文章编号 2095-1531(2017)02-0267-13

用于智能移动设备的条纹反射法检测系统

冀 翼,张学军*,袁 婷,陶小平
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所
光学系统先进制造技术中国科学院重点实验室,吉林 长春 130033)

摘要: 条纹反射法是一种结构简单的三维面形检测手段,本文对该方法在智能手机、平板等移动设备中的集成和应用进行了研究。首先,对条纹反射法标定误差以及智能设备的特点进行了分析。然后,在分析实际检测中的关键误差基础上,提出了通过相机非线性定标、改善相移算法、格点位置标定、应对相机自动增益调整等一系列方法和算法,在设备现有硬件条件下提高了测量精度和稳定性;最后,使用 iPad Air 对直径为 105 mm 的 SiC 反射面进行了实验。结果表明,标定精度在毫米量级时,对反射面的检测精度 RMS 值达到 33 μm,并且以低频误差为主,在局部高频区域检测结果有明显优势,证实了在不使用其他外部设备前提下,集成于智能平板的条纹反射法具备几十微米量级精度的检测能力。

关 键 词: 面形测量;光学检测;条纹反射;智能设备
中图分类号: TH74 **文献标识码:** A doi: 10.3788/CO.20171002.0267

Deflectometry measurement system for smart mobile devices

JI Yi, ZHANG Xue-jun*, YUAN Ting, TAO Xiao-ping
(*Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: zxj@ciomp.ac.cn*

Abstract: Deflectometry is a three-dimension surface measurement method using simple equipment. In this paper, deflectometry based on portable devices such as smart phones and tablets is discussed. First, the calibration error and advantages of mobile devices are proposed. Then, according to analysis of the data and errors in experiments, a series of methods, such as camera non-linear calibration, improved phase shift algorithm, grid position calibration, automatic gain adjustment, are introduced to improve the measurement accuracy and stability. Finally, app launched in an iPad is used to test a 105 mm SiC workpiece. Experimental results indicate that the precision of global surface is 33 μm RMS with millimeter scale calibration accuracy. The error is mostly of low frequency, and the sensitivity is rather high in some areas. It proves that deflectometry integrated in smart tablet has the capability of achieving a measurement accuracy of tens of microns without other external equipment.

Key words: shape measurement; optical testing; fringe reflection; portable device

收稿日期: 2016-10-17; **修订日期:** 2016-12-02
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61036015)
Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61036015)

1 引 言

反射测量术是一种波前斜率测量方法，最早在德国提出[1]，可以追溯到 20 世纪 50 年代，该方法的提出主要是为了满足工业制造业中对自由曲面的测量需求。其基本原理是通过观测反射面对于已知图样的反射变形，利用光线追迹到反射面的斜率信息，建立偏折角度与物面局部梯度或法向矢量的关系，进而重建面形[2]。反射测量技术在过去的几十年用于对汽车喷漆表面、飞机表面、金属镜面等实现微米级快速测量。国际上目前已有相应商品化测量仪器，如法国的 VISUOL 技术公司[3]、德国的 3D-shape 公司[4]和不莱梅应用光学研究所[5]等。

近年来，对反射测量术的大量研究和新标定方法的提出使其得以应用于高精度光学检测领域，利用 LCD 屏幕显示周期性的正弦图样，使用 CCD 相机观测反射图样，具有动态范围大，结构简单，成本低，检测速度快，操作简单等特点。美国 Arizona 大学提出将条纹反射法检测系统放置于反射镜曲率中心附近，使其可应用于超大口径光学检测[6-7]，并应用于直径为 8.4 m 的 GMT 望远镜主镜面形检测[8]，条纹反射法大动态范围的特点解决了干涉仪检测不全的问题，据报道去除低阶像差后精度可达到 nm 量级[8]。国内四川大学与成都光电所[10-11]，中国科学院[12]等都对类似技术有一定研究。然而条纹反射法标定过程复杂，标定误差往往引入低阶像差，结果可靠性受到一定程度的质疑。使用条纹反射法实现高精度全局测量仍是目前的研究难点。

目前，在已经十分普及的智能手机、平板等移动设备中，通常都配备了高分辨率显示屏，前置摄像头和高性能处理器，这已经满足了条纹反射法的基本设备条件。将光学检测手段集成在移动智能设备中，其意义在于为普通智能手机、平板提供一种对反射面进行三维形貌测量的方法，可以让用户无需购买其他外设，只需使用手持设备通过 app 即可对工业界和生活中的类反射面进行快速高精度检测[13]，另外也有望帮助专业技术人员对光学加工过程中的高精度光学反射面进行定性分析，为专业光学加工和检测过程提供更多依据。使用智能移动设备进行检测的优势显而易见，不过廉价的消费级摄像头和设备自身结构的限制也带来了新的问题并影响检测精度。

本文讨论了条纹反射法应用于智能设备的特点，分析了使用智能设备进行实际检测的新问题。通过相机非线性定标、改善相移算法、格点位置标定、应对相机自动增益调整等一系列方法和算法提高了测量精度和稳定性。使用设计的 iOS APP 对实际反射面进行快速便捷测量，探究了在目前硬件条件下能达到的检测精度，验证了智能拍照设备用于条纹反射法的可行性。

2 条纹反射法基本原理

典型的条纹反射法基于简单的光线反射原理，如图 1 所示[14]。系统由显示屏、CCD 相机和待测表面组成，计算机控制 LCD 显示屏生成一幅已知图像，通过相机拍摄反射面对已知图像的调制，由光线追迹原理可以得到其表面斜率信息，进而得到表面梯度分布。

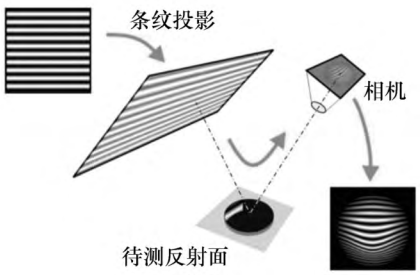


图 1 典型条纹检测法原理

Fig. 1 Schematic diagram of a typical deflectometry measurement

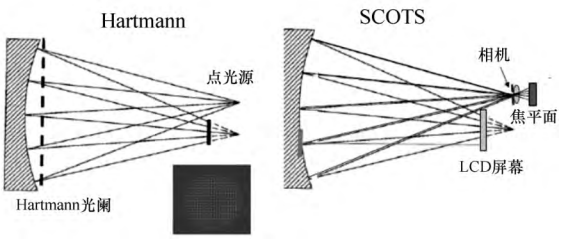


图 2 SCOTS 检测和 Hartmann 检测比较

Fig. 2 Comparison of SCOTS and Hartmann test

美国亚利桑那大学提出了 SCOTS 检测结构[13],强调将屏幕和相机放置于镜面曲率中心附近,可以通过小尺寸屏幕实现对更大口径光学反射面进行检测,如图 2 所示。基本结构可以类比为传统 Hartmann 检测,只不过光是逆向传播的。LCD 显示屏和 CCD 相机的位置代替了 Hartmann 检测中的接受屏和点光源的位置。显示器上的点阵经过镜面反射进入 CCD 相机成像,利用基本的几何关系可以计算得到反射点(x_m,y_m)的斜率 $w_x(x_m,y_m)$,$w_y(x_m,y_m)$,通过对斜率进行拟合积分可以得出待测面形(w)。

