

# 基于线结构光视觉的平面度误差测量方法

刘思远<sup>1</sup>, 侯跃谦<sup>2</sup>, 寇莹<sup>1</sup>, 任真<sup>2</sup>, 胡正乙<sup>3,4</sup>, 赵雪微<sup>2</sup>, 葛云鹏<sup>1</sup>

(1. 吉林大学机械与航空航天工程学院, 长春 130022; 2. 长春大学机械工程学院, 长春 130022; 3. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广州 510641; 4. 长春汽车工业高等专科学校产教融合发展中心, 长春 130010)

**摘要:** 针对机械零部件制造及加工领域的平面度测量问题, 提出了一种基于线结构光视觉技术的平面度误差测量方法。首先, 采集被测平面上不同位置的光条图像, 并根据每个位置所对应的光平面方程获得扫描点的空间坐标。其次, 对国家标准中平面度误差评定方法进行分析, 建立了基于几何约束的平面度误差视觉测量算法。最后, 通过本文算法, 利用扫描点空间坐标计算出评定基面及平面度误差。在实验中, 选择镶块模具的定位面作为被测平面, 并将视觉测量结果与采用接触式测量方法获得的结果进行对比, 测量误差小于 20  $\mu\text{m}$ 。实验结果表明本文提出的平面度误差测量方法具有一定的可行性, 提高了平面度误差的测量效率。

**关键词:** 机器视觉; 平面度; 线结构光视觉; 公差测量

**中图分类号:** TH164 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2023)12-3358-09

**DOI:** 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20220050

## Flatness error measurement method based on line structured light vision

LIU Si-yuan<sup>1</sup>, HOU Yue-qian<sup>2</sup>, KOU Ying<sup>1</sup>, REN Zhen<sup>2</sup>, HU Zheng-yi<sup>3,4</sup>, ZHAO Xue-wei<sup>2</sup>, GE Yu-peng<sup>1</sup>  
(1. School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. School of Mechanical Engineering, Changchun University, Changchun 130022, China; 3. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 4. Production and Education Integration Development Center, Changchun Automobile Industry College, Changchun 130010, China)

**Abstract:** Flatness is an important shape deviation. A flatness error measurement method was proposed based on line structured light vision technology for flatness measurement in the field of mechanical component manufacturing and processing. Firstly, the images of light strips were collected, and the spatial coordinates of the scanning points were obtained by the corresponding light plane equation for each position. Secondly, the evaluation methods for flatness errors in national standards was analyzed and a measurement algorithm for flatness errors was established based on geometric constraints. Finally, through the proposed method, the evaluation base plane and flatness errors were calculated using the spatial coordinates of the

收稿日期: 2022-01-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52005213); 吉林省科技发展计划项目(20220201040GX); 长春市科技发展计划项目(21ST06).

作者简介: 刘思远(1985-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 机器视觉. E-mail: liusiy@jlu.edu.cn

通信作者: 寇莹(1988-), 女, 工程师, 博士. 研究方向: 机器视觉. E-mail: kouy@jlu.edu.cn

scanning points. In the experiment, the positioning surfaces of the insert molds are selected as the measured planes, and the measurement results obtained by visual measurement are compared with those obtained by the contact measurement method. The measurement error is less than 20  $\mu\text{m}$ . The experimental results show that the measurement method proposed is feasible and improves the measurement efficiency of flatness error.

**Key words:** machine vision; flatness; line structured light vision; tolerance measurement

## 0 引 言

平面度是一种重要的形状公差,在机械部件装配中,平面度误差直接影响机器的工作性能<sup>[1]</sup>,也是零件加工中关键的质量评价指标。针对平面度测量进行研究,对提高零件的加工质量及效率具有重要作用。现有的平面度测量方法多属于接触式测量方法,以三坐标测量仪完成平面度测量为例,该方法需要将被测工件放置于专用测量平台上,通过分析被测物体的形状确定测量点分布方案。接触式测量方法普遍存在测量效率低、对操作人员的技能水平要求高,无法实现在线测量等缺点<sup>[2-4]</sup>。

随着非接触测量技术的不断发展,非接触式的平面度测量方法也逐渐得到广泛应用。目前,非接触式方法主要可以分为激光测距传感器测量法及电涡流位移传感器测量法。利用激光测距传感器获得平面度误差的方法是通过接受反射激光的时间长短判断传感器与被测平面的距离,进而获得平面信息。单忠德等<sup>[5]</sup>利用该原理建立了平面度误差测量模型,通过求解被测平面上特征点与理想平面的距离获得平面度误差。此类方法的优点是受外界环境的影响较小,但是当被测物体表面的镜面反射率较大时,容易出现漏检的情况。电涡流传感器测量平面度误差方法是通过被测平面与探头的相位变化获得被测平面与探头的相对距离,最终转化为平面度误差。该方法的测量范围广且分辨率较高,但是只能针对金属被测物,测量精度会受到磁场和电场的干扰。

机器视觉技术是快速发展的一种非接触测量技术,该技术具有测量范围广、测量效率高、设备硬件成本相对较低等特点,被广泛应用于制造业中<sup>[6-8]</sup>。基于机器视觉的测量技术<sup>[9]</sup>主要可以分为主动视觉测量技术及被动视觉测量技术,结构光视觉测量技术<sup>[10-12]</sup>就是一种重要的主动视觉技术,此类技术具有测量范围大,受环境影响低的特

