基于光切法的车身双平行断面测量技术研究

王世乙 范永顺 宁建勇 洪少良 郭塞

（比亚迪汽车工业有限公司，深圳 518000）

摘要：汽车行业断面测量商用线激光扫描仪多采用全断面拟合，在双平行断面的强直线特征场景下存在算力冗余，且封闭算法难以适配产线动态优化需求。为此，针对该场景，基于光切法配套的相机标定、图像滤波与激光中心线提取技术，引入霍夫变换实现局部直线特征直接检测，在保证精度的同时大幅降低测量耗时，实现双平行断面轮廓测量误差≤0.15 mm，有效提升了车身断面自动化测量水平。

关键词：光切法 断面测量 中心线提取 直线拟合

中图分类号：TN249 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20260084

Research on the Measurement Technology for Dual Parallel Sections of Vehicle Body Based on the Light-Section Method

Wang Shiyi, Fan Yongshun, Ning Jianyong, Hong Shaoliang, Guo Sai

(BYD Auto Industry Company Limited, Shenzhen 518000)

Abstract: Commercial line laser scanners for cross-section measurement in the automotive industry predominantly employ full cross-section fitting. In scenarios characterized by strong straight-line features of double parallel cross-sections, this approach introduces redundant computation, and the closed algorithms are difficult to adapt to the dynamic optimization requirements of production lines. To address this issue, specifically for such scenarios, the Hough transform is introduced to directly detect local straight-line features, based on the camera calibration, image filtering, and laser centerline extraction techniques associated with the light-section method. While maintaining measurement accuracy, this strategy substantially reduces measurement time, achieving a profile measurement error of ≤0.15 mm for double parallel cross-sections and effectively improving the automated measurement level of car body cross-sections.

Key words: Light-section method, Cross-section measurement, Centerline extraction, Straight line fitting

1 前言

视觉装配技术作为自动化生产体系中广泛应用的核心支撑技术，具备非接触、高效率、易集成的显著优势，其核心由视觉检测与自动装配构成。其中，视觉检测作为自动装配的前置工序，其测量精度直接决定装配环节的误差补偿精度，是保障整车尺寸匹配一致性与最终装配质量的前提。

当前汽车行业主流的视觉测量技术可分为两大类：一类是蓝光扫描技术，虽可实现工件三维全轮廓的高密度点云采集，但其单工位测量周期长，无法适配高速自动化产线的节拍要求；另一类是线激光测量技术，其以光切法为核心测量原理，通过线激光投射至被测物体表面形成的光条随轮廓高度变化产生的几何畸变，结合三角测量模型完成物体表面三维轮廓的高精度解算，具备毫秒级

作者简介：王世乙（1996—），男，工程师，硕士学位，研究方向为汽车尺寸测量技术。

通信作者：郭塞（1993—）男，工程师，博士学位，研究方向为汽车尺寸控制新技术开发，guosai14@qq.com。

参考文献引用格式：

王世乙，范永顺，宁建勇，等. 基于光切法的车身双平行断面测量技术研究[J]. 汽车工艺与材料，2026(6): 15-22.

WANG S Y, FAN Y S, NING J Y, et al. Research on the Measurement Technology for Dual Parallel Sections of Vehicle Body Based on the Light-Section Method[J]. Automobile Technology & Material, 2026(6): 15-22.

响应速度，与汽车车身间隙面差的测量需求高度契合。间隙面差是表征车身相邻覆盖件（如车门、发动机罩等）匹配状态的核心参数，其中间隙为匹配面间的缝隙宽度，面差为匹配面间的法向高度差，是整车尺寸技术规范（Dimensional Technical Specification，DTS）的核心管控指标，直接决定车身外观感知质量与整车制造精度。

白车身间隙面差的核心管控测点集中于四门两盖的匹配装配区域，其中车身侧门匹配区域的测点占比可达70%，且该区域前、后门的匹配断面多呈现典型的双平行几何特征。现有商用线激光测量系统多采用全断面拟合策略，针对该类双平行断面特征存在显著的计算冗余，难以兼顾产线的测量效率与精度要求。为此，本文针对车身侧门装配中的双平行断面典型场景，基于光切法测量原理，融合相机标定、图像滤波与激光中心线提取技术提升断面识别精度，进一步引入霍夫变换直线检测技术替代传统全断面拟合算法，有效削减计算冗余，最终实现双平行断面轮廓数据的高精度、高效率自动化测量。

