

引用格式: ZHANG Lian-tao, LU Rong-sheng, CHENG Zi-yi. Measurement Technique of High-reflected Surface Based on Phase Measuring Deflectometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(1): 0112002

张莲涛, 卢荣胜, 程子怡. 基于相移偏折法的高反射表面面形测量技术[J]. 光子学报, 2020, 49(1): 0112002

基于相移偏折法的高反射表面面形测量技术

张莲涛, 卢荣胜, 程子怡

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 合肥 230009)

摘 要: 利用单相机所采集的图像实现了对光滑高反射表面面形的直接检测. 首先利用相机获取参考平面在标准平面镜中的镜像, 然后通过参考平面上的点与归一化成像平面上图像点之间的密集折返对应关系, 求得待测镜面的深度距离, 从而实现对高反射表面面形的测量. 通过光线追迹将该测量过程转化为求解物空间中关于两对应光线束之间的相交问题. 以相位为载体获取面形梯度分布, 求得该表面的法向量场, 并求解相应的反射光线束. 通过光线追迹对该光线束与相应入射光线束求“交点”检测高反射表面. 对标准平面镜进行实验检测, 测量得到的面形平面度为 0.19 mm. 采用传统方法与本文所提方法对汽车后视镜进行检测, 所得检测结果对应点之间的平均距离为 0.15 mm, 验证了本文方法检测镜面面形的有效性.

关键词: 相移测量; 直接检测; 镜面法向量场; 光线追迹; 高反射表面面形

中图分类号: TN247

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204901.0112002

Measurement Technique of High-reflected Surface Based on Phase Measuring Deflectometry

ZHANG Lian-tao, LU Rong-sheng, CHENG Zi-yi

(School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The direct measurement of the smooth and high-reflected surface was realized using images acquired by a single camera. Firstly, the image of the reference plane in the standard plane mirror was captured by the camera. Then, the depth distance of the mirror to be measured was obtained, by using the dense reflection correspondence between the points on the reference plane and the image points on the normalized imaging plane. Finally, the measurement of high-reflected surface was achieved. The high-reflected surface was measured by finding the "intersection point" between the camera ray beam and the corresponding incident ray beam. The ray tracing was used to transform the measurement process into an intersection problem between the two corresponding ray bundles in the solution space. The normal fields of the surface were obtained and the corresponding reflected light beam was solved based on the surface profile gradient which is obtained by taking the phase information as the carrier. The standard plane mirror is tested and the measured flatness is 0.19 mm. The rearview mirror is detected by the traditional method and the method proposed in this paper, and the average distance between the corresponding points in the test result is 0.15 mm, which verifies the effectiveness of the method for detecting the mirror surface shape.

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51875164), 国家重点研发计划 (No. 2018YFB2003801), 国家重大科学仪器开发专项 (No. 2013YQ220749)

第一作者: 张莲涛 (1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉与光电检测. Email: cczhangliantao@163.com

导师 (通讯作者): 卢荣胜 (1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为机器视觉和光学测量. Email: rslu@hfut.edu.cn

收稿日期: 2019-06-06; 录用日期: 2019-08-13

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

Key words: Phase shift measuring; Direct measurement; Normal vector fields of specular surface; Ray tracing; High-reflection surface shape

OCIS Codes: 120.4630; 120.5050; 120.5060; 120.6650; 120.5700; 120.2650

0 引言

高反射表面被广泛应用于生产实践中,但投射到其表面的光束会发生镜面反射,这给加工制造过程中对其面形的无损检测带来了难度.根据镜面反射的特点,国内外研究组有针对性地设计了镜面面形检测系统.基于相移偏折反射(Phase Measuring Deflectometry, PMD)法的镜面面形检测技术因其灵敏度高且系统误差易于修正,受到了研究人员的青睐.适用于不同应用场景的相关算法相继被提出,但探索一种高鲁棒性、实时性、适用性强的镜面面形测量方法,仍是该领域内研究人员的共同目标.

中国科学院自动化研究所^[1]提出基于成像模拟法镜面面形检测,以参数曲面逼近待测镜面面形.香港大学^[2]通过在显示器屏幕所在平面的三个不同姿态中建立反射对应,在物空间施加共线性约束实现了对大曲率且连续的高反射表面面形局部恢复.且该研究组^[3]将相机到待测镜面之间的深度距离建模,利用相关理论对透明物体的形貌测量进行了研究.合肥工业大学^[4]利用高反射表面法向量场的唯一性结合双目立体视觉的极线约束,实现了对不同曲率高反射表面 3D 形貌的恢复.英国哈德斯菲尔德大学^[5]运用迭代算法,对立体相位偏折镜面检测系统整体标定,以提高镜面面形测量精度.四川大学^[6]建立了结合图像拼接技术双目镜面检测系统.河北工业大学^[7]利用双远心透镜研制了可对非连续性类镜面物体整体面形进行检测的系统.湘潭大学^[8]利用相移偏折术进行了光学反射镜表面的缺陷检测.中国科学院长春光机所^[9-10]、清华大学^[11]、南洋理工大学^[12]采用相关迭代补偿算法对高反射表面面形进行了恢复.

基于以上分析,本文采用多频条纹反射相位提取精度的误差补偿法,通过多项式拟合获得含有较低噪声的反射对应关系,进而求解待测镜面的深度距离以获取其 3D 面形.利用梯度信息对高反光物体表面法向量场整体建模,避免了传统方法对镜面面形或其深度信息构造相应函数所引入的截断误差.且该算法不受相关积分算法过程中误差累积及反复迭代的困扰.该检测方法原理简单、移植性强,可实现对待测高反射表面面形的高精度直接测量.

1 相移偏折系统测量原理

高反射表面相移偏折法检测系统主要由液晶显示器(Liquid Crystal Display, LCD)、相机与待测镜面组成,其原理示意如图 1(a).其中,显示器屏幕作为参考平面,由计算机控制显示器生成相移条纹图像;相机通过待测表面注视参考平面,利用高反表面折返镜像特性,采集受该高反表面曲率变化调制的条纹图像,通过解调条纹相位信息恢复该镜面的 3D 面形.

