

线结构光管道焊缝表面形貌重建与质量评估

韩家杰, 周建平*, 薛瑞雷**, 许燕, 刘宏胜

新疆大学机械工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047

摘要 为了检测管道焊缝表面质量,建立了基于线结构光的检测系统。首先通过图像处理提取中心线与特征点,测量出轮廓仪回转中心与待测管道的轴线偏差。然后对平台空间位姿进行校正,获取了焊缝表面形貌信息,通过数值运算和点云处理,重建了管道焊缝表面的三维形貌。再通过最小二乘改进算法拟合母材平面,提取焊缝的边缘轮廓。最后根据测量出的余高和焊缝宽度等参数,建立理想焊缝模型,设定空间阈值,识别焊缝缺陷,检测焊缝成形质量。实验结果表明,与直接在每一帧轮廓线上进行检测的方法相比,所提方法的效果优良。

关键词 激光技术; 结构光; 图像处理; 三维重建; 焊缝质量检测

中图分类号 TP242.26

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1402010

1 引言

目前,焊缝成形质量检测是管道自动焊接的重点研究内容之一。多线激光、双目视觉、深度相机等虽然可以获取较多的检测信息,但实际应用受复杂结构、图像处理难度、实时性等问题的制约。X光、超声波、磁粉探伤等焊后无损检测方法,过程繁琐,检测的是焊缝内部缺陷,无法反馈焊缝表面状况。结构简单、图像处理难度较低、实时性较好的单线结构光传感器的应用最为广泛,但检测信息有限^[1-3]。

同时,现有的基于结构光的焊缝检测,大多是在一条轮廓线上进行检测,未能很好地利用相邻轮廓线的变化,得到的焊缝边缘在空间平面上的离散度较高;根据焊趾(焊缝表面与母材交界处)计算出的熔宽、余高未能考虑空间姿态的影响,且基于这些数据的三维重建及后续处理的准确程度有待提高^[4-5]。

此外,针对管道环焊缝,利用线结构光扫描、重建焊缝表面三维形貌并进行检测仍存在诸多问题。检测设备与焊缝表面的相关空间位姿关系决定了相邻轮廓线数据间隔的可靠性,并最终影响轮廓拼接、点云数据的生成及后续处理。针对以上问题,本文提出了一种改进检测方法,该方法包含中心线提取、

检测设备的位姿校正和三维重建。

2 焊缝轮廓结构光信息提取

2.1 视觉检测系统的搭建

检测系统如图 1 所示,由三坐标滑台、精密回转工作台、工控机和轮廓仪组成,其中轮廓仪由线激光发射器、滤光系统、CCD 相机和图像采集卡组成。

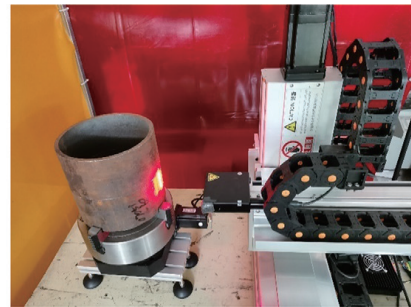


图 1 检测装置图

Fig. 1 Diagram of detection device

实验使用 HD8-0050W 轮廓仪,检测宽度为 50 mm,景深范围为 105~155 mm,采样频率为 $T = 50$ Hz,高度、宽度方向的分辨率分别为 $Z_p = 0.04$ mm、 $X_p = 0.07$ mm,重复采样精度外 $Z_q = 0.007$ mm,线性精度为 $\pm 0.02\%$ 。本文所处理的焊

收稿日期: 2020-11-05; 修回日期: 2020-12-16; 录用日期: 2021-02-07

基金项目: 自治区高校科研计划自然科学重点项目(XJEDU20181006)、2018 新疆维吾尔自治区天山雪松计划(2018xs01)、大型油气输送管道全位置自动焊接技术研究(2017D01C038)

通信作者: *linkzhou @ 163.com; **1981907557 @ qq.com

缝如图 2 所示,管径为 203 mm,焊接工艺为熔化极气体保护焊(GMAW)。

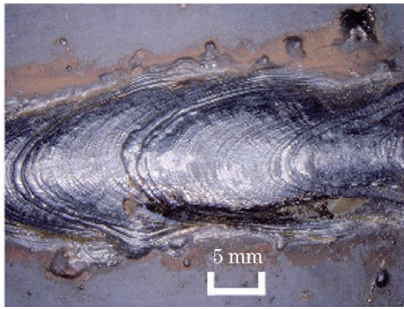


图 2 所测焊缝的原始图像

Fig. 2 Original image of weld to be measured

2.2 结构光图像处理

结构光图像处理是准确获取焊缝表面轮廓数据的关键,更是焊缝表面三维形貌重建和成形质量检测的基础,并决定了后续处理结果的可靠性。

目前,常用的结构光中心线提取法^[6-8]有极值法、灰度重心法和 Hessian 矩阵法。极值法简单且运行速度较快,但易受噪声干扰,无法准确表征轮廓信息。灰度重心法应用广,精度高,具有良好的鲁棒性,但难以保证线结构光在非近似水平状态时的提取精度;Hessian 矩阵法准确度高,但计算复杂,难以满足实时性需求。Tian 等^[9]针对线结构光轮廓和中心线接近平行的特点,通过分割线结构光的轮廓线提取和优化中心线,精度较高,三维重建效果较好。李伟明等^[10]通过结合轮廓跟踪算法,提高了提取速度。杨鹏斌等^[11]通过改进的反射分量分离算

法,有效避免了反射光的干扰。

因此,本文提取结构光边缘,利用重心法得到的亚像素结构光中心线,每列取均值以作为实际的中心线位置。

首先,为了提高运算速度,从原始图像中提取出感兴趣区域(ROI),并保证特征区域(结构光投射到焊缝上的区域包括焊趾和宽度大于 100 pixel 的母材区域)在采集过程中一直处于 ROI 内,即激光条纹边缘不与 ROI 上下边缘相接,激光条纹在高度方向上的每列像素坐标最大、最小值均在 ROI 内,且 ROI 内的激光条纹长度等于 ROI 列数。处理流程如下。