点,非常适合零件加工现场的在线测量。由于结构光视觉技术的特点,结构光视觉技术也常被应用到平面度的测量中。何文彦等<sup>[13]</sup>通过线结构光视觉系统对大型平面的平面度测量进行了研究,将线结构光阵列投射至被测平面上,利用亚像素图像处理方法获得平面度误差。该方法所用的激光发射器的安装及硬件成本大,且阵列中的线结构光入射角度较难调节。在虚拟实验中,当相机的分辨率为  $1024 \times 1024$ 、入射角度为  $85^\circ$  的条件下,平面度检测设备的分辨率理论上可以达到 0.005 mm。Miao 等<sup>[14]</sup>提出了基于多线结构光视觉的键帽平面度测量方法,该方法利用稀疏采样估计算法获得被测平面的平面度误差,提高了视觉系统的测量效率。当键盘键帽上的点云数目为 1614 个时,平面度测量精度为 0.073 mm。该方法虽然可以在较小面积下通过足够多的点云获得平面度误差,但是由于测量范围有限,并不适用于机械制造中的零件平面度测量。谭文等<sup>[15]</sup>提出了基于 3D 激光测量的微型物体平面度测量方法,在实验中将电子器件上的针脚作为被测对象,平面度的测量精度为 0.1  $\mu\text{m}$ 。Miao 和谭文的方法虽然具有较高的平面度测量精度,但是以上两种方法都是针对小型或微型被测物体,并不适用于大部分机械零部件的测量。Chen 等<sup>[16]</sup>将立体视觉技术与机器人技术结合,将激光器和相机固定在机械臂的末端,通过网格形结构光获得某个平面区域的三维点云,并依靠机械臂完成被测平面的整体扫描。

综上所述,现有基于线结构光视觉的平面度检测算法多针对小型或微型的电子产品零部件,很少有针对机械零部件检测,而机械零部件相对于小型或微型的电子器件有以下特点:①机械零部件的尺寸显著比电子器件的尺寸大;②为了降低零部件的生产制造成本,提高测量设备的适用性,不仅需要测量设备的硬件成本较低,且设备的安装精度也不易过高;③机械零件加工现场的测

量环境光照复杂,采集图像会受到外界光照的影响。

针对以上问题,本文采用测量范围大,抗噪能力强的线结构光视觉测量方法,并通过建立视觉算法降低对设备安装精度的要求及测量过程的复杂度。由于机械零件的平面度定义和评定方法都由国家标准规定,因此,本文根据国家标准《产品几何量技术规范(GPS)平面度误差检测》(GB/T 11337—2004)<sup>[17]</sup>中对平面度的定义和平面度评定方法的分析,建立基于线结构光视觉的被测平面的扫描模型,通过移动线激光器获得不同位置上光平面与被测平面的交线,利用每个位置对应的光平面方程获得扫描点的三维空间坐标;根据对国家标准中最小二乘法分析,建立利用扫描点通过最小二乘法获得平面度误差的算法,并在此基础上对算法进行改进,提出了一种基于几何约束的平面度误差测量方法。

## 1 线结构光视觉测量系统标定

在线结构光视觉测量系统中,为了获得被测表面上光条中心点的三维坐标,需要对摄像机及线结构光进行标定。根据摄像机的成像模型,建立像素坐标系( $O_puv$ )、图像坐标系( $O_xy$ )、摄像机坐标系( $O_cX_cY_cZ_c$ )和世界坐标系( $O_wX_wY_wZ_w$ ),各坐标系的空間位置如图1所示。在摄像机标定中,本文将平面棋盘格标定板上的角点作为特征点,利用张正友的两步标定法<sup>[11,18]</sup>获得摄像机内参及畸变系数。

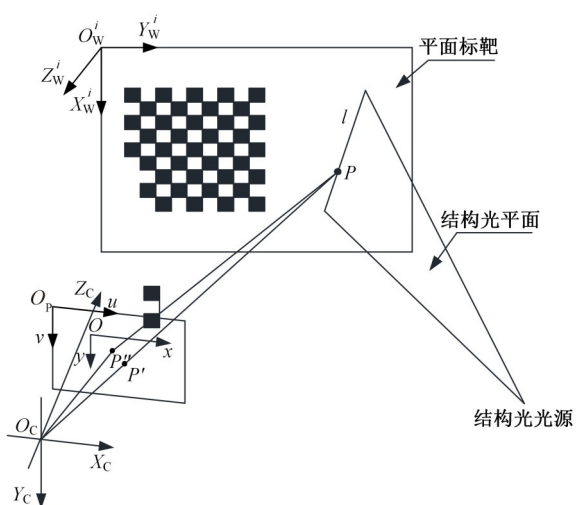


图1 线结构光光平面标定模型

Fig. 1 Calibration model of the light plane of the line structured light

线结构光视觉的基础是光学三角法,为了获得被测物体表面上光条中心点的三维坐标还需要确定摄像机与线结构光光平面的空间位置关系,即摄像机坐标下的结构光光平面的空间方程。结构光光平面的标定模型如图1所示,本文利用棋盘格标定板制作共面标靶,其中, $P$ 点为投射到标靶上光条的中心点,直线 $l$ 为光条中心点组成的直线。点 $P'$ 为 $P$ 点在摄像机成像平面的真实投影点,点 $P''$ 为 $P$ 点在摄像机成像平面的理想投影点。由于棋盘格标定板与靶平面共面,通过共面标靶的外参及光条中心点像素坐标,求解光条中心点的摄像机坐标,光条中心点的像素坐标通过Steger算法<sup>[19]</sup>获得。

