

基于多线结构光扫描点云的导管弯曲褶皱度测量方法

邹杭波^{1,2,3}, 夏仁波^{1,2*}, 曾元松⁴, 赵吉宾^{1,2**}, 陈月玲^{1,2}, 张涛^{1,2,3}, 张天宇^{1,2}, 付生鹏^{1,2}¹中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;²中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110169;³中国科学院大学, 北京 100049;⁴中国航空制造技术研究院, 北京 100049

摘要 导管弯曲内侧面的褶皱变形是一种加工缺陷, 它会降低导管承压能力, 影响设备运行安全。为了实现褶皱变形的精确测量, 提出了一种利用扫描点云的导管褶皱度测量方法。首先, 结合弯管的形态特征, 提出了一种切线圆弧切线模型方法以重建弯管脊线, 确定导管形态参数。然后, 借助各个表面点在各自脊线截面下的极角, 实现导管轮廓线的管理与提取。最后, 提出了一种轮廓线的展平方法, 避免导管自身的弯曲形态影响褶皱辨识。基于最大褶皱深度计算导管褶皱度, 使用典型导管样件进行脊线的重建验证, 优化后的脊线点误差均值接近于零, 均方根误差由优化前的 0.297~15.439 mm 降至优化后的 0.171~1.129 mm; 使用标准件进行褶皱度分析精度的验证, 褶皱度误差稳定在 0.011%。因此, 所提方法可以实现导管褶皱度的准确测量。

关键词 测量; 工业检测; 褶皱度; 点云处理; 脊线重建; 轮廓线提取; 弯曲变形

中图分类号 TH164

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220977

1 引言

航空导管由于其优秀的物理性能与化学特性^[1]而被广泛运用在航空航天设备中^[2]。鉴于航空导管需要在极端环境下持续工作, 严格保证航空导管的制造质量对确保航空器的运行安全具有重要意义。

航空导管是由直管通过弯曲加工获得的。在弯曲力矩的作用下, 导管内侧受压, 管壁由于失稳而产生褶皱变形^[3]。这既会导致导管的承压能力降低, 又会引发湍流, 造成振动。虽然已经有大量研究人员尝试了各种制造方法, 但依旧无法避免褶皱变形^[4-5]。

导管褶皱度是衡量导管弯曲加工后褶皱变形情况的关键指标, 它的关键几何量是褶皱深度。在一般情况下, 工人利用塞尺、检块等手动工具, 或者使用光学投影检量仪^[6]对褶皱进行测量。但是, 褶皱在导管上呈区域化连续分布, 上述方法一次测量只能获得一条褶皱的轮廓数据, 无法保证测量效率。此外, 导管为空间弯曲状态, 上述方法在测量过程中无法稳定可靠地捕捉轮廓特征, 导致无法保证测量结果的可靠性。

近年来, 计算机科学与三维成像技术飞速发展, 数字化三维测量方法^[7-8]也取得了长足的进步。线结构光测量系统^[9]作为智能制造与数字化测量方法的重要

组成部分, 已经在工业测量领域中有了广泛的应用。例如: 逆向工程^[10]、焊缝检测^[11-12]、轨迹规划^[13]等。它是一种将线激光主动投影至被测物体表面, 通过分析反射光的成像信息来获得物体表面轮廓空间信息的方法。这种技术不仅具有稳定、高效、无接触的特点, 还具有高可靠性, 适用于无纹理、非漫反射的物体表面。

线结构光测量系统还能用于轮廓变形检测。Yao 等^[14]为了保证镁合金管的成型质量, 直接使用一个轮廓仪获得截面轮廓, 用以分析截面扁平化情况。Wang 等^[15]为了提升叶片轮廓的检测精度, 设计了基于叶片自身特征的轮廓仪姿态调整方法, 避免了标定误差, 提升了截面轮廓的测量准确性。王乐等^[16]为了提高钢轨全断面轮廓的测量精度以准确评估钢轨的磨损量, 研究了钢轨两侧激光不共面的误差修正模型。

