sup>[55]</sup>。由于辅助设备较为复杂,使用平面镜来标定系统参数的方法得到了广泛研究。基于两显示屏的镜面测量系统,郭佼等人<sup>[56]</sup>提出利用带有基准点的平面镜和显示屏虚像在相机坐标系下的空间位置关系标定系统参数。肖永亮等人<sup>[57]</sup>引入一个自由参考系,使该参考系处于 CCD 相机的视野内,将入射光线、反射光线的坐标都统一到该自由参考系内,简化了标定过程,但标定过程中显示屏的翻转会带来误差且结构配置较为复杂。之后,这些作者又提出基于同名相位点的自由镜面位姿评估<sup>[58-59]</sup>,即不要求两显示器平行,简化了测量系统。Olesch 等人<sup>[60]</sup>提出一种新的全局自标定方法,通过 3 个不同步骤的迭代可用于任意镜面表面的校准,相较于普通标定方法,全局精度从  $3 \mu\text{m}$  提高到  $1 \mu\text{m}$  以下。之后,作者将标准量块(如已知半径的球面或已知尺寸平面等)倾斜不同的角度来标定镜面物体三维形

貌测量系统的几何参数<sup>[61]</sup>。Bonfort 等人<sup>[55]</sup>将没有基准点的平面镜放在 3 个不同位置,通过虚拟相机直视条纹图,最后根据虚拟相机和平面镜的位姿关系计算相机的空间位置。之后,Zhou 等人<sup>[62]</sup>在此基础上进行了改进,将显示器放在相机视野中任意 3 个不同位置来标定相机和反射光线的方向,平面镜放在 3 个不同位置来计算虚拟条纹的空间位置,由于实际显示器的空间位置固定,可以得到平面镜的位置,从而计算显示器的空间位置。用反射光替代相机中心的坐标可以减小成像像差,且全局优化算法的使用使系统显示出较强的抗噪能力。

#### 2.1.4 斜率积分

根据上述相位和梯度的关系式,通过展开相位和标定好的系统参数获得梯度数据后需要对它积分来计算物面的深度信息。理想的梯度场是一个保守场(无旋场),可通过简单的积分重建面形,

但实际测得的梯度信息包含很多噪声,积分方法会影响重建精度。为提高测量精度,大量的积分算法被提出,主要分为局部积分技术<sup>[63-64]</sup>和全局积分技术<sup>[65-66]</sup>。前者计算速度快,但对梯度数据的精确性要求较高,后者通过最小化代价函数来增强可积性。斜率积分过程通常使用迭代法,先将初始高度值设为零,对获得的梯度数据积分得到高度信息,再对此高度值求导得到新的梯度值,重复积分步骤得到新的高度值,将相邻两次高度值作差,当差值小于某一阈值时此高度数据即为所求物面深度。Huang 等人<sup>[67]</sup>在不同的情况下对三类积分方法进行了比较,使读者可以根据需要选取最适合的积分方法。荆海龙等人<sup>[68]</sup>通过计算机模拟实验对积分技术中 3 种不同算法的重建精度进行了对比研究。表 1 中列出了应用较为广泛的四类积分方法的优缺点,可为不同测量需求提供参考。

表 1 四种积分方法对比

Tab. 1 Comparison of four integral methods

积分方法	十字路径积分法	傅里叶积分法	区域波前重构法	径向基函数法
优点	算法简单、快速	速度快	精度高、抗噪能力强	抗噪能力强,可对缺失数据区域进行处理
缺点	噪声抑制能力差 边界要求符合周期性延拓条件		速度慢	算法结构复杂,需要设置复杂的系数

通过斜率积分恢复物面三维形貌的方法在镜面物体测量中得到广泛应用。李绍辉等人<sup>[69]</sup>基于针孔相机模型建立了相位与梯度的关系,通过对梯度积分计算物面高度信息。赵文川等人<sup>[70-71]</sup>使用移动显示器的方法来测量非球面镜,为减小噪声影响,求得入射光线后,通过入射光线和反射光线的法线向量来计算梯度,再对梯度积分计算物面的高度,但要求相机的光心在待测镜面的光轴上,结构复杂。唐燕等人<sup>[72-73]</sup>提出将显示器和相机分别沿待测镜面轴向移动,通过物点虚拟抛物面的焦距确定该点的梯度和位置坐标,最后对梯度积分恢复物面的三维形貌。之后,作者又对上述系统进行优化<sup>[74]</sup>,在待测非球面镜上假设一个抛物面,则入射光线与虚拟面交于一点,从而得到与虚拟入射光线对应的反射光线,该反射光线与实际反射光线的方向重合时,虚拟抛物面与入射光线的交点即为待测物点。该方法只移动显示器不移动相机,且相机的光心不需要放在待测镜面的光轴上,简化了系统,