在求解摄像机坐标系下光平面方程过程中,设光平面在摄像机坐标系下的空间平面方程为:

$$AX_c + BY_c + CZ_c - 1000 = 0 \quad (1)$$

式中: $A$ 、 $B$ 、 $C$ 为光平面方程的参数; $(X_c, Y_c, Z_c)$ 为 $P$ 点在摄像机坐标系下的坐标。

根据几何关系,不同位姿下的所有光条中心点都应该在光平面上,因此,将光条中心点 $P$ 的摄像机坐标代入式(1)中,通过最小二乘拟合可以获得光平面方程的参数。设第 $j$ 个位姿下的第 $i$ 个光条中心点为 $P_i^j$ ,且该点的摄像机坐标为 $(X_{Ci}^j, Y_{Ci}^j, Z_{Ci}^j)$ ,将中心点的坐标代入式(1)并写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} X_{C1}^1 & Y_{C1}^1 & Z_{C1}^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{Ci}^j & Y_{Ci}^j & Z_{Ci}^j \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{CN}^N & Y_{CN}^N & Z_{CN}^N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1000 \\ 1000 \\ \vdots \\ 1000 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $N$ 为共面标靶对应的位姿总数; $K$ 为每个位姿下光条中心点的总数。

## 2 基于线结构光的平面度测量模型

根据国家标准(GB/T 11337—2004)<sup>[17]</sup>中对平面度的定义及评定方法,本文建立了基于线结构视觉的平面度测量模型。在接触式的平面度测量中,需要将被测物体放置于具有高精度的测量台上完成测量,测量平台与被测物体的接触面为测量的评定基面,此类方法虽然可以提高平面度测量的可靠性,但是无法实现对工件的在线测量。本文结合线结构光视觉测量的特点,通过移动线激光器完成对被测平面的扫描,获得足够多的被

测平面上的点,并根据平面度的评定方法建立平面度误差视觉测量算法,获得被测平面的平面度误差。

### 2.1 基于最小二乘的平面度误差视觉测量算法

根据国家标准规定,平面度误差为被测平面与理想平面的最大变动量,即将所有扫描点都包括在内的两个平面间的距离。

为了精确获得被测平面的平面度误差,需要采集被测平面上足够多的点以反映被测平面信息。本文将线结构光作为扫描线,移动线激光器并求解每个位置上光平面对应的空间方程,利用三角光学测量原理获得被测平面上所有光条中心点的摄像机坐标,这些光条中心点为测量平面度误差的扫描点。

在国家标准中,基于最小二乘法的平面度测量算法需要寻找测量平面度误差的评定基准平面(下文简称评定基面),且该平面到各扫描点的距离平方和最小。在计算平面度误差时,将扫描点与评定基面的位置关系分为上侧扫描点和下侧扫描点。在上、下侧的扫描点中分别寻找到评定基面的最大距离,将两侧的最大距离求和就是被测平面的平面度误差。

根据算法基本流程,首先获得评定基面的平面方程。设最小二乘法中评定基面的方程为:

$$z_c = A_1 x_c + B_1 y_c + C_1 \quad (3)$$

式中: $A_1$ 、 $B_1$ 、 $C_1$ 为评定基面的平面方程参数; $(x_c, y_c, z_c)$ 为扫描点的摄像机坐标系下坐标。

设第 $k$ 个扫描点坐标为 $(x_{ck}, y_{ck}, z_{ck})$ ,将扫描点的坐标代入式(3)中,获得所有扫描点到评定基面的代数距离的平方和为:

$$\varphi = \sum_{k=1}^{N_1} [z_{ck} - (A_1 x_{ck} + B_1 y_{ck} + C_1)]^2 \quad (4)$$

式中: $N_1$ 为扫描点的总数; $\varphi$ 为所有扫描点到平面的代数距离平方和。

根据最小二乘法,当 $\partial\varphi/\partial A_1=0$ , $\partial\varphi/\partial B_1=0$ , $\partial\varphi/\partial C_1=0$ 时距离的平面和 $\varphi$ 最小:

$$\begin{cases} \frac{\partial\varphi}{\partial A_1} = 2 \sum_{k=1}^{N_1} (z_{ck} - A_1 x_{ck} - B_1 y_{ck} - C_1)(-x_{ck}) = 0 \\ \frac{\partial\varphi}{\partial B_1} = 2 \sum_{k=1}^{N_1} (z_{ck} - A_1 x_{ck} - B_1 y_{ck} - C_1)(-y_{ck}) = 0 \\ \frac{\partial\varphi}{\partial C_1} = 2 \sum_{k=1}^{N_1} (z_{ck} - A_1 x_{ck} - B_1 y_{ck} - C_1)(-1) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

