

文章编号 1004-924X(2024)16-2464-10

基于激光点云的中厚板表面平整度测量

时 浩¹, 邓高旭¹, 李正楠¹, 王荣军¹, 马立东^{1,2*}

(1. 太原科技大学 机械工程学院, 山西 太原 030024;

2. 太原科技大学 重载装备作业智能化技术与系统山西省重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要:在冶金行业中,中厚板是主要产品之一,其平整度是评估钢板质量的重要指标。压力矫平现场还依赖于人工测量,无法准确地表征板材平整度。为了提高检测的准确度及高效性,提出了一种基于机器视觉的平整度测量方法。基于高精度的三维视觉扫描技术,结合高斯拟合算法,利用高斯系数构建特征值,建立高斯特征值与实际板材弯曲高度的映射关系,构建基准平面,计算点云坐标值与基准平面的距离,结合 RGB 颜色模型绘制板形云图,在此基础上给出压力矫平添加垫板的位置。实验表明,所提出的方法计算误差不大于 0.3 mm,可以实现对中心凸起或边缘翘曲钢板的测量,同时板形云图反映了板形分布状况及垫板位置。该度量方法可以准确测量中厚板的弯曲量,可以为压力矫平提供数据支持。

关键词:激光点云;板形检测;平整度;高斯拟合;映射

中图分类号:TP741;TG83 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20243216.2464

Surface flatness measurement of medium-thick plate based on Laser point cloud

SHI Hao¹, DENG Gaoxu¹, LI Zhengnan¹, WANG Rongjun¹, MA Lidong^{1,2*}

(1. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology,
Taiyuan 030024, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Intelligent Technology and System for Heavy Duty Equipment Operation,
Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

* Corresponding author, E-mail: mald@tyust.edu.cn

Abstract: In the metallurgical industry, medium and thick plate is one of the main products, and its flatness is an important index to evaluate the quality of steel plate. The pressure leveling field also relies on manual measurement, which cannot accurately characterize the flatness of the plate. In order to improve the accuracy and efficiency of detection, a flatness measurement method based on machine vision was proposed. Based on the high-precision three-dimensional visual scanning technology, combined with the Gaussian fitting algorithm, the Gaussian coefficient was used to construct the eigenvalue, and the mapping relationship between the Gaussian eigenvalue and the actual bending height of the plate was established. The reference plane was constructed, and the distance between the point cloud coordinate value and the reference plane was calculated. The RGB color model was used to draw the shape cloud diagram. On this

收稿日期:2024-04-18;修订日期:2024-05-20.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 52274389);山西省留学人员科技活动择优资助项目(No. 20220028);山西省基础研究计划联合资助项目(No. TZLH20230818011)

basis, the position of the pressure leveling pad was given. Experimental results indicate that the calculation error of the proposed method is not greater than 0.3 mm, which can realize the measurement of the central bulge or the edge warping steel plate. At the same time, the shape cloud diagram reflects the shape distribution and the position of the plate. This measurement method can accurately measure the bending of medium-thick plates and provide data support for pressure leveling.

Key words: Laser point cloud; plate shape detection; flatness; gaussian fitting; correlation mapping

1 引 言

中厚板板形包括钢板断面形状和平直度两项指标^[1],平直度、平坦度、平整度和平面度都表示板材表面上的平整程度。而中厚板的表面平整程度对保证最终产品的性能和减少材料浪费具有至关重要的影响。国内外众多学者围绕板形检测^[2-4]、平面度计算^[5-6]等方面做了大量研究工作。

现有的板形检测装置主要用于生产线的板形控制中,当无法使用辊式矫直机时,需要借助压力矫直机来改善平整度,但是压平机处的板形检测目前主要依赖于人工测量,通过水平仪与塞尺进行板材平整度测量,这种方式对操作人员的要求严格,准确性难以保证,在压平过程中依靠工人经验目测压弯位置及效果,不能准确测量钢板的平整度以及进行有效的表征。

为降低人工测量带来的安全隐患,提高检测效率与精度,利用激光三角法对中厚板进行非接触式平整度检测是当前可行有效的手段^[7]。基于激光三角法进行表面平整度检测原理是:投射激光线^[8]或激光条纹^[9-10]至物体表面,通过激光线是否变形判断钢板是否含有平直度缺陷,计算钢板表面激光线的长度来表征平直度。但此方法提供的板形信息受钢板振动影响大。针对以上问题,Pernkopf F^[11]提出了一种利用几何变换重建三维曲面的方法重建钢板的三维表面数据进行平整度计算。Yang DL^[12]利用激光跟踪仪测量目标物体的点坐标的高度差表征平整度。Chen^[13]利用立体视觉与网格投影仪获取物体点云,基于最小二乘法计算平整度。Vladan Radlovacki^[14]通过一个点生成一束平面,计算点到参考平面的距离以评估平面度误差,此方法比最小二乘法计算的误差值更小。Zhang^[15]提出基于凸包算法和改进的粒子群优化算法,用于测量和评估

大规模点云数据的平面度误差。Liu C Y^[16]提出采用海洋掠食者算法(Marine Predator Algorithm, MPA)对平面度误差进行计算,比最小二乘法和粒子群优化算法具有更小的平面度误差和更快的收敛速度。但是这类方法主要对整体进行测量与计算,缺少对局部的分析。