2 视觉测量设备选择及原理解析

2.1 测量设备选择

在汽车工业中，获取间隙面差的常用设备主要有间隙面差尺、蓝光扫描仪、三坐标机、关节臂测量仪、线激光扫描系统、激光跟踪仪，如图1所示。

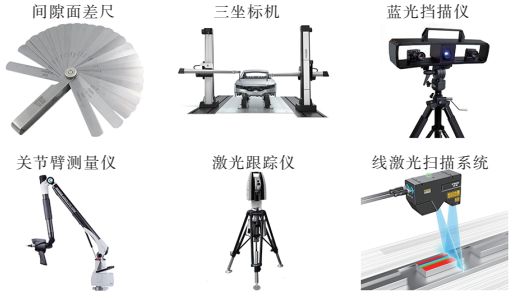


图1 常用6种测量仪器

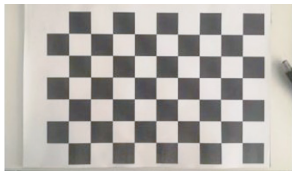
其中，间隙面差尺为手动测量仪器，适用于局部间隙面差灵活性检测，但不适用于自动化测量。三坐标机具有最高的检测精度，但其体积过于庞大，且测量过程需架设专用夹具，不适用于间隙面差测量。蓝光扫描仪并非为间隙面差测量设计的仪器，需完整扫描工件轮廓后进行点云处理，效率较低。关节臂和激光跟踪仪为同类型测量仪器，其测量过程需要建立坐标系，分别在需要测量的断面两侧打点多次，才能读出间隙面差，不适用于间隙面差测量。

线激光扫描系统专为间隙面差测量设计，通过线激光与所测轮廓截交产生断面，后经相机拍摄，再辅以专用图像算法，即可自动计算对应断面的间隙面差，测量过程简单高效。表1所示为上述6种间隙面差常用测量设备在测量方式、检测效率、检测成本以及检测精度方面的对比结果。由表1可知，线激光扫描系统具有非接触测量、检测效率高、检测成本低以及检测精度高的特点。因此，经过综合比对，选用线激光扫描仪作为测量设备。

表1 6类间隙面差常用测量设备对比

测量方式	是否接触	检测效率	检测成本	检测精度
间隙面差尺	是	低	低	低
三坐标机	是	低	高	高
蓝光扫描仪	否	低	高	中
关节臂测量仪	是	中	高	高
激光跟踪仪	是	中	高	高
线激光扫描系统	否	高	低	高

当前，商用线激光扫描仪的算法具有封闭性，难以根据产线需求实时变更，且算法针对全断面进行拟合，存在算力冗余，还有一定的优化空间。基于此，本文采用工业相机和线激光器，自组线激光测量系统，所选用设备如图2所示，具体型号、参数如表2所示。



（a）标定板



（b）工业相机

图2 工业相机和标定板

表2　试验所用设备型号和参数

设备名称	型号	参数
标定板	棋盘格标定板	棋盘规格10×7格,单元尺寸25 mm×25 mm
工业相机	迈德维视 MV-UBS31GM	分辨率752×480
相机镜头	迈德维视定焦镜头 MV-LD-25-12M-JT05	焦距25 mm

按照测量原理计算相机的理论测量精度,评估相机选型的合理性。具体计算过程如下:所采用相机感光元件尺寸为4.8 mm×3.6 mm,设定测量范围为22.5 mm×17 mm,相机焦距f=25 mm,视场宽度H=22.5 mm,根据公式$H/d=h/f$计算可得测量距离d=117 mm,其中,h为像高。像素当量$s=H/u$=22.5 mm/752像素=0.03 mm/像素,其中,u为像素列数。按照测量原理,该相机的像素当量为0.03 mm/像素,选取5倍测量准确度比,该测量方案的理论测量精度为0.15 mm/像素。