1) 将 1000 frame 结构光图像分为 20 份,根据第一帧和最后一帧图像确定出合适大小的感兴趣区域。

2) 随机从第 2~19 份中分别抽取 18 frame 图像进行验证,如果特征区域都处于 ROI 区域内,则根据这 18 frame 图像中最小的 ROI 区域进行下一次判断;如果特征区域超出 ROI 区域,则将步骤 1)中确定出的 ROI 区域扩大至包含超出区域,之后重复步骤 2)。

3) 再次从这 20 份中剩余的 980 frame 中随机抽取 20 frame,如果其特征区域仍处于 ROI 区域内,则选择此 ROI 区域作为这 1000 frame 图像的 ROI 区域,否则返回步骤 2)选择次最小 ROI 区域再次进行判断。

从原始灰度图像提取得到的 ROI 区域如图 3(a)所示。

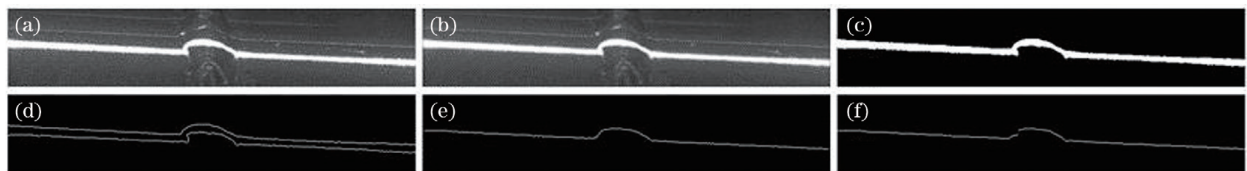


图 3 基于结构光的图像处理流程。(a)感兴趣区域;(b)高斯 & 中值滤波;(c)图像二值化;(d)线结构光的边缘提取;(e)利用灰度重心法提取中心线;(f)中心线提取的最终结果

Fig. 3 Flow chart of image processing based on structured light. (a) ROI; (b) Gaussian & median filtering; (c) image binarization; (d) edge extraction of line structured light; (e) central line extraction by gray centroid method; (f) final result of central line extraction

在实际测量中,由于被测焊缝表面的状况复杂多变,当线结构光投影在管道焊缝上时,存在衍射、漫反射等多种因素的影响,需选择具有良好鲁棒性和实时性的滤波算法消除这些噪声,同时尽可能减少对结构光边缘轮廓特征的影响。

均值滤波实际并没有去除噪声,只是弱化了噪声干扰,同时也破坏了图像的细节部分。单独使用

中值滤波或高斯滤波及改进算法,只能去除某一类噪声,适应性较差。

因此本文用标准差 $\sigma=0.72$ 的 3×3 卷积核进行高斯滤波后,进行了 3×3 模板的中值滤波,滤波结果如图 3(b)所示。对比图 3(a)发现,在激光条纹外噪声灰度值得到抑制的同时,激光条纹的边缘几乎没有改变,滤波效果良好。

利用最大类间方差法 (OTSU) 确定阈值后, 进行二值化处理, 并通过形态学操作滤除像素面积值小于 ROI 区域列数的孤岛噪声, 得到图 3(c) 所示的二值图像。

利用 Canny 算法提取结构光边缘轮廓, 结果可能存在假边缘, 通过设置较高阈值产生的边缘可能断裂, 利用 8 邻域法进行弥补, 计算量大, 实时性差; 利用 Sobel 算法提取结构光边缘轮廓, 抗噪性能好, 但产生的边缘有强弱, 难以准确界定结构光边界, 不利于后续处理; 利用 Laplace 算法提取结构光边缘轮廓, 除对轮廓边缘提取前的降噪要求较高外, 由于算法对边缘敏感, 提取结果能较好地表征焊缝表面

轮廓信息。经测试, 本文采用 $\begin{bmatrix} 1/6 & 2/3 & 1/6 \\ 2/3 & -10/3 & 2/3 \\ 1/6 & 2/3 & 1/6 \end{bmatrix}$ 的

拉普拉斯算子对二值图像进行卷积处理, 得到的结构光边缘轮廓图像如图 3(d) 所示。

利用图 3(b), 根据灰度重心法 (用极值法求取每列光强最大的一点, 并确定一个阈值 K , 在阈值两边判断大于 K 的元素, 求出其重心位置以作为激光条纹的中心), 得到的中心线如图 3(e) 所示。 m 行 n 列结构光图像的中心线重心坐标为

$$(x_0, y_0) = \left(\frac{\sum_i \sum_j x'_{ij} f_{ij}}{\sum_i \sum_j f_{ij}}, \frac{\sum_i \sum_j y'_{ij} f_{ij}}{\sum_i \sum_j f_{ij}} \right), \quad (1)$$

式中: x'_{ij}, y'_{ij} 为第 i 行第 j 列的像素点坐标; f_{ij} 为像素灰度值。

最后, 根据提取的结构光边缘轮廓像素点位置和亚像素结构光中心线, 每列取均值以作为最终的亚像素结构中心线, 结果如图 3(f) 所示。

2.3 轮廓点数据处理

通过求导计算轮廓点变化率, 确定焊趾大概位置后, 分别采用最小二乘法与三次样条曲线拟合母材与焊缝区域, 剔除离散值较大的干扰点。再次拟合后, 距轮廓线交点最近的数据点即为焊缝边缘。检测结果如图 4 所示, 其中 AB、DE 段为焊缝母材区域, B、D 点为焊趾, C 点为焊缝最高点。

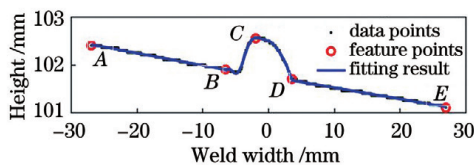


图 4 焊缝表面轮廓的拟合图像

Fig. 4 Fitting image of weld surface contour

3 检测设备的位姿纠正

在扫描位姿处于非理想状态时, 结构光容易受被测焊缝表面及其特性等影响, 无法完整投影至待测表面, 引起测量误差; 测量出的相邻轮廓线, 其间隔和高度基准难以准确衡量, 直接用作点云拼接时无法保证后续检测的准确性。此外, 受轮廓仪有效工作区域的限制, 对检测位姿进行校正, 使轮廓仪回转轴线尽可能接近管道轴线, 可大幅提高检测精度与可靠性, 便于后续处理。理想扫描状态 (结构光垂直投影在待测焊缝表面) 如图 5 所示。