但要逐点测量,耗时较长。袁婷<sup>[75]</sup>使用虚拟的辅助表面结合显示器移动的方法获得物面梯度,再对梯度积分计算深度数据。Petz 等人<sup>[53]</sup>提出使用双相机测量镜面物体的方法,其基本思想是待测物面上任一点的法向量唯一确定。假设其中一个相机为主相机,由于反射光线的方向唯一确定,取其上一点为虚拟物点,可确定该点的法向量,从而求出另一相机对应的入射光线,该光线与显示器的交点与实际像素点重合时,虚拟物点即为所求物点。根据法向量可获得梯度数据。Knauer 等人<sup>[54]</sup>假设物面点后,确定两相机所对应的入射光线,计算出两个法向量,当两法向量重合时,假设的物面点即为所求点。梁礼斌等人<sup>[76]</sup>使用双目系统得到物面的梯度值后采用插值积分的方法重建面形。Hung 等人<sup>[77]</sup>比较了用于漫反射测量的条纹投影法和用于镜面测量的条纹反射法,通过梯度积分求解高度,但未考虑高度对相位变化的影响,仅适用于类平面的测量。

## 2.2 直接条纹反射术

上述基于条纹反射的镜面物体测量方法主要是通过相位求解梯度,再对梯度积分计算高度,不能用于非连续物体的测量且会造成误差的积累和传播。为避免数值积分,需要绕过梯度数据的计算,直接建立变形条纹图与待测物面深度信息间的关系,多位学者对此展开了深入研究。

Petz 等人<sup>[53]</sup>提出平行移动显示器的方法来确定入射光线的空间位置,入射光线和反射光线的交点即为待测物面点的空间位置。这种方法可用于大梯度、不连续物体的测量,但显示器的移动会带来误差,且增加了标定难度。Guo 等人<sup>[78]</sup>提出平行移动显示器到多个位置,利用最小二乘法确定入射光线的空间位置,相较于只移动两个位置,该方法提高了测量精度,但系统结构复杂且移动会带来误差。Ren 等人<sup>[79]</sup>通过移动显示器的方法直接建立了相位和高度之间的关系。为消除显示器移动误差,提高测量精度,刘玥<sup>[80-81]</sup>提出使用两个显示器,并通过半透半反镜使二者平行,直接通过相位求解高度,可用于非连续物体的测量。张宗华等人<sup>[82-83]</sup>直接建立了变形条纹中相位变化和物面深度信息之间的关系,并基于上述测量系统提出了两显示器平行对正的方法<sup>[84]</sup>。

直接条纹反射术除上述增加系统约束条件的方法外,还可以通过增加假设来建立条纹图与物面深度数据间的关系。付生鹏等人<sup>[85]</sup>提出成像模拟的方法,先假设一个参数曲面,通过该曲面上各点的法向量可以计算出对应显示器上的像素点。通过该像素点与实际像素点的差值不断调整曲面,差值接近于零时即为所求物面,但该方法只适用于表面光滑且连续的物体。Perard 等人<sup>[86]</sup>假设一个贝塞尔曲面,通过迭代使光心到显示器的方向向量与实际向量的差值最小来调整曲面系数。Yamamoto 等人<sup>[87]</sup>在已知一个物点高度的情况下,使用正交条纹确定相机像素以及与之对应的显示器像素的空间坐标,计算得到该点的法向量以及切平面,将切平面与相机中相邻像素点的反射光线的交点视为下一个物点,依次迭代即可得到整个面形。Muhre 等人<sup>[88]</sup>针对上述方法中需要计算其中一个物点绝对高度的问题提出了解决办法。

## 3 具体应用

### 3.1 实际应用

基于条纹反射的镜面物体测量方法已广泛应

用于实际物体测量中。Hoefling 等人<sup>[89]</sup>提出了一种通过使用相位信息测量反射物体的方法,并将该方法应用于检测车身板上的形状缺陷。从相位数据直接计算表面曲率,然后对缺陷进行鉴别;也可以使用两个积分步骤从表面曲率计算高度信息。因为使用了两个积分步骤,所以形状数据将包含很多累积的错误。Hung 等人<sup>[90]</sup>提出一种检测表面和亚表面缺陷的方法,对待测物体施加一个负载,亚表面缺陷会引起表面梯度变化,根据施加负载前后的相位差图可确定亚表面缺陷。Zhang 等人<sup>[91-93]</sup>使用回射光栅投影术来检测准平反射面,物面上的局部误差使相机采集到的光栅图像发生弯曲和偏移,通过积分可以得到待测面的深度。Silin 等人<sup>[94]</sup>提出镜面反射与光波波长和散射尺寸相关,并使用近红外光来测量具有部分镜面的精细金属掩膜来减少散射,对待测物体施加不同压力证实了测量的可靠性。Chan 等人<sup>[95]</sup>提出使用条纹反射技术测量物体的亚表面缺陷,并通过实验证明了方法的可行性。

### 3.2 具体实例

条纹反射术可用于获取物体表面的三维形貌,LIU 等人在直接条纹反射术的基础上研制了一种镜面物体三维形貌测量系统<sup>[81]</sup>。该系统使用两个液晶显示屏(Liquid Crystal Display, LCD)作为光源产生正弦条纹,并使用一个半透半反镜调节两屏平行。CCD 相机作为成像设备采集经物体调制后的变形条纹图,最后计算机解算变形条纹图的相位,根据事先标定的系统参数即可恢复物面的三维形貌。系统模型如图 6 所示。