将所有扫描点坐标代入式(5)中,获得评定基面的参数。在获得评定基面后,对扫描点进行分类,将扫描点的摄像机坐标代入下式:

$$\delta_k = A_1 x_{ck} + B_1 y_{ck} - z_{ck} + C_1 \quad (6)$$

式中: $\delta_k$ 为第 $k$ 个扫描点对应的判别系数,当扫描点对应的 $\delta_k$ 为正时,代表对应的扫描点在基准面的上方,当扫描点对应的 $\delta_k$ 为负时,代表对应的扫描点在基准面的下方。

如图2所示,设 $P_1$ 为位于基准面上方最远的点, $P_2$ 为位于基准面下方最远的点,两个点到基准面的距离分别为 $d_1$ 、 $d_2$ ,则平面度误差 $f$ 为:

$$f = d_1 - d_2 \quad (7)$$

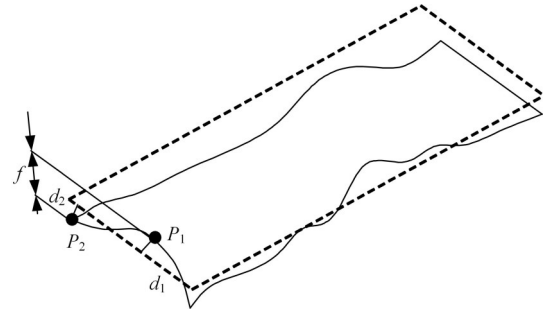


图2 基于最小二乘的平面度测量模型

Fig. 2 Flatness measurement model based on least squares

### 2.2 基于几何约束的平面度误差视觉测量算法

根据式(7)可知,采用最小二乘法获得评定基面的过程是通过点到平面数值距离拟合平面的过程,该拟合过程属于代数拟合,虽然代数拟合的运算速度快,但是获得的平面方程参数存在较大误差。

为了提高平面度误差的测量精度,本文提出了一种基于几何约束的平面度误差测量方法。首先,计算所有扫描点到评定基面的空间距离,设任意扫描点到评定基面的空间距离为 $D_k$ ,其表达式为:

$$D_k = \frac{|A_1 x_{ck} + B_1 y_{ck} - z_{ck} + C_1|}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + 1}} \quad (8)$$

根据基于最小二乘法的平面度误差评定方法及各扫描点到评定基面的距离建立如下目标函数:

$$F(\hat{D}_k(A_1, B_1, C_1)) = \min \sum_{k=1}^{N_1} \frac{(A_1 x_{ck} + B_1 y_{ck} - z_{ck} + C_1)^2}{A_1^2 + B_1^2 + 1} \quad (9)$$

式中: $N_1$ 为扫描点的总数。

通过求解目标函数的最小值,可以获得优化



后的评定基面参数。由于该优化问题属于非线性优化问题,优化的初值对最终优化结果及运算速度都有很大影响。为了提高评定基面的优化精度,本文提出利用交叉光平面获得评定基面参数初值的方法,如图3所示。

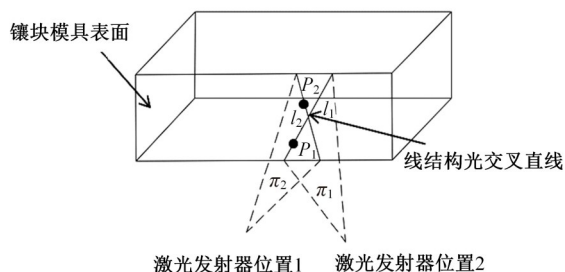


图3 评定基面初值求解模型

Fig. 3 Solution model for evaluating the initial value of the base surface

在评定基面参数初值的求解模型中,在两个不同位置向被测平面投射光平面,且保证两个光平面不平行。图3中,两个交叉的光平面分别为 $\pi_1$ 和 $\pi_2$ ;  $l_1$ 和 $l_2$ 分别为两个光平面与被测平面的交线;  $P_1$ 为直线 $l_1$ 上的光条中心点;  $P_2$ 为直线 $l_2$ 上的光条中心点。根据光学三角形法,在获得摄像机内参和两个光平面的空间方程后,可以获得两个平面上的光条中心点坐标。初始评定基面在摄像机坐标系的方程可以写为:

$$A_2 X_C + B_2 Y_C - Z_C + C_2 = 0 \quad (10)$$

式中:  $A_2$ 、 $B_2$ 、 $C_2$ 为评定基面的平面方程参数初值。

根据评定基面参数初值的求解模型可知,交线 $l_1$ 和 $l_2$ 的点都在评定基面上,因此将光条中心点的坐标代入式(10),并通过最小二乘法可获得评定基面方程的初始参数。

在线结构光视觉系统中,由于视觉系统标定及光条中心点检测算法都存在误差,且在平面度测量中评定基面空间方程的精度对平面度测量有着重要影响。为了提高平面度测量的精度,本文将图3中 $l_1$ 和 $l_2$ 上的光条中心点到评定基面的距离作为判别条件,对参加计算评定基面的光条中心点进行筛选,并将筛选后的点通过最小二乘法拟合获得最终评定基面方程的优化初值。

