

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2005999

基于单目结构光的形貌测量误差补偿方法研究*

李茂月, 马康盛, 许勇浩, 王 飞

(哈尔滨理工大学机械动力工程学院 哈尔滨 150080)

摘 要:基于单目结构光的重构测量技术,因具有精度高、成本低等优点,在现代测量领域尤其是具有一定曲面特征的中小型低反光零部件测量方面得到广泛应用,而测量误差是测量精度的重要影响因素。首先,根据所搭建的单目结构光重构测量系统,对影响测量精度的主要误差来源进行分析,通过对硬件设备参数的合理设置与调节,来保证所采集结构光图片的质量。然后,为提高投影出结构光的正弦性,提出一种可降低普通投影仪 γ 非线性响应的简易方法。最后,提出一种基于圆形标定板的张正友优化标定算法来提高系统的标定精度。实验结果表明,重构测量出的中小型曲面件表面点云数据的精度在 0.3 ~ 0.6 mm 之间,对被测物体表面的单次投影重构测量时间在 2 min 内,验证补偿方法有效可行。

关键词: 误差补偿; 结构光; 形貌测量; 非线性响应; 优化标定算法

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4035

Research on morphology measurement error compensation method based on the monocular structure light

Li Maoyue, Ma Kangsheng, Xu Yonghao, Wang Fei

(School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: The reconstruction measurement technology based on monocular structured light is widely used in modern measurement field, especially in the measurement of small and medium-sized low-reflective parts with certain curved surface characteristics, due to its high accuracy and low cost. The measurement error is an important factor affecting measurement accuracy. Firstly, according to the constructed monocular structured light reconstruction measurement system, the main sources of errors affecting measurement accuracy are analyzed, and the quality of the collected structured light pictures is ensured through reasonable setting and adjustment of the parameters of the hardware equipment. Then, in order to improve the sinusoidal property of the projected structured light, a simple method to reduce the non-linear γ response of a common projector is proposed. Finally, a Zhang Zhengyou optimization calibration algorithm based on circular calibration plate is proposed to improve the calibration accuracy of the system. The experiment results show that the accuracy of reconstructing the measured point cloud data on the surface of small and medium-sized curved parts is between 0.3 and 0.6 mm, and the reconstruction measurement time of a single projection on the surface of the measured object is within 2 minutes, which verifies that the compensation method is effective and feasible.

Keywords: error compensation; structure light; morphology measurement; nonlinear response; optimized calibration algorithm

0 引 言

随着现代高精密机械制造业的快速发展,大量精密曲面零部件被应用到各个工业领域,因此对该类中小型工件的表面形貌进行高精密经济性测量成为研究热点。

由于被测件表面存在一定的曲面特征,且测量过程不能损坏表面形貌,因此多采用非接触式测量方式对该类工件的形貌进行精密测量,而如何采用适合的测量方式并提高测量精度则成为研究的主要内容。

目前,非接触式测量作为一种先进测量方式已应用到不同领域^[1],且针对该类被测件多采用光学测量方式,

收稿日期:2020-01-08 Received Date:2020-01-08

* 基金项目:国家自然科学基金(51975169)、黑龙江省普通高校基本科研业务费专项资金(LGYC2018JC041)资助

主要包括结构光测量技术、激光三角测量技术和显微干涉技术。其中,激光三角测量技术的测量精度受到其系统本身误差、被测件表面特征等多方面影响,其误差补偿有效途径主要依赖于提高系统自身硬件参数质量,使得精度难以进一步提高;而显微干涉测量技术则是测量物体表面高度微小差别的精密仪器,虽然精度可达到纳米级别,但由于其误差来源主要是系统自身误差与相移误差,难以做出有效补偿且测量成本较高,并不适合经济性精密测量^[2]。

结构光测量技术相对于其他非接触测量方式具有精度较高、成本低以及效果直观等优点,在满足具有一定曲面特征且表面变化不过度陡的中小型低反光零部件的测量需求的同时,相比多目测量系统而言,其具有操作简单、测量视野大以及速度快等优势,因此在重构测量领域得到广泛应用^[3]。

然而,在利用结构光测量技术进行物体形貌测量时,其测量过程往往存在相关误差,若不采取有效的误差补偿方法将难以获得有效的测量结果。因此,对单目结构光重构测量进行误差补偿一直是学者们研究的重点。Lohry 等^[4]在不影响条纹质量的情况下,采用了增加局部像素的有效灰度值的方式,从根源上消除由投影过程产生的三阶谐波,进而提高所投影结构光的正弦性来补偿测量误差;Stoykova 等^[5]采用成本更高、光谱更宽的发光二极管(light emitting diode, LED)投影仪照明光源设备进一步提高采集的图片质量;盖绍彦等^[6]通过建立相关映射关系,提出一种针对数字光处理(digital light processing, DLP)投影仪投影出的非正弦性光栅的自校正方法,以此来降低测量误差,但需要进行多次投影自校正;Lyu 等^[7]提出了一种从相同高度的垂直线段估计摄像机内外参数的自校准方法;Daniel 等^[8]通过提出一种新的投影仪图像坐标估计方法来提高系统标定效果,以此对测量误差进行补偿;杨幸芳等^[9]通过对图像像素类型与性质的分析,提出一种用于摄像机标定的棋盘图像角点检测算法,该算法一定程度上提高了标定效果与精度,但过程较为复杂。

由于国内外学者大多从提高投影出的结构光正弦性或标定效果等单一补偿方法出发,来研究结构光重构测量误差补偿的方法,虽然这些方法有着一定效果且部分已应用到相关领域^[10],但其过程通常较为复杂,而对单目结构光重构测量系统从整体测量方式出发对相关误差分别进行补偿的研究较少。因此,在利用该技术搭建的平台对一些具有一定曲面特征的中小型低反光零部件(如薄壁叶片类零部件)进行表面形貌测量时,由于测量装置调试不当、投影出的结构光的非正弦性、以及标定过程的方法错误与操作复杂等问题,均会对测量精度造成一定影响,使得测量精度大多局限于 $0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$ ^[11]。