这些方法利用了目标物体存在线性主轴的特性。当线结构光所在的平面垂直于该主轴时, 获得的物体表面轮廓即为理想轮廓。然而, 褶皱变形主要的位置是在导管的弯曲段, 该部位不存在线性主轴, 无法直接使用轮廓仪获得正确的轮廓信息, 进而无法进行变形检测。因此, 需要先通过三维扫描获得弯曲段的整体形貌数据^[17-18], 再进行后续的检测分析^[19]。

为了获得正确的导管轮廓线, 需要先分析导管扫

收稿日期: 2022-06-17; 修回日期: 2022-07-25; 录用日期: 2022-08-01; 网络首发日期: 2022-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(52075532, 91948203)、辽宁省自然科学基金(2020-MS-030)、中国科学院青年创新促进会(2021199)

通信作者: *xiarb@sia.cn; **jbzhao@sia.cn

描点云,获得导管的位姿与形态参数^[20]。可以使用一个具有恒定半径的标准圆,沿经过其圆心的一条线,扫略得到导管的外表面数据^[21]。这条导管内的虚拟骨架线可以称为脊线。显然,脊线的形态在很大程度上决定了导管的形态。通过分析脊线的形态,可以确定导管的形态参数。利用生长方法有序生成组成导管脊线的各个脊线点,即可实现导管脊线的提取^[22-23]。

导管弯曲部位的扫描结果表现为三段式:直管段-弯曲段-直管段。针对该部位的脊线形态辨识,本文提出了一种切线圆弧切线(TCT)模型。它能够适应这三部分脊线的共面特性,并能够保证直管段脊线与弯曲段脊线在过渡时的G1平滑。

然后,讨论了轮廓线的两种提取方式:使用与脊线平面平行的平面剖切导管表面,获得轮廓线,或利用脊线截面下具有相同极角的表面点组成轮廓线。通过比

较这两种方式下褶皱位置轮廓线的变形情况,选择后者以避免褶皱轮廓的失真。

最后,为了避免导管自身弯曲形态对褶皱深度的计算产生影响,研究了导管轮廓线的展平方法。将展平后的轮廓线用于褶皱的辨识与褶皱深度的计算,将最大褶皱深度用于导管褶皱度的计算。

2 导管褶皱变形的检测方法

本文研究了基于导管扫描点云的褶皱变形检测方法,整体框架如图 1 所示。首先,利用导管表面点生成了导管的脊线点,并以此确定了导管的形态参数,完成了导管脊线的重建。然后,研究了表面点在脊线截面下的极角计算方法,提取了导管弯曲内侧的轮廓线。最后,对各条轮廓线进行展平处理与褶皱分析,确定了导管的褶皱度。