$$w_x(x_m,y_m)=\frac{\frac{x_m-x_{screen}}{d_{m2screen}}+\frac{x_m-x_{camera}}{d_{m2camera}}}{\frac{z_{m2screen}-w(x_m,y_m)}{d_{m2screen}}+\frac{z_{m2camera}-w(x_m,y_m)}{d_{m2camera}}}, \tag{1}$$

$$w_y(x_m,y_m)=\frac{\frac{y_m-y_{screen}}{d_{m2screen}}+\frac{y_m-y_{camera}}{d_{m2camera}}}{\frac{z_{m2screen}-w(x_m,y_m)}{d_{m2screen}}+\frac{z_{m2camera}-w(x_m,y_m)}{d_{m2camera}}}. \tag{2}$$

根据几何关系得到的斜率计算公式如式(1)与式(2)。其中被测点的坐标 x_m 和 y_m 可以通过对相机成像进行校准得到,相机坐标 x_{camera} 和 y_{camera} 通过标定和测量得到,屏幕亮斑坐标 x_{screen} 和 y_{screen} 通过质心算法或者相移方法得出; $z_{m2camera}$ 和 $z_{m2screen}$ 是相机距离镜面和屏幕距离镜面的 z 坐标差,$d_{m2camera}$ 和 $d_{m2screen}$ 为相机镜面距离及屏幕和镜面的距离。Z 和 d 都可以通过对系统的标定和测量得到。

$w_x(x_m,y_m)$,$w_y(x_m,y_m)$ 计算式中仍含有待求的面形函数 $w(x,y)$,需对其进行多次迭代计算,初始值为物理坐标确定的参考位置,迭代流程如图 3,通过反复迭代计算得到反射面面形。

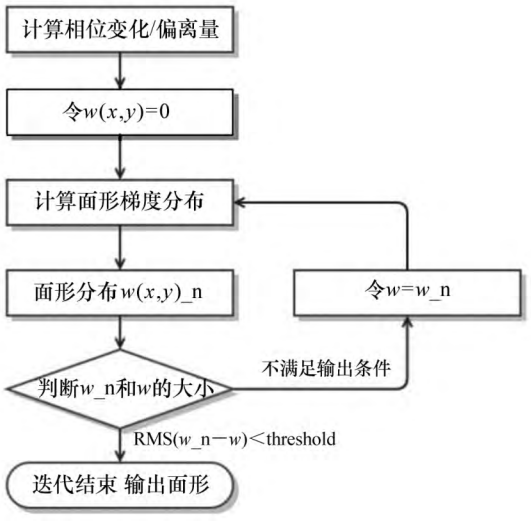


图 3　面形迭代计算流程图

Fig. 3　Flowchart of surface shape iterative calculation

LCD 屏幕上显示的正弦条纹起到对屏幕像素点进行编码的作用,以实现屏幕点和镜面点的一一对应关系。在屏幕上分别显示横向和纵向的正弦条纹,采用数字相移方法,通过相位展开技术得到相位分布,据此进行光线追迹计算待测面上梯度分布。投影正交方向的正弦条纹,使用数字相移技术调制屏幕像素点光强并进行相位展开,相位展开通常使用 Goldstein 枝切法[15]、质量引导法[16]等进行处理以减小噪声影响。在处理复杂连通区域时,区域波前重构法有明显优势。

3　智能移动设备的条纹反射法特点

条纹反射法对反射面进行全局检测时,检测精度很大程度上依赖于系统物理位置标定,也就是摄像机、屏幕和反射镜统一到世界坐标系的精度,物理位置标定误差主要引入的是低阶项。如果希望通过条纹反射法对反射面测量并得到准确可靠的 nm 级检测结果仍然困难重重[14],也对系统各部分标定的精度提出了极高的要求。相机镜头畸变和屏幕非线性都要得到较好的校正,各装置位置需要至少到亚毫米级,抑制噪声和相位展开算法也需要进一步改进,而且评估结果的不确定度也比较困难,不适合单独用于工程高精度检测。

与此同时，也应该注意到条纹反射法装置简单，动态范围大的特点。目前的智能移动设备已经满足进行检测的基本条件：具备高分辨率屏幕、前置摄像头、高速处理器等。在不追求达到亚微米级高精度测量的前提下，条纹反射法应用于手机、平板电脑等智能移动设备中，对反射面和类反射面进行快速测量已经成为可能[13]。在将条纹反射技术向智能设备集成过程中，着重考察智能设备本身的优势，不以追求 nm 级的测量精度为主，而希望在现有硬件条件下提升系统的易用性和测量的普适性。此时，廉价的消费数码级摄像头和智能移动设备的其他特性也会带来新的问题。

3.1 物理位置标定误差模拟

条纹反射法检测残差在很大程度上源于系统相对物理位置测量偏差。利用 CodeV 和 MATLAB 进行光线追迹仿真，模拟给定偏离量时对待测面检测结果的影响。仿真模拟结构如图 4 所示，相机和显示器放置在距离镜面同样远处，距离镜面约 0.4 m，对一直径 80 mm 凹面镜进行模拟检测，考察引入相对物理位置测量误差时的测量残差。