在获得评定基面方程的优化初值后,利用非线性优化算法对评定基面进行优化,最终获得基于几何约束的平面度误差测量评定基面参数及被测平面的平面度误差。

### 3 平面度误差测量实验及结果分析

为了验证本文提出的基于线结构光视觉的平面度测量算法的有效性,将镶块模具作为被测对象,对镶块模具定位面的平面度进行测量。

#### 3.1 平面度测量实验设备及内参标定

在实验中,本文选择汽车镶块模具的定位面作为被测平面,镶块模具如图4所示。为了验证本文算法的精度,利用SinpoJVB300CT手动型测量仪获得被测平面的平面度误差。该测量仪的分辨率为 $0.5 \mu\text{m}$ ,模具1所对应的平面度误差测量结果为 $8 \mu\text{m}$ ,模具2所对应的平面度误差测量结果为 $7 \mu\text{m}$ 。



图4 被测镶块模具

Fig. 4 Tested insert molds

基于线结构光视觉的平面度误差测量实验现场如图5所示。在测量过程中,将线激光器布置于直线滑轨上,通过摄像机采集被测平面上的光条图像,实验使用的主要硬件参数如表1所示。



图5 平面度测量实验现场

Fig. 5 Flatness measurement experiment

在测量被测平面的平面度误差前,需要获得摄像机的内参和畸变系数。实验中,采集9幅空间任意位姿下的标定板图像,通过张正友两步标定法获得摄像机内参和畸变系数,摄像机内参的

标定结果为  $A = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ , 其中,参数 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、

表 1 实验设备型号及参数

Table 1 Model and parameters of experimental equipment

| 实验设备   | 型号                | 主要参数                 |
|--------|-------------------|----------------------|
| 计算机    | 联想 R5000          | 处理器:AMD R4800u       |
| 摄像机    | 恒大水星系列-125-30UM   | 分辨率:1292×964 像素      |
| 镜头     | Computer M2514-MP | 焦距:25 mm             |
| 线激光器   | LH650-80-3        | 功率:0~20 mW;波长:650 nm |
| 平行辅助光源 | CCS LFL-200       | 最大亮度:800 尼特          |
| 标定板    | NANO CBC 25mm-2.0 | 精度:±1.0 μm           |

$u_0$ 、 $v_0$  分别取值为 6766.561、6768.716、0.471、601.615、416.484;切向畸变系数分别为 0.1126、3.830;径向畸变系数分别为 0.0037、0.0017。

3.2 平面度扫描点获得及评定基面初值求解

在平面度测量实验中,线激光器被固定于直线运动平台上,线激光器投射出的激光在被测平面相交形成光条,通过摄像机采集光条及被测平面的图像,将线激光器沿直线滑轨移动,光条从被测平面右侧向左侧移动,最终完成被测平面的扫描。

在本实验中,通过摄像机采集镶块模具定位表面(被测平面)上 10 个不同位置上的光条图像,被测平面上最右侧(位置 1)和最左侧(位置 10)的光条图像如图 6 和图 7 所示。根据平面度误差测量原理可知,获得扫描点越多,对被测平面的信息表征就越完整,但是采集光条数量越多也会降低视觉测量的速度。因此,在实际工程应用中,需要根据测量精度的要求设计合理的采集光条数量,且在完成被测平面扫描过程中,尽量保证扫描间隔均匀。

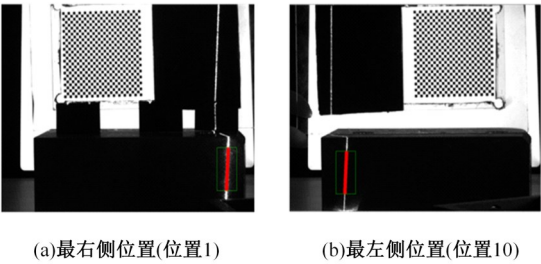


图 6 被测平面扫描图像(模具 1)

Fig. 6 Scanned images of the measured plane (mold 1)

在完成被测平面的扫描后,通过线结构光标定模型可以获得每个模具对应的 10 个不同位置的光平面方程,光平面方程如表 2 和表 3 所示。

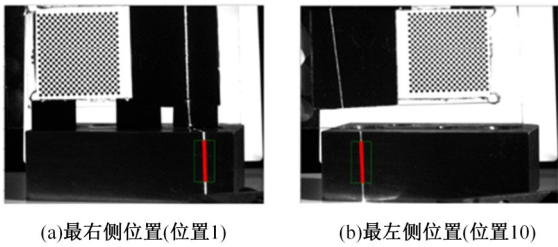


图 7 被测平面扫描图像(模具 2)

Fig. 7 Scanned images of the measured plane (mold 2)

表 2 模具 1 上各位置的光平面标定结果

Table 2 Calibration results of the light plane at each position of mold 1

| 位置编号 | 光平面方程                                            |
|------|--------------------------------------------------|
| 1    | $9.1927X_C - 0.01465Y_C + 2.8465Z_C - 1000 = 0$  |
| 2    | $9.1902X_C - 0.01465Y_C + 2.846Z_C - 1000 = 0$   |
| 3    | $9.3838X_C - 0.01530Y_C + 2.915Z_C - 1000 = 0$   |
| 4    | $9.6735X_C - 0.01456Y_C + 3.116Z_C - 1000 = 0$   |
| 5    | $9.889X_C - 0.01589Y_C + 3.270Z_C - 1000 = 0$    |
| 6    | $10.2258X_C - 0.017808Y_C + 3.369Z_C - 1000 = 0$ |
| 7    | $10.4496X_C - 0.01926Y_C + 3.463Z_C - 1000 = 0$  |
| 8    | $10.6854X_C - 0.01998Y_C + 3.474Z_C - 1000 = 0$  |
| 9    | $10.9072X_C - 0.01804Y_C + 3.587Z_C - 1000 = 0$  |
| 10   | $11.107X_C - 0.01869Y_C + 3.574Z_C - 1000 = 0$   |