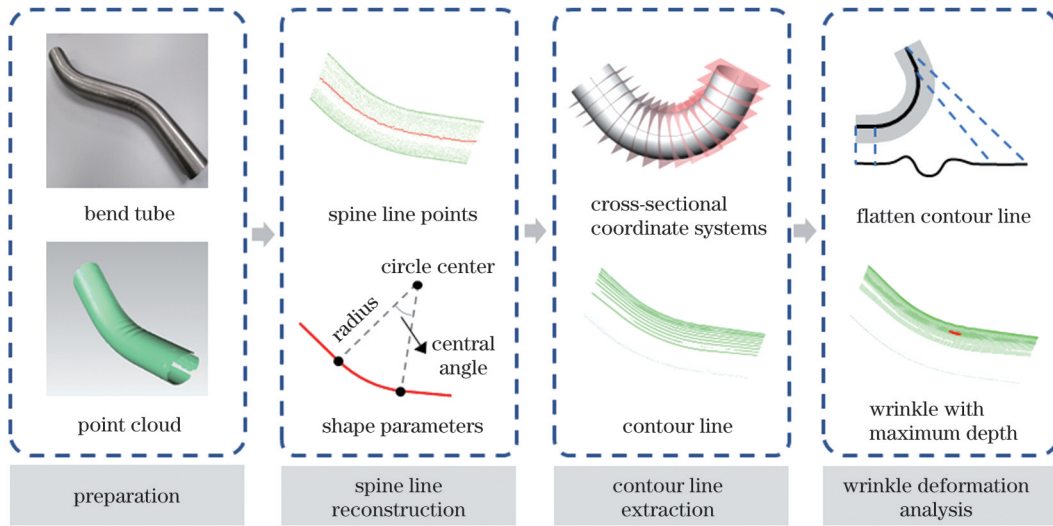


图 1 弯曲导管褶皱变形的检测框架

Fig. 1 Framework for detecting wrinkle deformation of bend tube

2.1 导管脊线重建

鉴于脊线能够很好地表示导管形态,因此可先通过重建脊线来提取导管的形态参数。导管形态参数主要包括弯曲半径、弯曲中心点、弯曲中心轴以及脊线各部分的端点。

受导管弯制工艺的限制,绝大部分导管上不同弯曲段的弯曲半径都相同。对于此类导管,弯曲变形最可能出现在弯曲角度最大的弯曲段上。因此,为了提高检测效率,对于具有相同弯曲半径的导管,只需检测弯曲角度最大的弯曲段即可。对于具有不同弯曲半径的导管或者需要检测每一个弯曲段的导管,只需依次检测需要检测的弯曲段即可。

导管弯曲段及其脊线可以分成三个部分。如图 2 所示,弯曲段中间的弯曲部分及对应的圆弧段脊线是核心部位。设圆弧段脊线的一个端点为第一过渡点 s_1 。与该点相连的直线型脊线为第一直线段,对应的直管为第一直管段。该直线段的另一端点为脊线起始

点 s_s 。与圆弧段脊线另一个端点对应的部分可分别称为第二过渡点 s_2 、第二直线段、第二直管段、脊线结束点 s_e 。

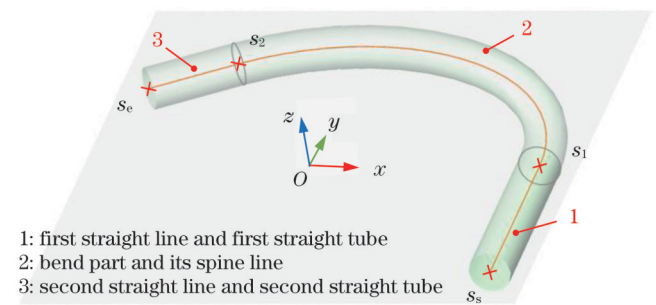


图 2 脊线形态介绍

Fig. 2 Shape introduction of spine line

2.1.1 导管脊线点生成

利用导管脊线连续且一阶可微的特性生成导管脊线点。先找到脊线上任意一点以及该点对应的脊线切

向。然后,以脊线切向作为生长方向,不断向前生成新的脊线点与新的生长方向,直至生长停止。该方法可以快速获得间隔均匀的有序化的导管脊线点。

2.1.2 脊线形态参数辨识

为了辨识导管脊线的形态参数,本文提出了一种切线圆弧切线模型。它能够适应导管脊线的三个特性:1) 所有脊线点共面;2) 圆弧段有且仅有一个,且在两个直线段中间;3) 两侧直线段为圆弧段两个端点的切线,圆弧段两侧端点处是G1平滑。