2.2　线激光测量原理

透视投影模型精确描述了光线通过光心在像平面上成像的物理过程,为三维空间到二维平面的几何映射提供了最本质且准确的数学描述[1]。透视投影模型是将像平面移动到光心与被摄物体之间的简化模型,本质与透视投影模型相同,如图3所示。

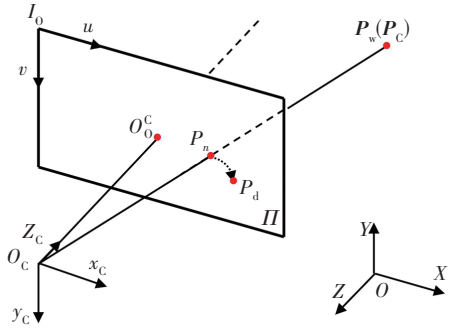


图3　相机的透视投影模型

图中,$\boldsymbol{P}_w=[X\ Y\ Z]^T$是世界坐标系$(O-XYZ)$下的点,$\boldsymbol{P}_c=[x\ y\ z]^T$为相机坐标系$(o_c-x_cy_cz_c)$下的$\boldsymbol{P}_w$的对应点。$\boldsymbol{P}_w$与$\boldsymbol{P}_c$之间坐标变换关系为:

$$\boldsymbol{P}_c=\boldsymbol{R}\cdot\boldsymbol{P}_w+\boldsymbol{T} \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{R}$为旋转矩阵,$\boldsymbol{T}$为平移向量。

$\boldsymbol{P}_n$为$\boldsymbol{P}_c$在图像传感器上对应的投影点,根据投影相似定理归一化后可得:

$$\boldsymbol{P}_n=\begin{bmatrix}x_n\\y_n\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{x}{z}\\\frac{y}{z}\end{bmatrix} \tag{2}$$

式中:x_n、y_n分别为归一化后的相机横、纵坐标。

受相机镜头的折射和装配制造误差影响,存在径向畸变和切向畸变,使实际投影点$\boldsymbol{P}_d$相较于$\boldsymbol{P}_c$产生偏移,其具体表达如下:

$$\boldsymbol{P}_d=f_d(\boldsymbol{P}_n,\boldsymbol{K}) \tag{3}$$

$$f_d(\boldsymbol{P}_n,\boldsymbol{K})=\begin{bmatrix}x_d\\y_d\end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\begin{bmatrix}x_d\\y_d\end{bmatrix}=(1+k_1r^2+k_2r^4)\boldsymbol{P}_n+\begin{bmatrix}2k_3x_ny_n+k_4(r^2+2x_n^2)\\k_3(r^2+2y_n^2)+2k_4x_ny_n\end{bmatrix} \tag{5}$$

式中:$r^2=x_n^2+y_n^2$、$\boldsymbol{K}=[k_1\ k_2\ k_3\ k_4]$为畸变系数,式(5)右侧两部分分别代表径向畸变和切向畸变。

$\boldsymbol{P}_d=[x_d,y_d]^T$在图像像素坐标系下的对应点$\boldsymbol{P}_i$可表示为:

$$\boldsymbol{P}_i=\begin{bmatrix}u\\v\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}f_ux_d+u_0\\f_vy_d+v_0\end{bmatrix} \tag{6}$$

式中:f_u为水平焦距,f_v为垂直焦距,u_0、v_0分别为中心点的水平坐标和垂直坐标。

综合式(1)~式(6),以齐次坐标形式表示相机模型如下:

$$\mu\tilde{\boldsymbol{P}}_i={}^{c_i}\boldsymbol{T}_C{}^{C}\boldsymbol{H}_w\tilde{\boldsymbol{P}}_w=\begin{bmatrix}f_u&0&u_0&0\\0&f_v&v_0&0\\0&0&1&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}_{3\times3}&\boldsymbol{T}_{3\times1}\\\boldsymbol{0}_{1\times3}&1\end{bmatrix}\tilde{\boldsymbol{P}}_w \tag{7}$$