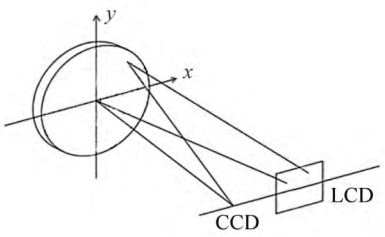


图4 误差仿真坐标系

Fig. 4 Coordinate system of calibration error simulation

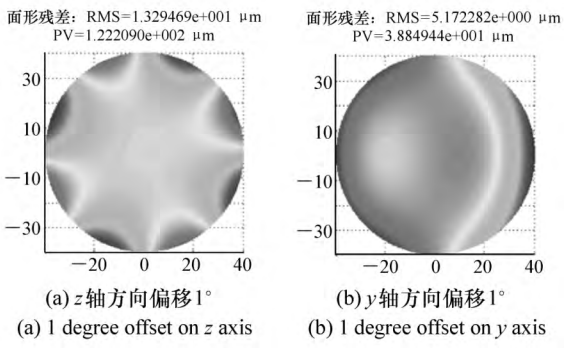
针对仿真过程引入的误差主要有以下3种：

(1) 相机和屏幕相对角度误差；

(2) 屏幕和相机相对位置平移误差；

(3) 待测镜面位置测量误差。

在对相机和屏幕位置进行标定和坐标系变换过程中，LCD 屏幕实际位置和理想位置的区别会产生相对角度标定误差，定义垂直屏幕方向为 z 方向。分别引入 LCD 屏幕在 z 方向的偏移角度和垂直屏幕方向(以 y 轴为例)的偏移角度，进行仿真得到此时的检测残差，如图 5 所示。



(a) z轴方向偏移1°
(a) 1 degree offset on z axis

(b) y轴方向偏移1°
(b) 1 degree offset on y axis

图5 相对角度测量误差仿真结果

Fig. 5 Simulation result of relative angle measurement error

当 z 方向偏移 1°时，会对测得结果产生 RMS 值 10 μm 量级的影响，PV 值在几十 μm 至 100 μm大小的影响，而且引入的误差面形不是简单的低阶像差，无法通过简单去低阶项的方法直接去除。y 方向偏移误差也会引入同数量级的误差，对结果的可信度产生较大影响。

镜面位置测量误差来自于待测面和相机/屏幕的相对位置测量误差，镜面其他信息都通过拍摄的图片反映，在面形迭代重构过程中不会产生影响，因此不会带来角度上的误差，只需考虑平移误差。接下来对镜面位置测量不准确进行仿真。物理位置偏离主要分解为沿镜面相机连线的 z 方向和垂直连线方向的 x-y 平面内。

在 z 方向，仿真计算偏离量在 1 mm、5 mm 和 10 mm 对测量结果的影响如图 6 所示，在偏离 1 mm时，面形残差 RMS 和 PV 值都在 5 μm 以内，此时误差基本可以被迭代重构过程消去；在偏离量达到 10 mm 时，RMS 面形残差为 10 μm，PV 残差44 μm。此时引入的偏差主要为倾斜和离焦的叠加。如果拟合并去除低阶离焦项，此时面形残差在微米量级。

在垂直连线的 x-y 平面中，以 x 方向为例引入 5 mm 误差，其对测量结果产生一个较大的倾斜量，如图 7 所示，对其进行去倾斜操作后，面形残差 RMS 值降至 1 μm 以内，PV 值在 5.2 μm 左右，且主要集中在待测面边缘引起。对于 y 方向进行类似操作，去掉倾斜项后 RMS 面形残差 1.12 μm，PV 值在 4.94 μm 左右，主要由离焦项

造成。最后,屏幕和相机的平移位置误差为镜面位置测量误差和倾斜项的叠加,结果类似。

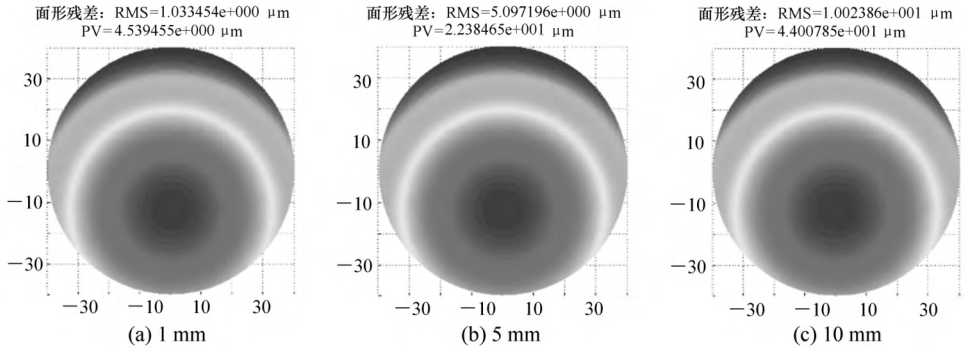


图 6　反射镜沿 z 方向相对位置测量误差仿真

Fig. 6　Simulation result of surface calibration error along z axis

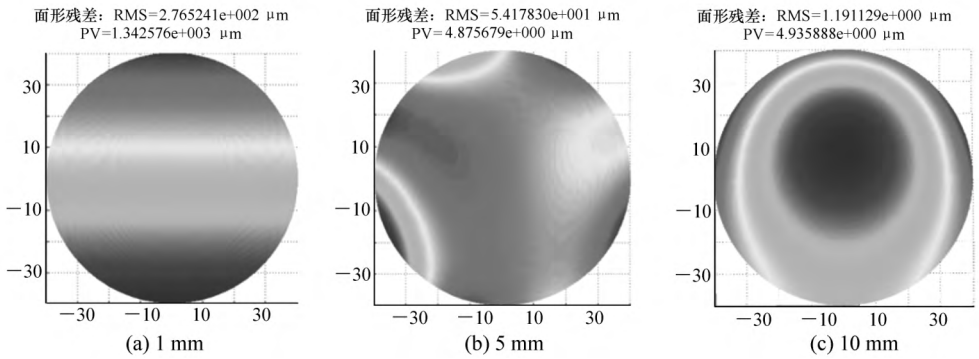


图 7　反射镜沿 x 方向相对位置测量误差仿真

Fig. 7　Simulation result of surface calibration error along x axis

根据物理位置测量偏差对结果的影响可以看出,除角度偏差对系统影响以高阶像差为主,镜面位置偏差主要引入倾斜项和离焦项。从物理位置标定的角度来说,标定精度达到 mm 量级,对镜面全局检测精度可达到几十微米量级。如果离焦等低阶泽尼克系数调整量可以去掉,精度可以提升到微米量级。

3.2　硬件特点分析

3.2.1　相机-屏幕相对位置固定

从 3.1 节条纹反射法的误差仿真中可以看到,相机和屏幕相对位置不确定引入的角度校准误差对测量结果影响较大,1°的角度对准偏差会对结果引入 PV 值 100 μm 左右的误差。对于简易、不追求过高精度的系统,如果没有精确的标定手段,十分有可能产生较大的角度测量偏差和对准偏差。

在移动设备中,镜头和屏幕已经具有了较好的封装结构,且使屏幕各坐标点和前置相机位置固定,角度校准偏差不复存在,仅余下镜面位置测量不确定度对系统引起的误差,以低阶项为主。而且在系统多次使用过程中不会发生改变,仅需第一次标定或通过平面镜预先测量可得到相机和屏幕相对位置。

