

光亮表面双目立体视觉三维形貌测量方法

程子怡¹, 卢荣胜^{1*}, 毛翠丽^{1,2}

¹合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;

²南阳理工学院机械与汽车工程学院, 河南 南阳 473004

摘要 光亮表面因其反射特性,一般三维形貌测量方法对此难以测量,针对该问题,本文给出了基于双目视觉结合相位偏折法对光亮表面进行三维形貌测量的方案。双目系统布局选用相机横向摆放方式,完整的屏幕-相机-可调节载物台测量系统被集成在定制框架内。对相移法中存在的非线性相位误差进行校正,在主值相位图内进行反向相位误差补偿,提高解包裹精度,为减小标定误差,将系统标定得到的位置参数使用 Levenberg-Marquardt 算法优化。结合光亮表面法向量唯一性和相机的极线约束提高匹配点搜索效率,对传统三角法求空间点进行改进,提高待测物表面点求取准确性,实验结果验证了所提方案具有较高的测量精度和稳定性。

关键词 测量; 双目立体视觉; 三维形貌测量; 匹配点搜索; 相位偏折; 位置标定

中图分类号 TH741

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.071202

Measurement Method of Three-Dimensional Shape of Bright Surface with Binocular Stereo Vision

Cheng Ziyi¹, Lu Rongsheng^{1*}, Mao Cuili^{1,2}

¹ School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;

² School of Mechanical & Automotive Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang, Henan 473004, China

Abstract Due to the reflection characteristics of the bright surface, the general three-dimensional shape measurement method are difficult to measure. To solve this problem, a scheme based on binocular vision and phase deflection method to measure the three-dimensional shape of bright surface is proposed. The binocular system layout uses the camera horizontal placement, and the complete screen-camera-adjustable platform measurement system is integrated into a custom frame. In order to reduce the calibration error, the Levenberg-Marquardt algorithm is used to optimize the position parameters obtained from the system calibration. The matching point search efficiency is improved by combining the uniqueness of the bright surface normal vector with the polar constraint of the camera. The traditional trigonometry method is improved to find the space points and the accuracy of the surface points of the object to be measured is improved. The experimental results verify that the proposed method has high measurement accuracy and stability.

Key words measurement; binocular stereo vision; three-dimensional shape measurement; matching point search; phase shift deflection; position calibration

OCIS codes 120.5050; 110.5086; 120.6650; 120.5700

1 引言

物体表面的三维形貌数据是加工表面质量和功

能特征的重要参数^[1],目前已经涌现大量的光学三维形貌测量方法,但只有为数不多的方法适用于光亮表面的测量。其中相位偏折法(PMD)具有测量

收稿日期: 2019-11-25; 修回日期: 2019-12-01; 录用日期: 2019-12-11

基金项目: 国家自然科学基金(51875164)、国家重点研发计划(2018YFB2003801)、国家重大科学仪器开发专项(2013YQ220749)

* E-mail: rslu@hfut.edu.cn

视场和精度适中、成本低等优点,受到光亮表面加工行业的重视。

相位偏折测量技术自2000年被提出后,目前在相位提取、系统标定、重建方法等方面取得了较大进展。相位提取方面,通过对非线性相位误差进行补偿^[2],结合高精度相位解包裹算法^[3],可得到高精度的绝对相位值。系统标定方面,无标记平面镜镜像标定方法解决了光亮表面相位偏折系统外参标定难题^[4],该方法不需要改变系统结构位置,用标准平面镜在空间不同位置镜像参考面上的标定特征,然后采用平面靶标标定算法实现标定。如果再结合迭代优化的方法,可实现立体偏折系统的精确标定^[5]。重建方法方面,对待测物表面斜率进行数值积分可获得面形信息^[6-7],但由于条纹变形量受待测面型和待测物与屏幕之间距离共同影响,因此该方法可能存在多义性问题。对连续表面准确地积分运算依赖于设定一个已知表面点作为初始值,但即便是找寻一个点,也很难确定其准确位置^[8]。单相机结合多参考面模型可得到被测点的空间位置及其梯度^[9],但屏幕位置移动需要借助精密位移台,因此系统测量精度会受位移台的位移精度影响。双目立体视觉模型通过增加一个相机,约束被测点在测量系统中的位置^[10-11],结合光亮表面法向量唯一性来确定被测点对应于两相机平面上的匹配点,得到光亮表面面形测量结果。该模型中增加了一个相机,系统标定难度相对复杂,同时对于匹配点的快速准确搜索也是难点之一。

本文介绍了结合双目视觉的相位偏折法测量光亮物体形貌的基本原理,分析了双目测量系统布局结构对测量结果的影响,解决了整体测量系统的建模问题,通过对位置参数标定进行优化,提高了屏幕坐标系的建系精度,减小了图像畸变对极线搜索带来的影响,从而提高了匹配点的搜索效率,实验结果证明了该测量方案的有效性。