式中:$\tilde{\boldsymbol{P}}_w=[X\ Y\ Z\ 1]^T$为$\boldsymbol{P}_w$的齐次坐标形式;$\tilde{\boldsymbol{P}}_i$为$\boldsymbol{P}_i$的齐次坐标形式;${}^{c_i}\boldsymbol{T}_C$为相机内参矩阵;${}^{C}\boldsymbol{H}_w$为相机外参矩阵;$\mu$为尺寸因子,为任意值。

为实现线激光测量,需确定线激光所在平面与相机坐标系之间的相对位置关系,因此需要对线激光器光平面进行标定,光平面参数方程如下:

$$ax_c+by_c+cz_c+d=0 \tag{8}$$

式中:a、b、c为光平面的法向量分量,d为待求参数。

确定一个平面需要3个非共线点,因此,完成光平面标定,需要获得3个光平面上的点在相机坐标系下的坐标值。

式(3)~式(5)、式(7)和式(8)是考虑了镜头畸变和传感器制造误差的数学模型。现使用线面求交模型代替三角测量原理解释三维重建。式(7)可以改写为相机坐标系到图像像素坐标系的变换关系：

$$\mu \tilde{\boldsymbol{P}}_i = {}^{c^i}T_C \tilde{\boldsymbol{P}}_c = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \tilde{\boldsymbol{P}}_c \tag{9}$$

式中：$\tilde{\boldsymbol{P}}_c = [x\ y\ z\ 1]^T$为$\boldsymbol{P}_c$在相机坐标系下的齐次坐标值，矩阵${}^{c^i}\boldsymbol{T}_C$为列不满秩，所以其没有左逆矩阵。

式(9)为相机的针孔模型变换过程，可视为相机坐标系下的空间直线方程。由于$\boldsymbol{P}_c$位于光平面上，所以式(8)为一个附加的约束方程，由式(8)、式(9)可得：

$$\mu \tilde{\boldsymbol{P}}_{i0} = \mu \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = {}^{c^i}H_C \tilde{P}_c = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ a & b & c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \tag{10}$$

式(10)中，矩阵${}^{c^i}\boldsymbol{T}_C$的前两行可视为相机坐标系下的空间直线方程，最后一行为相机坐标系下的平面方程。由于单目线激光视觉传感器的结构保证空间直线和平面存在交点，故${}^{c^i}\boldsymbol{T}_C$为可逆矩阵，可通过图像像素坐标系下的坐标值获得相机坐标系下的三维坐标值。

2.3 相机标定

相机标定的核心作用是确定相机内部的几何与光学特性以及其在世界坐标系中的空间位置与姿态，从而校正镜头畸变并建立精确的二维图像坐标与三维空间坐标之间的映射关系。本文采用Matlab Camera Calibration模块进行标定，该模块提供了集成先进标定算法、支持多种畸变模型与标定靶，并具备可视化误差分析功能的图形化环境，标定算法选用张氏标定法[2]，该方法介于摄影标定法和自标定法之间，既克服了摄影标定法需要高精度三维标定物的缺点，又解决了自标定法鲁棒性差的难题。标定过程仅需使用棋盘格和标定板，灵活方便，且精度高、鲁棒性好。

本文使用的标定板尺寸根据所需要拍摄的视场范围选取，将标定板以不同位姿放置于相机拍摄范围内，拍摄图片若干，各姿态间的旋转与平移需存在明显差异，以确保单应性矩阵构成的方程组具有唯一确定性解，原始图片如图4所示。

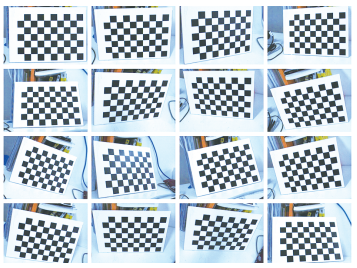


图4 相机标定原始图片

相机标定精度通过重投影误差来衡量，其原理如图5所示。计算重投影误差的前提是拍摄2张不同角度的标定板照片，三维空间内的点P通过投影在图片上形成对应像素点p_1、p_2，点P与p_1、p_2构成三角形，通过对极几何可获得P点坐标以及P点到p_1、p_2的旋转平移量(R,t)，利用点P的三维坐标与(R,t)进行二次映射，可获得重投影坐标$\hat{p}_2$，p_2与$\hat{p}_2$之间的距离e即为重投影误差。标定过程通过拍摄多张不同角度的标定板照片，分别计算每张图片的重投影误差，可剔除部分误差过大的图片，以提升标定精度。