从物理位置标定误差对检测结果的影响程度考虑,在待测面没有距离手机过近的情况下,物理位置测量达到毫米级,即可实现对待测面几十微米量级精度的检测。

3.2.2　相机无需额外光阑

条纹反射法模型中使用的是理想小孔相机,在通常测量条件下,如 CCD 相机镜头尺寸较大,则需要在镜头前设置额外小孔光阑,此时也会影响到 CCD 相机成像对比度。对相机镜头设置大

小和位置合适的光阑孔径对保证测量精度十分重要。

而对于手机前置摄像头，其尺寸一般很小，基本可以认为是小孔相机，实际拍摄过程中也可以看出其可以对镜面良好成像，这也极大简化了相机和屏幕相对位置的测量过程，在有条件的情况下，可以通过三坐标测量仪得到较为精确的屏幕像素点和相机光阑位置的相对位置关系。

3.2.3 限制待测面尺寸

智能手机屏幕尺寸通常在 5 英寸左右，平板电脑尺寸一般不超过 10 英寸。摄像头和屏幕相对位置固定，对待测面的尺寸、形状提出了要求，无法对凸面和较大的平面进行检测。

对于待测面的限制条件主要来自于相机最大视场角和屏幕尺寸，而且相机角度不能够任意调节。在已知最大视场角 θ_x 和镜面与测量系统距离 z 时，对能够待测面的 F 数范围进行大致估计，模型如图 8 所示。

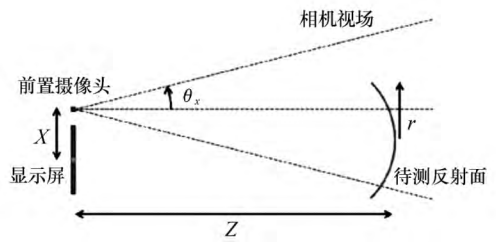


图 8 几何关系示意图

Fig. 8 Schematic diagram of geometric relations

假设镜面的曲率中心位置在 $-x/2$ 处，f 数最小值可以写作 $f_{\#}=Z/4r$，而对于相机，受最大视场角的限制，能进行全口径检测时，应满足：

$$-r<Z\tan(\theta_x)+\frac{X}{2}. \tag{3}$$

由此可以推出 $f_{\#}$ 应满足条件如下：

$$f_{\#}>f_{\#,\min}=\frac{Z}{4\,|\,Z\tan(\theta_x)+X/2\,|}. \tag{4}$$

F 数的最小值表示进行测量的离轴系统和相机应满足的条件。

4 智能设备关键误差分析与优化

条纹反射法集成于智能设备时，误差源可以分为硬件和软件。硬件主要来自于设备本身，比如相机拍摄和屏幕显示的伽马非线性效应[17]，这类系统误差在每次拍摄过程中不会发生改变，也可以通过仔细标定来进行补偿。

软件和算法的误差则更不易定量确定和补偿。移动设备拍摄系统已经高度集成了去噪，自动修正边缘等图像算法，这些问题是使用高精度 CCD 相机不会遇到的，也为利用其进行检测增加了难度。由于拍摄系统的影响，也需要对相位展开算法进行相应优化。

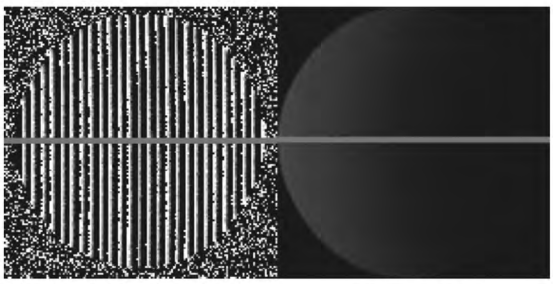
4.1 拍摄图片中存在过饱和点

对拍摄图片进行分析后得知，由于设备本身对相机拍摄照片的优化算法，在镜面反射的正弦图像中，很多点已经过饱和，灰度值达到了 0，即无法和其他亮度未饱和点一样正确地反映出测量值和真实值的对应关系，也会对后续相位展开操作等造成影响并累计误差，过饱和会对检测结果引入高频条纹残差。

使用普通 CCD 相机时，可以通过改变其快门大小和曝光时间，控制拍摄照片中镜面部分图像的直方图在合理范围内，防止过饱和或亮度过低。使用移动设备进行检测时，需要保持背景不要过暗或过亮，并通过控制屏幕亮度实现其经镜面反射后的图像亮度在理想范围内。更有效的普适处理方法还需要进一步探讨。

4.2 相机噪声影响

智能手机前置摄像头成像质量较差，体现在噪声高和确定性差，为此选取对标准凹面检测过程拍摄的四步相移图样进行处理分析，考察其中



(a) 相位展开前 (b) 相位展开后

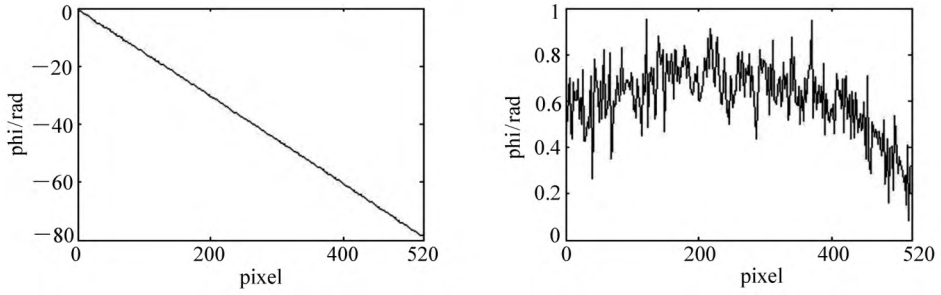
(a) Before phase unwrapping (b) After phase unwrapping

图 9 相位分布

Fig. 9 Phase distribution

随机误差的分布情况,相位展开前后的相位分布如图 9 所示。

考察中心线上的实际相位分布情况,如图 10 所示,去除倾斜量后进行拟合,由系统噪声随机波动产生的相移误差方差在 0.13 rad 左右,这一误差会对确定表面斜率和面形重构过程产生影响。在相移阶段的每一步采集快速拍摄多幅图取平均的方式,可以有效减小随机噪声。



(a) 中心线相位展开位相
(a) Phase distribution after unwrapping

(b) 去除倾斜量后位相值
(b) After removing tilt in (a)