针对以上问题,本文通过分析研究单目结构光测量系统中的可补偿误差,得出其主要来源于两部分:结构光图片正弦性的优劣会直接影响图片的解包裹效果;摄像机标定过程中所检测的标志点的像素坐标误差会对标定结果的精度产生影响。另外,测量平台硬件调试作为次要影响因素,同样会对精度与效果造成影响,若不加以合理调试甚至会造成部分数据丢失。本文从测量全过程出发,通过对测量硬件进行合理分析设置和优化可补偿的主要误差,重点从结构光的投影误差补偿、相机的采集误差补偿和系统标定算法优化 3 方面对该类误差进行补偿。

1 单目结构光测量模型及系统组成

1.1 单目结构光测量模型

为简化测量过程,减少测量模型中的各组件之间的几何约束条件,本文采用如图 1 所示的新型单目结构光测量模型。

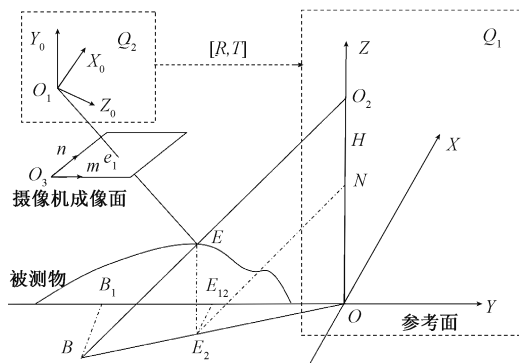


图 1 单目结构光测量模型

Fig.1 Monocular structured light measurement model

图 1 中, Q_1 为被测件的参考坐标系; Q_2 是获取的重构点的三维坐标系; O_3mn 为相机成像面中的像素坐标系。 R 与 T 分别为 Q_2 与 Q_1 坐标系转换中的旋转矩阵与平移矩阵,其具体数值可由标定结果获得。其相关计算公式如下:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = [R, T] \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \quad (2)$$

联立式(13)和式(9)得:

$$\begin{cases} \theta = \frac{c_1 X_0 + c_2 Y_0 + c_3 Z_0 + c_4}{c_1 X_0 + c_6 Y_0 + c_7 Z_0 + c_8} \\ m_s = \frac{F_x X_0 + Z_0 u_0}{Z_0} \\ n_s = \frac{F_y Y_0 + Z_0 v_0}{Z_0} \end{cases} \quad (16)$$

式中:被测物点 E 的相位值 θ 可通过对图片进行多频外差解包裹后得出,且在相机及测量模型未知参量的标定后,能够求得该点对应的像素坐标 (m_s, n_s) 及公式中除重点三维坐标以外的未知数。故式(16)中相当于有3个等式和3个未知量 (X_0, Y_0, Z_0) ,能够进行求解,对简化式(16)可得:

$$\begin{cases} X_0 = \frac{(c_8 \theta - c_4) B_1}{[(c_1 B_1 + c_2 B_2 + c_3) - \theta(c_5 B_1 + c_6 B_2 + c_7)]} \\ Y_0 = \frac{(c_8 \theta - c_4) B_2}{[(c_1 B_1 + c_2 B_2 + c_3) - \theta(c_5 B_1 + c_6 B_2 + c_7)]} \\ Z_0 = \frac{(c_8 \theta - c_4)}{[(c_1 B_1 + c_2 B_2 + c_3) - \theta(c_5 B_1 + c_6 B_2 + c_7)]} \end{cases} \quad (17)$$

其中, $(m_s - u_0) F_x^{-1} = B_1, c_2(n_s - v_0) F_y^{-1} = B_2$ 。

式(17)为单目结构光重构测量模型中用于求解重点点三维坐标的整体映射公式。

1.2 单目结构光测量系统的组成

为提高单目结构光形貌重构测量系统的自动化水平,本文基于主动视觉的控制思想,设计搭建了一套基于单目结构光技术的十字滑台测量系统,其测量原理如图3所示。

本文采用型号为 MER-302-56U3C 的大恒工业相机和成像效果优良的日本 VTS 变焦镜头采集图像;由于 DLP 投影仪采用的反射式投影原理更适合投影黑白对比度较高的图片,因此选择了标准分辨率为 1280×720 的明基 SP831-V 投影仪。立式二维滑台模组可对硬件起到平稳支撑与固定的作用,且载物台能沿 X 轴与 Z 轴进行二维平稳移动。

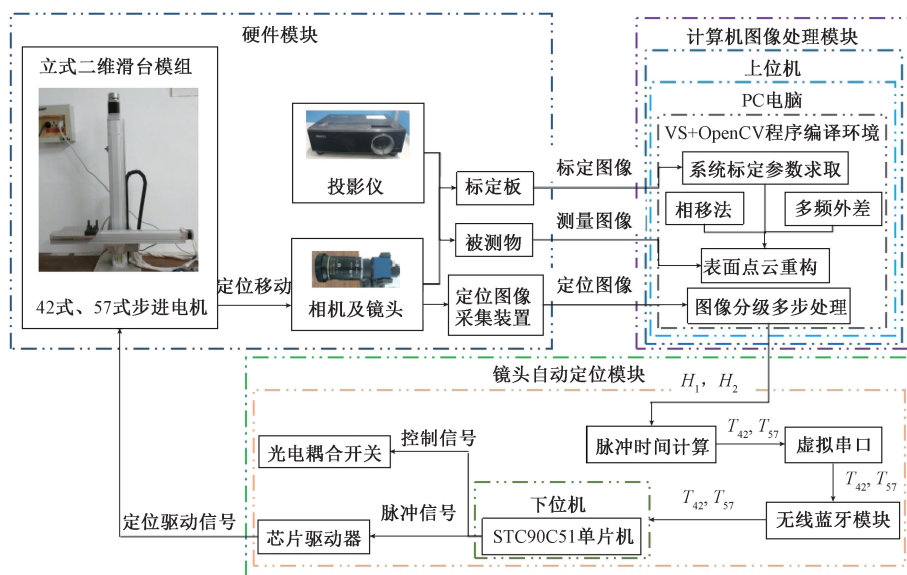


图3 测量系统

Fig.3 Measurement system

2 测量系统误差分析及补偿

通过对单目结构光重构测量技术的基础理论研究可知,结构光图片的正弦性较差,会影响图片的解包裹效果,使得到的像素点的连续相位值 θ 降低;而摄像机标定时所检测到的标志点的像素坐标误差,则会影响到各相机标定参数的精度,其上述参量与测量误差补偿之间的