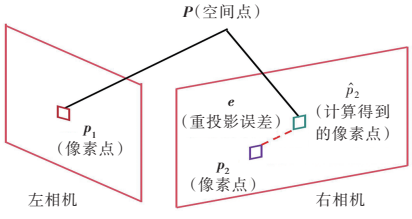


图5 重投影误差原理

相机标定误差在0.5像素以内通常可视为标定合格。在剔除部分异常图片后，整体标定误差控制在0.13像素以内，远低于0.5像素的误差上限，如图6所示，符合测量精度要求。

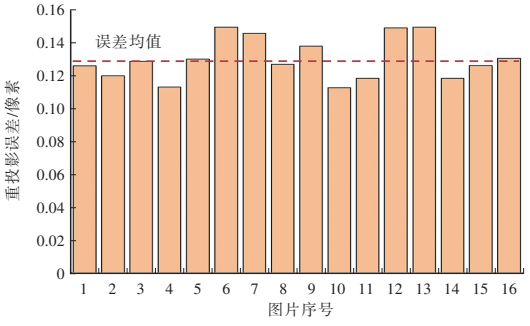


图6 相机标定精度

相机标定的内参矩阵为：

$${}^{c^i}\boldsymbol{T}_C = \begin{bmatrix} 1\,035.8 & 0 & 319.2 \\ 0 & 1\,034.3 & 223.2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

畸变系数为:

$$K = [-0.1438 \quad 0.5196 \quad 0 \quad 0]$$

3　图像前处理技术

图像前处理是以图像滤波、阈值分割等方式对图像进行处理,主要是滤除拍摄环境中的干扰,例如声、光、振动、电磁等因素造成的成像质量劣化,方便后续图像的进一步处理[3]。

3.1　图像滤波技术

根据所需去除的干扰不同,滤波方式主要有高斯滤波、中值滤波、均值滤波等[4]。图7是本文所使用的光条,由图7可知,光条灰度值呈现中间高两端低的特点,灰度值由中心最大值255逐步过渡到边缘接近0。中心处饱和光条平均宽度为10像素,呈现过曝趋势,过宽的过曝区不利于后续的中心线提取,因此需要通过滤波手段进行图像处理,细化中间过曝像素宽度。

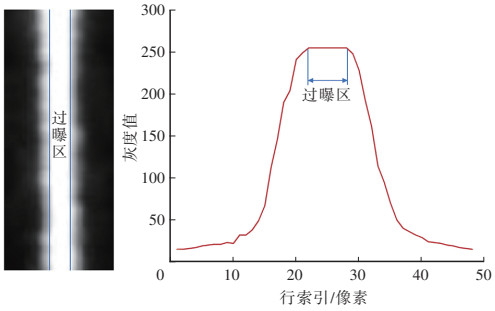
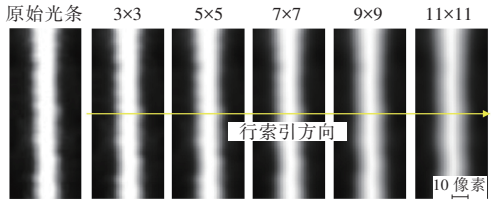


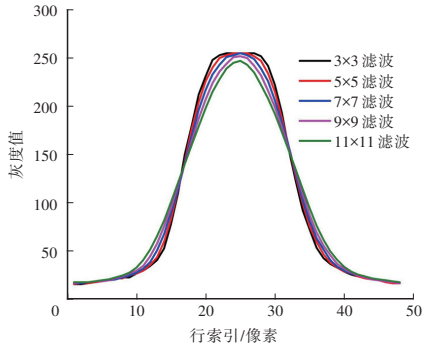
图7　光条像素分布

由于该图像光条法向具有明显的灰度过渡趋势,因此适宜采用均值滤波,该滤波方式通过$n\times n$(n为奇数)的掩膜板,将掩膜区域的灰度均值作为中心点的灰度值,通过选取大小适宜的掩模板可使中心灰度值同时参考亮部和暗部的信息,综合给出过渡自然的光条条纹。