图 10　中心线相位分布

Fig. 10　Phase distribution on the center line

4.3　获取亮度的非线性

由于屏幕显示的非线性和相机对各实际亮度响应的非线性,在采集图像时,相机不能线性地反映出其真实的亮度值,也会出现过饱和的情况。针对这种非线性响应,需考察拍摄图片的亮度信息和屏幕显示的真实亮度值的对应关系。

设计标准图样如图 11 所示,上部由纯黑纯白色块组成,下部由亮度 0 到 255 的 32 级灰度渐变组成。用相机对校准图样进行拍照,通过直方图或像素点对应的方式获取拍摄像素点亮度和显示亮度的对应关系,如图 12 所示。在屏幕亮度较低区域(灰度 30 以下),非线性较明显,高亮度区域也会出现类似情况。

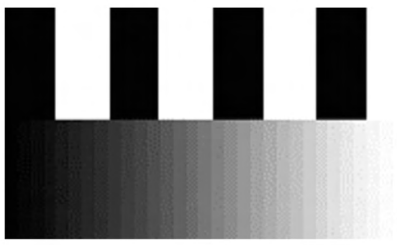
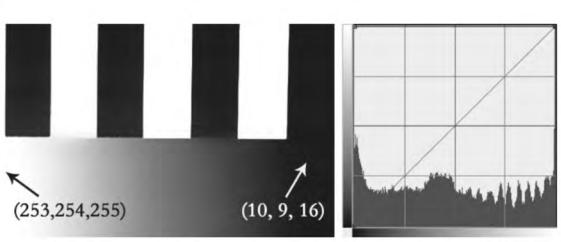


图 11　设计用于非线性校正的标准图样

Fig. 11　Designed pattern for camera nonlinear calibration



(a) 相机实拍的校准图像
(a) Photograph taken from camera

(b) 直方图分布
(b) Histogram distribution

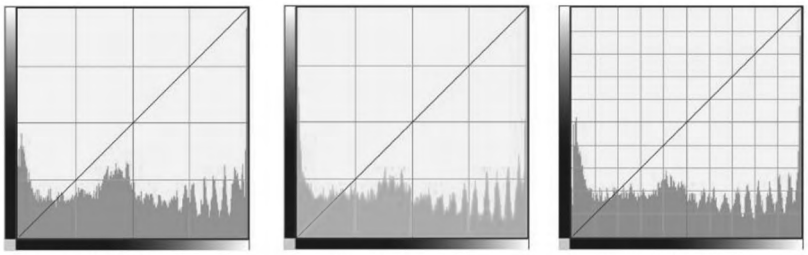
图 12　对校准图样进行拍摄

Fig. 12　Photograph of calibration pattern

对于同一幅图 RGB 三色直方图进行分析,图 13 可看出蓝色分布更均匀,红色波动较大,可以增加蓝色分量的权重或单独抽取蓝色分量亮度值进行后续运算。在使用正弦相移图样时,不再选取亮度值 0 和 255 作为全白和全黑本底,使用 30 到 200 的灰度值作为相移正弦图样的亮度取值范围。另一方面适当降低屏幕亮度以利用显示亮度和采集亮度对应关系较好的区域。

4.4　相机自动增益调整控制

目前,自动增益控制(Automatic Gain Control, AGC)广泛应用于手机和网络摄像头中[20],设备自带算法不通过用户手动设置,根据环境明暗程度自动改变拍摄动态范围。当拍摄区域的平均亮度改变时,相机 AGC 将被触发。如果平均亮度值



(a) 红色分量直方图 (a) Red　(b) 绿色分量直方图 (b) Green　(c) 蓝色分量直方图 (c) Blue

图 13　红绿蓝 RGB 三色直方图分布

Fig. 13　RGB histogram distribution

降低，增益将自动提升以适应环境亮度，并尽量使屏幕中心区域亮度保持定值。这种控制机制导致在拍摄多幅图片过程中，相机自动增益量会发生改变，为测量过程带来了很大的麻烦。

在某些特定情况下，可以直接控制移动设备的相机具体参数，此时可以通过保持其曝光时间等参数为定值进行拍摄。为了把自动增益控制效应降低到最小，从亮度均值角度着手进行优化。对于亮度均值控制，即在镜面反射相移条纹时保留多条正弦条纹，而应使在相移过程中亮度均值不会发生明显改变。

在没有自动增益效应影响时的理想情况，确定每幅相移图的亮度值 I_{phaseN}，需要用拍摄值 $I_{\text{capturedN}}$ 减去屏幕全黑时拍摄图片的亮度值 I_{black}：

$$I_{\text{phaseN}}(x,y) = | I_{\text{capturedN}}(x,y) - I_{\text{black}}(x,y) |, \ \forall (x,y) . \tag{5}$$

受到自动增益效应的影响，拍摄相移图样和全白全黑图片时的反射照片的增益值有明显区别。在此做出假定，AGC 效应对全局各像素点的亮度值的调整在小范围内是线性的，即：

$$I_{\text{gain}}(x,y) = I_{\text{captured}}(x,y) \times \text{Gain}, \ \forall (x,y) . \tag{6}$$

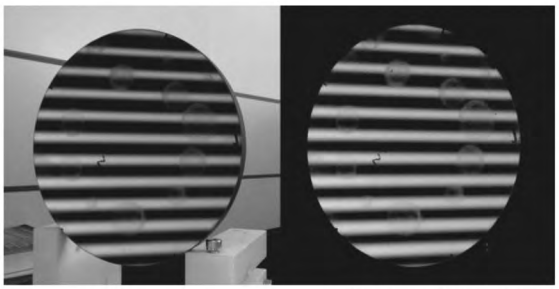
此时需要对两幅待对比的图片进行增益统一化。此处利用待测区域外的特征点亮度比对或者全局平均的方法进行。采用全局平均的方案，通过拍摄的全黑全白图样确定镜面区域后，区域外待平均的区域为 E：

$$\text{if } (I_{\text{white}}(x,y) - I_{\text{black}}(x,y)) < \text{average}[I_{\text{white}} - I_{\text{black}}], \text{then } (x,y) \in E . \tag{7}$$

对 E 区域内所有像素全黑图和相移条纹图亮度比值取平均得到附加增益系数，用增益系数乘以全黑图得到待测相位图 I_{phaseN}。经过增益校准的图样如图 14 所示。

$$\text{Gain} = \frac{\sum_{(x,y) \text{ in } E} \left[\frac{I_{\text{phaseN}}(x,y)}{I_{\text{black}}(x,y)}\right]}{\sum \text{point}_{\text{count}}}, \tag{8}$$

$$I_{\text{phaseN}}(x,y) = | I_{\text{capturedN}}(x,y) - I_{\text{black}}(x,y) \times \text{Gain} |, \ \forall (x,y) . \tag{9}$$