映射关系如图4所示。

由图4可以看出,采集得到的结构光栅的正弦性与标定过程中标志点的像素坐标精度为该测量系统的主要误差来源,而在测量过程中相机的采集误差作为次要误差来源同样会对测量精度造成影响,若不加以调试或调试不当,容易造成部分数据信息丢失。因此,本文从测量整体过程出发,通过对结构光投影误差补偿、相机采集误差补偿和测量系统标定算法优化的角度,对上述3类误差进行补偿。

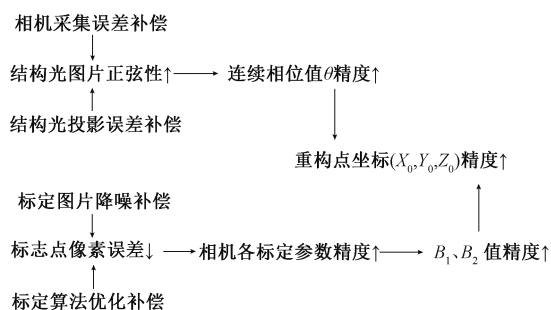


图4 参量与误差补偿映射关系

Fig.4 Mapping relation diagram of parameters and error compensation

2.1 相机采集误差补偿

1) 相机参数设置及镜头调节

当投影仪将结构光图片投影到被测物表面时,相机应配合进行图像采集。为提高采集得到的结构光图片质量,降低采集误差,应当在使用前对相机进行相关设置和调节。

由于相机镜头边缘存在畸变现象,易使采集的图片边缘部分的条纹发生变形,故选择图片的中心区域进行保存;为减小相机拍摄的结构光图片中的像素点的灰度值偏差,本文将图片期望灰度值设置为 112;当相机的采集帧频为 25 Hz 时可保证图片的连续采集,且 bmp 无损格式的图片质量较高。由于采用的镜头光圈的大小会影响采集的结构光图片的像素灰度值,且镜头光圈的调节较为复杂,难以确定镜头的光圈值,因此本文将镜头光圈调节到一固定位置,主要通过调节相机和投影仪以保证测量效果。

2) 相机白平衡调节

由于本文采用彩色工业相机,且测量调节在普通日光灯下,为降低外来光线对目标拍摄物体的影响,使相机能够正确记录被拍摄物体的真实颜色,让白色物体更加真实的还原为白色,提高所采集的结构光图片质量,需对相机进行一定的白平衡调节。

通过在镜头前放置一张白纸且中间标识黑体符号,调节相机曝光时间,使白纸中的黑体符号显示清晰即可,其相机白平衡调节后的对比效果如图 5 所示。

2.2 结构光非正弦性投影误差补偿

由于投影仪的 γ 非线性响应、被测件表面反光以及投影仪的参数设置等问题,通过 MATLAB 或 OpenCV 生成的结构光图片在经过投影仪投影到空间后,并不能保证采集到的结构光图片同样具有良好的正弦性。针对上述问题,接下来对结构光的非正弦性进行误差补偿。



(a) 白平衡调节前
(a) Before white balance adjustment

(b) 白平衡调节后
(b) After white balance adjustment

图5 相机白平衡调节前后对比

Fig.5 Comparison before and after camera white balance adjustment

1) 投影仪的参数设置

将投影仪清晰度的相关参数和黑电平参数调到最高,使投影仪投出的结构光图片能够保留更多的灰度细节信息;将色调、色彩的参数调到最小,可最大程度降低投影仪的色彩投影功能;将投影仪的灰度系数调至中间值并保证投影仪的色温正常,使投影图片的灰度更均衡。通过对投影仪进行参数设置,使其投影出的图像均为灰度图像,图片投影的对比效果如图 6 所示。



(a) 图像投影参数设置前
(a) Before setting image projection parameters

(b) 图像投影参数设置后
(b) After setting image projection parameters

图6 投影效果对比

Fig.6 Projection effect comparison

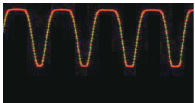
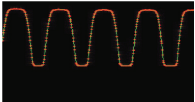
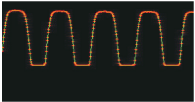
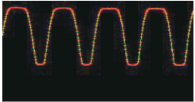
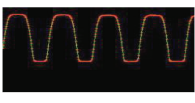
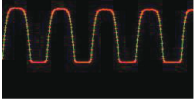
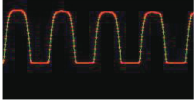
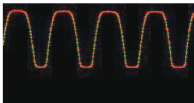
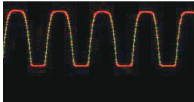
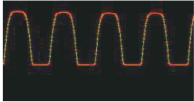
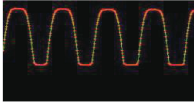
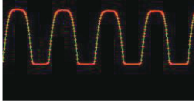
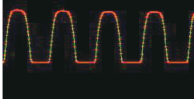
2) 投影仪 γ 非线性响应补偿方法

由于显示设备的输入电压与亮度之间呈非线性关系,故难以直接获得使投影图像与原图像灰度值保持一致时的投影参数值,且该问题易导致所投影结构光图片像素点的灰度值正弦性变化规律曲线中出现异常“波动”或“扰动”现象,进一步影响投影结构光图片的正弦性。本文通过一种精确调整投影仪光照强度的方式,来弱化投影仪 γ 非线性响应对投影结构光图片正弦性的影响。