因此本研究提出了一种基于机器视觉的平整度测量方法,旨在通过高精度的三维视觉扫描技术,结合高斯拟合算法,实现对中厚板平整度的高效、准确测量。该方法首先对通过三维视觉扫描得到的板面点云数据进行预处理,其次对板材宽度方向上的点云数据进行高斯拟合,计算得到高斯特征值,最后建立高斯特征值与板材弯曲高度间的映射关系,以精确度量并计算板形。引入可视化技术^[17],直观展现板形质量。该方法的提出不仅提高平整度检测的精度和效率,同时也为压平工作提供了强有力的数据支持。

2 钢板点云数据获取及预处理

2.1 3D扫描仪

本文使用PhoXi 3D扫描仪对钢板进行测绘,得到其三维点云数据。扫描仪实物如图1所示。PhoXi 3D激光扫描仪采用波长639 nm的红色可见光为光源,CMOS传感器成像,其基于结构光投影和视差计算原理实现三维重建。中厚板在扫描时处于常温状态,温度对扫描成像无干扰。扫描仪的扫描距离为1 680~3 780 mm,视野范围为2 064×1 544 pixels,一帧输出点云可以达到320万个点,测量精度≤500 μm。

2.2 点云数据预处理

由于三维扫描仪在扫描过程中会将周围环境中存在的物体一并扫描到仪器中成像,因此需要对点云数据进行预处理,从原始点云中提取板材点云。



图1 PhoXi 3D扫描仪

Fig. 1 PhoXi 3D Scanner XL

首先,针对原始点云利用高通滤波器去除 z 方向与目标点云距离较远的点;其次,为了提高处理速度,需要对数据进行精简^[18],本文采用改进的体素下采样算法^[19],其原理是通过用原始点云数据中距离体素重心点最近的点代替体素重心点;然后,利用聚类分割的方法提取目标点云,并对其进行高斯滤波去噪;最后,成像坐标系是基于相机坐标系成像,而相机坐标系的 z 轴与设备横轴存在倾斜角度,故需要对点云进行旋转校正。

3 中厚板板形表征

中厚板在生产制造的过程中可能会出现弯曲、浪形等缺陷,如图2所示为两种中厚板常见的弯曲类型。这些弯曲不仅影响板材的外观质量,还可能影响其后续的加工和使用性能。因此,针对辊式矫直机无法处理的板材需要使用压平机进行矫平。

压力矫平是基于反弯矫直原理,根据原始弯曲量的不同施加不同的压下量,以保证达到矫平的目的。压力矫平一般采用三点弯曲模型^[20],如图3所示,即当钢板向上弯曲时,在钢板上表面最高位置放置垫块,钢板下表面的两侧放置垫块,压平机的压头下压钢板,使钢板反向弯曲,压头抬升,钢板回弹至平面。反之,当钢板向下弯曲时,在钢板下表面最低位置放置垫块,钢板上表面的两侧分别放置垫块,压平机的压头下压钢板,使钢板反向弯曲,压头抬升,钢板回弹至平面。

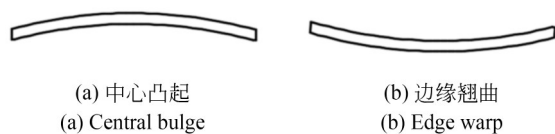


图2 钢板弯曲类型

Fig. 2 Bending type of steel plate

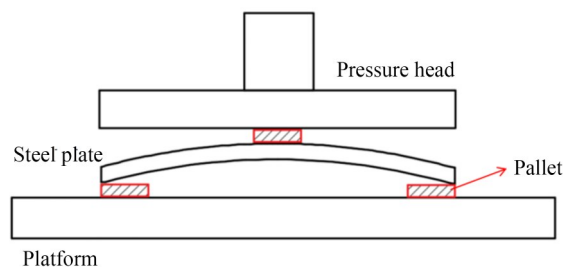


图3 压力矫直

Fig. 3 Pressure straightening

因此利用压平机进行压力矫平的前提是获取钢板的弯曲形式、弯曲位置以及弯曲量。

3.1 建立映射关系模型

通过设备扫描得到的板材点云是以相机坐标为原点,故远离相机的方向为 z 轴的正方向,即越远离相机 z 值越大,故当钢板为边缘翘曲时,将每次最低点与上平面的测量高度记为 h_i , $i=1, 2, \dots, n$ 。

将长度为 L 的板材点云沿宽度方向上的每一行点云称为一个分布单元。其中,每个分布单元都可单独看作为高斯曲线,使用一维高斯函数对点云条进行拟合。式(1)为高斯函数,高斯曲线如图4所示。

$$Z(x) = ae^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}}, \quad (1)$$

其中: $Z(x)$ 表示点云在 z 方向上的值, x 表示点云条上点的数量, a, b, c ,为高斯曲线的参数, a 为曲线的高度, b 为曲线在横坐标上的中心, c 是指半峰全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)^[21]。