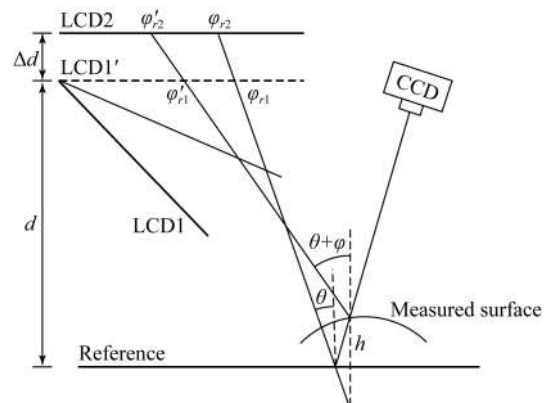


图 6 条纹反射术测量系统原理图

Fig. 6 Schematic diagram of measuring system based on fringe reflection profilometry

图 6 中,  $\varphi_{r1}$  和  $\varphi_{r2}$  分别为相机同一像素点采集到的两显示屏经过参考镜面反射的绝对相位;  $\varphi'_1$  和  $\varphi'_2$  分别为相机同一像素点采集到的两显示屏经待测物体反射的绝对相位;  $\Delta d$  为两显示屏间的距离;  $d$  为显示屏虚像到参考面的距离。

根据图中各系统参数间的几何关系, 可以得到待测物面的深度数据:

$$h = \frac{d[(\varphi_{r1} - \varphi_{r2}) - (\varphi'_1 - \varphi'_2)] - \Delta d(\varphi'_1 - \varphi_{r1})}{(\varphi_{r2} - \varphi_{r1}) + (\varphi'_2 - \varphi'_1)} \quad (1)$$

实验系统硬件结构如图 7 所示。基于此实验系统测量了具有多个镜面的单片多镜面阵列, 结果如图 8 所示。

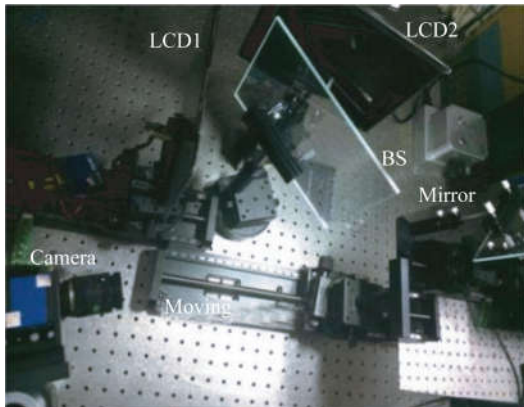
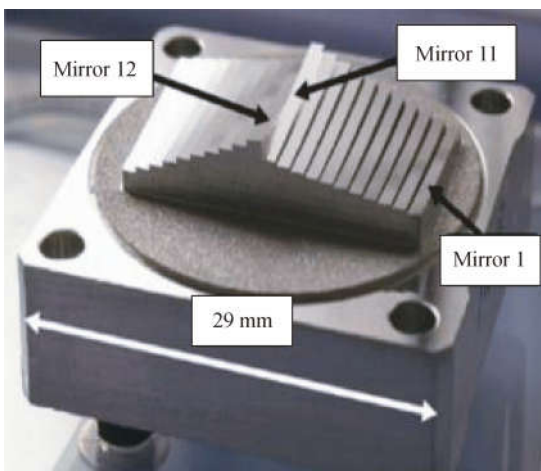


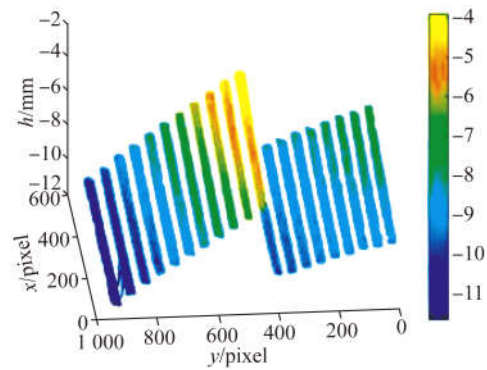
图 7 实验系统硬件结构图

Fig. 7 Hardware of experimental setup



(a) 测量工件实物图

(a) Photo of measured specular objects



(b) 测量形貌图

(b) Measured 3D shape

图 8 单片多镜阵列的深度测量

Fig. 8 Depth measurement of monolithic multi-mirror array



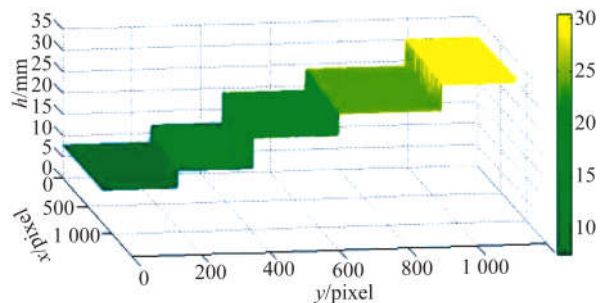
(a) 测量工件实物图

(a) Photo of measured specular objects



(b) 展开相位图

(b) Unwrapped phase map



(c) 测量形貌图

(c) Measured 3D shape

图 9 台阶的深度测量

Fig. 9 Depth measurement of step

为评价系统的测量精度,实际测量了精密加工的镜面台阶。相机采集经镜面台阶反射的正弦条纹,利用四步相移和最佳三条纹选择法计算得到绝对相位信息。标定系统后,台阶面的相对深度可通过公式(1)求解得到,如图9所示。对比测量结果与三坐标测量机得到的标准台阶间距,结果如表2所示。