2 系统测量原理

2.1 相位偏折法原理

经典相位偏折法中首先由计算机编码产生理想正弦条纹图,相机采集经光亮表面反射后的变形镜像条纹图,结合条纹相位信息建立相机成像平面上像点与参考屏幕上光源点(显示屏上的像素点或亚像素点)间的对应关系,其测量原理如图1所示。当被测面为平面时,参考屏幕上一点 Q_i ,在镜面 S_i 处经反射后,对应于相机图像平面上的点 P_i ,入射光

线为 w_i ,反射光线为 v_i 。其中,下标 i 为采集图像的像素点总个数,本文中应为 $1\sim 1280\times 1024$ 。当被测面在该点处存在倾角 θ 时,对于同一像点,入射光线将偏折角度 2θ ,并与参考屏幕交于点 Q'_i 。由此可得,待测面的表面倾角会使光线传播方向发生偏折,导致相机图像平面上的点 P_i 对应于参考屏幕上的光源点位置发生偏移。该偏移量与被测曲面的梯度(或法向量)相关,对表面梯度进行积分处理可实现待测面的面型测量^[12]。

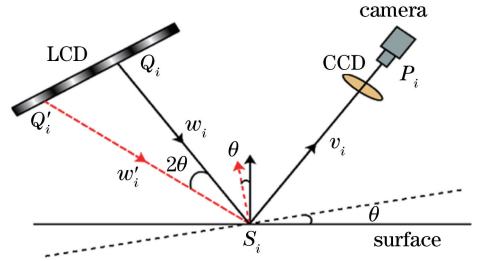


图1 相位偏折测量系统原理图

Fig. 1 Schematic of phase deflection measurement system

在相位偏折法中,参考屏幕的光源点位置标识可通过相移编码来实现,即在参考屏幕上分别显示横向和纵向相互垂直的正弦条纹,经过相位解包裹,获得参考屏幕上每个光源点的编码信息,建立参考屏幕相位坐标与物理坐标之间的对应关系。

上述过程中,准确获得条纹相位信息非常关键。设 I_n 为参考屏幕的相移条纹经过待测光亮表面反射后由相机拍摄的第 n 幅($n=1,2,3,\dots,N$)变形条纹图的光强分布函数^[13], (x,y) 为图像平面上的点坐标,则 I_n 可描述为

$$I_n(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\cos\Delta, \quad (1)$$

式中: $a(x,y)$ 为图像背景光强; $b(x,y)$ 为调制后的正弦条纹振幅。变形条纹相位 Δ 为

$$\Delta = (2\pi/mP)[x - kZ(x,y)], \quad (2)$$

式中: P 为理想条纹间距; m 为参考屏幕与待测表面不平行引起的间距变形因子; k 用来描述条纹投影与相机光轴方向夹角; $Z(x,y)$ 为待测物表面深度,当待测物为平面时,该项为0。

相位值采用四步相移法求得,即在参考屏幕上先后显示四幅正弦条纹图,相位差为 $\pi/2$ 。然后通过下式求取。

$$\begin{cases} I_1 = a(x,y) + b(x,y)\cos\Delta \\ I_2 = a(x,y) + b(x,y)\cos(\Delta + \pi/2) \\ I_3 = a(x,y) + b(x,y)\cos(\Delta + \pi) \\ I_4 = a(x,y) + b(x,y)\cos(\Delta + 3\pi/2) \end{cases} \Rightarrow \Delta = \arctan \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}. \quad (3)$$

解出的相位值在 $[-\pi, \pi)$ 之间,称之为包裹相位或相位主值。将包裹相位恢复成连续相位的过程叫做相位解包裹,相移算法与解包裹算法配合使用才能恢复条纹的真实相位。

常用的解包裹算法包括空间相位解包裹^[14]和时间相位解包裹^[15-16]两大类。空间相位解包裹需要附加标志点或线,相位提取的准确性易受标志插入的位置影响。时间相位解包裹则可获取绝对相位,且各个相邻像素之间的解包裹相位值相互独立,互不影响,具体形式有多频外差法、倍频法等。其中倍频法可提高绝对相位解包裹的精度和可靠性,基本原理为

$$\Phi_h(x, y) = (f_h/f_l)\Phi_l(x, y), \quad (4)$$

式中: f_h, f_l 分别为所采用的高、低频条纹的频率值; f_h/f_l 为一正整数,即倍频数; $\Phi_h(x, y), \Phi_l(x, y)$ 分别是高、低频条纹图像在 (x, y) 处的解包裹相位值。

联合高、低频的主值相位图可得到高频相位图中每点的条纹级数 $e(x, y)$,代入下式将包裹相位 Δ 恢复为原相位 $\Phi(x, y)$ 。

$$\Phi(x, y) = \Delta + 2e(x, y)\pi, \quad e(x, y) = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