如图3所示,在二维脊线平面内,使用 X 定义圆弧段形状:

$$X = [x_c, y_c, R_c, \beta_1, \beta_2], \quad (1)$$

式中: x_c 和 y_c 为圆心 C 的坐标; R_c 为圆弧半径; β_1 与 β_2 分别为圆弧段端点 s_1 与 s_2 相对圆心 C 的方位角。

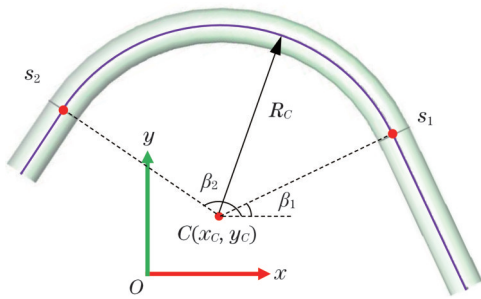


图3 脊线平面内的TCT模型
Fig. 3 TCT model in spine line plane

圆弧段两侧端点与其切线随之确定。两侧端点 s_1 与 s_2 可表示为

$$\begin{cases} s_1 = [x_c, y_c] + R_c \cdot [\cos \beta_1, \sin \beta_1] \\ s_2 = [x_c, y_c] + R_c \cdot [\cos \beta_2, \sin \beta_2] \end{cases}, \quad (2)$$

式中: s_1 和 s_2 分别为 s_1 和 s_2 的点向量。

2.1.2.1 预处理

导管脊线点是空间三维点。为了简化TCT模型的辨识过程,将三维脊线点转为二维脊线点。

利用所有脊线点共面的特性,对脊线点进行平面拟合以获得脊线平面。然后,将脊线点投影到脊线平面上。将所有投影点用于后续形态分析。它能保证分析得到的直管段脊线与弯曲段脊线共面。此外,它还能最大化保证弯曲中心轴方向的正确性。

建立脊线参考坐标系 T ,以将三维脊线点转为二维脊线点。使用随机采样一致性方法对脊线点进行3D圆弧拟合,获得弯曲半径 R 、圆弧中心点 C 以及组成圆弧的脊线点。利用有序脊线点的序号,可以直接提取圆弧段脊线的两个端点 s_1 与 s_2 。

如图2所示,圆弧中心点 C 为脊线参考坐标系 T 的原点,射线 Os_1 为坐标系 x 轴。 z 轴方向可由 Os_1 与 Os_2 叉乘确定, y 轴方向可由 z 轴与 x 轴叉乘确定。

脊线在参考坐标系 T 的 xOy 平面内。各个脊线点 p 的二维坐标 (x, y) 满足

$$\begin{cases} x = (p - O) \cdot v_x \\ y = (p - O) \cdot v_y \end{cases}, \quad (3)$$

式中: p 为 p 的点向量; O 为 O 的点向量; v_x 和 v_y 分别为脊线参考坐标系的 x 轴与 y 轴的单位向量。

2.1.2.2 参数优化

采用非线性最小二乘法优化TCT模型的5个参数。参考坐标系 T 建立时的相关参数作为TCT模型的初始值。此时,脊线参考坐标系 T 的原点即为圆心 C ,端点 s_1 在 x 轴上。TCT模型的初始值 X_0 为

$$X_0 = \left[0, 0, R, 0, \frac{l_1 \cdot l_2}{\|l_1\| \cdot \|l_2\|} \right], \quad (4)$$

式中: l_1 为 O 指向 s_1 的方向向量(未归一化); l_2 为 O 指向 s_2 的方向向量(未归一化)。

各个脊线点到其对应模型的距离即为该点的代价。当脊线点在脊线内侧时,代价为负;当脊线点在脊线外侧时,代价为正。对于每个脊线点,先计算该点相对圆心 C 的方位角 β ,判断该脊线点属于导管脊线的哪个部位,再计算该点的代价 e 。

若 $\beta \leq \beta_1$,该点属于第一直线段。该点的代价 e 可表示为

$$\begin{cases} e = -l_3 \cdot [\cos \beta_1, \sin \beta_1] \\ l_3 = p - s_1 \end{cases}. \quad (5)$$