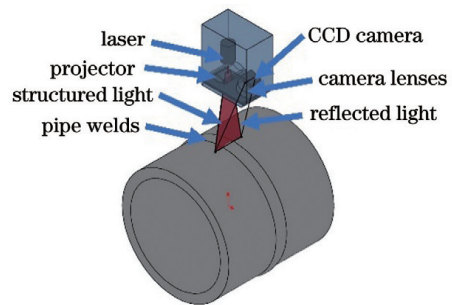


图 5 理想扫描状态示意图

Fig. 5 Schematic of ideal scan status

位置偏差关系如图 6 所示, 管道轴心为 $O_1(0,0)$, 外径为 R , 轮廓仪回转中心为 $O_2(\Delta Y, \Delta Z)$, 轮廓仪回转半径为 R_L , 轮廓仪特定姿态为 $(0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ)$, 测量出的 B、D 点均值位置分别为 $T_1(\Delta Y, -z_{T_1}), T_2(y_{T_2}, \Delta Z), T_3(\Delta Y, z_{T_3}), T_4(-y_{T_4}, \Delta Z)$, 均值点处与管道焊缝表面的距离值分别为 $L_{T_1}, L_{T_2}, L_{T_3}, L_{T_4}$ 。在实际校准时, 轮廓仪与焊缝表面的距离可能超出工作范围, 需通过三坐标滑台进行调节并将位移值计入距离值中。

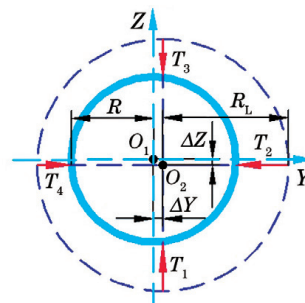


图 6 空间位置偏差示意图

Fig. 6 Schematic of spatial position deviation

回转轴线偏差如图 7 所示, α, β 分别为管道轴线与轮廓仪回转轴线在 XZ, YZ 平面投影的夹角。

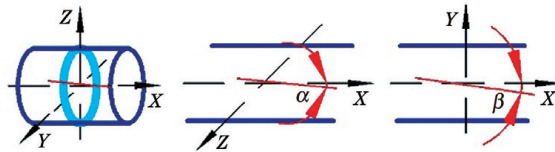


图 7 回转轴线偏差示意。(a)空间示意图;(b) XZ 平面;(c) XY 平面

Fig. 7 Schematic of rotation axis deviation. (a) Spatial diagram; (b) XZ plane; (c) XY plane

计算 $\alpha, \beta, \Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 和 R 的纠正值, 并将其换算为运动机构所需的步进值, 以实现检测平台的位姿校正, 即

$$(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z) = \left[\sum_{t=1}^4 \sum_{p=1}^q \frac{(X_{T_t B p} + X_{T_t D p})}{8 \times q}, \frac{y_{T_2} - y_{T_4}}{2}, \frac{z_{T_3} - z_{T_1}}{2} \right], \quad (2)$$

$$R = \frac{1}{2} \sqrt{(z_{T_1} - L_{T_1})^2 + (y_{T_2} - L_{T_2})^2 + (z_{T_3} - L_{T_3})^2 + (y_{T_4} - L_{T_4})^2 - \frac{(y_{T_2} - y_{T_4})^2}{2} - \frac{(z_{T_3} - z_{T_1})^2}{2}}, \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{1}{4 \times q} \times \sum_{p=1}^q \arcsin \left(\frac{X_{T_2 A p} - X_{T_2 B p}}{Y_{T_2 A p} - Y_{T_2 B p}} + \frac{X_{T_2 D p} - X_{T_2 E p}}{Y_{T_2 D p} - Y_{T_2 E p}} + \frac{X_{T_4 A p} - X_{T_4 B p}}{Y_{T_4 A p} - Y_{T_4 B p}} + \frac{X_{T_4 D p} - X_{T_4 E p}}{Y_{T_4 D p} - Y_{T_4 E p}} \right), \quad (4)$$

$$\beta = \frac{1}{4 \times q} \times \sum_{p=1}^q \arcsin \left(\frac{X_{T_1 A p} - X_{T_1 B p}}{Y_{T_1 A p} - Y_{T_1 B p}} + \frac{X_{T_1 D p} - X_{T_1 E p}}{Y_{T_1 D p} - Y_{T_1 E p}} + \frac{X_{T_3 A p} - X_{T_3 B p}}{Y_{T_3 A p} - Y_{T_3 B p}} + \frac{X_{T_3 D p} - X_{T_3 E p}}{Y_{T_3 D p} - Y_{T_3 E p}} \right), \quad (5)$$

式中: ΔX 为 O_1 与 O_2 在 X 轴上的偏差; q 为特定姿态下测量的轮廓线数, 一般取 3~5; $U_{T_i K p}$ 为 T_i 处第 p 条轮廓线上特征点 K 的 U 轴坐标, K 取 A、B、D 和 E, U 取 X 和 Y , 单位为 mm。

4 点云滤波与三维重建

为了便于后续处理, 三维重建中将管道焊缝当作平面处理, 取管道焊缝轴心作为三坐标原点, 焊缝轮廓间隔的计算公式为

$$Y_p = \frac{2\pi RFS}{60 \times T}, \quad (6)$$

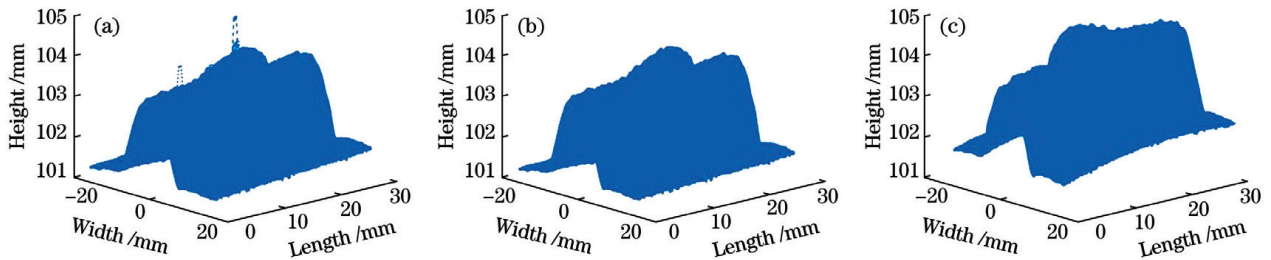


图 8 焊缝表面形貌的三维重建。(a)滤波前;(b)滤波后;(c)实际的管道焊缝表面形貌

Fig. 8 3D reconstruction of weld surface morphology. (a) Before filtering; (b) after filtering; (c) actual pipeline weld surface topography