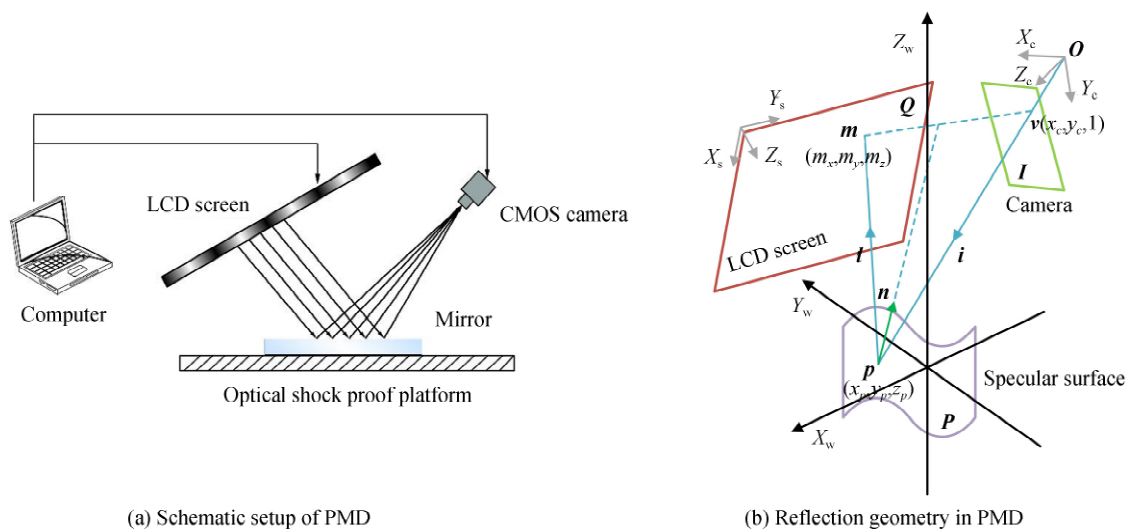


图 1 条纹反射检测系统的几何原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of geometric principle of measuring experimental device

图 1(b)反映了检测系统的光路追迹情况^[1],图中 $X_w - Y_w - Z_w, X_s - Y_s - Z_s, X_c - Y_c - Z_c$ 分别表示物体、屏幕与相机坐标系.在相机坐标系下,以 O 为光心的针孔相机观测参考平面 Q 在镜面 P 中的镜像,其归一化像平面为 I . Q 上的点 m 通过镜面 P 上的 3D 镜像点 p 在 I 上的成像点为 v ,称 m 和 v 为折返对应.为了描述方便,设经过点 v 的光线 i 为入射光线,则反射光线 l 由点 m 和 p 确定, n 为 p 点处的法向量.从图中可以看出,对于像平面上有效测量范围区域 $I_x \times I_y$ 上的点 (x, y) ,入射光线 i 与镜面(非切向)交于点 $p(x, y) = s(x, y)v$,其中 $v(x, y) = (x, y, 1)^T$ 表示 i 的方向矢量, $s(x, y)$ 为待测曲面上的点 p 在相机坐标系下的深度函数.则像面上的点 (x, y) 、参考平面上的点 m 和表示空间点 p 的深度函数 $s(x, y)$ 可表示为^[3]

$$\begin{cases} \frac{\partial s}{\partial x} = f_x[s, x, y, m(x, y)] \\ \frac{\partial s}{\partial y} = f_y[s, x, y, m(x, y)] \\ s(x_0, y_0) = s_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, s_0 为函数 s 在该点 (x_0, y_0) 处的初始值.由式(1)可知偏导数 f_x 和 f_y 最终只是 x, y 和 s 的函数,由深度距离 s 确定的镜面面形是初始值问题(1)的解,且该解满足如下的 2 阶多项式方程^[3].

$$Ds^2 + Es + F = 0 \quad (2)$$

式中,系数 D, E 和 F 的精确值取决于 x, y, m 及其分别对 x 和 y 的偏导数.一般地,该 2 阶多项式方程的两个根只有一个能表示镜面的深度距离.

2 显示器编码原理

本文采用具有四步相移的正弦条纹,获取显示器像素点与成像平面图像点之间的折返对应关系.在显示器屏幕上分别显示水平和竖直两个方向相互正交的条纹,实现对显示器上的每个像素点编码.其同方向相邻两幅条纹图相位差为 $\pi/2$,其数学表达式为

$$I_n(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos \left[\varphi_0(x, y) + \frac{2\pi(n-1)}{4} \right] \quad (3)$$

式中, n 为条纹幅数,分别取 $1, 2, \dots, 4$.由式(3),可联立方程组求解得到

$$\varphi_0(x, y) = \arctan \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \quad (4)$$

式(4)求解条纹相位的问题在于反正切函数的值域为 $[-\pi, \pi)$,因此求解出的相位值被包裹在 $[-\pi, \pi)$ 之间,称之为相位主值,通过主值相位恢复其绝对相位称作相位解包裹过程.

绝对相位解包裹算法有多种处理方式,文献[13-14]详述了不同相位解包裹方法的原理,按多频时间相位展开可提高绝对相位解包裹的精度且易于实现,因此本文采用该方法以实现对显示器像素的编码.解包裹算法实际应用中所处理的都是由相机采集的图像,不可避免地会存在噪声.由于四步相移法中相位误差具有较强的周期性和对称性,因此,本文利用文献[15]提出的算法,利用额外的“相移”除去因显示器和相机成像

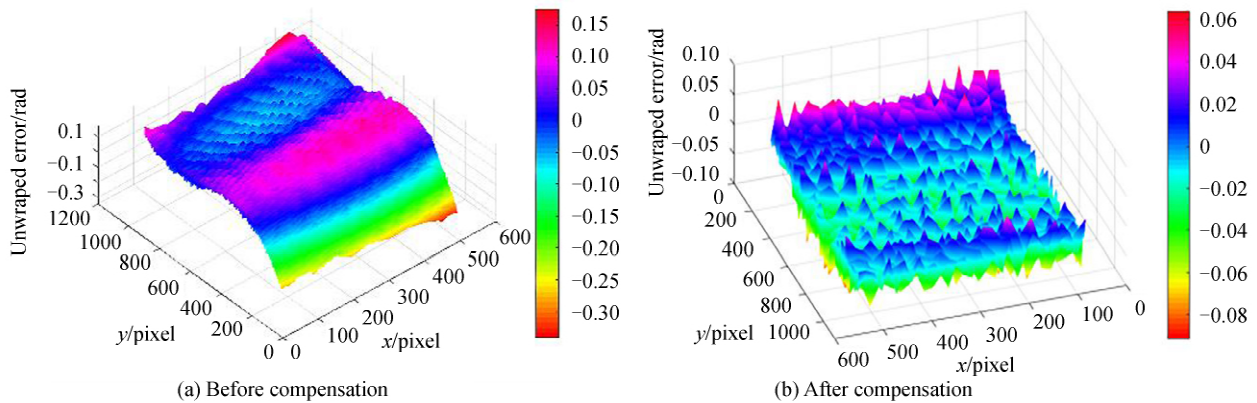


图 2 列相位解包裹误差补偿前后结果(单位:rad)

Fig.2 Before and after compensation result diagram of the column unwrapped phase error (unit: rad)

的 Gamma 效应引起的相位误差:通过投射初始相移量分别为 $0, \pi/8, \pi/4$ 和 $3\pi/8$ 的条纹,将相位误差中的低频分量消除.实验中采用四次四步相移相位误差补偿方法,相位解包裹误差补偿前后结果如图 2.对于求解偏微分方程(1)与多项式方程(2)测量高反射表面的折返对应关系,由参考平面上的点和归一化成像平面上的对应点通过多项式拟合得到,每次拟合均方根值(Root Mean Squared Error, RMSE)均小于 0.1 mm.