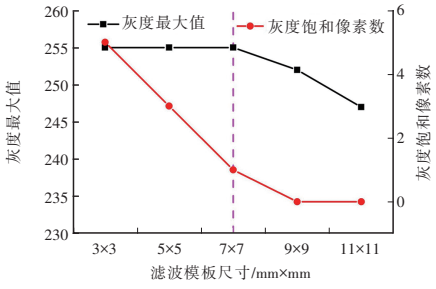
为验证均值滤波掩膜的最佳尺寸,分别采用3×3、5×5、7×7、9×9、11×11共5种尺寸的掩膜作为图像滤波的模板,其具体滤波效果如图8所示,可以看出,5种模板对于过曝区的抑制均有一定效果:3×3滤波掩膜处理后图像边缘得到一定弱化,但中心处仍残留了约5像素宽的过曝区;11×11滤波掩膜处理后图像对过曝区域抑制效果明显,但光条中心被过度抑制,无法精确识别中心线;7×7滤波掩膜处理后图像的抑制效果介于上述两者之间,既对过曝区进行了有效抑制,又保留了约3像素宽的过曝区,提高了后续阈值分割、中心线提取的准确性,7×7的掩膜抑制效果最优。



(a)不同滤波模版处理效果



(b)灰度值分布对比



(c)灰度值最大值对比

图8　不同尺寸掩膜滤波效果

3.2　阈值分割

经过图形滤波后的图像全局一致性较好,因此可采用全局固定值分割方法。经过全局阈值分割和二值化图像处理后的效果如图9所示,可以看出,光条整体均匀性较好,连续、无缺陷和亮斑,符合后续中心线提取的输入要求。



(a)处理前　　(b)处理后

图9　全局阈值分割效果

4 中心线提取技术

阈值分割后，光条具有若干个像素宽度，沿垂直方向离散分布，不具有唯一性，因此需要通过算法计算中心线，为后续拟合提供基础。

4.1 中心线检测原理

中心线检测主要分为像素级检测和亚像素级检测。其中亚像素级检测可突破相机原有分辨率限制，实现超越相机精度的检测，但对算法依赖程度高、计算效率低、鲁棒性差，一般用于相机精度不高或所需测量精度高于当前测量手段所能达到的最高精度的情况[5]。如图10所示，对于同一光条，分别采用灰度重心法、形态骨架法进行中心线提取，两者误差均在允许范围内，其中，形态骨架法精度稍低，偏差比灰度重心法高约40%，但测量时间仅为灰度重心法的1/8，测量效率显著优于灰度重心法。

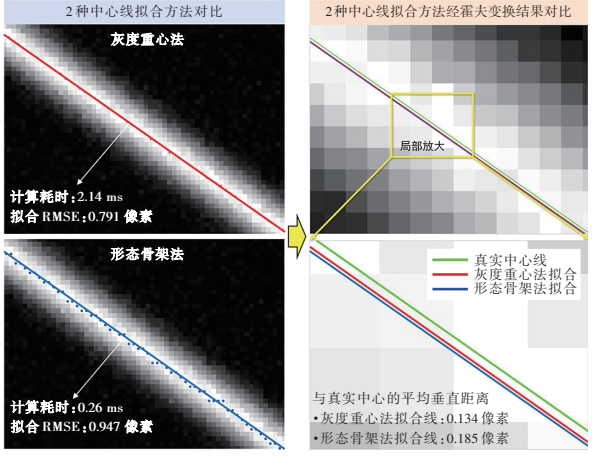


图10 中心线的像素级检测和亚像素级检测方法对比

在实际生产中，在满足测量精度的前提下，需要追求更高的测量效率。此外，由于本文所采用的相机分辨率高于检测精度所要求的分辨率，因此，采用像素级算法可在满足精度的同时，极大提高图像处理的运算效率。

像素级检测的基本原理是通过算法将光条线宽由多像素缩减为1像素，且缩减前后线条形态一致。因此，形态学的处理算法天然适用于光条中心线提取。形态学通常指生物学的一个分支，用于处理动物和植物的形状和结构。在数学形态学的语境中，形态学为提取图像分量的一种工具，其中细化图像的典型算法为形态骨架法。