点云滤波与异常值处理流程如下。

1) 利用焊缝几何形貌与轮廓仪重复采样精度 Z_q , 计算出合适的相邻数据点变化阈值:

$$\sigma_z = \frac{(n+1)}{2} \times \frac{W_0 \times \sqrt{X_p^2 + Y_p^2}}{(2s \times X_p + W_0 \times Z_q)}, \quad (7)$$

式中: n 为遍历窗口大小; s 为焊缝余高; W_0 为焊缝

式中: S 为步进电机转速, $S=1000$ r/min; F 为回转工作台减速比, $F=1/7560$; T 为采样频率。经计算, 本文 $Y_p \approx 0.028$ mm。

直接进行三维重建, 结果如图 8(a) 所示, 仍存在噪点。常见的解决方法^[12-13]是调用点云库, 进行点云滤波, 而这会模糊掉焊缝表面的细小特征, 甚至造成局部失真, 不利于后续的焊缝成形质量检测。

为了提高建模准确性, 本文改进了点云滤波算法, 三维重建结果如图 8(b) 所示, 实际的管道焊缝表面形貌如图 8(c) 所示。

理论宽度。

2) 由于异常点处相邻的数据点乃至同一行或列的数据点高度值 $Z_{(i,j)}$ 仍可能存在异常, 因此本文选用图 9 所示的 5×5 窗口遍历整个点云图像, 比较 $Z_{(i,j)}$ 与 $Z_{(i-2,j-2)}, Z_{(i+2,j-2)}, Z_{(i-2,j+2)}, Z_{(i+2,j+2)}$ 的差值 $C_{Z_{(i \pm 2, j \pm 2)}}$, 当 $C_{Z_{(i \pm 2, j \pm 2)}}$ 大于阈值 σ_z 时, 即可认

$Z_{(i-2,j-2)}$	$Z_{(i-2,j-1)}$	$Z_{(i-2,j)}$	$Z_{(i-2,j+1)}$	$Z_{(i-2,j+2)}$
$Z_{(i-1,j-2)}$	$Z_{(i-1,j-1)}$	$Z_{(i-1,j)}$	$Z_{(i-1,j+1)}$	$Z_{(i-1,j+2)}$
$Z_{(i,j-2)}$	$Z_{(i,j-1)}$	$Z_{(i,j)}$	$Z_{(i,j+1)}$	$Z_{(i,j+2)}$
$Z_{(i+1,j-2)}$	$Z_{(i+1,j-1)}$	$Z_{(i+1,j)}$	$Z_{(i+1,j+1)}$	$Z_{(i+1,j+2)}$
$Z_{(i+2,j-2)}$	$Z_{(i+2,j-1)}$	$Z_{(i+2,j)}$	$Z_{(i+2,j+1)}$	$Z_{(i+2,j+2)}$

图 9 焊缝轮廓数据 5×5 窗口

Fig. 9 5×5 window of weld contour data

为 (i, j) 为异常点。

当点 (i, j) 本身正常, 点 $(i \pm 2, j \pm 2)$ 存在异常, 即 $(i \pm 2)$ 行、 $(j \pm 2)$ 列轮廓存在裂纹、咬边、划痕等异常时, 都可能造成 $C_{Z_{(i \pm 2, j \pm 2)}}$ 大于阈值 σ_z , 故当

$$Z_{(i,j)} = 2 \times (Z_{(i-1,j-1)} + Z_{(i-1,j+1)} + Z_{(i+1,j-1)} - Z_{(i-2,j-2)} - Z_{(i-2,j+2)} - Z_{(i+2,j-2)}) / 3. \quad (8)$$

当 $C_{Z_{(i \pm 2, j \pm 2)}}$ 都大于阈值 σ_z 时, 有

$$Z_{(i,j)} = (Z_{(i+1,j+1)} - Z_{(i+2,j+2)} + Z_{(i+1,j-1)} - Z_{(i+2,j-2)} + Z_{(i-1,j+1)} - Z_{(i-2,j+2)} + Z_{(i-1,j-1)} - Z_{(i-2,j-2)}) / 4 + (Z_{(i-2,j-1)} + Z_{(i-1,j-2)} + Z_{(i-2,j+1)} + Z_{(i-1,j+2)} + Z_{(i+1,j-2)} + Z_{(i+2,j-1)} + Z_{(i+1,j+2)} + Z_{(i+2,j+1)}) / 8. \quad (9)$$

5 焊缝成形质量评定

国内外众多学者^[14-15]通过测量焊缝表面形貌和研究熔池固化过程, 根据焊接工艺、工况、焊缝形貌参数等, 基于迭代预测算法, 建立了相应的理想焊缝模型。理想焊缝轮廓截面如图 10 所示, 近似模型^[16]可描述为

$$Z_h = \sqrt{\frac{W^2}{4} - \frac{W^2}{2s} + \frac{W^4}{8s^2} + \frac{s}{2} - \frac{s^2}{4} - x^2}, \quad (10)$$

式中: 焊缝在宽度方向的位置 $x \in \left[-\frac{W}{2}, \frac{W}{2}\right]$ 。理想焊缝宽度为

$$W = w + 2v + \frac{H-h}{\tan(\gamma/2)}, \quad (11)$$

式中: w 为组对间隙; v 为焊缝增宽; H 为管道壁厚; h 为钝边高度; γ 为坡口角度值。

$C_{Z_{(i \pm 2, j \pm 2)}}$ 中有 3 个以上的值大于阈值 σ_z 时, 才可以认为 (i, j) 是需要滤除的噪点。

3) 针对噪点, 常用的均值法没有考虑变化趋势, 这会使凹陷或凸起处变为邻域均值平面, 造成局部细节失真。通过高次样条曲线拟合异常点所在对角线和行列上一定范围内的数据点, 根据 X, Y 值插值出 Z 值, 虽然能较精确地修正异常点, 但当引入的拟合数据较少时, 计算量增加且效果并不明显。