表 3 模具 2 上各位置的光平面标定结果

Table 3 Calibration results of light plane at each position of mold 2

| 位置编号 | 光平面方程                                          |
|------|------------------------------------------------|
| 1    | $8.0042X_C - 0.01546Y_C + 2.897Z_C - 1000 = 0$ |
| 2    | $8.1717X_C - 0.01464Y_C + 2.933Z_C - 1000 = 0$ |
| 3    | $8.3115X_C - 0.01380Y_C + 3.005Z_C - 1000 = 0$ |
| 4    | $8.521X_C - 0.01560Y_C + 3.071Z_C - 1000 = 0$  |
| 5    | $8.6764X_C - 0.01696Y_C + 3.089Z_C - 1000 = 0$ |
| 6    | $8.9311X_C - 0.01617Y_C + 3.209Z_C - 1000 = 0$ |
| 7    | $9.1270X_C - 0.01544Y_C + 3.293Z_C - 1000 = 0$ |
| 8    | $9.4170X_C - 0.01576Y_C + 3.355Z_C - 1000 = 0$ |
| 9    | $9.6412X_C - 0.01472Y_C + 3.386Z_C - 1000 = 0$ |
| 10   | $9.8509X_C - 0.01873Y_C + 3.446Z_C - 1000 = 0$ |

在获得基于几何约束的评定基面初值时,向被测平面投射不平行的两个光平面,并获得两个平面的平面方程,求解评定基面的光条图像如图 8 所示,获得的评定基面空间方程如表 4 所示。

3.3 平面度误差测量及结果分析

通过获得的扫描点像素坐标及每个位置对应的光平面方程,可以求解扫描点的摄像机坐标,在平面度测量过程中,本文分别利用最小包容法、最小二乘法及基于几何约束的平面度误差算法获得被测平面的平面度误差,并将基于线结构光视觉

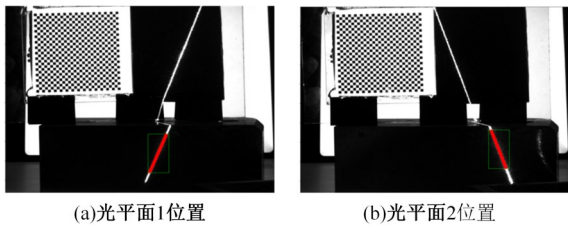


图 8 解评定基面初值的图像(模具 1)

Fig. 8 Solve and evaluate the images of the initial value of the base surface and the position of the center point of the light strip (mold 1)

表 4 评定基面的优化初值空间方程及交叉平面的空间方程

Table 4 Space equation of the optimized initial value of the evaluation base level and the space equation of intersecting plane

| 光平面方程      |                                                |
|------------|------------------------------------------------|
| 位置 1(模具 1) | $2.1456X_C + 0.2233Y_C + 1.8771Z_C - 1000 = 0$ |
| 位置 2(模具 1) | $2.1650X_C - 0.1990Y_C + 2.0237Z_C - 1000 = 0$ |
| 评定基面(模具 1) | $-0.0316X_C + 0.09Y_C - Z_C + 529.661 = 0$     |
| 位置 1(模具 2) | $2.1607X_C - 0.2245Y_C + 1.8694Z_C - 1000 = 0$ |
| 位置 2(模具 2) | $2.1925X_C + 0.2151Y_C + 2.0707Z_C - 1000 = 0$ |
| 评定基面(模具 2) | $-0.0258X_C + 0.0898Y_C - Z_C + 531.6321 = 0$  |

的测量结果与接触式测量方法进行对比,两个模具的测量结果如表 5 所示,其中,方法 1 表示基于几何约束的测量算法,方法 2 表示最小二乘法,方法 3 为最小包容法。

表 5 模具定位面平面度误差测量结果

Table 5 Measurement result of flatness error of mold positioning surface

|      | mm    |       |       |       |       |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | 接触式   | 方法 1  | 误差    | 方法 2  | 误差    | 方法 3  | 误差    |
| 模具 1 | 0.008 | 0.013 | 0.005 | 0.025 | 0.017 | 0.019 | 0.011 |
| 模具 2 | 0.007 | 0.015 | 0.008 | 0.020 | 0.013 | 0.017 | 0.010 |
| 均值   | —     | 0.014 | 0.007 | 0.023 | 0.015 | 0.018 | 0.011 |

在实验数据分析中,将接触式测量方法获得的平面度作为测量标准值,根据测量结果可知,针对两个模具定位面,本文提出的基于几何约束的平面度测量均值为 0.014 mm,该测量值与接触式方法所代表的标准值的误差为 0.015 mm,相对于其余两种算法的精度最高,但是该算法所用的时间也最长,如表 6 所示。最小包容法直接通过 3 个边界点获得评定基面的平面方程,测量算法的用时最少,但是由于边界点的判定可能存在偏差,平面度测量精度低于基于几何约束的平面度测量算法,但是该算法可以快速获得评定基面的平面方程,算法速度较快。由于在扫描被测平面获得被测平面上扫描的三维坐标时存在误差,这些误差