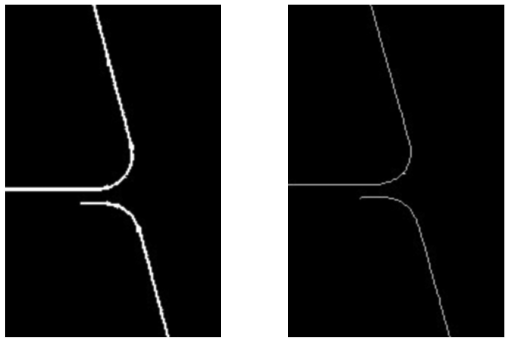
形态骨架法通过结构元素对目标图像边界进行减法操作，其原理如下：

$$(f\ominus b)(x,y)=\min\left\{f(x+x',y+y')-b(x',y')\mid(x',y')\in D_b\right\} \quad (11)$$

式中：b为结构元素；D_b为b的定义域；$(f\ominus b)(x,y)$为b对f的灰度膨胀，其中x、y为自变量；x'、y'为微分量；$f(x,y)$在f的定义域外假设为$+\infty$。

4.2 形态骨架法中心线提取

通过形态骨架法提取光条的骨架，即去除物体外边缘的点，保持物体不发生断裂，同时保持欧拉数不变。在满足上述约束的条件下，对图像进行反复迭代，直到最终收敛[6]。其最终提取效果如图11所示。可以看出，光条中心线特征与原图趋势一致，无断点，线宽为1像素，整体效果良好。



(a)处理前 (b)处理后

图11 形态骨架法处理效果

5 霍夫变换直线拟合

5.1 霍夫直线拟合

霍夫直线检测是利用图像空间中的点与参数空间中的线之间存在的对偶性识别并提取直线特征的算法[7]，检测原理如图12所示，图像空间中的点(x_1,y_1)和(x_2,y_2)分别对应参数空间中的2条曲线，图像空间中的直线对应参数空间中的交点(r',θ')。可以看出，图像空间中的每个点均对应参数空间中的参数曲线，而图像空间中直线上的像素点在参数空间中对应的所有曲线均交于一点。因此，将图像空间中所有点参数化后，通过检测参数空间中点的叠加数量，即可检测出图像空间中的直线。

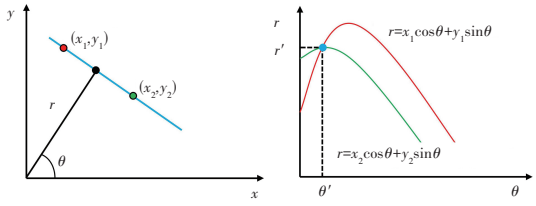
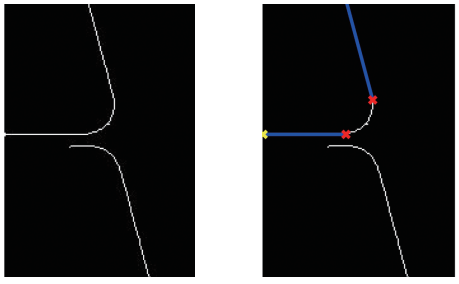
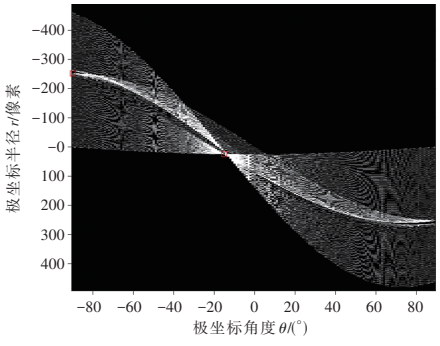


图 12　图像空间到参数空间映射原理

霍夫直线检测的输入如图 13a 所示,其为经过中心线提取的光条图像,通过图像遍历对每个光条中心点进行霍夫变换,即可通过投票得出 2 个极值点[8]。如图 13c 所示,根据霍夫变换,参数曲线中的 2 个交点对应如图 13b 中的 2 条拟合直线。