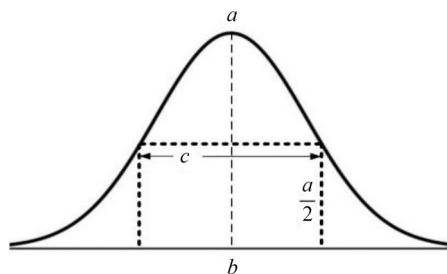


图4 高斯曲线图

Fig. 4 Gauss curve

对提取出的板材点云进行横向点云条提取,横向点云条上的数据表示为 (x_i, y_i) , $i=1, 2, \dots, n$,将此数据代入到式(1)中,可得:

$$y_i = ae^{-\frac{(x_i-b)^2}{2c^2}}, \quad (2)$$

式中, a, b, c 为所估计的参数。

对式(2)的左右两边取自然对数, 可得:

$$\ln y_i = z_i, \ln a - \frac{b^2}{2c^2} = m_0, \frac{b}{c^2} = m_1, -\frac{1}{2c^2} = m_2. \quad (3)$$

由于采集的数据量较大, 用矩阵形式表示为:

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 \\ 1 & x_2 & x_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_0 & m_1 & m_2 \end{bmatrix}^T. \quad (4)$$

根据最小二乘原理, 求解上述矩阵方程的最小二乘解, 即可以求出待估参数 a, b, c , 并得到高斯函数的特征参数。

其中, 参数 a, b, c 在测量中都有它们自己的物理意义^[22], 其中 a 表示钢板弯曲的程度, b 表示钢板弯曲的位置, c 表示钢板弯曲的宽度尺寸。

为了表征每一点云条上点云拟合的高斯分布曲线, 采用如下表达式:

$$y^u = \ln a - \frac{1}{c}, \quad (5)$$

其中, y^u 表示高斯特征值。

由于每一条拟合的高斯曲线得到的高斯特征值都与所测量的弯曲高度是一一对应的, 因此, 需要建立高斯特征值和测量高度之间的映射关系, 通过二次多项式的方法实现。映射关系如式(6)所示:

$$h^u = f(y^u). \quad (6)$$

至此, 通过对所采集点云的凹度最大点点云条进行高斯拟合并计算其高斯特征值, 就可以通过上式求得钢板边缘翘曲最低点的深度, 并以此来表示板材的弯曲高度。

同样地, 对于钢板还有另外一种形变, 即钢板中心凸起。仍然使用高斯曲线对其进行表征, 此时所测量的高度记为 h^d 。钢板中心凸起时, 最高点的位置距离相机更近, z 值更小, 呈现的曲线为下凹形。为了便于高斯曲线的拟合, 需要将开口向上的曲线以水平方向轴线进行上下翻转及平移以使得其变为开口向下的标准高斯曲线。

同理可获得钢板向上弯曲时高斯特征值 y^d 和弯曲测量高度之间的映射关系, 即表示为:

$$h^d = f(y^d). \quad (7)$$

因此, 将式(6)与式(7)联立即可建立出如下的高斯特征值-弯曲高度映射关系模型:

$$\sigma = \begin{cases} h^u, & \text{边缘翘曲} \\ h^d, & \text{中心凸起} \end{cases}, \quad (8)$$

其中, σ 表示板材在该位置的弯曲高度。

3.2 点云坐标值的数值拟合

在模型建立的过程中, 首先提取板面点云, 从源点云中经过预处理后得到板面点云, 提取横向点云条, 其次将提取的横向点云条进行高斯拟合, 计算高斯特征参数, 最后重复多次实验得到多组实验数据, 利用多个样本数据建立测量模型。

针对模型建立的过程, 实验设备安装高度为 2.3 m, 基于长 1.2 m 宽度 1 m 的板材获取数据, 取不同弯曲程度的板面点云的不同位置的横向点云条进行高斯曲线拟合获取高斯系数, 利用高斯系数计算高斯特征值。

得到高斯特征值以后, 需要将高斯特征值与弯曲高度建立映射关系。利用在不同弯曲程度的钢板上取横向点云条后进行高斯拟合得到的高斯特征值与实际测量弯曲高度真值的数据, 分别利用三次样条插值、二次多项式、二项指数三种拟合方式对所记录的数据进行数值拟合, 图 5 显示了利用三种不同拟合方式进行数值拟合的结果。

图 5(a)所示, 利用三次样条插值对钢板中心凸起拟合存在过拟合的现象; 图 5(c)和 5(d)所示的利用二次多项式对中心凸起、边缘翘曲拟合时, 曲线与数据的吻合程度比较高; 图 5(e)和 5(f)所示的利用二项指数对中心凸起、边缘翘曲拟合时, 曲线两端的趋势与所得数据不符。表 2 中的数据表明二次多项式比二项指数的拟合结果效果好。

表 1 显示了利用三次样条插值、二次多项式、二项指数对中心凸起、边缘翘曲进行数值拟合结果的均方根误差 (RMSE) 和确定系数 (R^2); RMSE 反映了预测值偏离真实值的程度, RMSE 越小, 表示模型的预测结果与真实值越接近; R^2 的值越接近 1, 说明回归曲线对观测值的拟合程度越好; 反之, R^2 的值越小, 说明回归曲线对观测值的拟合程度越差。