为了进一步降低系统畸变及环境噪声对测量的影响,可采用反向相位误差补偿算法提高精度^[17]。通过投影与最高频率相同且具有特定相移量的补偿相移条纹图,获得相位误差大小相等,符号相反的两幅主值相位图,二者运算后误差得以抵消,与倍频法相结合得到高精度的绝对相位值。

2.2 相位偏折结合双目立体视觉系统测量原理

双目立体视觉一般模型中的光轴采用会聚式,根据两相机基线呈水平或竖直状分为横向摆放和纵向摆放两种。本文双目视觉测量系统选用横向会聚式布局。测量系统如图2所示。

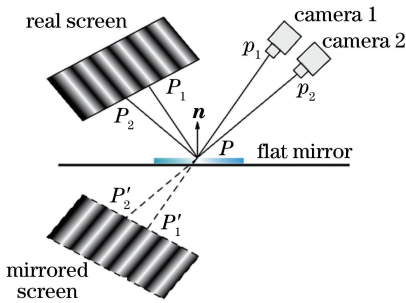


图2 双目立体视觉系统测量原理图

Fig. 2 Measurement schematic of binocular stereo vision system

图中, P 为待测表面上一点,屏幕上两点 P_1 和 P_2 经 P 点反射后成像于左右相机图像平面上的 p_1 和 p_2 。对图像平面中待测物范围内条纹镜像点进行解包裹操作,结合参考屏幕相位坐标与物理坐标之间的对应关系,确定其对应的屏幕点物理坐标,根据空间几何知识由入射光线和出射光线求得待测物表面法向量 n 。若由 P_1, P, p_1 求出的法向量与由 P_2, P, p_2 求出的法向量方向相同,则根据镜面表面法向量唯一性可知, p_1 与 p_2 为一对匹配点。

在求得左右匹配点后,常使用三角法^[18]求空间点三维坐标,但在测量过程中存在标定误差和操作误差等,如果这些误差没有很好地修正,则使用该方法恢复的形貌结果就会不准确。针对两匹配点与光心连线不一定相交的情况,本文在得到两直线参数方程后,计算两直线间的空间距离 d ,当 d 小于某一给定的阈值时,取两直线间的最近点为有效点云坐标,进行保存,反之,进行下一对匹配点的判断。如图3所示,异面直线 L_l 和 L_r 的方向向量为 l_l 和 l_r, q_1 和 q_r 分别为 L_l 和 L_r 上的动点,当 $|q_1q_r|$ 值最小时, q_1q_r 则为两条异面直线的公垂线。

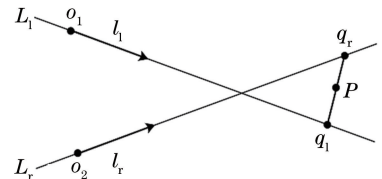


图3 空间点坐标求取模型图

Fig. 3 Schematic of space point coordinate calculation model

两直线的参数方程为

$$\begin{cases} L_l(a_l) = o_l + a_l l_l \\ L_r(a_r) = o_r + a_r l_r \end{cases}, \quad (6)$$

由公垂线与两异面直线垂直可得

$$\begin{cases} \overrightarrow{q_1q_r} \cdot \overrightarrow{o_1q_1} = 0 \\ \overrightarrow{q_1q_r} \cdot \overrightarrow{o_2q_r} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} [(o_l + a_l l_l) - (o_r + a_r l_r)] \cdot l_l = 0 \\ [(o_l + a_l l_l) - (o_r + a_r l_r)] \cdot l_r = 0 \end{cases}, \quad (7)$$

解得

$$\begin{cases} a_l = \frac{(o_r - o_l) \cdot l_l - [(o_r - o_l) \cdot l_r] \cdot (l_l \cdot l_r)}{1 - (l_l \cdot l_r)^2} \\ a_r = \frac{[(o_r - o_l) \cdot l_l] \cdot (l_l \cdot l_r) - (o_r - o_l) \cdot l_r}{1 - (l_l \cdot l_r)^2} \end{cases} \quad (8)$$

将得到的参数代入公垂线所在的直线方程(6)式中,求得 q_l 和 q_r 的坐标,当 $|q_l q_r|$ 小于设置的阈值时,所求空间点 P 坐标为 $(q_l + q_r)/2$ 。

3 系统位置参数标定

3.1 双目相机标定

整个测量系统的标定包括双目相机的标定及相机与屏幕位置标定。双目相机的标定是在单相机标定的基础上完成的,所求的结果包括两相机各自内参和相对外参^[19]。内参包括主点坐标、相机焦距、像元尺寸和像面畸变系数,外参包括两相机之间的旋转矩阵 R 和平移向量 t 。双目相机标定流程图如图4所示。