通过确定出使投影仪 γ 非线性响应对投影结构光图像正弦性影响较小时的投影光照强度,使其投影出具有较高正弦性的结构光图片,采用实验方法对不同投影强度下所投影出的结构光图像的正弦性进行分析,来确定此时投影光照强度参数值。首先,将硬件设备参数进行调整,在环境光条件稳定且光栅黑白条纹均匀分

布的情况下,将投影仪亮度及对比度在 40~55 的范围内进行调试。通过 OpenCV 读取所采集到的每张结构光图片第 1 200 行的像素点灰度值数据,并绘制该数据的分

布曲线,利用 MATLAB 计算出各像素点灰度值数据的标准差。已知所投影的标准结构光图像每行像素点灰度值数据的标准差为 90,具体实验结果如表 1 所示。

表 1 确定投影仪光照强度参数实验					
Table 1 The experiments for determining the light intensity parameters of the projector					
序号	投影仪亮度	投影仪对比度	像素点灰度值标准差	与 90 像素标准差偏离度的绝对值	像素点灰度值分布曲线
1	40	40	89.473	0.527	
2		45	93.291	3.291	
3		50	92.875	2.875	
4		55	90.409	0.409	
5	45	40	91.752	1.752	
6		45	93.480	3.480	
7		50	91.696	1.696	
8		55	88.353	1.647	
9	50	40	93.495	3.495	
10		45	92.287	2.287	
11		50	89.968	0.032	
12		55	86.320	3.680	
13	55	40	92.526	2.526	
14		45	91.088	1.088	
15		50	87.001	2.999	
16		55	84.124	5.876	

由表 1 可知,所用投影仪的亮度及对比度都为 50 时,与 90 像素标准差偏离度的绝对值最小,故投影出的结构光图像的正弦性最好,且像素点灰度值标准差实验数据在改变投影参数量后呈现明显变化,可推断在不同投影亮度下的投影仪对比度参数区间内,可以投影出正弦性较高的结构光图片,参数如表 2 所示。

根据表 1 和 2 的数据可进一步确定,在不同投影亮度下能使投影的结构光图片具有正弦性的对比度近似值,本文确定出的所用投影仪的最合适 4 组光照强度

表 2 不同投影亮度下的投影仪对比度参数区间
Table 2 Projector contrast parameter interval under different projection brightness

参数名称	数值			
投影仪亮度	40	45	50	55
投影仪对比度区间	(55,60)	(50,55)	(45,50)	(45,50)

数据分别为(40, 56),(45, 53),(50, 49)及(55, 46)。用 B_0 代表投影仪亮度, b_0 代表投影仪对比度,在

MATLAB 中对上述 4 组数据进行线性拟合,则可得二者的函数关系如式(18)所示。

$$B_0 = -1.4655b_0 + 122.24 \quad b_0 \in (45,60) \quad (18)$$

根据该式对本文所用投影仪进行调节,虽然不能彻底消除投影仪的 γ 非线性响应现象,但是可以有效弱化该现象对投影出的结构光图像正弦性的影响,从而提高测量精度。

3) 反光误差投影补偿

当对一些类似于航空叶片类被测件进行投影测量时,如果被测物某部分的表面较为光滑且发生了漫反射现象,则会在图片中形成如图 7 所示的强反光区域,该区域会破坏结构光条纹的正弦性,从而影响重构测量的准确性。

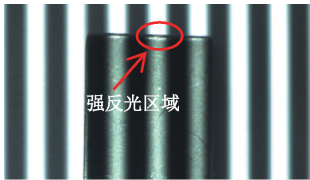


图 7 被测物强反光区域

Fig.7 Strong light reflective area of the measured object

针对该问题,本文通过增加横向结构光投影的方式进行测量补偿,即对被测物反光区域增补横向结构光,对强反光区域的横向结构光投影补偿效果如图 8 所示。从横向结构光图片中求取被测物表面的重构点时,仅需对图像每列的像素点进行包裹相位值求取即可。而在实际测量过程中,为方便采集图片通常会在被测物表面交叉投影相同节距的横纵结构光图片。

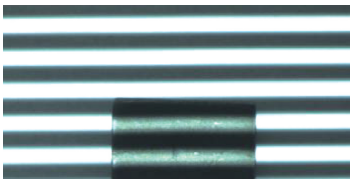


图 8 强反光区域横向结构光补偿

Fig.8 Lateral structure light compensation in strong light reflective area

2.3 相机标定精度的优化方法

由于相机标定得到的内外参数矩阵参与重构点的三维坐标计算,因此其标定精度也是影响测量结果的重要因素。因为本文采用的张正友标定法的标定精度依赖于标定图片中检测的标志点的像素坐标精度,所以本文通过对相机标定图像降噪及采用圆心标定板的方式,来提高标定图片中标志点像素坐标的检测精度,最终实现张正友标定法的优化并提高标定精度。

1) 相机标定图像的降噪处理

由于图片信息在传递、储存及显示等过程中受到来自硬件设备或外部环境的影响,从而产生噪点信息,导致某坐标像素点或某区域像素点的灰度值异常,最终降低棋盘格角点像素坐标的检测精度。

高斯模糊(gaussian blur, GB)算子相比于其他降噪方法,由于采用了遵循二维高斯分布的降噪系数模板,并不会改变图片中像素点的灰度值的分布规律,因此该降噪方法可在有效去除图片噪点的同时,保留标定图片中的角点坐标信息。故本文采用 GB 算子对采集的标定图片进行降噪处理,标定图片降噪前后相机的标定结果如表 3 所示。

表 3 标定图片降噪前后相机的标定结果

Table 3 Camera calibration results before and after noise reduction of calibration pictures pixel

标定图片降噪前相机标定结果		标定图片降噪后相机标定结果	
1~9 幅图片的 标定误差	0.775 817	1~9 幅图片的 标定误差	0.747 941
	0.812 496		0.793 756
	0.635 085		0.559 499
	0.528 644		0.600 120
	0.975 201		0.758 186
	0.841 787		0.746 784
	0.780 014		0.595 098
	0.858 491		0.690 626
	0.795 615		0.794 883
标定平均误差	0.778 128	标定平均误差	0.698 544
内参 数矩 阵	$\begin{bmatrix} 5\,446.2 & 0 & 896.7 \\ 0 & 5\,450.4 & 1\,022.2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	内参 数矩 阵	$\begin{bmatrix} 5\,454.7 & 0 & 918.9 \\ 0 & 5\,449.4 & 1\,054.3 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