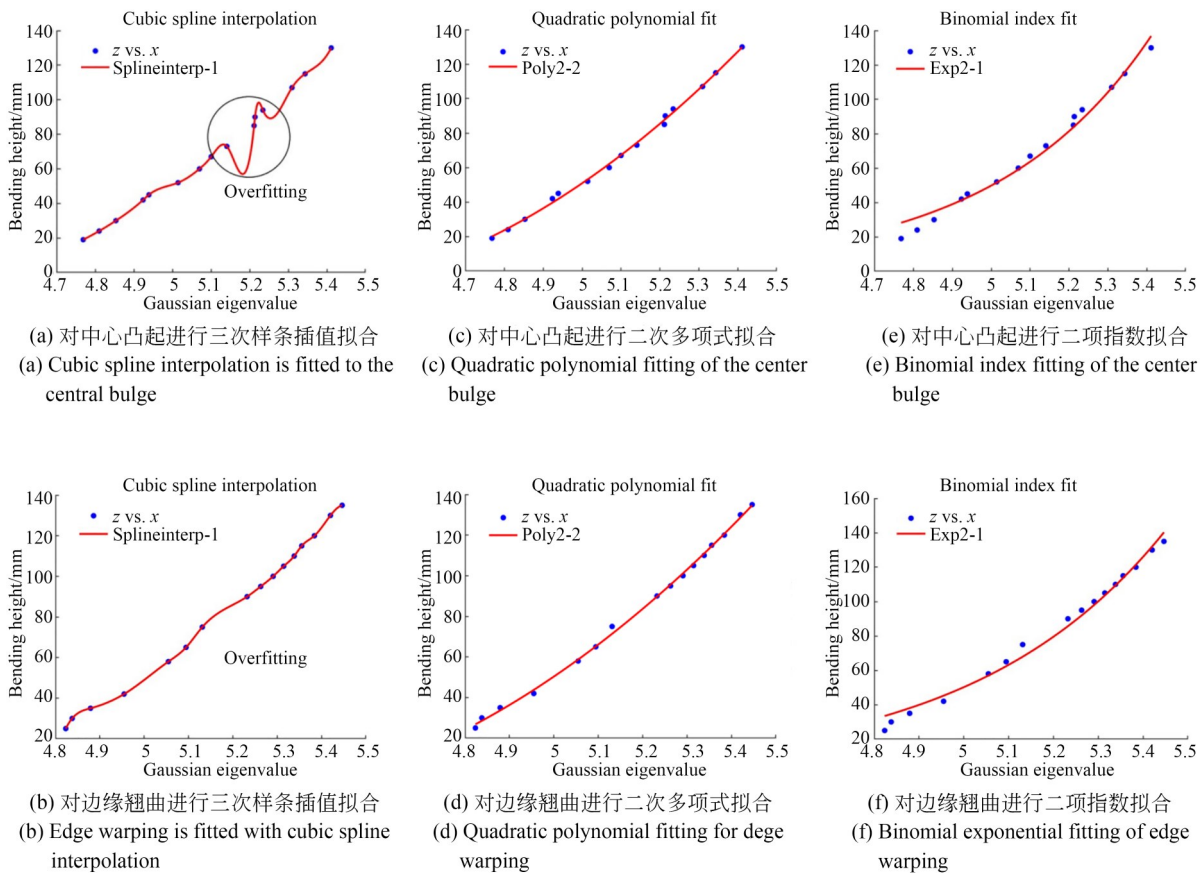


图 5 不同方法的数值拟合

Fig. 5 Numerical fitting of different methods

表 1 拟合误差

Tab. 1 Fitting error

	三次样条插值		二次多项式		二项指数	
	中心凸起	边缘翘曲	中心凸起	边缘翘曲	中心凸起	边缘翘曲
RMSE	\\	\\	1.832	1.529	5.178	1.555
R^2	1	1	0.997 5	0.998 5	0.982	0.998 6

结合图 5 中图像以及表 1 中的误差数据,三次样条插值在拟合过程中出现了过拟合的现象,二次多项式的均方根误差和确定系数比二项指数更优,最终选择采用二次多项式拟合模型建立高斯特征值与钢板弯曲高度之间的映射关系。

因此,式(8)建立的映射模型可以用式(9)表示:

$$\sigma = \begin{cases} 1542.18 - 745.53y^u + 89.43y^{u^2}, & \text{边缘翘曲} \\ 1550.48 - 754.19y^d + 90.86y^{d^2}, & \text{中心凸起} \end{cases} \quad (9)$$

3.3 板形彩色云图

绘制板形彩色云图需要将点云坐标与颜色建立映射关系,使不同高度的值都有与之相对应的颜色表示。在图像处理领域中,颜色模型主要有 RGB 和 HSL 两种^[23]。RGB 颜色模型基于红色、绿色、蓝色这三种基色,通过调节数值比例形成不同的颜色。在本文中,通过三维扫描设备得到的点云数据数值太大,因此需要建立一个基准平面,通过计算点云坐标值到基准平面的距离将数值缩小。

选取前文中计算弯曲高度最大值位置,以此处高度上的点和法线建立基准平面,将其代入式

(10)即可得到基准平面的平面方程。然后,利用公式(11)计算板面点云中每个点到基准平面的距离:

$$Ax + By + Cz + D = 0, \quad (10)$$

$$d = \frac{|Ax_i + By_i + Cz_i + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}. \quad (11)$$