表2 镜面台阶测量结果与误差

Tab. 2 Results and errors of measured mirror steps (mm)

标准台阶间距	测量间距	绝对误差
3.987	4.009	0.022
7.024	7.008	0.017
5.006	5.027	0.021
6.099	6.118	0.019

由表2可以看出,所研制的系统能精确测量非连续镜面物体的表面三维形貌。该方法的优点在于能够一次性恢复具有不连续镜面物体的三维形貌,不需要积分过程,避免了误差的积累。但所提方法的测量精度有待进一步提高。

## 4 未来研究方向

虽然基于全场条纹反射的镜面物体测量方法得到了大量研究,但仍有许多挑战性问题亟待解决,主要包括:微小形貌和大量程物体测量、非连续物体测量、测量速度、测量精度、系统便携性等。

### 4.1 微小形貌和大量程物体测量

与漫反射物体形貌测量相似,除了常规尺寸镜面物体的测量,实际应用中还存在着大量微小尺寸测量,如切割刀具、微光学元件、晶片等。这些场合要求成像透镜和显示屏幕具有较小的视场。Häusler等人<sup>[96]</sup>介绍了一种新颖的微偏折技术,通过微观物镜来测量微观镜面物体的形状,横向分辨率优于 $1\ \mu\text{m}$ ,深度方向分辨率在 $1\ \text{nm}$ 范围内。

同时,大镜面物体的测量,如车体、天文望远

镜等,也是镜面三维测量中不容忽视的一部分。Olesch等人<sup>[61]</sup>将条纹反射术用于切伦科夫望远镜中的反射镜测量,实验证明了方法的可行性。

### 4.2 非连续物体测量

目前,大部分镜面物体测量方法都是基于相位和梯度之间的关系来求解物面梯度,再对梯度积分求解高度信息,不能用于测量非连续表面的物体。虽然一些研究者研究了相关技术<sup>[80-84]</sup>,但基于全场条纹反射的非连续物体测量技术仍然有待发展。

### 4.3 快速测量

实际生产中存在着大量动态或者需要在线测量的镜面物体,这要求光学测量方法的速度要快。快速测量通常从提高硬件工作效率和减少拍摄图案等方面进行考虑。Trumper等人<sup>[97]</sup>在一幅图案中将存在三个相移的三组正交正弦条纹编码到三个颜色通道中,即通过单幅图案与三步相移相结合,提高了测量速度,但在相位计算时易引入色差和串扰。Liu等人<sup>[98]</sup>将四个条纹编码到一幅条纹图的四个不同方向中,其中两个正交的高频条纹用于获取相位变化,两个单条纹用于相位展开,减少了条纹图的投影和采集,可用于测量动态物体。

### 4.4 精度

影响测量精度的因素包括:显示器的平整度、相机的非线性响应和系统标定等。

#### 4.4.1 显示器的平整度

镜面物体测量中假定显示器是一个理想平面,但在实际测量中显示器的平整度并不理想,需要对显示器的平整度进行补偿来提高测量精度。

#### 4.4.2 相机的非线性响应

所有显示和成像设备都具有非线性响应,以适应人类视觉。然而,非线性响应将正弦条纹图案的标准形状改变为非正弦形状,使得计算的相位不正确。一些研究人员使用二元条纹图案来代替正弦条纹图案。Li等人<sup>[99]</sup>使用正交二进制图案来测量镜面物体,改善了显示设备和成像设备的非线性影响。Xu等人<sup>[100]</sup>将存在三个相移的三组正交二进制条纹编码单幅图案中,与正弦条纹相比,抗噪性更好。

另外,通过对成像或投影透镜进行离焦,可以捕获变形的正弦条纹图案。该技术降低了条纹图案的对比度,因此计算出的相位不准确,获得的形状数据具有更多的噪声。另一种方法是基于软件技术来补偿非线性响应,通过投影(显示)不同的灰度强度并捕获相应的灰度值来构建查找表(Look Up Table, LUT)。在软件中产生正弦波纹图案时,校正非线性响应。

#### 4.4.3 标定

无论是通过梯度积分间接计算高度还是通过光线和系统的空间位置关系直接得到物面的高度信息,都需要通过系统的几何参数将已知量和未知量联系起来,因此系统标定在镜面测量中至关重要,是影响测量精度的主要因素。

#### 4.5 便携

现有的镜面测量系统主要由显示器、相机和电脑构成,不利于在各种环境中安装和携带。

#### 参考文献:

- [1] 陈晓荣,蔡萍,施文康. 光学非接触三维形貌测量技术新进展 [J]. 光学精密工程, 2002, 10(5): 528-532.  
CHEN X R, CAI P, SHI W K. The latest development of optical non-contact 3D profile measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(5): 528-532. (in Chinese)
- [2] BLAIS F. Review of 20 years of range sensor development [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, 13(1): 231-240.
- [3] GORTHI S S, RASTOGI P. Fringe projection techniques: Whither we are? [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 133-140.
- [4] ZHANG Z H, ZHANG D, PENG X, *et al.*. Color texture extraction from fringe image based on full-field projection [J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(7): 1935-1939.
- [5] 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.
- [6] 戴美玲,杨福俊,何小元. 基于双频彩色光栅投影测量不连续物体三维形貌 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 7-12.