若 $\beta_1 < \beta \leq \beta_2$,该点属于圆弧段。该点的代价 e 可表示为

$$e = \|p - [x_c, y_c]\| - R_c. \quad (6)$$

若 $\beta_2 < \beta$,该点属于第二直线段。该点的代价 e 可表示为

$$\begin{cases} e = -l_4 \cdot [\cos \beta_2, \sin \beta_2] \\ l_4 = p - s_2 \end{cases}. \quad (7)$$

综上所述,为了使所有脊线点的整体偏离最小,TCT模型的目标函数设定如下:

$$\begin{cases} L = \sum_{i=1}^n e_i^2 \\ \text{s. t. } \beta_1 > \beta_{\min} \\ \beta_2 < \beta_{\max} \\ \beta_1 < \beta_2 \\ R_c > 0 \end{cases}, \quad (8)$$

式中: L 为目标函数; e_i 为脊线点 i 的代价; n 为脊线点数量; β_{\min} 和 β_{\max} 分别为脊线点相对圆心 C 的最小和最大方位角。

使用优化后的脊线形态参数,重新定义脊线参考坐标系 T ,此时有 $\beta_1 = 0$ 。

2.2 导管轮廓线的提取

弯管轮廓线的提取有以下两种方式。

第一种方法如图4所示,使用与脊线平面平行的

面对表面点进行剖切以获得轮廓线。然而,这种方式相当于对褶皱进行斜剖,容易造成褶皱深度计算失真。

轮廓线平面离脊线平面越远,导管自身曲率变化造成的影响越大,计算的褶皱深度越失真。

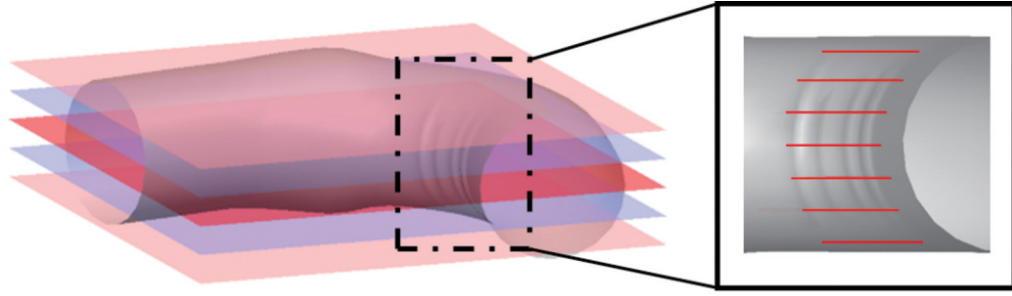


图 4 利用平行面提取的轮廓线
Fig. 4 Contour lines extracted by parallel planes

第二种方法如图 5 所示,使用具有相同截面极角的表面点组成轮廓线。在各脊线截面下,相同极角对应的射线形成了曲面。该曲面与导管表面相交,即可得到轮廓线。轮廓线的褶皱变形情况可以用各表面点极径的变化来描述。这种方法相当于对褶皱进行正剖。无论轮廓线在哪里,计算获得的褶皱深度都能够正确地反映对应表面的真实褶皱变形。

与脊线的交点。

极轴:在脊线截面内,由极点引出的一条指向弯曲内侧的射线。它的方向表示脊线平面法向量与脊线截面法向量的叉乘方向。

在建立极坐标系时,先计算表面点在脊线参考坐标系 xOy 平面内的方位角 β 。通过 β 判断表面点属于弯管哪个部位,再进行后续计算。

若 $\beta < 0$,如图 6(a)所示,表面点在第一直管段。该点所在截面极坐标系的极点 p_s 与极轴 v_s 可表示为

$$\begin{cases} p_s = s_1 + (p - s_1) \cdot v_1 \cdot v_1 \\ v_1 = v_y \\ v_s = -v_x \end{cases}, \quad (9)$$