以基准平面为准,可以将点云坐标值范围 $[Z_{\min}, Z_{\max}]$ 分成两段数值区间,即位于基准平面下方的点云,记为 h ,反之,位于基准平面上方的点云,或位于基准平面上的点云,都记为 H 。因此计算的距离范围 $[h_{\min}, H_{\max}]$ 也可根据点云位于基准平面的方位分成两段,对应两段颜色区间。这里的 $h_{\min}, H_{\max}$ 代表点云坐标值位于基准平面下方的最小值和位于基准平面上方的最大值。距离与颜色之间的映射关系如图6所示。

对于RGB颜色模型,主要包含三个变量,即R,G,B,而三个变量的取值范围皆为 $[0, 255]$ 之间的整数。根据图6可知,颜色变量相对于距离是单调变化的,因此可以建立起颜色与距离的映射关系式:当点云位于基准平面上方时,关系式为式(12);当点云位于基准平面下方时,关系式为式(13)。

对于某一点的坐标值,首先根据 z 值确定其隶属区间,其次计算点到基准平面的距离,然后代入式(12)或式(13)计算其RGB颜色值。

$$\begin{cases} \lfloor R \rfloor = \frac{255}{\lceil H_{\max} \rceil} H \\ \lfloor G \rfloor = 255 - \frac{255}{\lceil H_{\max} \rceil} H \\ B = 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} R = 0 \\ \lfloor G \rfloor = 255 - \frac{255}{\lceil h_{\min} \rceil} h \\ \lfloor B \rfloor = \frac{255}{\lceil h_{\min} \rceil} h \end{cases} \quad (13)$$

其中: $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整运算, $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整运算。

4 实验验证

4.1 模拟板材验证

为验证提出的板形平直度测量模型的准确性,现进行如下操作:

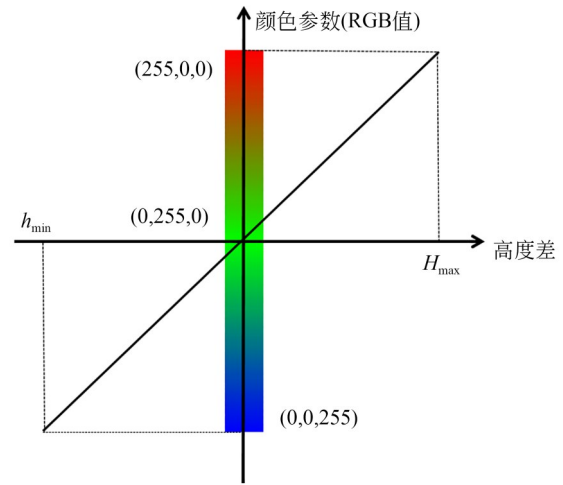


图6 距离与颜色的映射关系

Fig. 6 Mapping relationship between distance and color

我们利用一块不规则弯曲的板材模拟中厚板进行平直度测量,首先利用设备重新扫描,得到板材点云数据,经过点云预处理之后提取板材上三条横向点云,进行高斯拟合得到高斯特征参数。在图7中显示了板材在相机视野下的图像,图中红、绿、蓝三条颜色的线表示图8所取的三个位置(彩图见期刊电子版)。

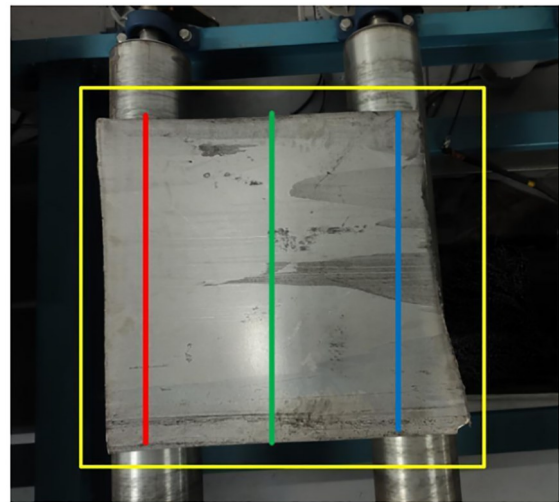


图7 模拟板材

Fig. 7 Simulated plate

图8是对图7中所示的三条横向点云进行提取、高斯拟合后的图像;通过图8中的(b1),(c1),(b2),(c3)发现:当板材弯曲规则、过渡平滑时,高斯拟合的偏离性小,两侧的高低不影响拟合效

果;由图 8 中(b2),(c2)可知:在板材弯曲不规则时,最高点陡峭,且高斯曲线不能拟合到所取点云条的最高点,此时高斯拟合的贴合程度会比对称弯曲时高斯拟合的贴合程度低,影响了高斯特征值的计算结果。

高斯曲线拟合遵循标准正态分布,图 8(b1),(b3)所示的离散点符合正态分布,因此利用高斯曲线进行拟合的效果好、偏离性小;而图 8(b2),

(c2)所示的离散点分布不规则、变化陡峭,基于高斯拟合的曲线拟合效果差,偏离性更大。由中厚板生产流程可知,在整个生产过程中存在多个环节导致板形弯曲,例如在轧制和矫直过程中,参数设置不合理、轧辊缺陷等因素会导致钢板不能达到理想结果,从而导致钢板弯曲;冷却过程中钢板内部残余应力的释放也会导致钢板变形。这些变形存在两种类型,即规则变形与不规则变形。