Butel 等人<sup>[10]</sup>提出一种便携式偏折测量技术,可以在任何有前置摄像头的安卓手机上运行,并在 1 min 内快速完成三维测量。

## 5 结 论

随着集成电路、汽车行业、先进制造和天文学的发展,实际生产生活对镜面物体的三维面形测量产生了大量需求,基于全场条纹反射的镜面物体三维形貌测量技术已成为一个很有意义的研究方向。本文详细综述了条纹反射术的基本原理,包括条纹产生的方法、相位计算方法、系统标定和斜率积分;然后针对现有测量技术中积分过程固有的误差和局限性,介绍了直接条纹反射术;接着列举了条纹反射术的具体应用。最后,本文指出镜面物体三维测量术未来的研究方向,为条纹反射术的深入研究提供了有益的参考。

- DAI M L, YANG F J, HE X Y. Three-dimensional shape measurement of objects with discontinuities by dual-frequency color fringe projection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1): 7-12. (in Chinese)
- [7] 张晓璇. 基于相位计算的三维形貌快速测量技术研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2017.  
ZHANG X X. *The Research of Fast Three-dimensional Shape Measurement Based on Phase Extraction* [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [8] 郑国权. 基于红外条纹投影的三维测量系统研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2015.  
ZHENG G Q. *Research on Three-dimensional Measurement System Based on Infrared Fringe Projection* [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [9] 曲睿. 基于彩色编码方法实现物体的三维轮廓测量 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008.  
QV R. *Three-dimensional Shape Measurement Based on Color-coded* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [10] 孙宇臣,葛宝臻,张以谟. 物体三维信息测量技术综述 [J]. 光电子·激光, 2004, 15(2): 248-254.  
SUN Y CH, GE B ZH, ZHANG Y M. Review for the 3D information measuring technology [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2004, 15(2): 248-254. (in Chinese)

- [11] FANG F Z, ZHANG X D, WECKENMANN A, *et al.*. Manufacturing and measurement of freeform optics [J]. *CIRP Annals*, 2013, 62(2): 823-846.
- [12] BOTHE T, LI W W, VON KOPYLOW C, *et al.*. High-resolution 3D shape measurement on specular surfaces by fringe reflection [J]. *SPIE*, 2004, 5457: 411-422.
- [13] 陶涛, 郭红卫, 何海涛. 镜面反射面形光学三维测量技术综述 [J]. *光学仪器*, 2005, 27(2): 90-95.
- TAO T, GUO H W, HE H T. Overview of optical three-dimensional measurement technique for specular reflection surfaces [J]. *Optical Instruments*, 2005, 27(2): 90-95. (in Chinese)
- [14] 张国雄. 三坐标测量机 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1999.
- ZHANG G X. *Coordinate Measuring Machines* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1999. (in Chinese)
- [15] BALZER J, WERLING S. Principles of shape from specular reflection [J]. *Measurement*, 2010, 43(10): 1305-1317.
- [16] WYANT J C. White light interferometry [J]. *SPIE*, 2002, 4737: 98-107.
- [17] KAFRI O, GLATT I. Moire deflectometry-A ray deflection approach to optical testing [J]. *Optical Engineering*, 1985, 24(6): 944-960.
- [18] SERVIN M, RODRIGUEZ-VERA R, CARPIO M, *et al.*. Automatic fringe detection algorithm used for moire deflectometry [J]. *Applied Optics*, 1990, 29(22): 3266-3270.
- [19] LEGARDA-SAENZ R. Robust wavefront estimation using multiple directional derivatives in Moiré deflectometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, 45(9): 915-921.
- [20] KAFRI O, LIVNAT A. Reflective surface analysis using Moiré deflectometry [J]. *Applied Optics*, 1981, 20(18): 3098-3100.
- [21] ROSETE-AGUILAR M, DÍAZ-URIBE R. Profile testing of spherical surfaces by laser deflectometry [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(25): 4690-4697.
- [22] LEE H J, KIM S W. Precision profile measurement of aspheric surfaces by improved Ronchi test [J]. *Optical Engineering*, 1999, 38(6): 1041-1047.
- [23] 宋雷, 岳慧敏, 吴雨祥, 等. 条纹反射法测量镜面手机外壳多尺度三维形貌 [J]. *光电子·激光*, 2012, 23(11): 2154-2162.
- SONG L, YUE H M, WU Y X, *et al.*. Surface profile measurement of specular cell phone cases on variable lateral scales by fringe reflection technique [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2012, 23(11): 2154-2162. (in Chinese)
- [24] WEDOWSKI R D, ATKINSON G A, SMITH M L, *et al.*. A system for the dynamic industrial inspection of specular freeform surfaces [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(5): 632-644.
- [25] HUANG L, WONG J X, ASUNDI A K. Specular 3D shape measurement with a compact fringe reflection system [J]. *SPIE*, 2013, 87691: 87691K.
- [26] 刘元坤, 苏显渝, 姜美花, 等. 基于相移和非相干成像的反射镜面形测量方法 [J]. *光电子·激光*, 2006, 17(4): 458-463.
- LIU Y K, SU X Y, JIANG M H, *et al.*. Shape measurement for reflector based on phase-shift and incoherent imaging [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2006, 17(4): 458-463. (in Chinese)
- [27] 刘元坤. 基于结构光投影的光学面形测量方法研究 [D]. 成都: 四川大学, 2004.
- LIU Y K. *Measurement of 3D Shape for Optical Surface Based on Structured Light Projection* [D]. Chengdu: Sichuan University, 2004. (in Chinese)
- [28] 宋雷. 基于条纹投影和条纹反射的三维形貌测量 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- SONG L. *Three-dimensional Shape Measurement Based on Fringe Projection and Fringe Reflection* [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012. (in Chinese)
- [29] LIU Y K, OLESCH E, YANG ZH, *et al.*. Fast and accurate deflectometry with crossed fringes [J]. *Advanced Optical Technologies*, 2014, 3(4): 441-445.
- [30] XIE P, TANG M X, WEI X R. Three-dimensional shape measurement of specular surfaces by orthogonal composite fringe reflection [J]. *SPIE*, 2011, 8200: 820014.
- [31] HUANG L, NG C S, ASUNDI A K. Dynamic three-dimensional sensing for specular surface with monoscopic fringe reflectometry [J]. *Optics Express*, 2011, 19(13): 12809-12814.
- [32] WU Y X, YUE H M, YI J Y, *et al.*. Dynamic specular surface measurement based on color-encoded fringe reflection technique [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(2): 024104.
- [33] WU Y X, YUE H M, YI J Y, *et al.*. Single-shot three-dimensional shape measurement of specular surfaces by orthogonal color fringe pattern reflection technique [J]. *SPIE*, 2014, 9276: 927603.
- [34] ESTEVE-TABOADA J J, MAS D, GARCÍA J.