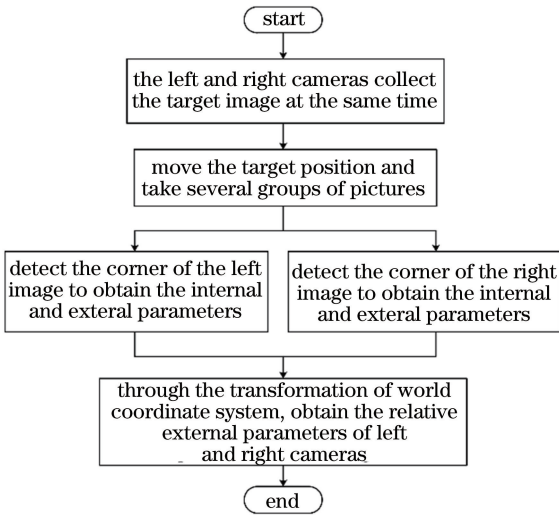


图4 双目相机标定流程图

Fig. 4 Flow chart of binocular camera calibration

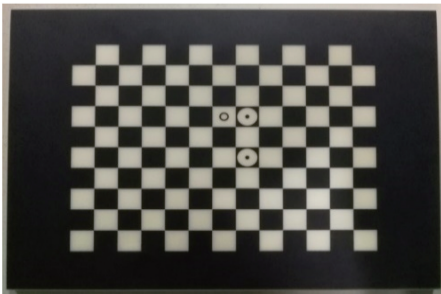


图5 标定板

Fig. 5 Calibration plate

实验所用定制高精度陶瓷标定板,如图5所示,每个棋盘格尺寸为 $11\text{ mm} \times 11\text{ mm}$,总角点数为108。标定时剔除重投影误差较大的图像,留取10组图像,平均重投影误差可至 0.04 pixel 。

3.2 参考屏幕外参标定

测量系统中参考屏幕标定是为了确定屏幕与相

机的相对关系,借助液晶显示的棋盘格靶标来完成,首先求得参考屏幕镜像相对于相机的旋转矩阵 R' 和平移向量 t' ,结合镜面反射定律得到实际参考屏幕相对于相机的旋转矩阵 R 和平移向量 t ,镜面反射模型如图6所示。

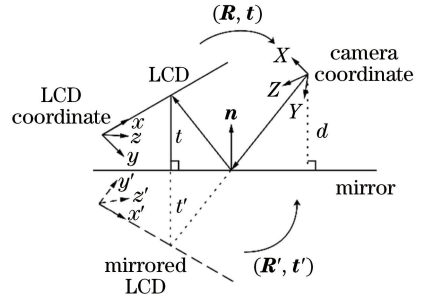


图6 镜面反射模型

Fig. 6 Specular reflection model

通过调整载物台位姿,在 M 个不同镜面位置拍摄 M 幅参考屏幕靶标的镜像图像^[20],旋转矩阵 R 通过建立以下代价方程求得,

$$E(R, n_1, n_2, \dots, n_M) = \sum_{j=1}^M \|R - R'_j(I - 2n_j n_j^T)\|_F^2, \quad (9)$$

式中: $\|\cdot\|_F$ 为弗罗贝尼乌斯范数; I 为 3×3 单位矩阵;在相机坐标系下, n_j 是镜面 δ_j 在 j 位置下的表面法向量, R'_j 为参考屏幕镜像在 j 位置下相对于相机的旋转矩阵。求得 R 后,平移向量 t 可通过建立参考屏幕靶标角点在镜面 j 位置下的物空间共线误差向量线性方程组,最小化共线误差求取。

在计算过程中,由于噪声扰动,利用上述方法所获得的位置参数将不可避免地存在误差。为获得更为精确的参数值,需对原始参数进行优化。根据旋转矩阵 R 的正交性,可得到约束方程如下所示。

$$\begin{cases} h_1(x) = r_1^2 + r_4^2 + r_7^2 - 1 \\ h_2(x) = r_2^2 + r_5^2 + r_8^2 - 1 \\ h_3(x) = r_3^2 + r_6^2 + r_9^2 - 1 \\ h_4(x) = r_1 \cdot r_2 + r_4 \cdot r_5 + r_7 \cdot r_8 \\ h_5(x) = r_1 \cdot r_3 + r_4 \cdot r_6 + r_7 \cdot r_9 \\ h_6(x) = r_2 \cdot r_3 + r_5 \cdot r_6 + r_8 \cdot r_9 \end{cases} \quad (10)$$

令求解代价方程获取的姿态转换矩阵作为初始值,将屏幕靶标角点 P_i 由参考屏幕坐标系转换到相机坐标系下,结合参考屏幕靶标与镜像相机之间的姿态映射关系,求得参考屏幕靶标角点重投影镜像上点 P'_i 。通过最小化实际镜像点 P'_i 与重投影点 P''_i 之间的误差,结合旋转矩阵的特性,优化姿态转