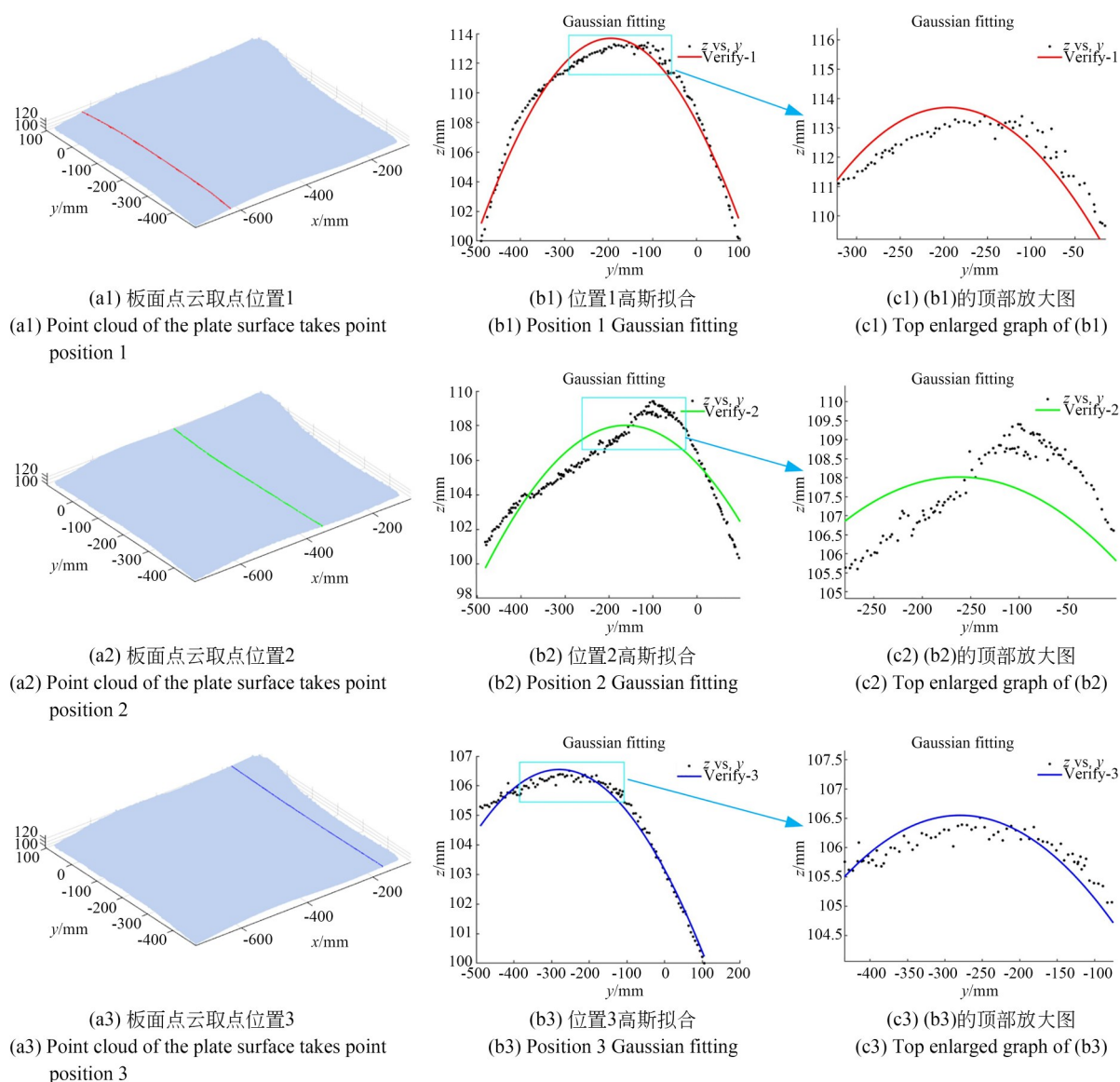


图 8 不规则弯曲板材

Fig. 8 Irregularly bent sheet

本文对所取位置进行高斯拟合的目的是获取高斯系数构建高斯特征值,从而建立特征值与弯曲高度的映射关系。当最高点陡峭时,高斯曲

线拟合的偏离性较大,并且公式(1)中的 a 蕴含钢板弯曲程度的物理意义,对于映射模型具有较大的影响,因此对系数 a 进行 $\ln$ 运算,其结果应用到

高斯特征参数计算中,极大地减小了系数 a 对最终结果的影响,降低了计算误差。

将图 8 中 3 条横向点云条高斯拟合得到的高斯特征值代入式(9)中进行计算,计算结果与其他方法的对比如表 2 所示。表 3 显示了本文方法和对比方法与真值的偏差,真值是通过水平尺与塞尺测量的结果。通过对比发现本文所提方法得到的计算结果更接近真值,验证了本文所提方法的可行性与准确性。

根据国家标准不平度要求每米小于 6 mm,但按照板材生产规格及客户精度要求,不平度最高要求每米小于 3 mm,表 3 所示本文所提方法计算误差的最大值小于 0.3 mm,远小于标准要求,符合现场实际使用要求。