(a) 单帧相移拍摄图像 (a) Photograph of a single frame　(b) 增益校准并移除背景 (b) After removing background with AGC calibration

图 14　控制增益校准算法

Fig. 14　AGC calibration algorithm

处理各帧相移图片过程中，光强的相对准确性会影响检测结果，因此也需对不同帧的相移图片进行增益校准。在未进行 AGC 增益校准时，相邻两幅相移图的统计直方图算数仍有约 5% 的差异，区域外特征点亮度有 3% 的差异。进行增益归一化确定每帧相移图自身的绝对增益 Gain_{N}，再进行后续相位提取和展开等操作。

4.5　角点提取

在对相位图片进行处理前，需要已知某屏幕点经反射成像点和相机成像点的一一对应关系，

并由此获得相机光阑、屏幕像素点和待测面坐标点的物理位置对应关系。在实验室条件下,使用高精度 CCD 相机观察待测面对十字叉丝反射像的方式可进行校准。然而在用智能手机进行检测时,由于摄像头高噪声的影响,往往对校准十字叉丝的拍摄效果较差,并不能和专业级 CCD 相机相提并论,十字叉丝的反射像难以分辨,采用黑白格点替代十字叉丝,利用相邻坐标点的高对比度实现对格点的自动查找,稳定性得到提升。

4.6　相移算法优化

在利用时间相位展开算法对相位信息的获取过程中,难免会受到高噪声和伽马非线性的影响。优化相移算法对进一步提高移动设备的测量精度和普适性有明显效果。

传统使用的四步相移采集到的光强分布函数存在高次谐波引用,其响应函数:

$$f(x) = a + bx + \sum_{i=z}^{k} c_i x^i. \tag{10}$$

四步相移法的近似误差:

$$\Delta\phi = \phi' - \phi \approx -\arctan\left[\sin\frac{(4\phi)}{k}\right]. \tag{11}$$

即四步相移计算结果存在 4 倍频的误差,这也较容易直观理解,在相位相减并相除的过程中,全明全暗点与非线性较明显区域会留下痕迹。

针对四步相移的理论问题,采用双四步相移法进行替代和改进[21]。其思想是以四步相移算法和多频外差相结合,在四步相移的基础上增加一次带相位偏移的测量(在对应条纹图上移相 $\pi/4$),对每种频率的两次结果进行对齐平均,抵消四倍频误差。

智能移动设备摄像头非线性响应明显,使用双四步测量方法可以显著提高测量可靠性。双四步相移技术可以和多频相位平均相结合,或采用相位平均法[22],对随机误差有更好的抑制效果,目前的实验研究尚未使用双四步相移法,对各相移算法的定量比较分析有待进一步研究。

5　App 运行流程与实验研究

5.1　App 运行流程

目前主流智能移动设备配备的前置摄像头通常在 100 万像素至 200 万像素,显示屏分辨率通常不低于 720p,每英寸像素数(PPI)可以达到 200 以上。为了减小设备对反射面形状尺寸的限制,选取屏幕稍大的 iPad Air 作为 app 运行平台,开发相应的 iOS app。该设备屏幕尺寸为 9.7 英寸,相比于智能手机的 5 寸左右屏幕测量优势明显,配备了 1 024 × 1 280 分辨率的前置摄像头,FOV 为 54.4,屏幕分辨率为 1 536 × 2 048,PPI 为 264,相邻像素间隔 96.2 μm。app 的运行流程和用户交互流程如图 15。

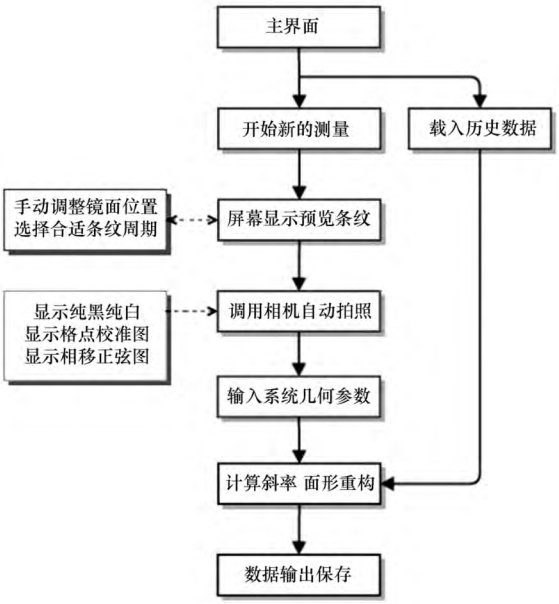


图 15　iOS 条纹反射法 app 运行流程图

Fig. 15　Flowchart of iOS app for deflectometry

通过预览窗口选择合适的条纹周期并手动调整镜面位置,固定设备位置,进入下一步,屏幕显示相移图样和全黑全白图片并调用相机自动拍摄。最后,需要手动输入的相对物理位置包括:

(1) 镜头到屏幕图片的二维距离 X 和 Y (图 16所示);

(2) 屏幕到镜面顶点的距离 Z_1;

(3) 相机到镜面顶点的距离 Z_2;

(4) 镜面尺寸,对于圆形镜面给出半径 R。

5.2　实验

实验采用 iPad 对一个近平面反射镜进行检测,该镜近似为圆形,直径 105 mm,表面若干点经



图 16 相机与条纹距离物理位置示意图

Fig. 16 Sketch of location between camera and fringe pattern

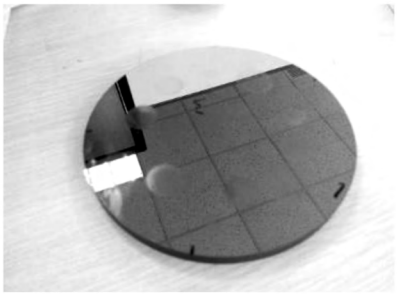


图 17 SiC 反射镜，表面有光学加工痕迹

Fig. 17 SiC mirror with optical manufacturing signs on the surface

过了光学加工，有明显加工痕迹，如图 17 所示，加工去除深度约在微米量级。对该反射面的检测，一方面探究现有硬件在不经过仔细标定所能够达到的低频检测精度；另一方面会反应出条纹反射法一贯的的低频检测精度较低的问题；同时加工点局部区域内的高频刀痕也有一定挑战。屏幕显示全白图片和根据全黑全白差值得到的镜面区域二值化判断如图 18 所示，由于支架漫反射，其亮度也会发生变化，被误判为镜面，不过会在获得绝对条纹图时自动舍去。