换矩阵 \mathbf{R} 和 \mathbf{t} 。最终优化转为解(11)式中的非线性最小二乘问题,令(10)式中的约束条件为惩罚函数,利用 Levenberg-Marquardt 方法对旋转矩阵 \mathbf{R} 及平移向量 \mathbf{t} 进行优化。

$$\min f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N \|P''_i(\mathbf{R}, \mathbf{t}) - P'_i\|^2 + \sum_{j=1}^6 h_j(\mathbf{x})^2, \quad (11)$$

式中: $\mathbf{x} = (r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6, r_7, r_8, r_9, t_x, t_y, t_z)^T$ 为待优化位置参数。

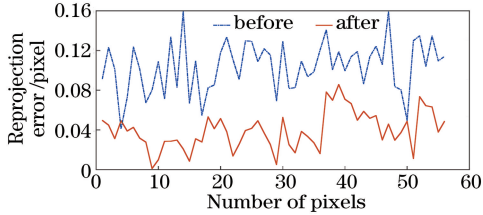


图7 屏幕外参优化前后重投影误差结果对比

Fig. 7 Comparison of reprojection results before and after screen external parameter optimization

图7为本文实验中屏幕靶标角点处重投影误差结果,其中点划线为位置参数优化前,对应的重投影

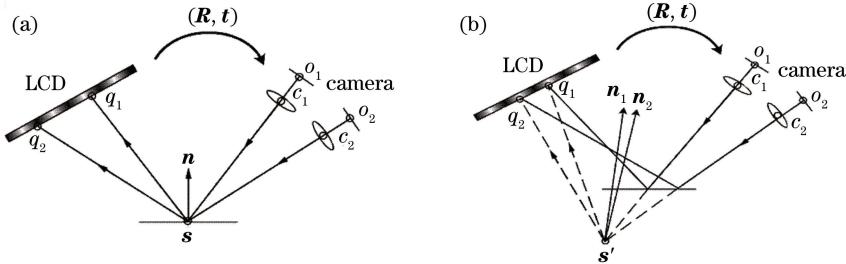


图8 测量系统示意图。(a)正确匹配;(b)误匹配

Fig. 8 Schematic of measurement system. (a) Correct matching; (b) mismatching

测量系统示意图如图8所示,其中图8(a)为正确匹配情况,左右匹配点均对应法向量 \mathbf{n} ,图8(b)为错误匹配情况,左右匹配点分别对应法向量 \mathbf{n}_1 和 \mathbf{n}_2 ,这种错误情况可通过设定法向量夹角阈值,将其滤除。双目立体视觉本身的几何极线约束,建立点与直线的对应,将对应点匹配从整幅图像压缩到在一条直线上寻找,可以降低对远离真实匹配点的范围搜索时间。在搜寻匹配点过程中,如若出现标定不准确、极线偏移等情况,会影响匹配精度,本文中对搜索算法进行优化,对初始右匹配点邻域进行遍历,比较其各自与对应左图像点所求法向量的夹角,将夹角极小值对应图像点作为最佳匹配点,之后再继续进行空间三维点坐标的求取。

误差均方根(RMS)为 0.112 pixel,实线为位置参数优化后,对应的重投影误差 RMS 为 0.054 pixel。结果表明,经优化后,角点重投影误差有所降低,即提高了位置参数标定精度。

4 匹配点搜索

左右匹配点搜索配对的准确性对三维点坐标求取精度有很大的影响,本文基于正确匹配点对应在镜面上待测点处存在唯一法向量的约束,开展匹配点搜索工作。

首先根据图像平面中待测物表面灰度随着光栅条纹的移动而发生变化,背景区域则不变的特性,建立灰度调制函数提取待测表面区域。针对左图像上一点,求其在右图像上的极线方程,令极线上每一点都假设其为真实的右匹配点,由匹配点对求得表面点的三维坐标。根据空间几何知识,结合入射光线向量和反射光线向量计算出每个假设的匹配点下的左右相机对应的表面法向量。保存两向量夹角的余弦值,然后求取这些余弦值的最大值,即为表面法向量夹角的最小值,此值对应的极线上的点就作为所求真实匹配点。

5 实验结果及分析

5.1 测量系统搭建

为了验证本文提出的测量方案,搭建了基于双目视觉的相位偏折法三维形貌测量硬件系统,整体硬件装置和双目系统及镜面条纹图如图9所示。

系统所用显示器型号为 DELL P4317Q,屏幕分辨率为 $3840 \text{ pixel} \times 2160 \text{ pixel}$,像元尺寸为 0.2451 mm ,双目系统使用两个分辨率为 1280×1024 的工业相机,配合 C1614-M 固定焦距工业镜头使用。载物台距离显示器 88 cm,双目相机距离载物台约 74 cm。