表 2 不同方法计算结果对比
Tab.2 Comparison of calculation results of different methods (mm)

	真值	最值法	所提方法
点云条 1	13.7	13.884 6	13.697 7
点云条 2	10.6	9.451 8	10.951 9
点云条 3	6.8	6.578 7	6.987 4

表 3 误差结果
Tab.3 Error result (mm)

误差	最值法	所提方法
点云条 1	0.184 6	-0.002 3
点云条 2	-1.148 2	0.248 1
点云条 3	-0.221 3	0.187 4

4.2 板材平整度测量的应用测试

板形检测系统软件是基于 C++ 编写的,利用 Visual Studio 2015 平台,引用 PCL 点云库与 OpenCV 图像处理库,完成了板材板形云图的实时绘制,并基于三点弯曲矫直模型给出垫板添加位置,开发了板形检测系统,如图 9 所示。开发的板形检测系统主要应用于压平机的压平工作中。

从图 9 中可以看出:钢板的板形分布基本呈边缘翘曲形式,中间凹两侧凸,图中下方显示的

板形彩色云图可以清晰地反映出来,且左上角的图中添加垫板的位置也清晰明确。

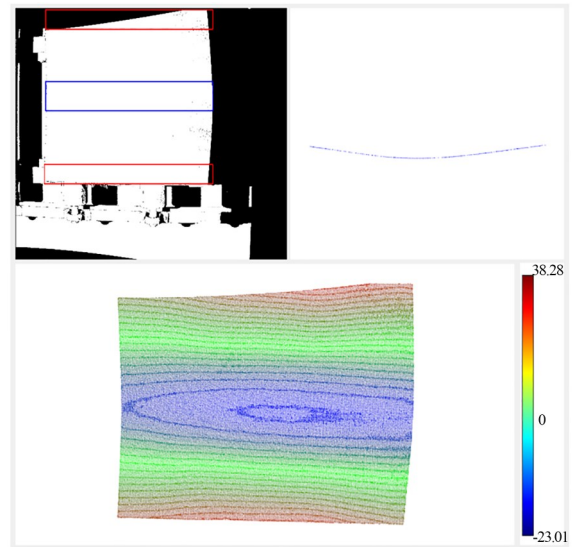


图 9 板形彩色云图
Fig. 9 Plate color cloud map

开发的板形检测系统不仅提高了中厚板平整度的检测效率与准确性,也便于压平机现场操作人员根据绘制的板形云图以及垫板添加位置示意图快速调整垫板,提高了工作效率和板形质量。

5 结 论

本研究提出一种基于机器视觉的中厚板平整度检测方法,通过结合高精度的三维视觉扫描技术与高斯拟合算法,成功建立了高斯特征值与板材弯曲高度之间的映射关系,实验结果表明计算误差不大于 0.3 mm,能够精确地度量和计算板形弯曲高度。通过建立基准平面,计算点云坐标值到基准平面的距离,构建了距离与颜色的映射关系,并基于三点弯曲矫直给出垫板添加位置,以此开发了板形检测软件。实验证明开发的板形检测系统可以准确测量中厚板的平整度,实现了对压力矫平现场的数据支持。

参考文献:

[1] 佟程志,李仕力,苏安龙. 中厚板板形缺陷分析及控制措施[J]. 天津冶金, 2016(B08): 27-29.
TONG C Z, LI S L, SU A L. Analysis on shape defects of medium and heavy plate and control mea-