- Three-dimensional object recognition by Fourier transform profilometry [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(22): 4760-4765.
- [35] SU X Y, CHEN W J. Fourier transform profilometry: a review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, 35(5): 263-284.
- [36] WANG Y CH, LIU K, HAO Q, *et al.*. Period coded phase shifting strategy for real-time 3-D structured light illumination [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(11): 3001-3013.
- [37] SANSONI G, CAROCCI M, RODELLA R. Three-dimensional vision based on a combination of gray-code and phase-shift light projection; analysis and compensation of the systematic errors [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(31): 6565-6573.
- [38] KARPINSKY N, ZHANG S. Composite phase-shifting algorithm for three-dimensional shape compression [J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(6): 063604.
- [39] QIAN K M, SHU F J, WU X P. Determination of the best phase step of the Carré algorithm in phase shifting interferometry [J]. *Measurement Science and Technology*, 2000, 11(8): 1220-1223.
- [40] HUNTLEY J M, SALDNER H. Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(17): 3047-3052.
- [41] 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): 1884-1890.
- 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): 1884-1890. (in Chinese)
- [42] 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. (in Chinese)
- [43] 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(S8): 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(S8): 665-668. (in Chinese)
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] SONG L, YUE H M, KIM H, *et al.*. A study on carrier phase distortion in phase measuring deflectometry with non-telecentric imaging [J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 24505-245015.
- [47] YUE H M, WU Y X, ZHAO B Y, *et al.*. A carrier removal method in phase measuring deflectometry based on the analytical carrier phase description [J]. *Optics Express*, 2013, 21(19): 21756-21765.
- [48] 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, GAI SH Y. Multi-cameras calibration approach based on fringe projection [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(9): 2149-2155. (in Chinese)
- [49] 邹建成, 田楠楠, 简易高精度的平面五点摄像机标定方法 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(3): 786-791.
- ZOU J CH, TIAN N N. An easy and high-precision camera calibration method based on planar five points [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(3): 786-791. (in Chinese)
- [50] ZHANG ZH Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [51] 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.
- [52] HUNG R, SU P, BURGE J H. Deflectometry measurement of Daniel K. Inouye solar telescope primary mirror [J]. *SPIE*, 2015, 9575: 957515.
- [53] PETZ M, TUTSCH R. Reflection grating photogrammetry: a technique for absolute shape measurement of specular free-form surfaces [J]. *SPIE*, 2005, 5869: 58691D.
- [54] KNAUER M C, KAMINSKI J, HAUSLER G. Phase measuring deflectometry: a new approach to