5.2 测量结果分析

在测量系统搭建完成后,计算机控制参考屏幕显示正弦条纹图案,启动双目相机同步采集程序,此

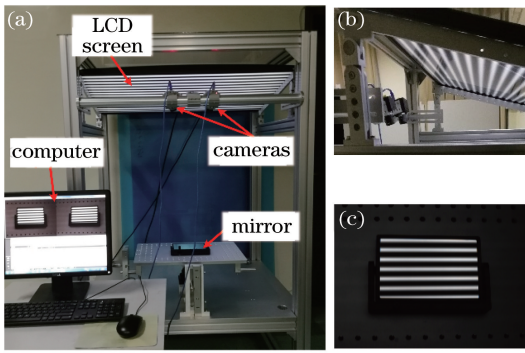


图9 测量系统装置图。(a)整体测量装置；
(b)双目局部装置；(c)镜面条纹图

Fig. 9 Device diagram of measurement system.

(a) Integral measuring device; (b) binocular local device; (c) specular fringe pattern

时需要调节相机的快门时间,以适用参考屏幕的分辨率,否则采集图像上会出现波纹现象。在相机采

集完实验图像之后,首先对相机所采集图像进行畸变校正,并在此基础上完成后续处理。

5.2.1 标准平面镜测量实验及分析

图10(a)为标准平面镜实物图,尺寸为 $150\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 。图10(b)为平面镜重建点云图,对平面镜的平面度误差评定采用最小二乘法,建立待测表面的最小二乘平面,计算对此具有最小距离两包容平面间距离,结果为 0.1025 mm 。平面镜测量结果相对于标准平面的全局误差图如图10(c)所示,误差多分布在 0.04 mm 以下。对标准平面镜进行测量后,在下面放置了厚度为 17 mm 的量块,再次对其进行测量,将两个平面镜的点云图在同一坐标系下显示,结果如图10(d)所示。将点云数据导入CloudCompare,通过使用工具Cloud/Cloud dis.计算出两片点云之间平均距离为 16.909 mm ,相对误差为 0.535% 。

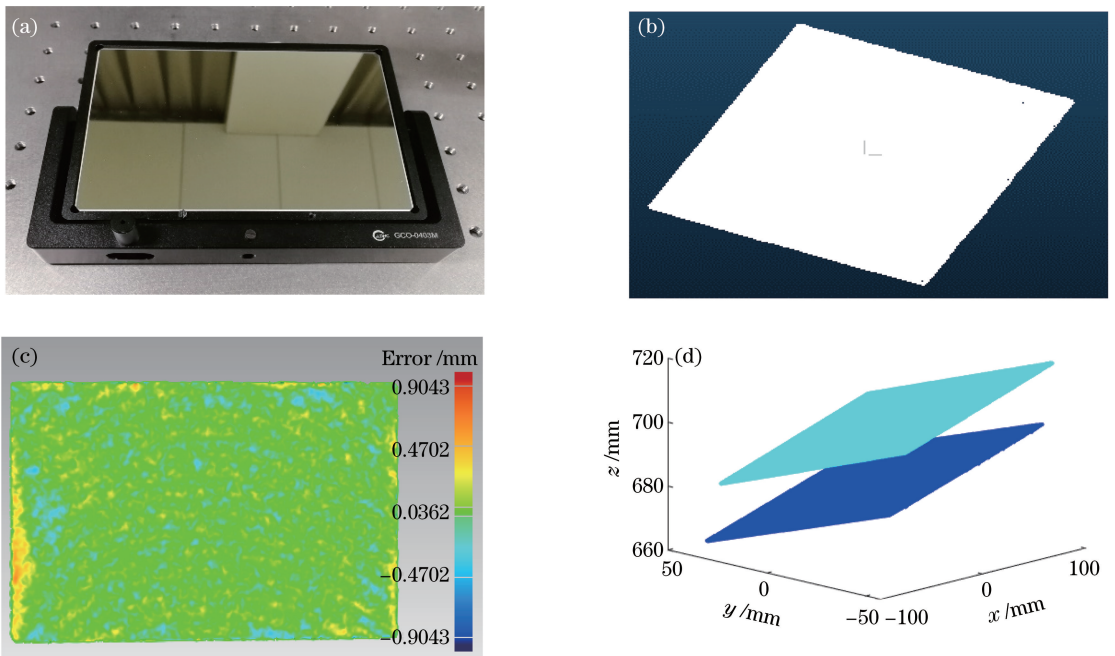


图10 标准平面镜面型测量结果。(a)平面镜实物图;(b)重建点云图;(c)平面镜全局误差图;(d)两个位置平面镜点云图

Fig. 10 Measurement results of standard plane mirror shape. (a) Plane mirror physical image; (b) reconstructed point cloud image; (c) global error diagram of plane mirror; (d) plane mirror point cloud image of two positions

5.2.2 后视镜测量实验及分析

对后视镜的测量,首先将其在型号为MC850,最高分辨率为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 的三坐标测量机(CMM)上进行采样检测,图11(a)为对采样点进行多项式拟合后的曲面,图11(b)为各处拟合误差分布图。