因此, 本文根据 $C_{Z_{(i \pm 2, j \pm 2)}}$ 大于阈值 σ_z 的数量和位置, 对 $Z_{(i,j)}$ 进行了修正。

当 $C_{Z_{(i \pm 2, j \pm 2)}}$ 中有 3 个值大于阈值 σ_z 时, 有

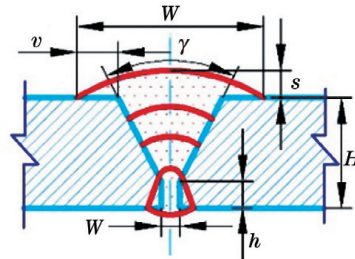


图 10 理想焊缝截面

Fig. 10 Ideal weld section

5.1 母材基准平面拟合

随机抽样一致性算法 (RANSAC) 的运算时间长, 易受表面焊渣等影响, 导致拟合结果出错, 如图 11(a) 所示。如图 11(b) 所示, 在母材区域表面质量较差时, 最小二乘算法 (LS) 拟合出的平面易出现整体偏移, 效果不好。因此, 本文在最小二乘算法基础上进行了改进, 其结果如图 11(c) 所示。

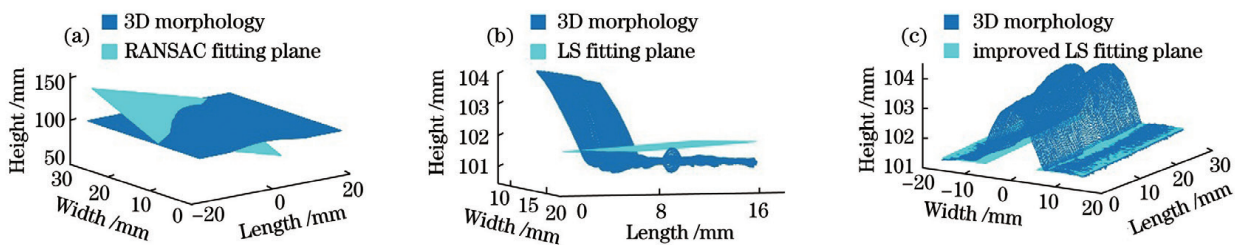


图 11 不同算法下的焊缝母材平面拟合。(a) RANSAC 算法; (b) LS 算法; (c) 改进算法

Fig. 11 Weld base plane fitting by different methods. (a) RANSAC method; (b) LS method; (c) improved method

首先, 找出每条轮廓的最高点所在列数, 取最小(大)列数减(加) N_w 作为左 L (右 R) 端母材区域与

焊缝的分界线列数, N_w 由 W 除 X_p 向上取整得到。然后将 1000 组左 (右) 母材区域轮廓数据均分为

20×5 个待拟合区域(每个区域的实际长宽值应尽可能接近,且宽度方向至少要分为 3 列),分别用最小二乘法拟合出平面。

平面方程的一般表达式为

$$Z = a_{Le}X + b_{Le}Y + c_{Le}, \quad (12)$$

式中: a_{Le} 、 b_{Le} 、 c_{Le} 为第 e 个区域的平面方程参数, $e=1, 2, \dots, 100$ 。只要使

$$S' = \sum (a_{Le}x_i + b_{Le}y_i + c_{Le} - z_i)^2, \quad (13)$$

最小,即解方程组

$$\begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum x_i^2 & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum y_i & n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_{Le} \\ b_{Le} \\ c_{Le} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum z_i x_i \\ \sum z_i y_i \\ \sum z_i \end{bmatrix}, \quad (14)$$

式中: x_i 、 y_i 、 z_i 为拟合面上数据点的空间坐标。即可得到最小二乘法拟合出的平面方程待求参数 a_{Le} 、 b_{Le} 和 c_{Le} 。

之后,按照标准差公式

$$\sigma_{a_{Le}} = \sqrt{\frac{1}{100} \times \sum_{e=1}^{100} \left(a_{Le} - \sum_{e=1}^{100} \frac{a_{Le}}{100} \right)^2}, \quad (15)$$

去除 a_{Le} 中超出阈值 $\sigma_{a_{Le}}$ 的平面,对数据组 b_{Le} 、 c_{Le}

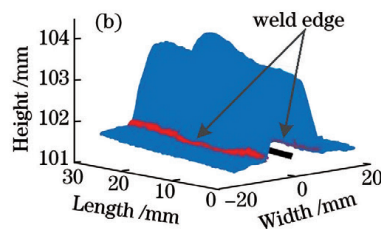
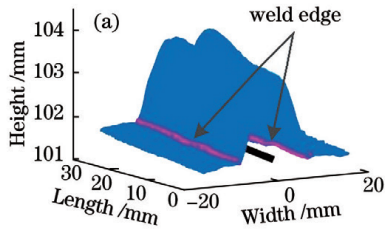


图 12 不同方法提取的焊缝边缘。(a) 利用拟合平面;(b) 利用每一帧轮廓线

Fig. 12 Weld edges extracted by different methods. (a) According to fitting plane; (b) from each contour line

5.3 焊缝轮廓面拟合

首先,根据每一帧轮廓线上的焊缝边缘位置 (x_{Li}, y_i, z_{Li}) 和 (x_{Ri}, y_i, z_{Ri}) , 剔除宽度 $\sqrt{(z_{Li} - z_{Ri})^2 + (x_{Li} - x_{Ri})^2}$ 在 $(W - 2v, W)$ 之外的轮廓,取左右焊趾坐标中值 $\left(\frac{x_{Li} + x_{Ri}}{2}, y_i, \frac{z_{Li} + z_{Ri}}{2} \right)$,拟合出焊缝中心线,拟合后的空间直线为

$$M: \begin{cases} x = ay + b \\ z = cy + d \end{cases}, \quad (16)$$

式中:参数 a 、 b 、 c 、 d 可根据最小二乘法求得。本文中焊缝中心线参数为: $a = -0.0035$, $b = -0.4405$,

的处理与之相同,最后取均值得到最终的拟合平面参数 a_L 、 b_L 、 c_L 。

同理,可得右端母材拟合平面参数 a_R 、 b_R 、 c_R 。在本文拟合平面中, $a_L = 0.0129$, $b_L = 0.0104$, $c_L = 101.5890$, $a_R = 0.0127$, $b_R = 0.0108$, $c_R = 101.4587$ 。