从表 3 的结果可以看出,利用 GB 算子对标定图片进行降噪处理后,再进行标定,其多数单幅图片的标定误差及平均标定误差均有一定减小。

2) 基于圆形标定板的张正友优化标定算法

在图片中,相比于角点特征,圆形轮廓更容易被识别。为进一步降低标定误差、提高相机的标定精度,本小节以圆形轮廓的圆心作为标志点,提出了一种基于圆形标定板的张正友优化标定算法。

在使用圆形标定板及张正友标定算法对相机进行标定时,需要将原有程序中的角点检测程序替换为特征圆检测程序,该检测算法原理如下:

首先,将图片转换为二值图像的集合,并设置一个灰度值的阈值范围 $[T_1, T_2]$,阈值步长为 t ,则所有灰度阈值为:

$$[T_1, T_2] = [T_1, T_1 + t, T_1 + 2t, T_1 + 3t, \dots, T_2] \quad (19)$$

然后,利用式(19)中的每个阈值对图像进行二值化,得到*i*张二值图,并利用 Suzuki 等^[12]提出的算法对每幅图片进行连通区域的提取,每幅图片中由边界所围成的不同连通区域,便是该二值图的斑点圆区域。

当确定出二值图中的斑点圆区域后,还必须求解出该区域的圆心坐标(X_s, Y_s),作为相机标定图片中的标志点。由于该点应等于所有二值图像斑点中心坐标的加权和,所以可以得到下式^[13]:

$$(X_s, Y_s) = \frac{\sum_i q_i (x_i, y_i)}{\sum_i q_i} \quad (20)$$

式中: (x_i, y_i) 为第*i*张二值图的斑点中心坐标;*q* 值为权重系数,其大小等于二值图像斑点惯性率 *I* 的平方。在 OpenCV 中,二值图像斑点惯性率 *I* 的计算过程如下:

首先,二值图像斑点区域图像中心矩^[14]的计算公式为:

$$\mu_{pq} = \sum_x \sum_y (x - \bar{x})^p \cdot (y - \bar{y})^q \cdot f(x, y) \quad (21)$$

式中: (x, y) 为二值图斑点圆区域各像素点的坐标;而 ($\bar{x}, \bar{y}$) 为该区域的中心点坐标,该值可根据式(22)^[15]二值图斑点圆区域矩的计算公式得到。

$$M_{ij} = \sum_x \sum_y x^i \cdot y^j \cdot f(x, y) \quad (22)$$

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{M_{10}}{M_{00}} \\ \bar{y} = \frac{M_{01}}{M_{00}} \end{cases} \quad (23)$$

在式(23)中, M_{00} 代表二值图中斑点圆的面积,将式(23)代入到式(21)中可得:

$$\mu_{pq} = \sum_x \sum_y \left(x - \frac{M_{10}}{M_{00}}\right)^p \cdot \left(y - \frac{M_{01}}{M_{00}}\right)^q \cdot f(x, y) \quad (24)$$

利用式(24)可以求出用于描述二值图斑点圆区域图像强度的两个特征值 λ_1 和 λ_2 ,其计算如式(25)和(26)所示^[16]。

$$\lambda_1 = \frac{\mu'_{20} + \mu'_{02}}{2} + \frac{\sqrt{4\mu'^2_{11} + (\mu'_{20} - \mu'_{02})^2}}{2} \quad (25)$$

$$\lambda_2 = \frac{\mu'_{20} + \mu'_{02}}{2} - \frac{\sqrt{4\mu'^2_{11} + (\mu'_{20} - \mu'_{02})^2}}{2} \quad (26)$$

因二值图像斑点惯性率 *I* 的计算公式为:

$$I = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (27)$$

所以,将式(25)及(26)代入到式(27)中可得:

$$I = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{\mu'_{20} + \mu'_{02} - \sqrt{4\mu'^2_{11} + (\mu'_{20} - \mu'_{02})^2}}{\mu'_{20} + \mu'_{02} + \sqrt{4\mu'^2_{11} + (\mu'_{20} - \mu'_{02})^2}} \quad (28)$$

根据公式(20)和(28),可得:

$$(X_s, Y_s) = \frac{\sum_i I i^2 (x_i, y_i)}{\sum_i I i^2} \quad (29)$$

由式(22)~(29)可得二值图像斑点圆的圆心位置,而每个斑点圆的半径大小等于*i*张二值图片中斑点圆面积值居中的斑点圆半径值。通过对张正友原始标定程序的优化,本文在9个角度对圆形标定板进行图片采集,且对标定图片利用 17×17 降噪系数模板的 GB 算子进行处理,标定过程如图 9 所示,其标定误差及相机内参标定结果如表 4 所示。

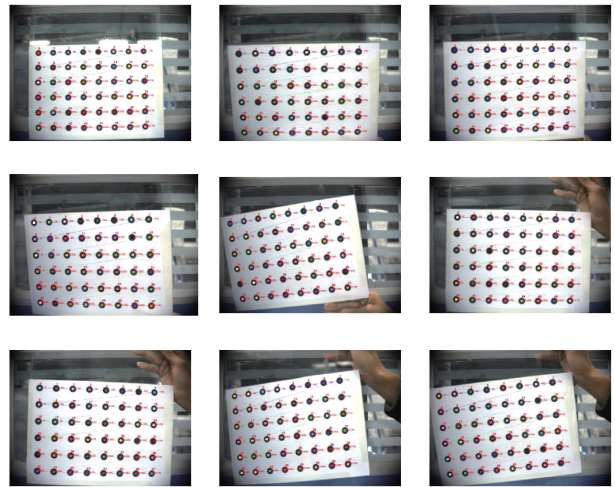


图 9 圆心标定板标定过程

Fig.9 Circle center calibration plate calibration process

表 4 圆形标定板图片标定结果

Table 4 Calibration result of circular calibration plate picture pixel

序号	标定误差	平均标定误差	相机内参数矩阵 R
1	0.090 919 6		
2	0.118 087 0		
3	0.077 721 6		
4	0.144 595 0		
5	0.128 460 0	0.105 055 0	$\begin{bmatrix} 5\ 251.0 & 0 & 921.8 \\ 0 & 5\ 249.4 & 819.9 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
6	0.077 782 5		
7	0.080 487 4		
8	0.138 886 0		
9	0.088 553 1		