- measure specular free-form surfaces [J]. *SPIE*, 2004, 5457: 366-376.
- [55] OLESCH E, FABER C, HÄUSLER G. Deflectometric self-calibration for arbitrary specular surfaces [C]. *DGaO Proceedings 2011*, 2011:A003-2.
- [56] 郭佼. 基于条纹反射法的镜面反射物体三维形貌测量技术优化 [D]. 天津: 河北工业大学, 2017. GUO J. *Optimization of Measuring 3D Shape of Mirror Based on Fringe Pattern Reflection Technique* [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [57] XIAO Y L, SU X Y, CHEN W J, *et al.*. Three-dimensional shape measurement of aspheric mirrors with fringe reflection photogrammetry [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(4): 457-464.
- [58] 肖永亮, 苏显渝, 陈文静. 基于自由镜面反射位姿评估的条纹反射摄影测量 [J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 512003. XIAO Y L, SU X Y, CHEN W J. Fringe reflection photogrammetry based on pose estimation with free planar mirror reflection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 512003. (in Chinese)
- [59] XIAO Y L, SU X Y, CHEN W J. Flexible geometrical calibration for fringe-reflection 3D measurement [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(4): 620-622.
- [60] OLESCH E, HÄUSLER G, WÖRNLEIN A, *et al.*. Deflectometric measurement of large mirrors [J]. *Advanced Optical Technologies*, 2014, 3(3): 335-343.
- [61] BONFORT T, STURM P F, GARGALLO P. General specular surface triangulation [M]// NARAYANAN J J, NAYAR S K, SHUN H Y. *Computer Vision-ACCV 2006*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006, 3852: 827-881.
- [62] ZHOU T, CHEN K, WEI H Y, *et al.*. Improved system calibration for specular surface measurement by using reflections from a plane mirror [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(25): 7018-7028.
- [63] 荆海龙, 苏显渝, 刘元坤. 基于梯度数据的三维面形重建方法 [J]. *激光杂志*, 2007, 28(6): 41-43. JING H L, SU X Y, LIU Y K. Shape reconstruction methods from gradient field [J]. *Laser Journal*, 2007, 28(6): 41-43. (in Chinese)
- [64] LI W S, BOTHE T, VON KOPYLOW C, *et al.*. Evaluation methods for gradient measurement techniques [J]. *SPIE*, 2004, 5457: 300-311.
- [65] HUANG L, ASUNDI A K. Improvement of least-squares integration method with iterative compensations in fringe reflectometry [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(31): 7459-7465.
- [66] HUANG L, ASUNDI A K. Framework for gradient integration by combining radial basis functions method and least-squares method [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(24): 6016-6021.
- [67] HUANG L, IDIR M, ZUO CH, *et al.*. Comparison of two-dimensional integration methods for shape reconstruction from gradient data [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 64: 1-11.
- [68] 荆海龙, 苏显渝, 刘元坤, 等. 基于条纹反射的镜面测量及三维重建算法分析 [J]. *光电工程*, 2008, 35(10): 37-42. JING H L, SU X Y, LIU Y K, *et al.*. Specular surface measurement based on fringe reflection and analysis of 3D shape reconstruction technique [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(10): 37-42. (in Chinese)
- [69] 李绍辉, 刘书桂, 张宏伟, 等. 基于光栅相位偏折的高反射曲面三维形貌测量 [J]. *计算机工程*, 2013, 39(6): 299-303. LI SH H, LIU SH G, ZHANG H W, *et al.*. Three dimensional shape measurement of specular surface based on phase deflectometry [J]. *Computer Engineering*, 2013, 39(6): 299-303. (in Chinese)
- [70] 赵文川, 苏显渝, 刘元坤, 等. 基于相位偏折术的非球面镜检测方法 [J]. *中国激光*, 2010, 37(5): 1338-1341. ZHAO W CH, SU X Y, LIU Y K, *et al.*. Testing an aspheric mirror based on phase measuring deflectometry [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(5): 1338-1341. (in Chinese)
- [71] ZHAO W CH, SU X Y, LIU Y K, *et al.*. Testing an aspheric mirror based on phase measuring deflectometry [J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(10): 103603.
- [72] 唐燕, 苏显渝, 刘元坤, 等. 基于条纹反射的非球面镜三维面形测量 [J]. *光学学报*, 2009, 29(4): 965-969. TANG Y, SU X Y, LIU Y K, *et al.*. Three-dimensional shape measurement of aspheric mirror based on fringe reflection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(4): 965-969. (in Chinese)
- [73] TANG Y, SU X Y, LIU Y K, *et al.*. 3D shape measurement of the aspheric mirror by advanced phase measuring deflectometry [J]. *Optics Express*, 2008, 16(19): 15090-15096.
- [74] TANG Y, SU X Y, WU F, *et al.*. A novel phase measuring deflectometry for aspheric mirror test [J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 19778-19784.