据此可得管道接头错边量 $|c_L - c_R|$ 等数据,且 a_L 、 b_L 、 c_L 与 a_R 、 b_R 、 c_R 越接近,说明管道焊接接头的对接效果越好。

5.2 焊缝轮廓边缘的检测

以焊缝轮廓左边缘为例,根据每条轮廓的最高点所在位置,向左循环判断实际轮廓在 (x_i, y_j) 点处的高度值 Z 与拟合平面 Z_L 的差值,同时,为了提高检测速度,判断第一条轮廓焊缝边缘时遍历最高点单侧区域,之后都是在前一边缘轮廓点 $\pm v$ 范围内寻找差值最接近 0 的点,当其满足右边轮廓点都在拟合平面上方且左边轮廓点在 $(Z_L - Z_p, Z_L + Z_p)$ 范围内时,即可认为该轮廓是焊缝边缘,检测结果如图 12(a) 所示。根据国内外学者的研究^[17-19],在每一帧轮廓线上提取焊缝边缘,结果如图 12(b) 所示。对比不难发现,在三维重建模型上提取的边缘轮廓,其分布更接近同一平面,更准确。

$c = 0.0105$, $d = 101.4984$ 。

将焊缝中心线 M 沿左右母材面分别平移 $0.5W - v$ 、 $0.5W$ 后,即可得到焊缝边缘容许界限,即

$$M_{Lmin}: \begin{cases} x = ay + b - 0.5W + v \\ z = b_L y + d \end{cases}, \quad (17)$$

$$M_{Lmax}: \begin{cases} x = ay + b - 0.5W \\ z = b_L y + d + cv \end{cases}, \quad (18)$$

$$M_{Rmin}: \begin{cases} x = ay + b + 0.5W - v \\ z = b_R y + d \end{cases}, \quad (19)$$

$$M_{Rmax}: \begin{cases} x = ay + b + 0.5W \\ z = b_R y + d + cv \end{cases}. \quad (20)$$

对焊缝轮廓边缘位置数据进行筛选后,得到实际最佳焊缝宽度 W_1 为

$$W_1 = \frac{1}{n'} \times \sum_{i=1}^{n'} \sqrt{\cos c \times (z_{Li} - z_{Ri})^2} + \frac{1}{n'} \times \sum_{i=1}^{n'} \sqrt{\cos a \times (x_{Li} - x_{Ri})^2}, \quad (21)$$

式中: n' 为符合条件的轮廓数, 本文 $n' = 953$ 。

根据每一帧轮廓线上焊缝区域的最高位置 (x_{mi}, y_i, z_{mi}) 和焊缝边缘位置, 由

$$s_i = \frac{|(z_{mi} - z_{Ri}) \times (x_{mi} - x_{Ri})|}{2\sqrt{(z_{Li} - z_{Ri})^2 + (x_{Li} - x_{Ri})^2}} - \frac{|(z_{mi} - z_{Li}) \times (x_{mi} - x_{Li})|}{2\sqrt{(z_{Li} - z_{Ri})^2 + (x_{Li} - x_{Ri})^2}}, \quad (22)$$

算出焊缝余高 s_i , 剔除 s_i 在 $(1, s + 0.1H)$ 范围以外的轮廓, 取均值后得到实际最佳焊缝余高 s_1 。最终, 根

据拟合得到的焊缝中心线 M , 母材平面 L、R 与 s_1 、 W_1 , 生成的实际最佳焊缝表面轮廓模型可以描述为

$$z_{ij} = \begin{cases} a_L x_{ij} + b_L y_{ij} + c_L, & x_{ij} \leq x_{Li} \\ \sqrt{\frac{2x_{mi}^2 + 2z_{mi}^2 + s_1}{128 + 32s_1 + 2s_1^2} + \left(\frac{s_1 z_{mi}}{2} - \frac{x_{mi} z_{mi}}{8s_1} - \frac{z_{mi}^3}{8s_1 x_{mi}}\right)^2} - (x_{ij} - x_{mi})^2 + z_{mi}, & x_{ij} \in (x_{Li}, x_{Ri}), \\ a_R x_{ij} + b_R y_{ij} + c_R, & x_{ij} \geq x_{Ri} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $x_{mi} = ay_{ij} + b, z_{mi} = cy_{ij} + d$ 。

最终得到的理想焊缝表面轮廓模型如图 13(a) 所示。同理, 根据焊缝最小宽度 $(W - 2v)$ 和余高最小值 (1 mm), 将左右母材拟合平面加上 Z_q , 得到图 13(b) 所示的焊缝最小理想表面轮廓模型。根据

焊缝允许的最大宽度 (W) 与余高最大值 $(s + 0.1 \times H)$, 当 $s + 0.1 \times H \geq 3$ 时, 余高最大值为 3 mm, 将左右母材拟合平面减去 Z_q , 得到图 13(c) 所示的焊缝最大理想表面轮廓模型。在实际具体应用中, 上述取值范围有待进一步优化。

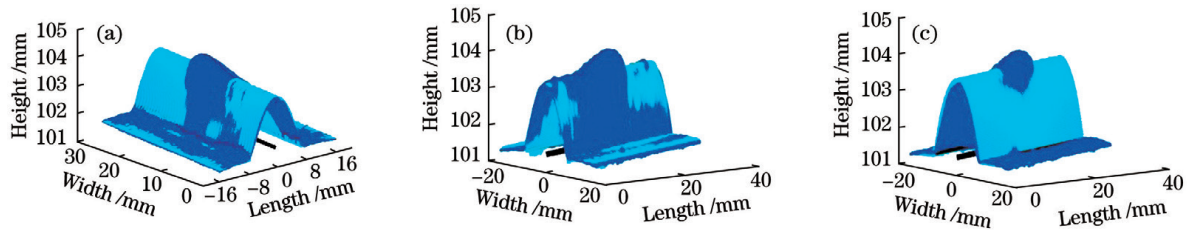


图 13 焊缝轮廓模型的对比。(a) 理想模型; (b) 最小理想轮廓模型; (c) 最大理想轮廓模型

Fig. 13 Comparison among weld surface models. (a) Idealized model; (b) minimum idealized model; (c) maximum idealized model