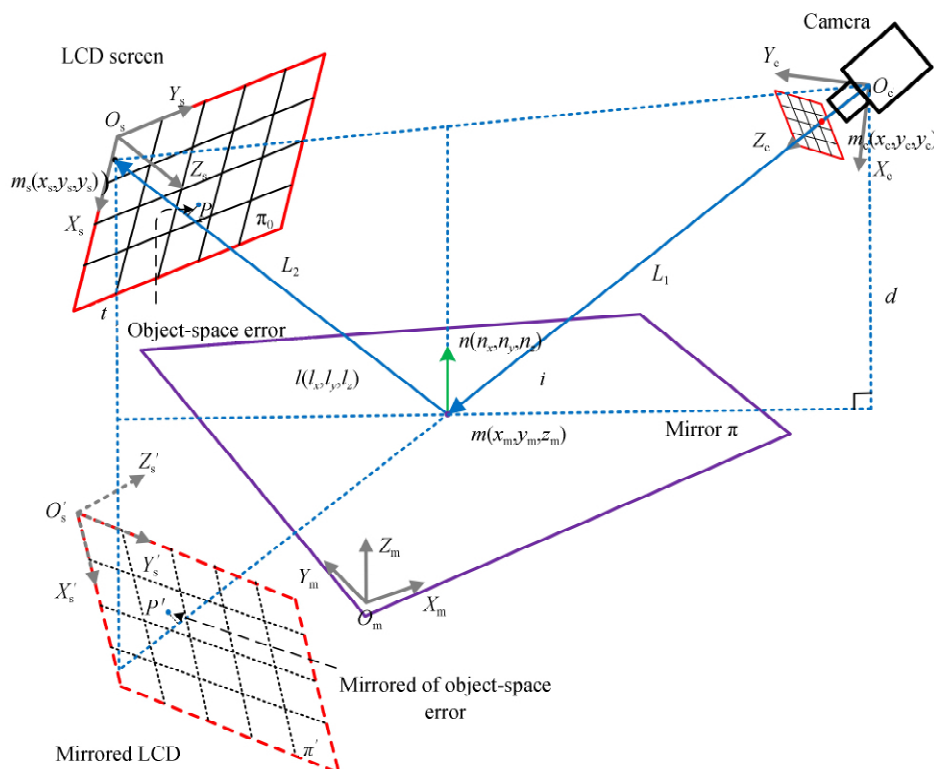
3 检测系统标定

图 1 所示的测量系统参数标定采用文献[16]介绍的镜面反射标定方法.如图 3(a),相机通过一个位姿可变的镜面对显示器显示的棋盘格靶标成像,通过标定算法计算得到屏幕镜像相对于相机的姿态转换矩阵,然后通过物空间将共线性误差最小化,得到实际屏幕相对于相机的旋转矩阵 $\tilde{\mathbf{R}}$ 和平移矢量 t .该检测系统具体标定的流程如图 3(b).

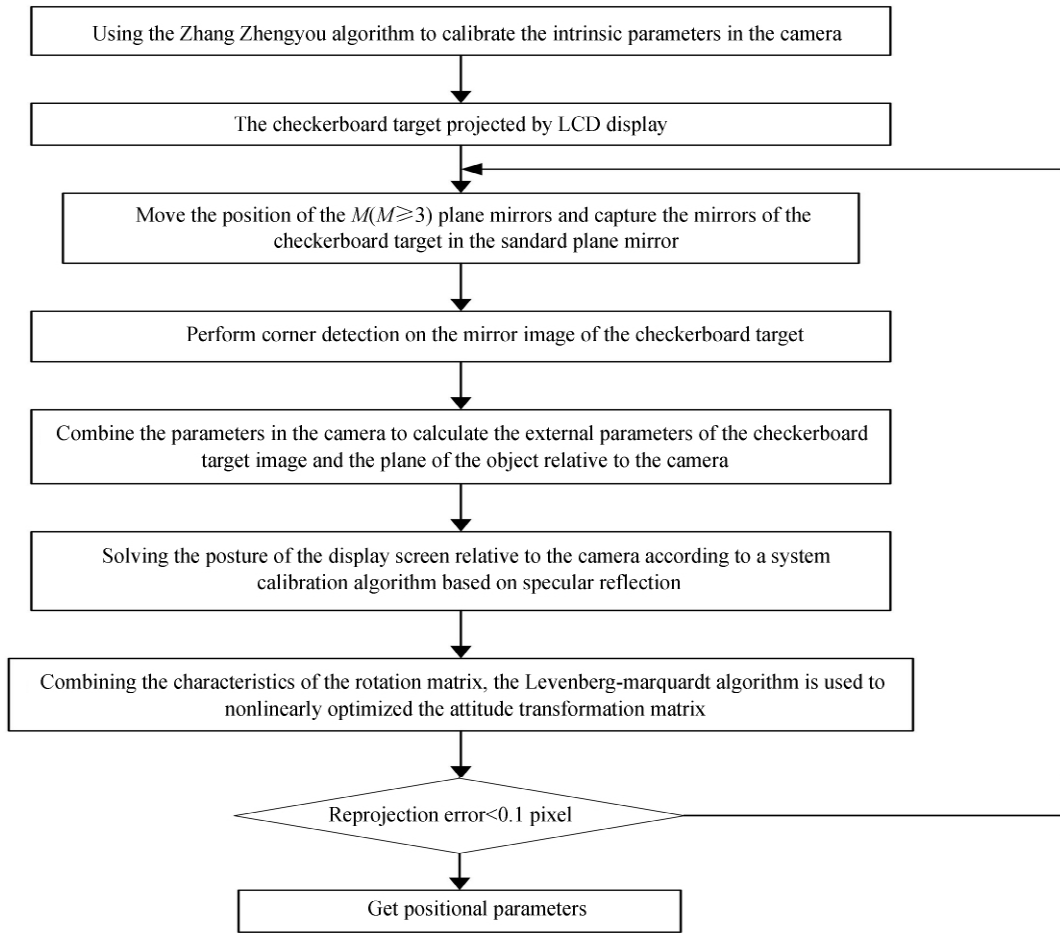
位置参数计算过程中,由于现实情况下存在噪声扰动,利用上述方法直接计算得到的姿态矩阵距理论值有一定的误差,为此将上述方法获取的姿态转换矩阵作为初始值,对该姿态转换矩阵进行优化.屏幕靶标角点在屏幕坐标系下的点转换到相机坐标系下的点 m_i ,通过屏幕靶标与镜像相机之间的姿态映射关系将屏幕靶标角点重投影到其镜像上的镜像点 m'_i ,最小化其实际点 m'_i 与重投影镜像点之间的误差,并结合旋转矩阵的特性^[17],优化该姿态转换矩阵 $\tilde{\mathbf{R}}$ 和 t ,最终将该优化问题转化为如式(5)的非线性最小二乘问题,该问题可通过 Levenberg-Marquardt 迭代法^[18]求解.