图12(a)为后视镜实物图,图12(b)为后视镜重建点云图,图12(c)为后视镜测量结果的全局误差图,误差多分布在 0.05 mm 以下,RMS为 0.0913 mm ,图12(d)为后视镜重建结果中X方向 -30 mm 处微观面型与拟合面型。

为了进一步衡量后视镜的重建精度,在实验数据与三坐标测量数据比较结果中不同位置随机选取15对点进行距离计算,结果如表1所示,平均距离为 0.0647 mm 。

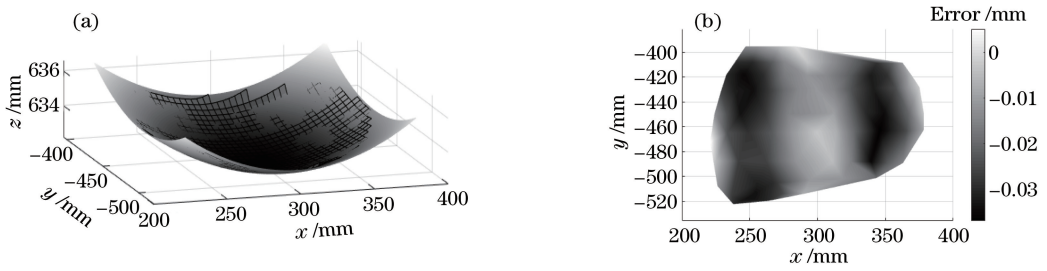


图 11 三坐标测量机对后视镜的测量拟合结果。(a)拟合后视镜曲面;(b)拟合误差分布

Fig. 11 Fitting results of CMM for rearview mirror measurement. (a) Fitting the surface of rearview mirror; (b) fitting error distribution

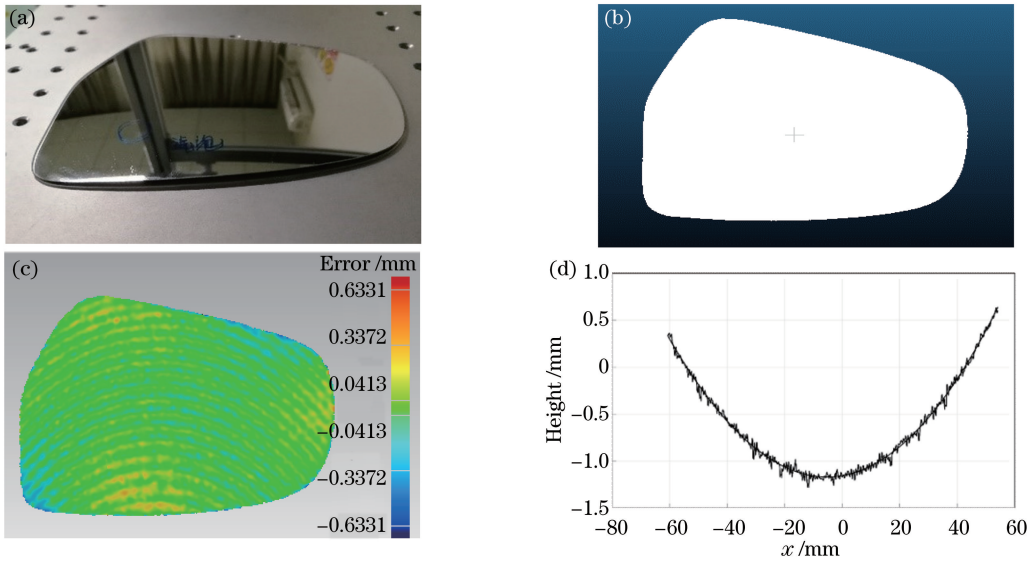


图 12 后视镜面型测量结果。(a)后视镜实物图;(b)重建点云图;(c)后视镜全局误差图;(d) X 方向 -30 mm 处微观面型

Fig. 12 Measurement results of rearview mirror shape. (a) Rearview mirror physical image; (b) reconstruction point cloud image; (c) global error diagram of rearview mirror; (d) microscopic surface at X direction of -30 mm