式中: p_s 为 p_s 的点向量; v_1 为直管段 1 轴向的单位向量,它也是截面的法向量。

若 $0 \leq \beta < \beta_2$,如图 6(b)所示,表面点在弯曲段。该点所在截面极坐标系的极点 p_s 与极轴 v_s 可表示为

$$\begin{cases} p_s = O + R \cdot v_s \\ v_s = -(v_x \cos \beta + v_y \sin \beta)^\circ \end{cases} \quad (10)$$

若 $\beta_2 \leq \beta$,如图 6(c)所示,表面点在第二直管段。该点所在截面极坐标系的极点 p_s 与极轴 v_s 可表示为

$$\begin{cases} p_s = s_2 + (p - s_2) \cdot v_2 \cdot v_2 \\ v_2 = \frac{v_s \times v_z}{\|v_s \times v_z\|} \\ v_s = -(v_x \cos \beta_2 + v_y \sin \beta_2) \end{cases}, \quad (11)$$

式中: v_z 表示脊线参考坐标系的 z 轴单位向量; v_2 表示直管段 2 的轴向单位向量,它也是截面的法向量。

2.2.2 极角与极径

对于任意一个导管表面点,极径 ρ 为该表面点到对应极点的距离:

$$\rho = \|p - p_s\|. \quad (12)$$

一般情况下,极径大小应当为导管截面半径,仅在表面变形处有变化。

极角 θ 为表面点到极点的连线与极轴 v_s 的夹角,

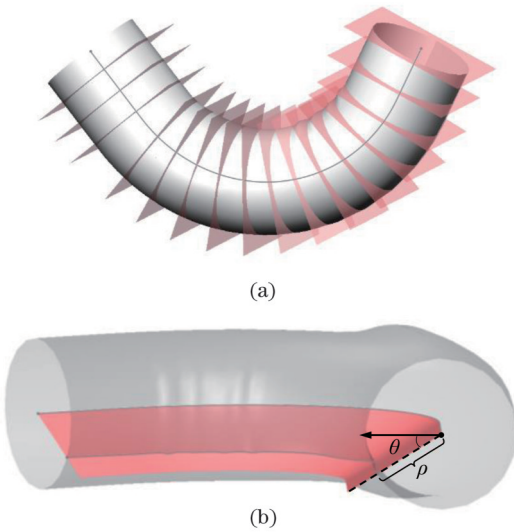


图 5 利用脊线截面极角提取轮廓线。(a)脊线截面;(b)相同极角对应的射线组成的曲面
Fig. 5 Contour lines extracted by polar angles of ridge sections. (a) Ridge sections; (b) surface composed of rays corresponding to same polar angle

因此,选择第二种方法提取导管表面轮廓线。具体地,先对每个表面点建立对应的脊线截面极坐标系,然后再计算该点的截面极角(θ)与极径(ρ)。各个截面内具有相同径向的表面点组成相应的轮廓线。