$$\min \sum_{i=1}^N \| m''_i(\tilde{\mathbf{R}}, t) - m'_i \|^2 \quad (5)$$

在本文的实验中,系统标定优化结果如图 4,蓝色圆点为通过角点检测得到的屏幕靶标镜像点,红色点表示未进行优化之前屏幕靶标角点经重投影得到的该镜像点,绿色点表示优化后通过屏幕靶标角点重投影得到的该镜像点,经计算,最终平均重投影误差为 0.05 pixel.



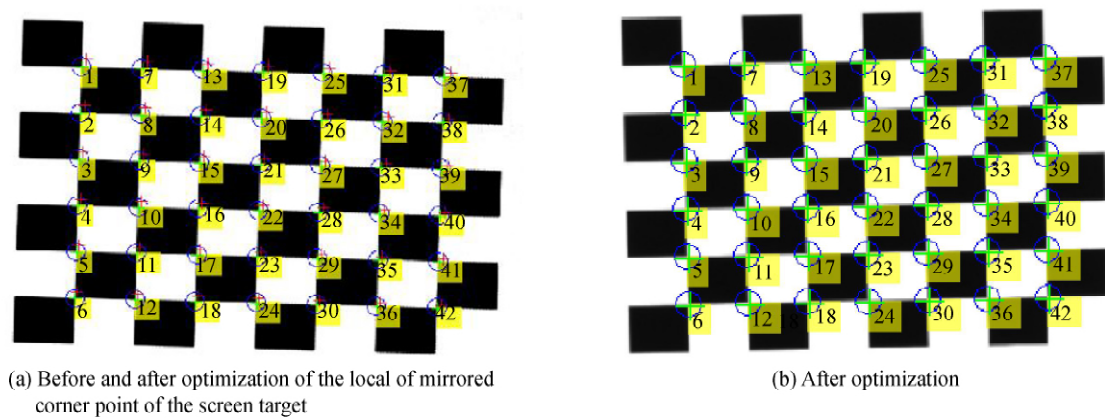
(a) Geometric principle of specular reflection



(b) Calibration flowchart

图 3 基于平面镜的相机标定

Fig.3 Camera calibration based on mirror



(a) Before and after optimization of the local of mirrored corner point of the screen target

(b) After optimization

图 4 系统标定优化过程

Fig.4 Optimization process of system calibration

如第 1 节所述,图像点 (x_i, y_i) 相对应的参考平面上的 3D 点 m_i , 该点相应镜面点处的法线为 $n = l - i$. 一般地,若用函数 $z = z(x, y)$ 表示待测镜面,其导数为

$$\begin{cases} p = \frac{\partial z}{\partial x} \\ q = \frac{\partial z}{\partial y} \end{cases} \quad (6)$$

对应于微分几何,其表面单位法向量也可以表示为

$$\mathbf{n} = \left[-\frac{p}{N}, -\frac{q}{N}, \frac{1}{N} \right]^T \quad (7)$$

式中, $N = (1 + p^2 + q^2)^{1/2}$, 相应的反射光线 l_i 的方向向量可以表示为

$$\mathbf{l}_i = (l_x, l_y, l_z)^T = \mathbf{i}_i - 2\langle \tilde{\mathbf{n}}_i, \mathbf{i}_i \rangle \tilde{\mathbf{n}}_i \quad (8)$$

式中, $\mathbf{i}_i = \|(x_i, y_i, 1)\|^{-1}(x_i, y_i, 1)^T$ 和 $\tilde{\mathbf{n}}_i = \|\mathbf{n}_i\|^{-1}\mathbf{n}_i$.

对于类平面镜面物体,其表面梯度场可通过文献[19]求得,结合式(7)即可确定其待测物体表面法向量场.对于标准平面镜,文献[16]给出了其表面法向量求解方法.此时所求得的法向场是在待测物体坐标系下,需要将其转化到相机坐标系下.根据向量场的矢量性可知,对于不同坐标系下的同一物体的表面法向量,要将其归一化到相机坐标系下,只需经过旋转变换即可.因此,只需将靶标置于与物体坐标系姿态一致的系下即可,此时物体坐标系与靶标坐标系的原点可不在空间中的同一点,但需保证这两个坐标系之间的 x, y 与 z 坐标轴姿态一致.通过不断试验,移动靶标使其坐标系与物体坐标系各坐标轴方向相同.再通过常规方法标定该靶标在相机坐标系下的外参数,最后只经旋转变换将该法向量场转化到相机坐标系下,即可求得相机坐标系下的相应的反射光线 l_i 的方向向量 $\mathbf{l}_i = (l_x, l_y, l_z)^T$.

从图 4(a)可知,在相机坐标系下,直线 L_1 的方程为 $\frac{x}{x_c} = \frac{y}{y_c} = \frac{z}{z_c}$.若待测表面上某个点法线方向矢量 $\tilde{\mathbf{n}}_i$ 和对应的显示器的编码点 $m_s(x_s, y_s, z_s)$ 已知,那么在已知入射光线 L_1 的情况下,对应的反射光线 L_2 的直线方程也可唯一确定,直线 L_2 的方程为 $\frac{x - x_s}{l_x} = \frac{y - y_s}{l_y} = \frac{z - z_s}{l_z}$.通过该直线方程与其相对应的入射光线 L_1 求“交点”,即可求得待测表面的点位置坐标,若两对应光线不相交则转为求其两者之间的最近点.针对表面光滑的高反射表面,其面形应满足如下的光滑性约束条件^[22],对于镜面上任意一点 p_{m1} 及其邻域内的点 p_{m2} , $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$ 分别为 p_{m1}, p_{m2} 处表面单位法向量, $\mathbf{L}(p_{m1} - p_{m2})$ 表示点 p_{m1} 到 p_{m2} 的单位方向矢量,则该镜面的表面光滑性约束可描述如下

$$\begin{cases} \lim_{p_{m1} \rightarrow p_{m2}} \mathbf{L}(p_{m1} - p_{m2}) \cdot \mathbf{n}_1 = 0 \\ \lim_{p_{m1} \rightarrow p_{m2}} \mathbf{L}(p_{m1} - p_{m2}) \cdot \mathbf{n}_2 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