点会影响到评定基面的准确性及最终的测量结果,因此基于最小二乘法的平面度测量算法精度低于基于几何约束的平面度测量算法,但是测量速度要明显快于基于几何约束的平面度测算法。

表 6 模具定位面平面度误差测量时间

Table 6 Measurement time of flatness error of mold positioning surface

|      | 几何约束法 | 最小二乘法 | 最小包容法 |
|------|-------|-------|-------|
| 模具 1 | 1.653 | 0.876 | 0.635 |
| 模具 2 | 1.735 | 0.873 | 0.615 |
| 均值   | 1.694 | 0.875 | 0.625 |

根据国家标准《过盈配合螺纹》(GB/T 1181—1998)中对平面度的规定,当被测平面的长度为 100 mm~160 mm 时,公差等级 6 级的公差值为 10  $\mu\text{m}$ ,公差等级 7 级的公差值为 15  $\mu\text{m}$ 。通过机械零件加工经验的总结<sup>[1]</sup>,普通机床导轨面,例如机床的床身导轨平面、立柱导轨平面的平面度公差等级为 6 级;2 级平面,机床主轴箱、镗床工作台等平面的平面度公差等级为 7 级。本文所选择的被测平面长度为 150 mm,由于基于几何约束的平面度测量算法获得测量均值为 14  $\mu\text{m}$ 。根据国家标准对平面度的规定,本文算法的测量精度在公差 6 级至 7 级之间,该精度可以满足机床导轨面、工作面和结合面的测量要求。因此,本文算法在机械制造加工上具有一定的工程应用价值。

视觉测量系统容易受到外界环境的影响,并且机械零件制造现场的外部环境都比较差,为了验证环境对本文测量算法的影响,对扫描点采集图像增加均值为 0、方差为 0.01 的高斯噪音,利用带有噪音的图像对模具定位面的平面度进行测量,增加噪音后的图像如图 9 和图 10 所示。

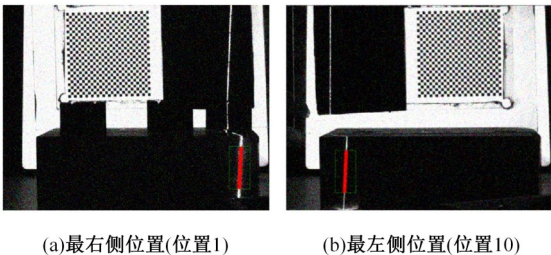
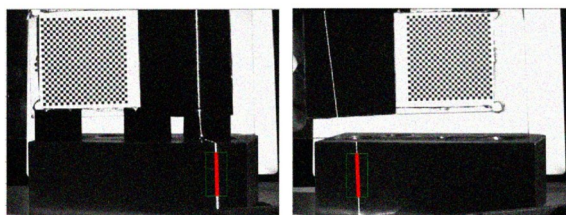


图 9 加入噪音后被测平面扫描图像(模具 1)

Fig. 9 Scanned images of the measured plane after adding noise (mold 1)

依旧采用上述相同的过程获得模具定位面的平面度误差,测量结果如表 7 所示。其中,方法 1 表示基于几何约束的测量算法,方法 2 表示最小





(a)最右侧位置(位置1)

(b)最左侧位置(位置10)

图 10 加入噪音后被测平面扫描图像(模具 2)

Fig. 10 Scanned images of the measured plane after adding noise (mold 2)

表 7 增加噪音后模具定位面平面度误差测量结果

Table 7 Measurement result of flatness error of mold positioning surface after increasing noise mm

|      | 接触式   | 方法 1(误差)     | 方法 2(误差)     | 方法 3(误差)     |
|------|-------|--------------|--------------|--------------|
| 模具 1 | 0.008 | 0.025(0.017) | 0.035(0.027) | 0.034(0.026) |
| 模具 2 | 0.007 | 0.026(0.019) | 0.030(0.023) | 0.035(0.026) |
| 均值   | —     | 0.026(0.018) | 0.033(0.025) | 0.035(0.026) |

二乘法,方法 3 为最小包容法。

通过实验结果可知,相较于未加入噪音的测量结果,加入噪音后每种评定方法的测量精度都有明显的降低。由于增加噪音后,会影响光条中心点的检测精度,所以点的空间位置就会出现较大的偏差,而最小包容区域法对误差点的敏感度最大,因此最小包容区域法受到的影响最大。基于几何约束的平面度测量和最小二乘的平面度测量方法都是通过一定的优化算法获得平面度误差,对误差点具有一定的筛选作用,所以噪声对算法的影响相对较少。

根据国家标准 GB/T 1181—1998 中对平面度的规定,增加噪音后本文提出的基于几何约束的平面度测量算法的精度也可以达到公差等级 8 (20~30  $\mu\text{m}$ ),在机械加工中,汽车发动机缸体结合面、连杆分离面等加工表面一般要达到该平面度要求。因此,在测量环境较差的情况,本文算法也具有一定的应用价值。