2.2.1 脊线截面极坐标系

对于任意一个表面点,都需要在经过该点的脊线截面上建立极坐标系。无论表面点在直管段还是在弯曲段,均使用以下方法定义脊线截面内的极点与极轴。

极点:表面点在脊线上的投影点,它也是脊线截面

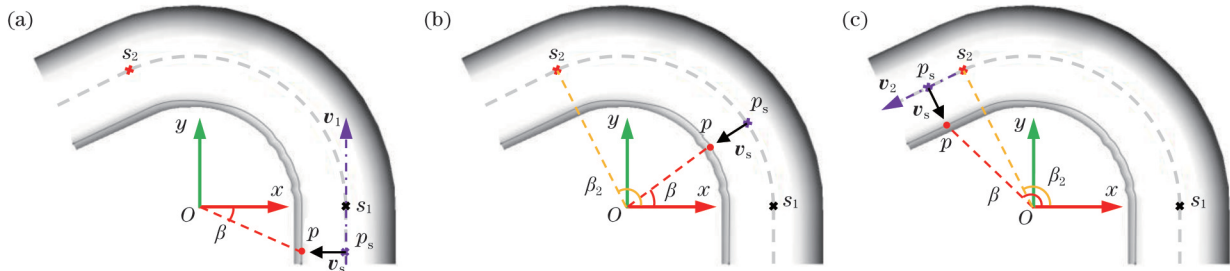


图 6 不同部位截面极坐标系的建立方法。(a)第一直管段;(b)弯曲段;(c)第二直管段

Fig. 6 Method of establishing polar coordinate systems on sections at different parts of bend tube. (a) First straight tube; (b) bend part; (c) second straight tube

以顺时针方向为正,取值范围为 $-180^\circ \leq \theta < 180^\circ$ 。

2.2.3 轮廓线生成

由于褶皱产生在弯曲内侧面,因此还需要辨别获得的轮廓线是否在导管弯曲内侧面。如图 7 所示,当 $-90^\circ < \theta < 90^\circ$ 时,对应的轮廓线将用于褶皱变形检测。对于第 k 条轮廓线,组成该条轮廓线的表面点集 Ψ_k 为

$$\Psi_k = \left\{ p \mid \theta \in \left[\theta_k - \frac{\Delta\theta}{4}, \theta_k + \frac{\Delta\theta}{4} \right], \theta_k = -90 + k \cdot \Delta\theta \right\}, \quad (13)$$

式中: θ_k 表示该条轮廓线对应的极角; $\Delta\theta$ 表示不同轮廓线之间的极角差。

2.3 褶皱变形分析

导管自身形态弯曲,直接获得的轮廓线将受这种弯曲形态的影响。在分析导管表面褶皱变形时,为了避免轮廓线弯曲对波峰波谷的识别造成影响,应当对



图 7 弯曲内侧面轮廓线的生成示意图

Fig. 7 Diagram of generating contour lines on inner side of bend
轮廓线进行展平处理。

2.3.1 轮廓线展平

如图 8 所示,建立轮廓线展平坐标系 uov 。对于轮廓线上某点,其极径为 v ,其沿理想轮廓线运动到第一过渡点所在截面的轨迹长度为 $|u|$ 。此外,设定第一直管段上表面点的 u 为负值,其他部位上表面点的 u 为正值。此时,轮廓线上任意一个点都有唯一的 u 。

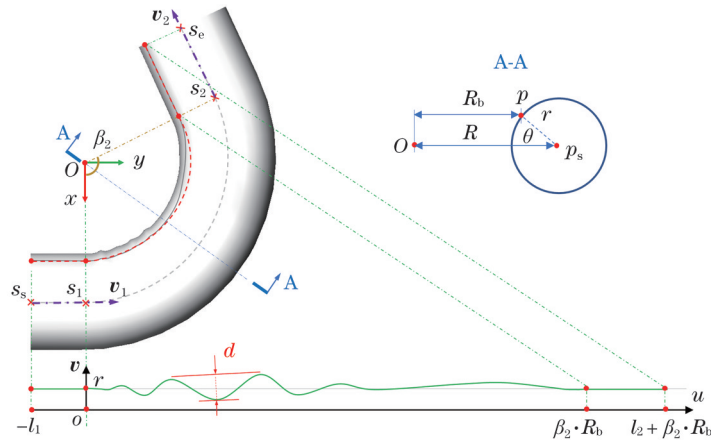


图 8 轮廓线展平示意图

Fig. 8 Diagram of flattening contour lines

在计算表面点的 u 值时,先根据该点的方位角 β 确定其属于导管的哪个部位,再进行计算。

若 $\beta < 0$,表面点在第一直管段。该点的坐标值 u 为

$$u = -\left| (p - s_1) \cdot v_1 \right|. \quad (14)$$

若 $0 \leq \beta < \beta_2$,表面点在弯曲段。该点的坐标值 u 可为

$$\begin{cases} u = \beta \cdot R_b \\ R_b = R - r \cos \theta \end{cases}, \quad (15)$$