考虑式(9)的约束条件,对得到的测量结果进行整体面形分析,引入如下代价方程

$$E_{\text{smooth}}(\hat{p}) = \max[|\mathbf{L}(p_{m1} - \hat{p}) \cdot \mathbf{n}_1(\hat{p})|, |\mathbf{L}(p_{m1} - \hat{p}) \cdot \mathbf{n}_2(\hat{p})|] \quad (10)$$

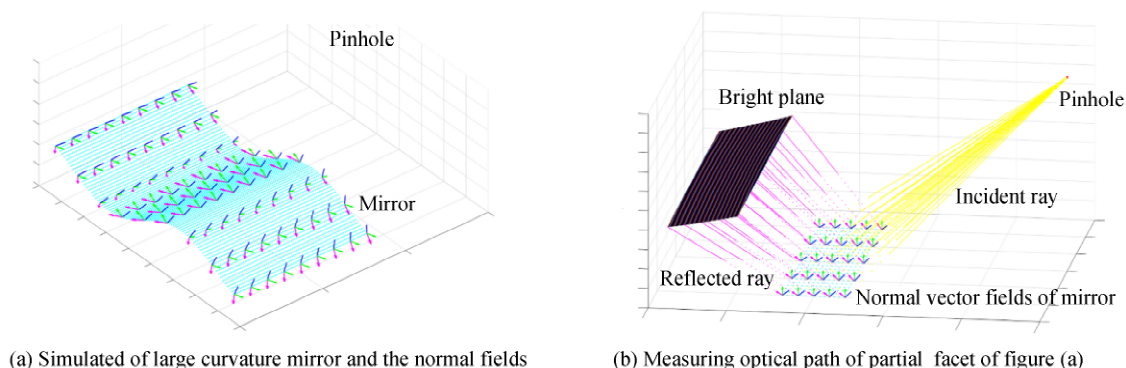


图 5 相移条纹反射法测量光路逆追迹示意图

Fig.5 Simulation of the testing based on fringe reflection

一般地,该代价函数将在待测镜面点 p_{m2} 处达到最小值.当待测镜面为平面时,函数 $E_{\text{smooth}}(\hat{p})$ 将在点 p_{m2} 处为 0.分析可知,函数 $E_{\text{smooth}}(\hat{p})$ 的值域为 $[0, 1]$,通过式(10)设置阈值,对于不满足上述镜面光滑性约束的点,利用待测点邻域及其法线值对所恢复的表面施加该约束,唯一求解待测镜面的 3D 面形.上述过程,可用光线逆追迹法^[1]对该检测系统的光路进行模拟,如图 5 所示.

4 实验结果与分析

4.1 实验

为了验证所提方案的可行性,本文采用第1节所述的相移偏折系统,对标准平面镜和汽车后视镜进行面形检测.利用大恒 DH-HV1351UM 的 CMOS 工业相机,分辨率为 $1\ 280\ \text{pixel} \times 1\ 024\ \text{pixel}$,像素尺寸为 $5.2\ \mu\text{m} \times 5.2\ \mu\text{m}$.相机标定采用定制的高精度陶瓷标定板,其棋盘格边长为 $6\ \text{mm}$,精度 $10\ \mu\text{m}$.使用联想 L1710A LCD 液晶显示器作为参考平面,分辨率为 $1\ 280\ \text{pixel} \times 1\ 024\ \text{pixel}$,像元尺寸为 $0.264\ \text{mm} \times 0.264\ \text{mm}$.系统标定过程中用到的标准平面反射镜是大恒的矩形平面反射镜,其尺寸为 $100\ \text{mm} \times 150\ \text{mm}$.检测装置实物图、相机所采集的部分图像及其提取的目标区域(Region of Interest, ROI)如图6.

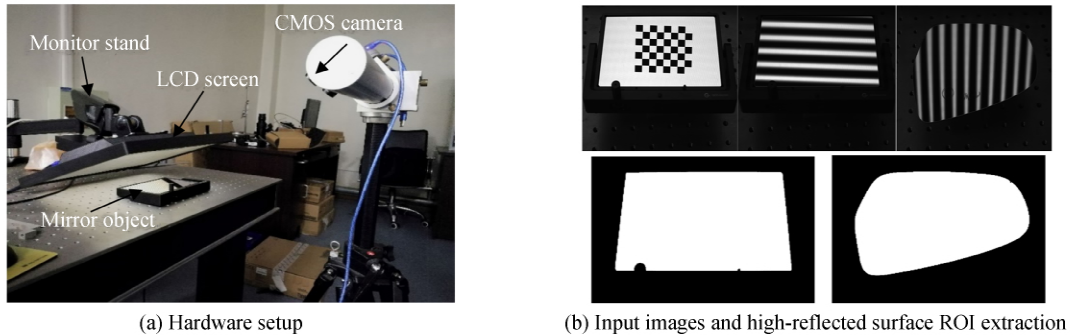


图6 测量实验装置

Fig.6 Measuring experimental device

检测过程中,在保证被测镜面处于相机视场内且无过曝光现象产生的前提下,对 LCD 位置及亮度无特定要求,只需保证相机能够清晰完整的采集到相应镜像即可.实验过程中,采用时间相位解包裹算法,其各点的展开相位与其周围像素点无直接联系,因此环境光对实验结果影响不大;但为突出待测镜面的高反光特性,应避免光学平台等额外反射的干扰,除显示屏背景亮度,环境中其它光源关闭为宜.经试验,LCD 与相机的相对位置满足反射定律,且当检测系统中光线入射角和反射角在 30° 左右时,能得到更准确的检测结果.

数据处理时,首先使用 MATLAB 相机标定工具箱标定相机的内参数,然后用张正友等提出的方法^[17]获取相机内参与屏幕参考平面坐标系相对于相机坐标系的姿态转换矩阵.按第3节所述系统标定优化后,完成屏幕对相机的标定,通过文献^[19]的方法完成相位标定.需要注意,由于相机所采集的镜像横条纹相位移动方向与其原方向相反,因此纵横包裹相位应采用不同的计算公式.在标准平面镜的图像采集完成后,将后视镜置于与平面镜空间位置相近的区域,且应尽量避免两镜面的摆放位置的高度误差.将靶标坐标系与物体坐标系对准后,结合之前标定的相机内参数,用常规方法标定基准平面相对于相机的姿态,将所得到的法向量经旋转变换化到与相机坐标系姿态一致的坐标系下.最后结合前述镜面面形检测方法,完成对待测镜面面形的整体测量.