从表 4 的标定结果可以看出,基于圆形标定板的张正友优化标定法,其单幅图片的标定误差显著降低;由相机内参的标定结果可知,该方法的标定结果更为合理。在实际测量过程中,本文采用了精度为 0.01 mm 且带有特殊定位圆的标准圆形标定板,如图 10 所示,若应用该标定板中的 5 个定位大圆同样能对标志点按一定方向进行排序,排序效果如图 11 所示。

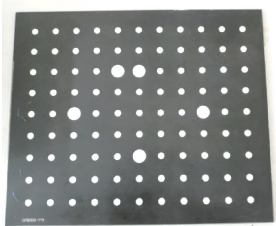


图 10 标准圆形标定板

Fig.10 Standard circular calibration plate



图 11 标志点排序效果

Fig.11 Marking point sorting effect

采用上述提出的标定方法,利用标准圆形标定板的标定过程如图 12 所示,获得的标定结果如表 5 所示。

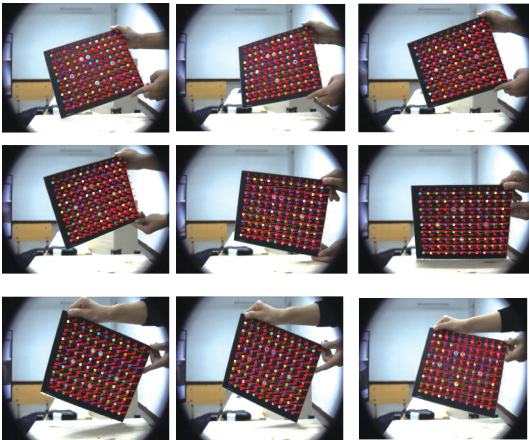


图 12 标准圆形标定板标定过程

Fig.12 Standard circular calibration plate calibration process

从表 5 的标定结果可以看出,采用本文所提出的方法,能够利用标准圆形标定板大大降低单幅图片的相机标定误差,使整体相机的标定结果精度提高。

表 5 标准圆形标定板标定结果
Table 5 Standard circular calibration plate calibration results

序号	标定误差	平均标定误差	相机内参数矩阵 R	pixel
1	0.011 214 9	0.011 692 8	$\begin{bmatrix} 2\,441.1 & 0 & 1\,044.9 \\ 0 & 2\,441.7 & 754.2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
2	0.016 465 2			
3	0.009 674 5			
4	0.012 448 5			
5	0.008 950 0			
6	0.012 516 7			
7	0.011 354 1			
8	0.009 354 4			
9	0.013 256 8			

3 零件表面重构测量实验验证

3.1 表面重构测量实验

为验证本文误差补偿方法的有效性,并对所搭建平台设备进行精度验证,本文选取结构具有一定代表性的零部件进行形貌测量。对测量实验所需的各种硬件装置及电子元件进行组装、连线 and 固定后,主要在黑暗环境条件下进行测量,所搭建的实验平台及测量过程如图 13~15 所示。调用所搭建测量平台的镜头自动定位模块完成镜头定位后,通过控制投影仪与工业相机进行结构光图片的投影与采集,并利用多频外差对采集的投影标定图片及测量图片进行解包裹,得到的其中一组横向结构光的连续相位如图 16 所示。



(a) 实验平台左侧
(a) Left side of the experiment platform

(b) 实验平台右侧
(b) Right side of the experiment platform

图 13 测量实验平台

Fig.13 Measurement experiment platform

使用 Geomagic 软件分别读取未采取误差补偿与通过本文方法进行误差补偿所获得的两个三维点云测量文件,其整体效果如图 17 所示;局部放大效果如图 18 所示,



图 14 被测的 RB199 叶片

Fig.14 Tested RB199 engine blade

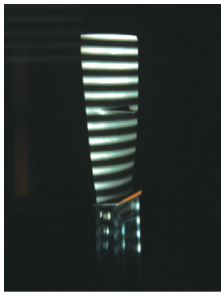
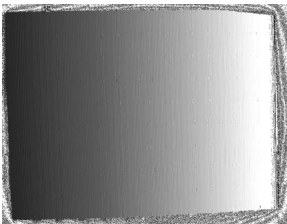
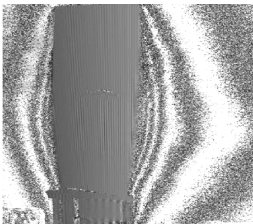


图 15 测量过程

Fig.15 Measurement process



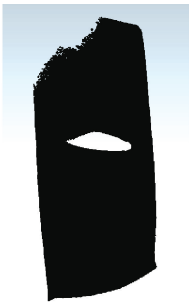
(a) 标定板连续相位
(a) Continuous phase of the calibration plate