表 1 后视镜点云比较结果

Table 1 Comparison results of rearview mirror point cloud

mm

Serial number	MC850 CMM fitting results	Measurement results	Distance
1	(-2.3917,67.9733,700.4851)	(-2.3940,67.9607,700.4927)	0.0149
2	(-0.9940,69.4607,700.4308)	(-0.9760,69.4720,700.3554)	0.0784
3	(4.9868,60.7640,702.8904)	(5.0060,60.7607,702.8071)	0.0855
4	(7.7060,61.5607,702.9885)	(7.6788,61.5412,703.0749)	0.0926
5	(9.2060,62.9607,702.9268)	(9.2028,62.9380,702.9842)	0.0618
6	(13.0947,63.9526,703.2891)	(13.1060,63.9607,703.2703)	0.0234
7	(50.1365,47.9780,712.0677)	(50.1060,47.9607,712.1594)	0.0982
8	(44.4060,-13.0393,725.6589)	(44.4481,-13.0899,725.5988)	0.0892
9	(10.1060,-24.9393,723.7928)	(10.1187,-24.9474,723.8903)	0.0987
10	(-44.2940,-24.2393,717.7873)	(-44.2575,-24.2401,717.8293)	0.0557
11	(-41.6940,-29.8393,719.5967)	(-41.6747,29.8638,719.5875)	0.0325
12	(-56.8610,27.3000,703.7897)	(-56.8940,27.2607,703.7814)	0.0519
13	(17.1060,60.3607,704.4991)	(17.1295,60.3239,704.5823)	0.0940
14	(20.2060,58.4607,705.3480)	(20.2138,58.4818,705.3888)	0.0465
15	(36.4060,55.5607,708.3388)	(36.4457,55.5848,708.3339)	0.0467
Average distance			0.0647

6 结 论

本文提出了一种针对光亮表面进行三维形貌测量的方法,用于解决光亮表面反射特性带来的测量不便问题。针对其中相移法求解相位精度、位置参数标定精度、匹配点搜索和空间三维点求取几个重点环节进行了优化改善,通过平面镜和后视镜的面形测量实验,获得了较高精度的结果数据,实验结果表明,该系统能够有效地恢复光亮物体的表面形貌。

参 考 文 献

- [1] Tian Y. Study on 3D shape measurement method for reflective surface[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
田宇. 反射表面三维形貌的测量方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [2] Lei Z K, Wang C L, Zhou C L. Multi-frequency inverse-phase fringe projection profilometry for nonlinear phase error compensation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 66: 249-257.
- [3] Zhang M L, Chen Q, Tao T Y, et al. Robust and efficient multi-frequency temporal phase unwrapping: optimal fringe frequency and pattern sequence selection[J]. Optics Express, 2017, 25(17): 20381-20400.
- [4] 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.
- [5] Ren H Y, Gao F, Jiang X Q. Iterative optimization calibration method for stereo deflectometry[J]. Optics Express, 2015, 23(17): 22060-22068.
- [6] 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.
- [7] Lü B T. Three-dimensional measurement of specular surfaces using phase measuring deflectometry[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(3): 031201.
吕蓓婷. 基于相位测量偏折术的镜面物体三维测量[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(3): 031201.
- [8] Zhang Z H, Wang Y M, Huang S J, et al. Three-dimensional shape measurements of specular objects using phase-measuring deflectometry[J]. Sensors, 2017, 17(12): 2835.
- [9] Marcus P, Tutsch R. Reflection grating photogrammetry: a technique for absolute shape measurement of specular free-form surfaces[C] // Optics and Photonics 2005. Proc SPIE 5869, Optical Manufacturing and Testing VI, San Diego, California, USA, 2005: 58691D.
- [10] Hao Z C, Liu Y K. Transparent object shape measurement based on deflectometry[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2019, 17(1): 63-69.
郝治超, 刘元坤. 基于相位测量偏折术的透明物体表面形貌测量[J]. 光学与光电技术, 2019, 17(1): 63-69.
- [11] Xu Y J, Gao F, Zhang Z H, et al. A holistic calibration method with iterative distortion compensation for stereo deflectometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 106: 111-118.
- [12] Knauer M C, Kaminski J, Hausler G. Phase measuring deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces[C] // Photonics Europe. Proc SPIE 5457, Optical Metrology in Production Engineering, Strasbourg, France, 2004: 366-376.
- [13] Hung Y Y. Practical three-dimensional computer vision techniques for full-field surface measurement[J]. Optical Engineering, 2000, 39(1): 143-149.
- [14] Chen K, Xi J T, Yu Y G. Quality-guided spatial phase unwrapping algorithm for fast three-dimensional measurement[J]. Optics Communications, 2013, 294: 139-147.
- [15] Ding Y, Xi J T, Yu Y G, et al. Absolute phase recovery of three fringe patterns with selected spatial frequencies[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 70: 18-25.
- [16] Lu J, Mo R, Sun H B, et al. Simplified absolute phase retrieval of dual-frequency fringe patterns in fringe projection profilometry[J]. Optics Communications, 2016, 364: 101-109.
- [17] Mao C L, Lu R S. Inverse error compensation method for improvement of phase recovery accuracy of multi-frequency fringe projection[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0412005.
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): 0412005.
- [18] Zhang G J. Vision measurement[M]. Beijing: Science Press, 2008.
张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [19] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [20] Li X, Long G C, Guo P Y, et al. Accurate mirror-based camera pose estimation with explicit geometric meanings[J]. Science China Technological Sciences, 2014, 57(12): 2504-2513.