- [75] 袁婷. 基于条纹反射法的大口径非球面反射镜面形检测技术研究 [D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2016.  
YUAN T. *Study on Fringe-reflection Optical Surface Shape Measurement Technology for Large Aspheric Mirror* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [76] 梁礼斌, 苏显渝, 刘元坤. 基于双目视觉的相位测量偏折术 [J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2009, 46(2): 387-391.  
LIANG L B, SU X Y, LIU Y K. Phase-measuring deflectometry based on binocular vision [J]. *Journal of Sichuan University: Natural Science Edition*, 2009, 46(2): 387-391. (in Chinese)
- [77] HUNG Y Y, LIN L, SHANG H M, *et al.*. Practical three-dimensional computer vision techniques for full-field surface measurement [J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(1): 143-149.
- [78] GUO H W, FENG P, TAO T. Specular surface measurement by using least squares light tracking technique [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 166-171.
- [79] REN H Y, JIANG X Q, GAO F, *et al.*. Absolute height measurement of specular surfaces with modified active fringe reflection photogrammetry [J]. *SPIE*, 2014, 9204: 920408.
- [80] 刘玥. 基于条纹反射法测量非连续镜面三维形貌的研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2016.  
LIU Y. *Study of Measuring 3D Shape of Mirror with Discontinuous Surface Based on Fringe Pattern Reflection Technique* [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [81] LIU Y, HUANG SH J, ZHANG Z H, *et al.*. Full-field 3D shape measurement of discontinuous specular objects by direct phase measuring deflectometry [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 10293.
- [82] ZHANG Z H, HUANG SH J, GAO N, *et al.*. Full-field 3D shape measurement of specular object having discontinuous surfaces [J]. *SPIE*, 2017, 10449: 104490T.
- [83] ZHANG Z H, LIU Y, HUANG SH J, *et al.*. Full-field 3D shape measurement of specular surfaces by direct phase to depth relationship [J]. *SPIE*, 2016, 10023: 100230X.
- [84] 张宗华, 郭俊, 王月敏, 等. 镜面物体三维测量系统中两显示屏的平行正对校正 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(2): 289-296.  
ZHANG Z H, GUO J, WANG Y M, *et al.*. Parallel-alignment and correction of two displays in three-dimensional measuring system of specular surfaces [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(2): 289-296. (in Chinese)
- [85] 付生鹏, 赵吉宾, 夏仁波, 等. 基于成像模拟法的镜面体表面三维测量 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(10): 17-24.  
FU SH P, ZHAO J B, XIA R B, *et al.*. Imaging simulation method for specular surface measurement [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(10): 17-24. (in Chinese)
- [86] PERARD D, BEYERER J. Three-dimensional measurement of specular free-form surfaces with a structured-lighting reflection technique [J]. *SPIE*, 1997, 3204: 74-80.
- [87] YAMAMOTO M, TONOOKA M, YOSHIKAWA T. Surface profile measurement of specular objects by grating projection method [J]. *SPIE*, 2002, 4567: 48-55.
- [88] MUHR R, SCHUTTE G, VINCZE M. A triangulation method for 3d-measurement of specular surfaces [J]. *International Archives Photogrammetry, Remote Sensing Spatial Information Sciences*, 2010, 5: 466-471.
- [89] HOEFLING R, ASWENDT P, NEUGEBAUER R. Phase reflection: a new solution for the detection of shape defects on car body sheets [J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(1): 175-182.
- [90] HUNG Y Y, SHANG H M. Nondestructive testing of specularly reflective objects using three-dimensional computer vision technique [J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(5): 1343-1347.
- [91] ZHANG X ZH, NORTH W P T. Retroreflective grating analysis versus physical measurements of surface contour [J]. *Optical Engineering*, 1998, 37(5): 1464-1467.
- [92] ZHANG X ZH, NORTH W P T. Retroreflective projection gratings [J]. *Optics & Laser Technology*, 1999, 31(5): 369-372.
- [93] ZHANG X ZH, NORTH W. Retroreflective grating generation and analysis for surface measurement [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(13): 2624-2627.
- [94] SILIN N A, SHIN S, KIM D, *et al.*. Deflectometric measurement of a fine metal mask by using near infrared to reduce scattering [J]. *New Physics: Sae Mulli*, 2016, 66(1): 108-113.
- [95] CHAN F W Y. Reflective fringe pattern technique for subsurface crack detection [J]. *NDT & E International*, 2008, 41(8): 602-610.

- [96] HÄUSLER G, RICHTER C, LEITZ K H, *et al.*. Microdeflectometry—a novel tool to acquire three-dimensional microtopography with nanometer height resolution [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(4): 396-398.
- [97] TRUMPER I, CHOI H, KIM D W. Instantaneous phase shifting deflectometry [J]. *Optics Express*, 2016, 24(24): 27993-28007.
- [98] LIU T, ZHOU C, LIU Y, *et al.*. Deflectometry for phase retrieval using a composite fringe [J]. *Optica Applicata*, 2014, 44(3): 451-461.
- [99] LI B, MA S D, ZHAI Y. Fast temporal phase unwrapping method for the fringe reflection technique based on the orthogonal grid fringes [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(20): 6282-6290.
- [100] XU X Y, ZHANG X CH, XU M. Dynamic three-dimensional shape measurement for specular freeform surfaces with the quaternary orthogonal grid fringes [J]. *SPIE*, 2016, 10155: 101553Y.
- [101] BUTEL G P, SMITH G A, BURGE J H H. Deflectometry using portable devices [J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(2): 025111.

#### 作者简介:



王月敏(1991—),女,河北保定人,博士研究生,2014年于河北联合大学获得学士学位,主要研究方向为三维光学测量技术。E-mail: 1553963863@qq.com

#### 导师简介:



张宗华(1974—),男,江苏徐州人,教授,1996年、1998年、2001年于天津大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事光学检测、三维数字成像和造型、条纹自动分析和三维生物测定等方面的研究。E-mail: zhzhang@hebut.edu.cn