## 4 结 论

为了解决现有基于机器视觉的平面度都是针对小型或微型零件,很少有针对机械零部件制造的测量方法的问题,本文根据国家标准中对平面度的定义及评定方法的分析,提出了基于线结构光视觉的平面度误差测量算法。为了获得被测平面上扫描点的三维空间信息,通过移动线激光器获得每个位置上的线结构光平面方程,利用光

学三角法获得每个扫描点的坐标。在平面度测量算法中,本文根据国家标准中最小二乘法评定平面度误差的方法,利用已获得的扫描点的空间位置获得被测平面的平面度误差,同时,为了提高平面度误差的测量精度,提出了一种基于几何约束的平面度误差测量算法。在实验中,将镶块模具的定位面作为被测平面,并将测量结果与接触式的平面度测量结果进行对比。实验结果表明,本文提出的平面度测量方法的测量精度小于 20  $\mu\text{m}$ ,在国家标准规定的平面度公差等级 6 级至 7 级之间,且与接触式测量方法获得的测量值的误差均值为 7  $\mu\text{m}$ 。为了验证本文算法的鲁棒性,将被测平面的扫描图像加入高斯噪声,对加入噪声图像进行处理。实验结果表明,噪声对最小二乘法的平面度测量算法的影响较大,对基于几何约束的平面度误差测量方法的影响较小,该算法的测量精度可以达到公差等级 8 级。根据机械加工中对不同零件的平面度精度要求,本文算法所达到的测量精度可以满足机床导轨面、工作面和箱体结合面的加工要求,具有一定的工程应用价值。

## 参考文献:

- [1] 薛岩,于明. 机械加工精度测量与质量控制[M]. 3版. 北京:化学工业出版社,2016.
- [2] 李影. 光电水平仪设计与平面度误差测量方法的研究[D]. 大连:大连理工大学机械工程学院,2019.  
Li Ying. The design of photoelectric level gauge and the study of flatness error measurement method[D]. Dalian: School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, 2019.
- [3] 焦梁,冉庆,龚柯安. 激光平面移相干涉仪示值误差测量结果不确定度评定[J]. 工业计量, 2020, 30 (增刊 1): 66-67.  
Qiao Liang, Ran Qing, Gong Ke-an. Evaluation of uncertainty in measurement results of indication error of laser planar phase-shifting interferometer[J]. Industrial Metrology, 2020, 30(Sup. 1): 66-67.
- [4] Wang Han-bin. Uncertainty evaluation for the CMM flatness measurement[J]. Metrology & Measurement Technique, 2019, 46(3): 98-99.
- [5] 单忠德,张飞,聂军刚,等. 非接触式缸盖平面度误差检测方法 with 测量系统研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(20): 1-7.  
Shan Zhong-de, Zhang Fei, Nie Jun-gang, et al. Study on the detection method and measurement system



- of head flatness error on non-contact detection[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(20): 1-7.
- [6] Tan Qing-chang, Kou Ying, Miao Jian-wei, et al. A model of diameter measurement based on the machine vision[J]. Symmetry, 2021, 13(2): No. 187.
- [7] Liu Rui-yuan, Wang Ze-yuan, Liu Xiao-min, et al. Research on Visual Inspection of Appearance Defects of Automotive Precision Parts, 2020, 41(3): 192-196.
- [8] Makela Mikko, Rissanen Marja, Sixta Herbert. Machine vision estimates the polyester content in recyclable waste textiles[J]. Resources Conservation and Recycling, 2020, 161: No. 105007.
- [9] 张广军. 机器视觉[M]. 北京:科学出版社, 2005.
- [10] Liu Bin, Wang Peng, Zeng Yong, et al. Measuring method for micro-diameter based on structured-light vision technology[J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(7): 666-669.
- [11] Liu Si-yuan, Tan Qing-chang, Zhang Ya-chao. Shaft diameter measurement of using the structured light vision[J]. Sensors, 2015, 15(8): 19750-19767.
- [12] Zhong Chu-qian, Gao Zhan, Wang Xu, et al. Structured light three-dimensional measurement based on machine learning[J]. Sensors, 2019, 19(14): No. 3229.
- [13] 何文彦, 曹学东, 匡龙. 结构光检测大型止推环止推面平面度探究[J]. 光电工程, 2016, 43(11): 7-12.
- He Wen-yan, Cao Xue-dong, Kuang Long, et al. A preliminary based on structured-light for flatness measurement of large annular planes[J]. Opto-Electronic Engineering, 2016, 43(11): 7-12.
- [14] Miao Hui-si, Xiao Chang-yan, Li Yu-cheng, et al. Machine vision system for key-cap flatness measurement of computer keyboards[J]. Optical Engineering, 2020, 59(3): No. 1.
- [15] 谭文, 方淼, 段峰, 等. 基于机器视觉的3D激光平面度测量系统的研究与应用[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(1): 241-249.
- Tan Wen, Fang Miao, Duan Feng, et al. Research and application of 3D laser flatness measurement system based on machine vision[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(1): 241-249.
- [16] Chen Sheng-feng, Su Chong-yang, Liu Jian, et al. Flatness measurement of platform screen system welding assembly using stereo vision and grid pattern projector[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(1): 948-958.
- [17] GB/T 11337—2004. 产品几何量技术规范(GPS)平面度误差检测[S].
- [18] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [19] Steger C. An unbiased detector of curvilinear structures[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(2): 113-125.