- tures[J]. *Tianjin Metallurgy*, 2016(B08): 27-29. (in Chinese)
- [2] XIA X H, WANG L, WANG L, *et al.* High-efficiency flatness detection method for medium-thick steel plates based on multiline parallel laser vision[J]. *Optical Engineering*, 2023, 62(10): 105101.
- [3] 李旭, 周平, 李涛, 等. 基于机器视觉的宽厚板轮廓及板形 CPS 智能制造技术研发与应用[J]. *中国冶金*, 2023, 33(4): 136.
- LI X, ZHOU P, LI T, *et al.* 基于机器视觉的宽厚板轮廓及板形 CPS 智能制造技术研发与应用[J]. *China Metallurgy*, 2023, 33(4): 136. (in Chinese)
- [4] 张绪杰, 付天亮, 韩冰, 等. 基于机器学习的淬火钢板板形识别及自学习模型策略[J]. *轧钢*, 2023, 40(5): 98-105.
- ZHANG X J, FU T L, HAN B, *et al.* Quenched plate shape identification and self-learning model strategy based on machine learning[J]. *Steel Rolling*, 2023, 40(5): 98-105. (in Chinese)
- [5] 刘明言, 杜万和, 杨敬辉. 基于最小二乘法拟合平面的激光平面度检测[J]. *智能制造*, 2023(5): 112-118.
- LIU M Y, DU W H, YANG J H. Laser flatness detection based on least square fitting plane[J]. *Intelligent Manufacturing*, 2023(5): 112-118. (in Chinese)
- [6] 厉玉康, 王玉琳, 黄海鸿. 改进差分进化算法在大型工件平面度评定中的应用[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(12): 2659-2667.
- LI Y K, WANG Y L, HUANG H H. Application of improved differential evolution algorithm in flatness evaluation of large work-piece[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(12): 2659-2667. (in Chinese)
- [7] 董博航, 陈平. 基于机器视觉的硅钢板边浪平直度测量方法[J]. *机械与电子*, 2022, 40(12): 53-58.
- DONG B H, CHEN P. Measurement method of edge wave straightness of silicon steel plate based on machine vision[J]. *Machinery & Electronics*, 2022, 40(12): 53-58. (in Chinese)
- [8] 王莹, 党悦晨. 一种基于机器视觉技术的陶瓷墙地砖平整度软测量方法[J]. *陶瓷学报*, 2021, 42(6): 1051-1057.
- WANG Y, DANG Y C. A soft measurement method of ceramic tile flatness based on machine vision technology[J]. *Journal of Ceramics*, 2021, 42(6): 1051-1057. (in Chinese)
- [9] MAGNE S, LEGRAND N, ERTZ S, *et al.* New shapemeter roll technology based on Fiber Bragg Grating technology for on-line flatness monitoring of thin cold rolled metal sheets[J]. *Journal of Applied Physics*, 2022, 131(22): 224502.
- [10] GÅSVIK K J, ROBBERSMYR K G, VADSETH T, *et al.* Deformation measurement of circular steel plates using projected fringes[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 70(1): 321-326.
- [11] PERNKOPF F. 3D surface acquisition and reconstruction for inspection of raw steel products[J]. *Computers in Industry*, 2005, 56(8/9): 876-885.
- [12] YANG D L, ZOU J G. Precision analysis of flatness measurement using laser tracker[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2022, 23(7): 721-732.
- [13] CHEN S F, SU C Y, LIU J, *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.
- [14] RADLOVAČKI V, HADŽISTEVIĆ M, ŠTRBAC B, *et al.* Evaluating minimum zone flatness error using new method-bundle of Plains through one point[J]. *Precision Engineering*, 2016, 43: 554-562.
- [15] ZHANG M W, LIU Y M, SUN C Z, *et al.* Precision measurement and evaluation of flatness error for the aero-engine rotor connection surface based on convex hull theory and an improved PSO algorithm[J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(8): 085006.
- [16] LIU C Y, YANG Y Y, HOU Y G, *et al.* Flatness error evaluation based on marine predator algorithm[C]. *2022 IEEE Conference on Telecommunications, Optics and Computer Science (TOCS)*. Dalian, China. IEEE, 2022: 1123-1125.
- [17] 丁进良, 关凯丰, 张同康. 面向厚板板形质量监控与异常诊断的大数据可视分析[J]. *控制与决策*, 2023, 38(8): 2192-2202.
- DING J L, GUAN K F, ZHANG T K. Big data visual analytics for heavy plate shape quality monitoring and anomaly diagnosis[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(8): 2192-2202. (in Chinese)
- [18] 徐扬欢, 王东城, 汪永梅, 等. 基于自编码器的冷轧带材板形数据降维方法[J]. *钢铁*, 2021, 56(9): 26-35.

- XU Y H, WANG D C, WANG Y M, *et al.* Dimension reduction method of cold rolling strip flatness data based on autoencoder[J]. *Iron & Steel*, 2021, 56(9): 26-35. (in Chinese)
- [19] 陶四杰, 白瑞林. 一种基于降采样后关键点优化的点云配准方法[J]. 计算机应用研究, 2021(3): 904-907.
- TAO S J, BAI R L. Point cloud registration method based on key point optimization after downsampling [J]. *Application Research of Computers*, 2021(3): 904-907. (in Chinese)
- [20] 江连运, 王萍, 李恒, 等. 宽厚板压力矫平压下模型理论建模与有限元分析[J]. 中国冶金, 2021, 31(6): 87-91.
- JIANG L Y, WANG P, LI H, *et al.* Theoretical modeling and finite element analysis of heavy plate under flattening[J]. *China Metallurgy*, 2021, 31(6): 87-91. (in Chinese)
- [21] DENG G X, WU S Q, ZOU L Y, *et al.* Robust gamma correction based on chord distribution coding considering projector defocusing [J]. *Applied Optics*, 2022, 61(10): 2842-2849.
- [22] ZHANG W, WU M, DU S, *et al.* Plate shape recognition based on Gaussian function and particle swarm optimization for roller quenching process [J]. *Journal of Process Control*, 2022, 119: 115-127.
- [23] 王鹏飞, 张智杰, 李旭, 等. 冷轧带材板形在线云图监控系统研究与应用[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(12): 2775-2784.
- WANG P F, ZHANG Z J, LI X, *et al.* Research and application of online sonogram monitoring system for cold rolled strip flatness [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(12): 2775-2784. (in Chinese)

作者简介:



时 浩(1997—),男,山东泰安人,硕士研究生,2021年于青岛农业大学获得学士学位,主要从事机器视觉及点云处理方面的研究。E-mail: 1773179117@qq.com

通讯作者:



马立东(1980—),男,河北唐山人,博士,教授,2010年在燕山大学获得博士学位,现为太原科技大学机械工程学院副院长,主要研究方向为智能机器人系统、视觉检测技术、先进检测技术、智能化弯曲与矫直工艺及装备。E-mail: mald@tyust.edu.cn