(b) 叶片连续相位
(b) Continuous phase of the blade

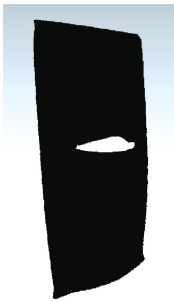
图 16 连续相位

Fig.16 Continuous phase



(a) 未补偿叶片

(a) Uncompensated blade



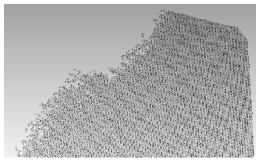
(b) 补偿后叶片

(b) Compensated blade

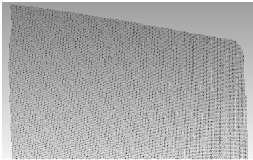
图 17 Geomagic 中读取的三维点云文件

Fig.17 3D point cloud file read in Geomagic

其中图 18(a)、(b)所示分别为未补偿测量和补偿测量的叶片左上角局部放大点云图,可以看出未使用本文方法进行误差补偿的被测件的测量结果有一定的数据丢失。



(a) 未补偿测量结果
(a) Uncompensated measurement result

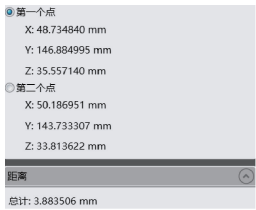


(b) 补偿后测量结果
(b) Measurement result after compensation

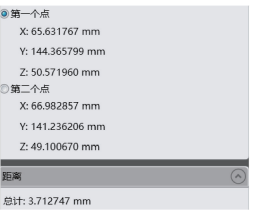
图 18 测量结果局部放大

Fig.18 Partial enlarged view of the measurement results

通过对比两次测量所得叶片右上角缺口长度大小与真实值误差,作为本次测量补偿前后精度对比验证方案。选取同一缺口位置两个边界点坐标,通过空间中两点距离公式得到测量点云模型中叶片缺口尺寸,如图 19 所示。已知叶片缺口真实值为 3.406 8 mm,可以看出未补偿时的距离误差为 0.476 7 mm,补偿后为 0.305 9 mm。



(a) 补偿前
(a) Before compensation

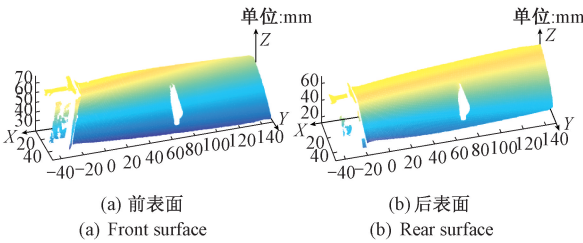


(b) 补偿后
(b) After compensation

图 19 Geomagic 中获取的缺口点长度信息

Fig.19 Gap length information obtained in Geomagic

在 MATLAB 中编程读取通过本文方法进行误差补偿获得的 ply 格式的三维点云测量文件,其显示效果如图 20 所示。



(a) 前表面
(a) Front surface

(b) 后表面
(b) Rear surface

图 20 MATLAB 中打开的三维点云文件

Fig.20 3D point cloud file opened in MATLAB

为进一步验证本文方法对于所搭建的测量系统误差补偿的有效性,利用同一平台设备与方法对一剃须刀曲面外壳进行测量,该被测件具有一定的曲面特征、尺寸大小适合且为低反光被测件,满足本文测量系统的测量对

象要求,外壳原图及最终测量效果如图 21 和 22 所示。



图 21 剃须刀曲面外壳原图

Fig.21 Original picture of the shaver curved shell

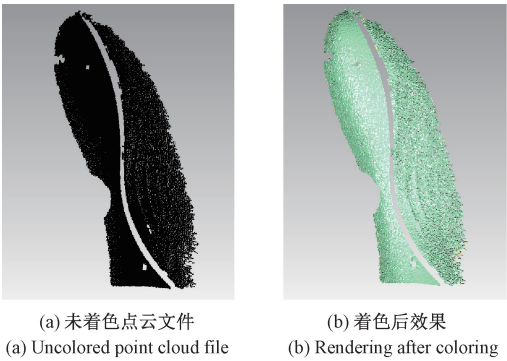


图 22 剃须刀曲面外壳点云文件

Fig.22 Shaver curved surface shell point cloud file

由图 22 可以看出,该外壳测量点云较好的保留了被测物中相对应的中间流线型凹槽与部分凹陷处的螺口等特征信息;通过点云着色使点云模型立体效果更佳,可以清晰地看出右下部分的外壳防滑端纹理信息,效果较为理想。

3.2 重构三维点云精度分析

如图 23 所示,本文通过对精度为 0.15 mm 的标准实心圆图案进行三维重构,确定出图 17 中所得到的叶片表面三维点云数据的精度,并对重构点云数据进行分析。

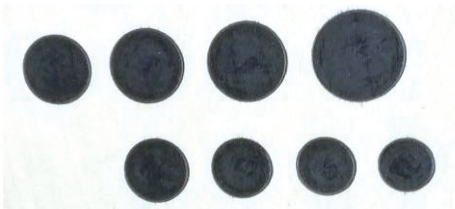


图 23 标准实心圆图案

Fig.23 Standard solid circle pattern

在重构出的标准实心圆三维点云中拾取多个圆边上对称两点,拾取的效果如图 24 所示,拾取点的三维坐标如表 6 所示。

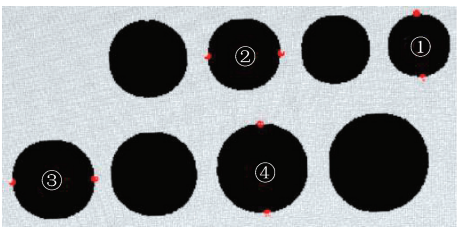


图 24 在圆心标定板三维点云中拾取的数据点

Fig.24 The data points picked up in the 3D point cloud of the circle center calibration plate

表 6 拾取点的三维坐标

Table 6 3D coordinates of the picked up points

序号	三维坐标	直径/mm
1	(15.002 3, 58.153 0, 80.170 0),	$d=13.445$
	(25.887 1, 59.373 4, 72.373 4)	
2	(21.404 2, 14.791 0, 75.881 0),	$d=15.289$
	(21.185 4, 30.078 7, 75.857 8)	
3	(42.335 1, -26.678 9, 61.947 7),	$d=17.262$
	(42.044 6, -9.419 7, 61.900 2)	
4	(33.218 6, 25.407 6, 67.743 8),	$d=19.051$
	(48.813 4, 26.391 2, 56.845 1)	