4.2 结果分析

将待检汽车后视镜置于最高分辨率为 $0.1\ \mu\text{m}$ 的三坐标测量机(型号:MC 850)下进行采样检测,其中, x 、 y 方向采样步长均为 $6\ \text{mm}$,检测点数为 594 点.通过拟合获得该表面的 3D 面形点云数据,采样检测结果及其拟合面形如图 7(a)所示.图中单位均为毫米,下同.该面形拟合方程为: $z(x, y) = -752.4 + 0.234\ 9x - 0.368\ 2y - 0.000\ 396\ 7x^2 - 0.000\ 398\ 5y^2$,RMSE: $0.01\ \text{mm}$,拟合误差分布如图 7(b).后面将其作为基准数据,以衡量检测结果的精度.检测实验中,对于标准平面镜的面形检测,利用求解初始值问题(1)偏微分方程方法的得到的测量结果如图 8(a)所示,矩形点和菱形点分别表示按不同积分次序求解该偏微分方程的结果,圆点表示该面形的拟合平面.图 8(b)是通过求解多项式方程(2)对标准平面镜 3D 面形测量的结果.最后在标准平面镜三维形貌检测的基础上,通过多项式方法完成对汽车后视镜的表面面形测量,结果如图 8(c)所示.用赵鑫等提出的立体匹配方法^[4,20],对相同高反面进行检测,结果如图 9.相同实验装置下,利用基于 PMD 的线-线相交模型对标准平面镜以及后视镜的测量结果分别如图 10(a)、10(b),图 10(c)呈现了该后视镜检测结果的微观曲面面形分布情况.利用软件 CloudCompare 中 Fine Registration 工具,将实验检测得到

的后视镜 3D 面形点云与其基准数据,通过迭代最近点(Iterative Closest Point, ICP)方法进行面形匹配,其 3D 面形点云融合结果如图 11.对于标准平面镜与后视镜,利用不同镜面面形的检测方法,得到相应的检测结果,衡量其检测结果精度的各项指标,如表 1 所示.在用 Southwell 所提出的区域波前重构法^[21]对后视镜面形进行检测,其结果如图 8(d),通过坐标系归一化后,将该检测结果对由基于 PMD 的线-线相交模型所得到的检测结果进行验证.经计算,这两种检测结果对应两点之间的平均距离为 0.15 mm,两种方法具有较好的一致性,至此验证了本文所用方法具有较高的精度.

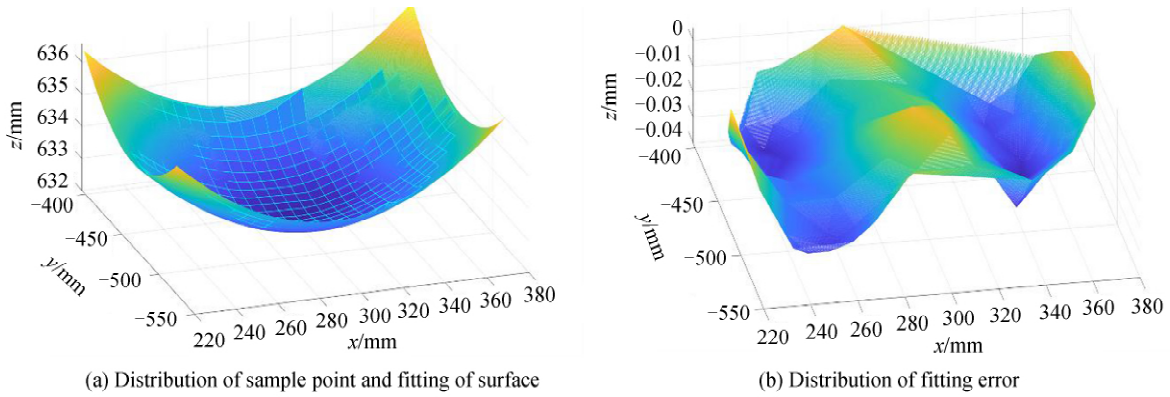


图 7 三坐标测量机采样检测结果及其拟合面形

Fig.7 The result of sampling detection by the coordinate measuring machine and its fitting shape