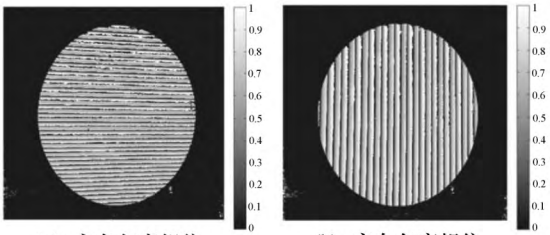
(a) 全白图样拍摄照片 (b) 二值化镜面区域

(a) Photograph of whole white pattern (b) Binary mirror area

图 18 确定待测镜面区域

Fig. 18 Identity mirror area

经过去噪，增益系数归一化等操作，获取相移图样和水平竖直方向的相位包裹如图 19 所示。

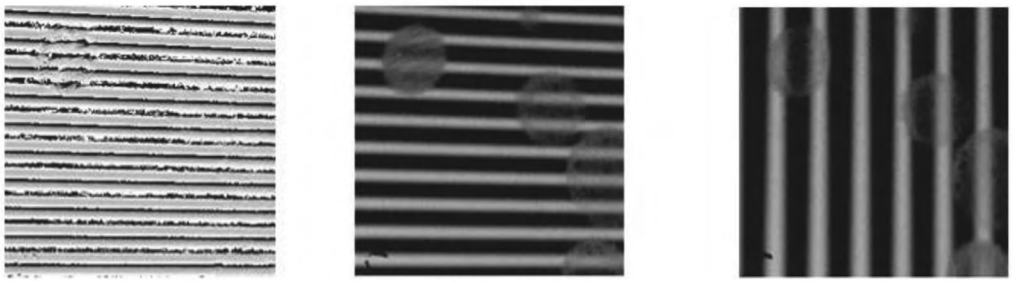


(a) x方向包裹相位 (b) y方向包裹相位

(a) Wrapped x phase (b) Wrapped y phase

图 19 x，y 方向相位包裹

Fig. 19 Phase wrapping on the direction of x and y axis



(a) x方向相位 (b) x方向相移单帧图像 (c) y方向相移单帧图像

(a) Phase distribution on x-axis (b) Photograph of a frame on x-axis phase shift (c) Photograph of a frame on y-axis phase shift

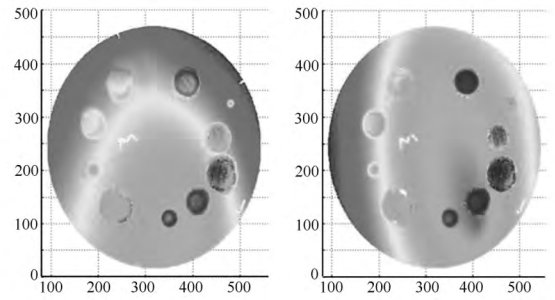
图 20 被加工区域对条纹产生弯折

Fig. 20 Fringe deformation in the manufacturing area

在相位包裹中对镜面加工区域进行局部放大,如图 20 所示,条纹有明显弯折。在对最终面形的分析过程中,会对加工区域重点关注。

通过面形重建得到待测面面形,如图 21 所示,可以明显看到表面加工点的痕迹。测量结果仍有较明显的低频误差。同时,由于拍摄过程中过饱和等非线性影响,在加工点小圆圈附近会出现个别像素点无法计算出真实值。

去除倾斜量后,得到图 21(b) 结果。通过直接观察读数,可以得到各点加工的深度分别在 3 μm至 50 μm 不等。这也和我们预期的光学加工结果较为接近。



(a) 面形重构结果　(b) 去除倾斜量

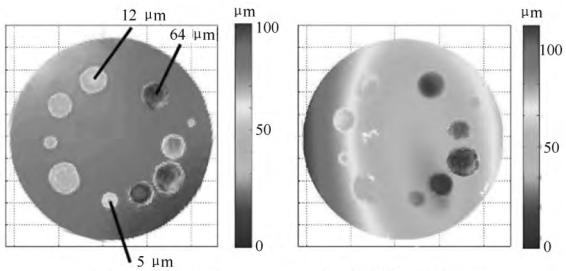
(a) Result of the surface reconstruction　(b) After removing tilt

图 21　SiC 反射镜检测结果

Fig. 21　Testing result of the SiC mirror

已知该表面加工前为高精度平面,此时测量结果主要误差表现为低阶像差,排除各加工区域对低频误差进行分析,此时残差 RMS 值为 33.4 μm。这也和仿真过程中得到的由镜面物理位置引入的误差面形较为接近。另外此时仍受随机噪声影响,检测结果中存在部分噪点。

同时,利用三坐标测量仪对面形进行了检测并进行比较,测量结果如图 22(a) ,图中标记了典型的几个加工区域深度。另外对前面得到的结果进行中值滤波减小噪声,并拟合到圆域,如图 22(b) ,由于拍摄畸变影响,条纹反射法测量结果和三坐标标准测量结果有一定区别。考察各子加工区域测量结果,通过三坐标测量得到的各加工点实际深度与条纹反射法测量结果进行比较,误差在 10 μm 以内。在深度较大时,边缘曲率变化很大,可能会对测量结果产生影响,受噪声影响也较大。



(a) 三坐标测量仪结果　(b) 条纹检测法结果

(a) Testing result of CMM　(b) Testing result of deflectometry

图 22　条纹反射法与三坐标测量结果对比

Fig. 22　Comparison of testing result of deflectometry and coordinate measuring machine

6　结　论

本文从原理上分析了条纹反射法集成于智能移动设备中的若干特点,针对移动设备的特点分析了物理位置标定误差对检测结果的影响,得出使用移动设备集成条纹反射法进行检测时,毫米量级的标定精度即可实现微米到几十 μm 精度的检测结果。从优化软件算法的角度出发,利用相机非线性定标、改善相移算法、格点位置标定、滤波去噪、应对相机自动增益调整等一系列方法提高测量精度和稳定性。设计了用于 iOS 的 app,使用 iPad Air 对直径 105 mm 的反射面进行了实验检测,实现了 30 μm 精度的测量。证实了使用智能平板进行几十 μm 精度的检测能力。

参考文献:

[1] LIGTENBERG F K. The Moiré method-a new experimental method for the determination of moments in small slab models [J]. *Proc. SESA*, 1954, 12(2): 83-98.

[2] KNAUER M C, KAMINSKI J, HAUSLER G. Phase measuring deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces [C]. Photonics Europe. International Society for Optics and Photonics, 2004: 366-376.

[3] ROSE P,SURREL Y,BECKER J M. Specific design requirements for a reliable slope and curvature measurement standard [J]. *Measurement Science and Technology*,2009,20(9):095110.