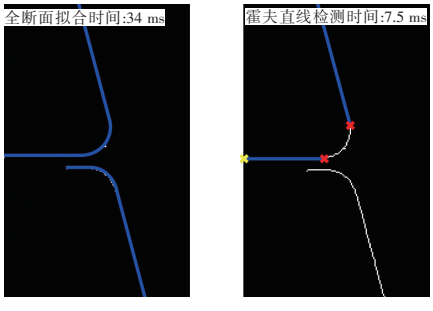
(a)直线拟合输入　　(b)直线拟合结果



(c)参数化投影点

图 13　霍夫直线拟合效果

如图 14 所示,针对同一光条分别采用全断面拟合和霍夫直线检测处理,全断面拟合相较于霍夫直线检测,在圆弧部分和下端直线部分存在多余拟合,采用霍夫直线检测用时节约 75%,拟合效率提升显著。



(a)全断面拟合　　(b)霍夫直线检测

图 14　全断面拟合和霍夫直线检测效率对比

5.2　间隙面差值解算

针对双平行断面间隙面差值解算,可通过将拟合图像分为拟合区和计算区,计算获得计算区的每个光条中心点像素坐标(x, y)到 2 条蓝色直线之间的距离,所有距离中的最小值即为间隙值和面差值。针对该断面进行了实车测试和 10 次测量运算,其具体数值如表 3 所示,间隙测量最大误差为 0.15 mm,面差测量最大误差为 0.14 mm。测量的最大偏差均在 0.15 mm 以内,测量精度满足应用要求。

表 3　测量试验数据　　mm

计算轮次	间隙	残差	面差	残差
理论值	5.0		5.0	
实测值	5.1		5.0	
计算 1	5.13	0.03	4.96	0.04
计算 2	4.98	0.12	5.08	0.08
计算 3	5.06	0.04	5.03	0.03
计算 4	5.00	0.10	4.94	0.06
计算 5	5.18	0.08	4.90	0.10
计算 6	5.06	0.04	5.06	0.06
计算 7	4.95	0.15	4.86	0.14
计算 8	5.15	0.05	4.97	0.03
计算 9	5.03	0.07	4.88	0.12
计算 10	5.01	0.09	5.08	0.08

6　结束语

本文研究了基于光切法的双平行断面轮廓的间隙面差测量方法,结合测量流程中所使用的相机标定技术、图像滤波、阈值分割技术、光条中心线提取技术以及直线拟合技术,给出了断面测量的全流程技术方案。

研究发现,均值滤波可有效抑制相机过曝带来的高亮区域,可突出光条中心与相邻区域的灰度对比。通过试验验证,7×7 的掩膜抑制效果最优。针对双平行断面,通过霍夫直线拟合计算间隙面差单帧计算时间为 0.26 ms,测量的最大偏差在 0.15 mm 以内,在提高运算效率的同时,保证了测量精度。

参考文献:

[1] 孙海霞, 胡永. 投影模型下全方位视觉图像畸变校正算法仿真[J]. 计算机仿真, 2024, 41(9): 177−181.

[2] ZHANG Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.

[3] 胡彦玲, 黄建军. 海量激光图像匹配误差点的智能消除方法[J]. 激光杂志. 2023, 44(11): 94-98.

[4] 李少波, 杨静, 王铮, 等. 缺陷检测技术的发展与应用研究综述[J]. 自动化学报, 2020, 46(11): 2319-2336.

[5] 李克斌. 基于机器视觉的汽车涡轮壳零件表面缺陷检测[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.

[6] 王宸, 张秀峰, 刘超, 等. 改进YOLOv3的轮毂焊缝缺陷检测[J]. 光学精密工程, 2021, 29(8): 1942-1954.

[7] 方遒, 黄智渊, 郭星浩, 等. 激光辅助基于机器视觉的车位线检测方法[J]. 激光杂志, 2025, 46(5): 86-93.

[8] 聂子博, 曹建军, 翁年凤, 等. 基于直线生成的卷积霍夫线段检测[J]. 计算机技术与发展, 2024, 34(5): 30-36.

AT&M