5.4 焊缝表面成形质量评估

焊缝表面轮廓在理想模型上的平面投影如图 14 所示。

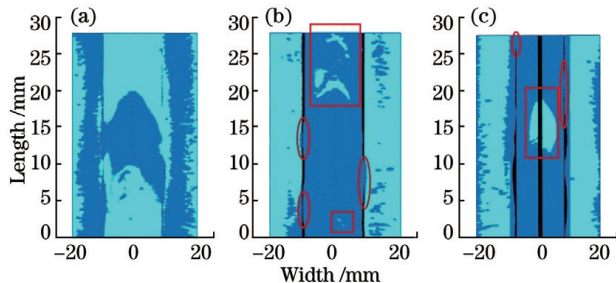


图 14 焊缝表面轮廓在不同模型上的投影。(a) 理想模型; (b) 最小理想轮廓模型; (c) 最大理想轮廓模型

Fig. 14 Weld surface contour projection on different models. (a) Idealized model; (b) minimum idealized model; (c) maximum idealized model

当焊缝边缘位于 $[M_{Lmin}, M_{Lmax}]$ 或 $[M_{Rmin},$

$M_{Rmax}]$ 处, 且所测焊缝表面位于最小表面轮廓模型下面的区域内时, 焊缝咬边, 检测结果如图 14(b) 圆圈所示。

当焊缝边缘位于 $[M_{Lmin}, M_{Rmin}]$ 处, 且所测焊缝表面位于最大表面轮廓模型母材区域处时, 焊缝未熔合, 检测结果如图 14(c) 圆圈所示。

当焊缝边缘在焊缝区域内, 且所测焊缝表面位于最大表面轮廓模型上面的区域内时, 焊缝出现缺陷即余高过高, 检测结果如图 14(c) 方框所示。

至于弧坑、焊瘤和焊缝母材过渡不圆滑等缺陷的检测还有待进一步研究。

此外, 为了整体评估焊缝表面成形质量, 本文从 6 块标准检测样件上, 随机采集了 9 组无表面缺陷和 9 组存在表面缺陷的焊缝轮廓数据, 通过计算实际焊缝表面轮廓与理想模型的高度均方差值, 衡量了二者的相近程度, 计算结果如表 1 所示。

表 1 标准检测样件与理想模型的高度均方差值

Table 1 Mean square deviation value of height between standard test sample and idealized model unit: mm

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Without defects	0.0141	0.0237	0.0777	0.0865	0.1064	0.0827	0.1097	0.0086	0.0732
With defects	0.3115	0.2919	0.3390	0.3910	0.1977	0.2983	0.3587	0.2481	0.2876

从实际焊接管道上采集了 3 组无表面缺陷、3 组存在不明显表面缺陷和 3 组存在明显表面缺陷的焊缝轮廓数据,计算结果如表 2 所示。

表 2 实际管道与理想模型的高度均方差值

Table 2 Mean square deviation value of height between real pipeline and idealized model unit: mm

No.	Without defects	With unnoticeable defects	With apparent defects
1	0.2146	0.2884	0.3716
2	0.1895	0.3155	0.3976
3	0.1154	0.2067	0.3990

从表 1 与表 2 中可知,实际焊缝表面轮廓越接近理想模型,焊缝表面成形质量就越好。

6 结 论

针对配有线结构光传感器的全位置管道自动焊接,通过完善平台检测流程,改进中心线提取算法,校正平台位姿,解决了基于线结构光重建管道焊缝表面形貌的轮廓拼接难题。根据三维重建测量结果,建立了理想模型。该模型可对焊缝表面成形质量进行评估,为管道自动化焊接生产中焊缝成形质量的快速检测及焊后打磨工作提供了参考。

未来将研究点云滤波中的异常点处理,继续优化模型以进一步提升检测效果,并完善算法以获取缺陷的位置与体积信息。

参 考 文 献

- [1] Guo J C, Zhu Z M, Yu Y F, et al. Research and application of visual sensing technology based on laser structured light in welding industry[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1200001.
郭吉昌, 朱志明, 于英飞, 等. 焊接领域激光结构光视觉传感技术的研究及应用[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1200001.
- [2] Zou Y B, Zhou W L, Chen X Z, et al. Research of laser vision seam detection and tracking system based on depth hierarchical feature[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0402009.
邹焱飏, 周卫林, 陈向志, 等. 基于深度分层特征的激光视觉焊缝检测与跟踪系统研究[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0402009.
- [3] Sun B W, Zhu Z M, Guo J C, et al. Detection algorithms and optimization of image processing for visual sensors using combined laser structured light[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2019, 59(6): 445-452.
孙博文, 朱志明, 郭吉昌, 等. 基于组合激光结构光的视觉传感器检测算法及图像处理流程优化[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, 59(6): 445-452.
- [4] Liu W, Gao P, Zhang Y, et al. High-precision measurement method for 3D shape of large-scale parts[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(3): 0317003.
刘巍, 高鹏, 张洋, 等. 面向大型零部件的三维形面高精度测量方法[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(3): 0317003.
- [5] Yin L, Wang X J, Qin G Y, et al. Dynamic measurement method of large-scale surface based on visual structured light technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 131202.
阴雷, 王向军, 秦贯宇, 等. 基于视觉结构光的大型曲面动态测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 131202.
- [6] Li Y Y, Zhang Z Y, Yuan L, et al. Survey on linear structured light stripe center extraction[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 100002.
李莹莹, 张志毅, 袁林, 等. 线结构光光条中心提取综述[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10): 100002.
- [7] Guo Y Y, Yang J, Song W A, et al. Method for extracting line structured light center in complex environment[J]. Computer Engineering and Design, 2019, 40(4): 1133-1138, 1144.
郭雁蓉, 杨剑, 宋文爱, 等. 复杂环境中的线结构光中心提取方法[J]. 计算机工程与设计, 2019, 40(4): 1133-1138, 1144.
- [8] Li Y H, Liu P, Zhou J B, et al. Center extraction of structured light stripe based on back propagation neural network[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1212005.
李玥华, 刘朋, 周京博, 等. 基于 BP 神经网络的结构光光条中心提取[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1212005.
- [9] Tian Q G, Zhang X Y, Ma Q, et al. Utilizing