已知圆 1~4 的实际直径值分别为 12.5、14.5、16.5、18.5 mm,结合表 6 中得到的各圆的直径值,并综合考虑图案平面与镜头平面之间的平行度误差、测量设备的固有误差等,最终得出经过本文方法进行误差补偿后,重构测量出的叶片表面三维点云数据的合理精度范围应在 0.3~0.6 mm 之间,该精度能够满足一般中小型零件的测量需求。因此,通过本文方法进行误差补偿后的单目结构光重构测量系统能够确保重构测量结果的有效性。在测量系统定位完成后,对被测物体表面的单次投影重构测量的时间在 2 min 内,测量系统的整体测量时间小于 4 min,证明本文提出的误差补偿方案是有效可行的。

当然,除了考虑前述误差影响的因素外,若本文实验中采用更高像素、更高帧频的工业相机,则测量误差可以降低到 0.1 mm 以下,且单次投影重构测量时间也会缩短到 1 min 以内;而若使用多倍变焦的镜头,并投影微型结构光栅,则能够测量诸如薄壁叶片零件表面的微观形貌,且测量精度能够达到纳米级别。

4 结 论

本文从单目结构光重构测量系统整体测量过程出发,通过建立单目结构光测量模型分析误差的主要来源,

从 3 个方面进行了误差补偿:通过给出投影仪、相机等硬件参数的合理设置方案,对硬件设置方面的误差进行了补偿;提出了一种能够弱化投影仪 γ 非线性响应的方法,并对被测物表面的反光区域进行了结构光投影补偿;通过对标定图片降噪及采用圆形标定板的方式对张正友相机标定算法进行优化来补偿测量误差。最后,运用自主搭建的光学测量平台进行了误差补偿后的测量精度效果验证,实验结果表明重构测量的中小型曲面件表面三维点云数据的精度范围在 0.3~0.6 mm,且被测物体表面的单次投影重构测量时间在 2 min 内,表明本文采用的测量误差补偿方法简单有效,且能够确保重构测量结果的有效性。

随着高精密制造业的智能化发展,利用结构光测量技术对工件形貌进行非接触测量必将得到越来越广泛的应用。在后续的研究中,将继续研究光栅投影测量方面的误差补偿问题,以进一步提高单目结构光测量的精度与效率。

参考文献

- [1] 刘今越, 刘浩, 贾晓辉, 等. 基于视觉的非接触呼吸频率自动检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 51-58.
LIU J Y, LIU H, JIA X H, et al. Vision-based non-contact respiratory frequency automatic detection method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 51-58.
- [2] 刘伟军, 孙玉文. 逆向工程原理方法及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
LIU W J, SUN Y W. Principle and application of reverse engineering[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [3] 杨柳. 单目结构光三维测量精度优化技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
YANG L. Study on optimization technology of 3D measurement accuracy of monocular structured light[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [4] LOHRY W, ZHANG S. Fourier transform profilometry using a binary area modulation technique [J]. Optical Engineering, 2012, 51(11): 1136021-1136026.
- [5] STOYKOVA E, KANG H, BERBEROVA N, et al. Using LED illumination in fringe projection profilometry with a sinusoidal phase grating[C]. 7th International Workshop on Advanced Optical Imaging and Metrology, 2013: 831-834.
- [6] 盖绍彦, 达飞鹏. 基于数字投影仪的光栅相位自校正方法[J]. 自动化学报, 2008, 12(11): 1363-1368.
GAI SH Y, DA F P. Grating phase self-correction method based on digital projector [J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 12 (11): 1363-1368.
- [7] LYU F, ZHAO T, NEVATIA R. Camera calibration from video of a walking human [J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(9): 1113-1115.
- [8] DANIEL M, GABRIEL T. Simple, accurate, and robust projector-camera calibration [C]. 2012 Second International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization & Transmission, 2012: 464-471.
- [9] 杨幸芳, 黄玉美, 高峰, 等. 用于摄像机标定的棋盘图像角点检测新算法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(5): 1009-1113.
YANG X F, HUANG Y M, GAO F, et al. A new algorithm for checkerboard corner detection for camera calibration[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32 (5): 1009-1113.
- [10] 王宪伦, 陈壮, 崔玉霞. 结构光非接触式 TCF 标定方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(1): 135-140.
WANG X L, CHEN ZH, CUI Y X. Study on calibration method of structured light non-contact TCF [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2019, 33(1): 135-140.
- [11] 许丽, 张之江. 结构光测量系统的误差传递分析[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 306-313.
XU L, ZHANG ZH J. Analysis of error transmission of structured light measurement system [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(2): 306-313.
- [12] SUZUKI S, ABE K. Topological structural analysis of digitized binary images by border following[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1985, 30(1): 32-46.
- [13] 秦绪功. 低成本多目立体视觉脚型三维测量方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
QIN X G. Research on low-cost multi-dimensional stereo vision foot shape 3D measurement method [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [14] 郭宇航. 通过积分图多项式方法快速计算图像中心矩和 Hu 距[J]. 电脑与电信, 2018(3): 43-48.

GUO Y H. Quick calculation of center moment and Hu distance of image by polynomial method of integral graph [J]. Computer and Telecommunications, 2018 (3): 43-48.

- [15] ASSEN H, EGMONT-PETERSEN M, REIBER J H C. Accurate object localization in gray level images using the center of gravity measure: accuracy versus precision[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 12(11): 1379-1384.

- [16] 王琪, 万中南, 韩俊伟. 基于图像中心矩和特征向量的目标识别方法[J]. 激光与红外, 2009, 39(8): 895-898.

WANG Q, WAN ZH N, HAN J W. Target recognition method based on image center moment and feature vector [J]. Laser and Infrared, 2009, 39(8): 895-898.

作者简介



检测技术。

E-mail: lmy0500@163.com

Li Maoyue (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2004 from Nanjing Forestry University, received his M. Sc. degree in 2007 from Chang'an University and Ph. D. degree in 2012 from Harbin Institute of Technology. Now, he is an associate professor and master student supervisor in Harbin University of Science and Technology. His main research interests include intelligent machining and optical detection technology.

李茂月 (通信作者), 2004 年于南京林业大学获得学士学位, 2007 年于长安大学获得硕士学位, 2012 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为哈尔滨理工大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为智能加工与光学