[4] 3D-Shape. A New Method to Measure Specular Free-Form Surfaces [EB/OL]. [2016-06-08] http://www.3d-shape.com/produkte/pmd_e.php.

[5] BOTHE T,LI W,VON KOPYLOW C,*et al*.. High-resolution 3D shape measurement on specular surfaces by fringe reflection [C]. Photonics Europe. International Society for Optics and Photonics,2004:411-422.

[6] SU P,PARKS R E,WANG L,*et al*.. Software configurable optical test system:a computerized reverse Hartmann test [J]. *Applied Optics*,2010,49(23):4404-4412.

[7] HUANG R,SU P,HORNE T,*et al*.. Optical metrology of a large deformable aspherical mirror using software configurable optical test system [J]. *Optical Engineering*,2014,53(8):085106.

[8] SU P,KHREISHI M A H,SU T,*et al*.. Aspheric and freeform surfaces metrology with software configurable optical test system:a computerized reverse Hartmann test [J]. *Optical Engineering*,2014,53(3):031305.

[9] SU P,WANG S,KHREISHI M,*et al*.. SCOTS:a reverse Hartmann test with high dynamic range for Giant Magellan Telescope primary mirror segments [J]. *SPIE*,2012,8450:84500W-9.

[10] **赵文川,范斌,伍凡,等. 基于** PMD **的反射镜面检测实验分析** [J]. **光学学报**,2013,33(1):0112001.
ZHAO W CH,FAN B,WU F,*et al*.. Experimental analysis of reflector test based on phase measuring deflectometry [J]. *Acta Optica Sinica*,2013,33(1):0112001.(in Chinese)

[11] **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.
YAN T,XIANYU S,YUANKUN L. Three-dimensional shape measurement of aspheric mirror based on fringe reflection [J]. *Acta Optica Sinica*,2009,29(4):965-969.(in Chinese)

[12] **王华荣,李彬,王志峰,等. 基于条纹反射术的槽式抛物面单元镜面形测量** [J]. **光学学报**,2013,33(1): 0112007.
WANG H R,LI B,WANG ZH F,*et al*.. Surface measurement of parabolic trough unit mirror based on fringe reflection [J]. *Acta Optica Sinica*,2013,33(1):0112007.(in Chinese)

[13] BUTEL G P,SMITH G A,BURGE J H. Deflectometry using portable devices [J]. *Optical Engineering*,2015,54(2):025111.

[14] H USLER G,FABER C,OLESCH E,*et al*.. Deflectometry vs. interferometry [J]. *SPIE*,2013,8788:87881C-11.

[15] GOLDSTEIN R,ZEBKER H,WERNER C. Satellite radar interferometry:two-dimensional phase unwrapping [J]. *Radio Science*,1988,23(4):713-720.

[16] FLYNN T J. Consistent 2-D phase unwrapping guided by a quality map [C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium,1996. IGARSS96,IEEE,1996,4:2057-2059.

[17] **张旭,朱利民**. Gamma **畸变的相位误差模型与** Gamma **标定技术** [J]. **光学学报**,2012,32(4):143-150.
ZHANG X,ZHU L M. Phase error model from Gamma distortion and Gamma calibration [J]. *Acta Optica Sinica*,2012,32(4):143-150.(in Chinese)

[18] OHTSUBO J,FUJIMOTO A. Practical image encryption and decryption by phase-coding technique for optical security systems [J]. *Applied Optics*,2002,41(23):4848-4855.

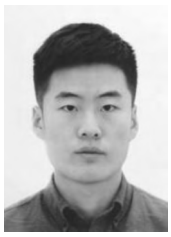
[19] AYUBI G A,DI MARTINO J M,ALONSO J R,*et al*.. Three-dimensional profiling with binary fringes using phase-shifting interferometry algorithms [J]. *Applied Optics*,2011,50(2):147-154.

[20] IULIAN ROSU. Automatic Gain Control (AGC) in Receivers, [EB/OL]. [2016-06-08]. http://www.qsl.net/va3iul/Files/Automatic_Gain_Control.pdf.

[21] **陈立伟,刘涌,毕国堂,等. 双四步路径相移均值法** [J]. **计算机应用**,2014,34(6):1830-1833.
CHEN L W,LIU Y,BI G T,*et al*.. Double four-step route phase-shifting average algorithm [J]. *J. Computer Applications*,2014,34(6):1830-1833,1838.(in Chinese)

[22] YONG L,DINGFA H,YONG J. Flexible error-reduction method for shape measurement by temporal phase unwrapping:phase averaging method [J]. *Applied Optics*,2012,51(21):4945-4953.

作者简介:



冀　翼(1992—) : 男,黑龙江大庆人,2013 年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事光学检测技术方面的研究。E-mail: jiyi4321@ gmail. com



张学军(1968—) : 男,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,主要从事大口径非球面加工与检测、新型空间反射镜制造、空间相机总体设计等方面的研究。E-mail: zxj@ ciomp. ac. cn

《中国光学》征稿启事

《中国光学》为双月刊,A4 开本; 刊号: ISSN 2095-1531/CN 22-1400/O4; 国内外公开发行,邮发代号: 国内 12-140,国外 BM6782。

★ 荷兰 Scopus 数据库
★ 美国《乌利希国际期刊指南》
★ 美国《化学文献》
★ 波兰《哥白尼索引》
★ 俄罗斯《文摘杂志》
★ 中国精品科技期刊
★ 中国科技核心期刊
★ 中国光学学会会刊
★ 中国科技论文与引文数据库
★ 中国期刊全文数据库
★ 万方数字化期刊全文数据库
★ 中国科技期刊数据库
★ 中国光学期刊网数据库

主要栏目: 微纳光学、信息光学、集成光电子、光谱学和光谱仪器、激光技术与应用、光学功能材料、光学设计与工艺、大气与空间光学、光学仪器与测试、综述、前沿动态、产业资讯、科普教学、实验室介绍、自然科学基金项目进展、前沿热点访谈、热点论文等。

发稿类型: 学术价值显著、实验数据完整的原创性论文; 研究前景广阔,具有实用、推广价值的技术报告; 有创新意识,能够反映当前先进水平的阶段性研究简报; 对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告; 以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿。

主管单位: 中国科学院
主办单位: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所
协办单位: 激光与物质相互作用国家重点实验室
编辑出版 《中国光学》编辑部
投稿网址: http: //chineseoptics. net. cn
邮件地址: chineseoptics@ ciomp. ac. cn; zggxcn@ 126. com
联系电话: 0431-86176852; 0431-84627061　　传　　真: 0431-84627061
编辑部地址: 长春市东南湖大路 3888 号(130033)