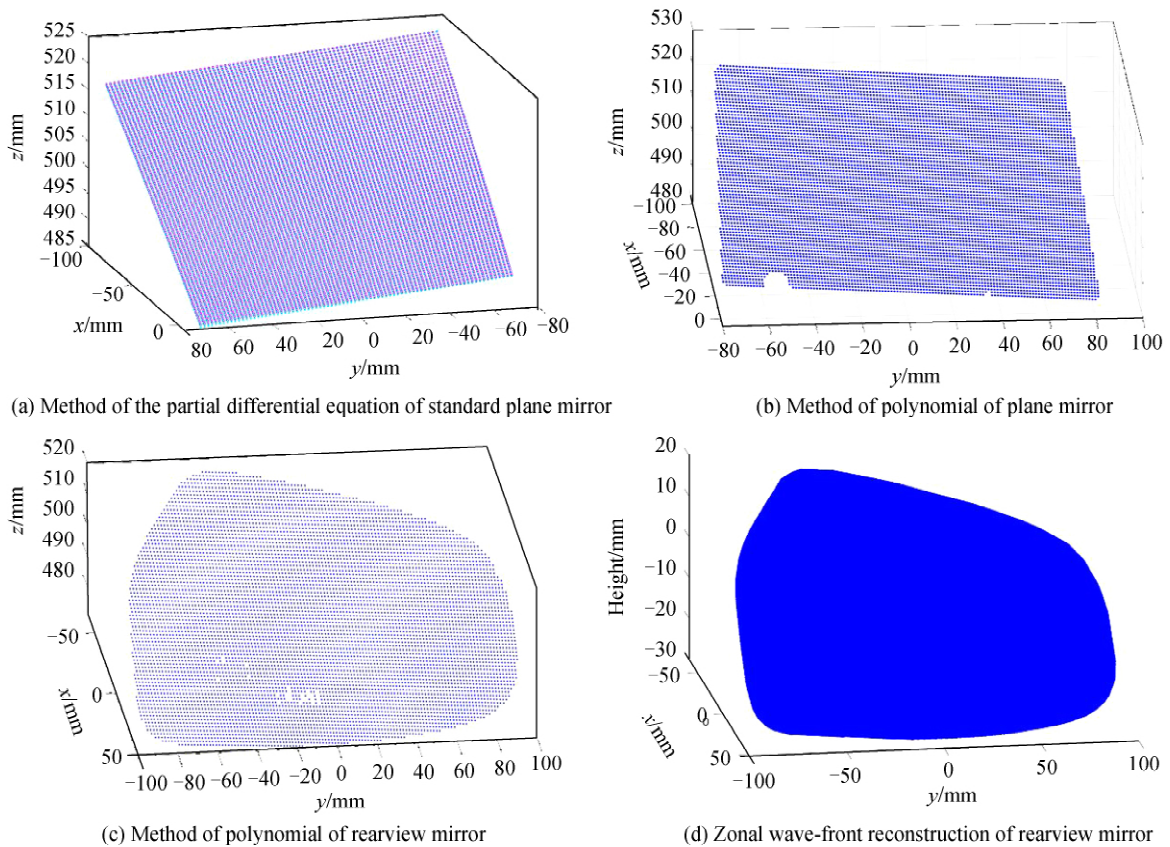


图 8 镜面物体表面面形测量结果

Fig.8 Surface measurement results of specular objects

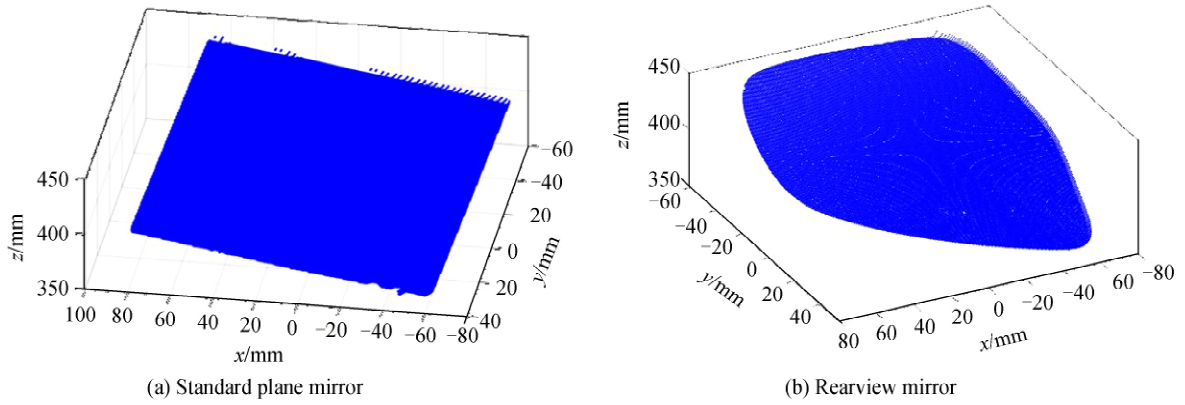


图 9 利用光栅相位偏折结合立体视觉测量模型对镜面面形的检测结果

Fig.9 Measurement of mirror using model of grating phase deflection combined with stereo vision

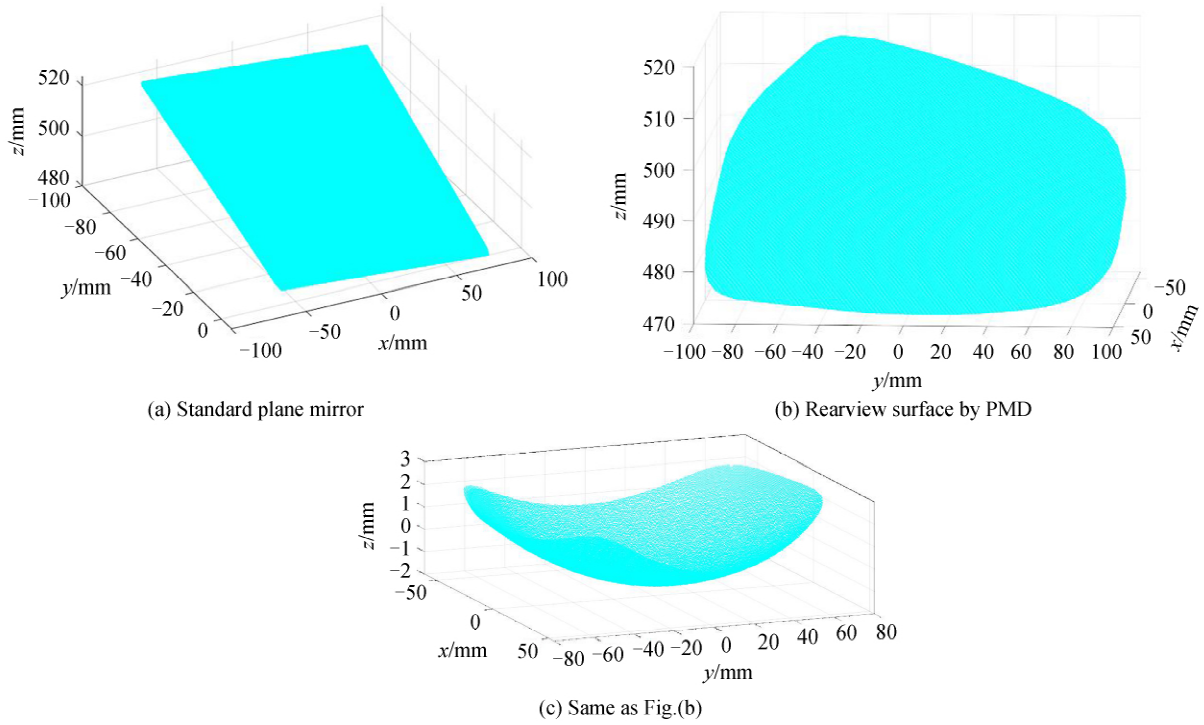


图 10 利用线-线相交模型对镜面的测量结果

Fig.10 Measurement of mirror using model of line-line intersection in PMD

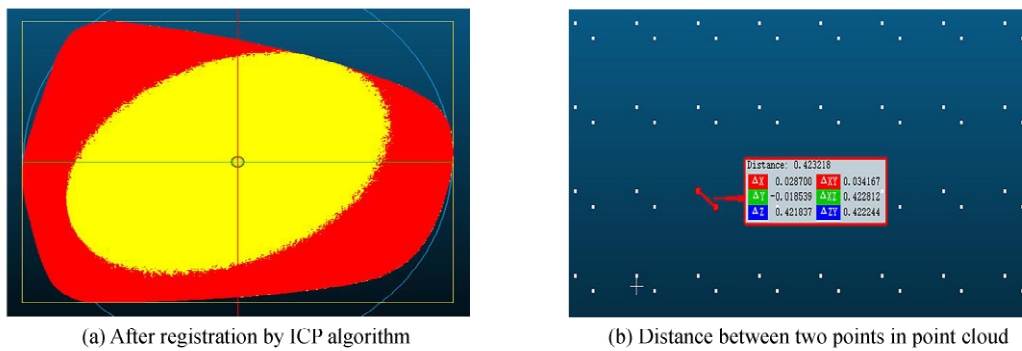


图 11 线-线相交方法所得汽车后视镜检测结果与其基准数据的面形融合情况

Fig.11 Profile distribution of rearview mirrors by method of line-line intersection in PMD