- polygon segmentation technique to extract and optimize light stripe centerline in line-structured laser 3D scanner[J]. *Pattern Recognition*, 2016, 55: 100-113.
- [10] Li W M, Peng G, Gao X Y, et al. Fast extraction algorithm for line laser strip centers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0304002.
李伟明, 彭国, 高兴宇, 等. 线激光光条中心快速提取算法[J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0304002.
- [11] Yang P B, Deng L J, Chen Y, et al. Three-dimensional shape measurement of highly reflective objects based on structured light[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(2): 0204004.
杨鹏斌, 邓林嘉, 陈元, 等. 基于结构光的高反物体三维形貌测量方法[J]. *中国激光*, 2019, 46(2): 0204004.
- [12] Guo Y L, Wang H Y, Hu Q Y, et al. Deep learning for 3D point clouds: a survey[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2020, 2: 3005434.
- [13] Zhang K, Yan M Z, Huang T Y, et al. 3D reconstruction of complex spatial weld seam for autonomous welding by laser structured light scanning [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 39: 200-207.
- [14] Li Y J, Wang J. Analysis and counter measures of welding defects[M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2014: 25-49.
李亚江, 王娟. 焊接缺陷分析与对策[M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2014: 25-49.
- [15] Cruz J G, Torres E M, Absi Alfaro S C, et al. A methodology for modeling and control of weld bead width in the GMAW process [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2015, 37(5): 1529-1541.
- [16] Zhou J P, Xue R L, Xu Y, et al. Research and development of flexible cutting welding technology equipment and system for pressure vessel and pipeline [D]. Xinjiang: Xinjiang University, 2017.
周建平, 薛瑞雷, 许燕, 等. 压力容器及管道柔性割焊工艺装备与系统研制[D]. 新疆: 新疆大学, 2017.
- [17] Jin Z S, Li H C, Li R, et al. 3D reconstruction of GMAW pool surface using composite sensor technology[J]. *Measurement*, 2019, 133: 508-521.
- [18] Qi J Y, Li J Y. Feature extraction of welding defect based on machine vision [J]. *China Welding*, 2019, 28(1): 56-62.
- [19] Chu H H. Research on weld quality inspection technology based on vision [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
褚慧慧. 基于视觉的焊缝质量检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.

Surface Morphology Reconstruction and Quality Evaluation of Pipeline Weld Based on Line Structured Light

Han Jiajie, Zhou Jianping*, Xue Ruilei**, Xu Yan, Liu Hongsheng

College of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830047, China

Abstract

Objective At present, pipeline automatic welding is generally equipped with a structural light sensor for seam tracking. And the detection of welding quality is one of the key points in robotic welding. Therefore, it has great practical value for the research on the detection of welding quality monitored by a linear structured light sensor. However, the existing weld forming quality detection based on structured light is mostly carried out on each contour line, and the change of adjacent contour lines is not properly utilized. For pipeline welds, it is difficult to guarantee the interval of adjacent contour lines when reconstructing the three-dimensional (3D) morphology of the weld surface by line structured light scanning. The weld edge, width and reinforcement extracted from each single contour also exist deviations due to the positioning error of the detection platform. Aiming at these problems, this paper presents a weld forming quality inspection method based on 3D reconstruction. And we hope that our findings can be helpful for pipeline automatic welding production.

Methods In order to improve the speed of extracting central-lines from structured light, the region of interest (ROI) should be extracted from the first and the last frames of the original N -frame images. Then the ROI is corrected by random sampling to ensure that the feature region is always within the ROI in the acquisition process. After Gaussian filtering, median filtering, image binarization, and morphological processing, the edge of structured

light is extracted by the Laplace operator, and the sub-pixel centerline of structured light is obtained by the gray centroid method. Then the average value of each column is taken as the actual centerline position (**Fig. 3**). To calculate the deviation between the axis of the pipeline to be measured and the rotation center of the profiler, the feature points of each central-line are extracted by calculating the changing rate and piecewise fitting, according to the measured results of the profilometer in both the horizontal and vertical states. After position and attitude of the platform are corrected, the information on weld surface is obtained. The 3D morphology of the pipeline weld surface is reconstructed by numerical calculation and point cloud processing. Aiming at the point cloud outliers, the filtering algorithm is improved by setting the height threshold and the outliers are reset according to the formulas (8) and (9). In order to facilitate the follow-up process, the circular seam is treated as a plane in the 3D reconstruction. After the base metal plane is fitted by the improved least squares algorithm, the weld edge is extracted by calculating the deviation and removing the contour in which weld width is greater than W and smaller than $W - 2v$ where W is ideal weld width and v is weld broadening. The central-line of weld is fitted according to the median value of the left and right weld toe coordinates. Then it is moved along the base metal plane to obtain the allowable boundary of the weld edge. Finally, the idealized model is established according to the width and reinforcement of seams to detect the weld forming quality and to identify the defects, such as excessive weld metals, undercut, lack of fusion (**Fig. 13**).

Results and Discussions The difficult problem of contour stitching can be solved in the reconstruction of the pipeline weld surface based on line structure light by correcting the position-posture of the platform and perfecting the detection process. The closer the fitting parameters of the left and right base metal surfaces of the pipeline are, the better the butt joint will be. Compared with that of the weld edge extraction from each contour, the distribution of weld toe extracted from the 3D reconstruction model is closer to the same plane and more accurate (**Fig. 12**). The closer the actual weld surface contour is to the ideal model, the better the weld forming quality will be (**Tables 1 and 2**). When the weld edge is located within the maximum and minimum boundaries and the actual height is lower than the minimum surface height of the idealized model, it is undercut. In the weld zone, the actual height is larger than the maximum surface height of the idealized model, means over reinforcement (**Fig. 14**). At the same time, it should be noted that after repeated filtering of the data, the abnormal points caused by small cracks and porosity or other defects on the weld surface are also removed, making them almost impossible to detect. Detection of weld defects according to the spatial threshold, such as crater, spatter, and overlap, should be further studied.

Conclusions Idealized model established based on the measured results of 3D reconstruction of pipeline weld surfaces can be used to make a general assessment of the weld surface forming quality and identify reinforcement, undercut, etc. Compared with that based on the contour of each frame, forming quality measured based on the reconstruction results performs better.

Key words laser technique; structured light; image processing; three-dimensional reconstruction; weld quality inspection

OCIS codes 140.3430; 100.3010; 120.6650; 150.3040