表 1 不同镜面检测方法精度比较(单位:mm)

Table 1 Comparison of different measurement methods of mirror surface (unit: mm)

Algorithms	Evaluation methods	Flatness of the standard	Matching point error of the
		plane mirror	rearview mirror
	Zonal wave-front reconstruction		± 0.085
	Grating phase deflection combined with stereo vision	0.98	± 0.8
	Method of polynomial	0.75	± 1
	Method of the partial differential equation	0.68	
	Model of line-line intersection in PMD	0.19	± 0.5

5 结论

本文利用单目相机实现了对镜面面形的便捷性检测,对显示器屏幕平面只需进行一次标定,该方法为直接测量高反射表面整体面形提供了新思路.由于通过求解镜面深度距离的镜面面形测量方法易受噪声影响,而且将深度距离建模并用方程表示其相互之间的关系,只适用于检测表面光滑且连续的镜面面形.因此,可将这种方法所得到的待测镜面面形作为其初始迭代面,再结合相关迭代补偿算法逼近待测高反射表面的真实面形,提高用该方法检测镜面面形的精度.在本文所提出的方法中,由于待测高反面的表面法向量场的精确获取与显示器编码和系统标定精度相关,为此可采用更高分辨率的显示器实现更精确的编码、提高系统整体标定精度,并以此为基础实现对不同曲率高反射表面的面形测量.对于复杂的大曲率高反射面、透明光学镜面、非连续性镜面如阶梯性高反光表面或大尺寸镜面,将本文所提方法应用到对这些特殊场景下的高反射表面面形检测是进一步研究的方向.

参考文献

- [1] FU Sheng-peng, ZHAO Ji-bin, XIA Ren-bo, *et al.* Imaging simulation method for specular surface measurement[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, **51**(10): 17-24.
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.
- [2] LIU Miao-miao, KWAN Y K. WONG, DAI Zhen-wen, *et al.* Pose estimation from reflections for specular surface recovery[C]. 2011 IEEE International Conference on Computer Vision, 2011:579-586.
- [3] LIU Miao-miao, HARTLEY R, MATHHIEU S. Mirror surface reconstruction from a single image[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015, **37**: 760-773.
- [4] ZHAO Xin. 3D Shape measurement of specular surface based on grating projection[D]. Hefei: Hefei university of technology, 2017.
赵鑫. 高反射表面光栅投影三维形貌测量技术[D]. 合肥:合肥工业大学, 2017.
- [5] XU Yong-jia, GAO Feng, ZHANG Zong-hua, *et al.* A holistic calibration method with iterative distortion compensation for stereo deflectometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, **106**:111-118.
- [6] CHEN Peng-yu, LI Da-hai, WANG Qiong-hua, *et al.* A method of sub-aperture slope stitching for testing flat element based on phase measuring deflectometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, **110**:392-400.
- [7] NIU Zhen-qi, GAO Nan, ZHANG Zong-hua, *et al.* 3D shape measurement of discontinuous specular objects based on advanced PMD with bi-telecentric lens[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(2):1615-1632.
- [8] XIAO Yong-liang, LI Si-kun, ZHANG Qi-can, *et al.* Optical fringe-reflection deflectometry with sparse representation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, **104**:62-70.
- [9] YUAN Ting, ZHANG Feng, TAO Xiao-pin, *et al.* Test of optical mirror surface using fringe reflection system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(9): 0912004.
袁婷, 张峰, 陶小平, 等. 条纹反射法检测光学反射镜面形[J]. *光子学报*, 2015, **44**(9): 0912004.
- [10] YUAN Ting, ZHANG Feng, TAO Xiao-pin, *et al.* Three-dimensional shape measuring for specular surface based on phase measuring deflectometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(2):0212004.
袁婷, 张峰, 陶小平, 等. 基于相位测量偏折术的反射镜三维面形测量[J]. *光学学报*, 2016,**36**(2):0212004.
- [11] ZHOU Tian, CHEN Kun, WEI Hao-yun, *et al.* Improved method for rapid shape recovery of large specular surfaces based on phase measuring deflectometry[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(10):2760-2770.
- [12] HUANG Lei, IDIR M, ZUO Chao, *et al.* Comparison of two-dimensional integration methods for shape reconstruction from gradient data[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, **64**:1-11.
- [13] DAI Zhi-yang, ZHA Xian-jie. An accurate phase unwrapping algorithm based on reliability sorting and residue mask[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, **9** (2): 219-223.
- [14] ZUO Chao, HUANG Lei, ZHANG Min-liang, *et al.* Temporal phase unwrapping algorithms for fringe projection

- profilometry: A comparative review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, **85**: 84-103.
- [15] MAO Cui-li, LU Rong-sheng. Inverse-phase error compensation method for improvement of phase recovery accuracy of multi-fringe projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, **38**(4): 232-240.
毛翠丽, 卢荣胜. 提高多频条纹投影相位提取精度的反向误差补偿法[J]. *光学学报*, 2018, **38**(4): 232-240.
- [16] LI Xin, LONG Gu-can, GUO Peng-yu, *et al.* Accurate mirror-based camera pose estimation with explicit geometric meanings[J]. *Science China Technological Sciences*, 2014, **57**(12): 2504-2513.
李鑫, 龙谷灿, 郭鹏宇, 等. 具有精确几何意义的基于镜面的精确相机姿态估计[J]. *中国科学技术大学学报*, 2014, **57**(12): 2504-2513.
- [17] ZHANG Zheng-you. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11):1330-1334.
- [18] ENDRE S, DAVID F M. An introduction to numerical analysis[M]. Cambridge University Press, 2003.
恩德·苏利, 大卫·梅耶斯. 数值分析导论[M]. 哥伦比亚大学出版社, 2003.
- [19] SONG Lei. Three-dimensional shape measurement based on fringe projection and fringe reflection [D]. Chengdu: University of electronic science and technology of china, 2012.
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.
- [20] KNAUER M C, KAMINSKI J, HAUSLER G. Phase measuring deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces[C]. SPIE. 2004, **5457**(0): 366-376.
- [21] SOUTHWELL W H. Wave-front estimation from wave-front slope measurements[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1980, **70**(8):998-1006.
- [22] WANG Zeng-fu, INOKUCHI S. Determining shape of specular surfaces[C]. Tromso, Norway, The 8th Scandinavian Conference on Image Analysis, 1993.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No. 51875164), National Key Research and Development Project of China (No. 2018YFB2003801), the National Major Scientific Instruments and Equipment Development Project of the Ministry of Science and Technology of China(No.2013YQ220749)