式中: R_b 为该条轮廓线对应的弯曲半径; r 为导管的截面半径。

若 $\beta_2 \leq \beta$,表面点在第二直管段。该点的坐标值 u 为

$$u = \beta_2 R_b + \left| (p - s_2) \cdot v_2 \right|. \quad (16)$$

2.3.2 导管褶皱度

查找各条轮廓线中的各个褶皱,并确定每个褶皱的波谷点与两个波峰点。以波谷点到峰峰连线的距离 d 作为褶皱深度。

导管褶皱度 w 由导管上的最大褶皱深度 d_{max} 计算获得:

$$w = \frac{d_{max}}{2r} \times 100\% \quad (17)$$

3 实验与分析

利用实际导管的扫描点云与标准件的扫描点云共同验证本文所提算法的有效性。

3.1 实验设备

本文所使用的 3D 扫描系统如图 9 所示。导管由机器人夹持,并在扫描时保持静止。4 个轮廓仪均布在直径为 760 mm 的圆周上,可由光栅尺触发工作。通过电机驱动滑台进行直线运动,即可实现环形空间内物体的全轮廓快速扫描。该系统的外参已被精确标定^[17]。

该系统选用的轮廓仪为自研设备,测量精度为 0.02 mm。每条轮廓上的横向点间距为 0.1 mm。轮廓仪的触发间距也被设定为 0.1 mm。该系统可为导管褶皱度测量提供足够致密的扫描点云。

3.2 脊线重建验证

为了验证本文算法的鲁棒性,挑选了两根典型弯管(导管 A'和导管 B')。如图 10 所示,它们在扫描时有不同的位姿与形态。表 1 总结了这两根导管目标弯曲段的基本信息。

对上述两根导管调整 5 次位姿,并依次进行扫描分析以保证实验结果的可重复性。本文所提方法均可

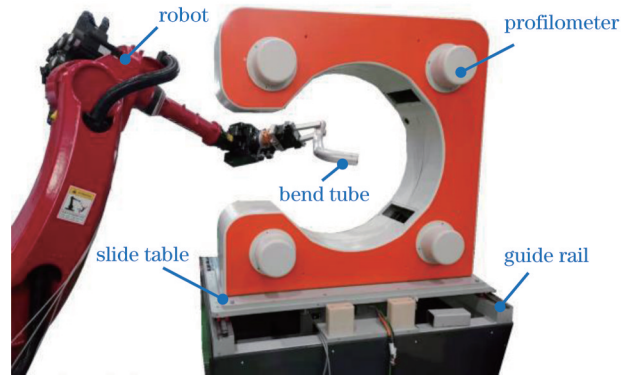


图 9 三维扫描系统

Fig. 9 3D scanning system

表 1 目标弯曲段的形态参数

Table 1 Shape parameters of target bend part

Parameter	Tube A'	Tube B'
Radius /mm	26	7.5
Bend radius /mm	65	47
Bend angle /($^{\circ}$)	90	70
Number of scan points / 10^6	2.18	0.74

完成导管脊线的重建。弯曲半径与弯曲角度的优化结果如图 11 所示。对于弯曲半径,两根导管的平均误差分别由优化前的 0.908 mm 和 0.445 mm 降至优化后的 -0.042 mm 和 -0.073 mm,均方根误差分别由优化前的 1.140 mm 和 0.455 mm 降至优化后的 0.521 mm 和 0.162 mm。对于弯曲角度,两根导管的平均误差分别由优化前的 31.334 $^{\circ}$ 和 0.777 $^{\circ}$ 降至优化后的 0.195 $^{\circ}$ 和 -0.114 $^{\circ}$,均方根误差分别由优化前的 31.356 $^{\circ}$ 和 0.932 $^{\circ}$ 降至优化后的 0.601 $^{\circ}$ 和 0.233 $^{\circ}$ 。

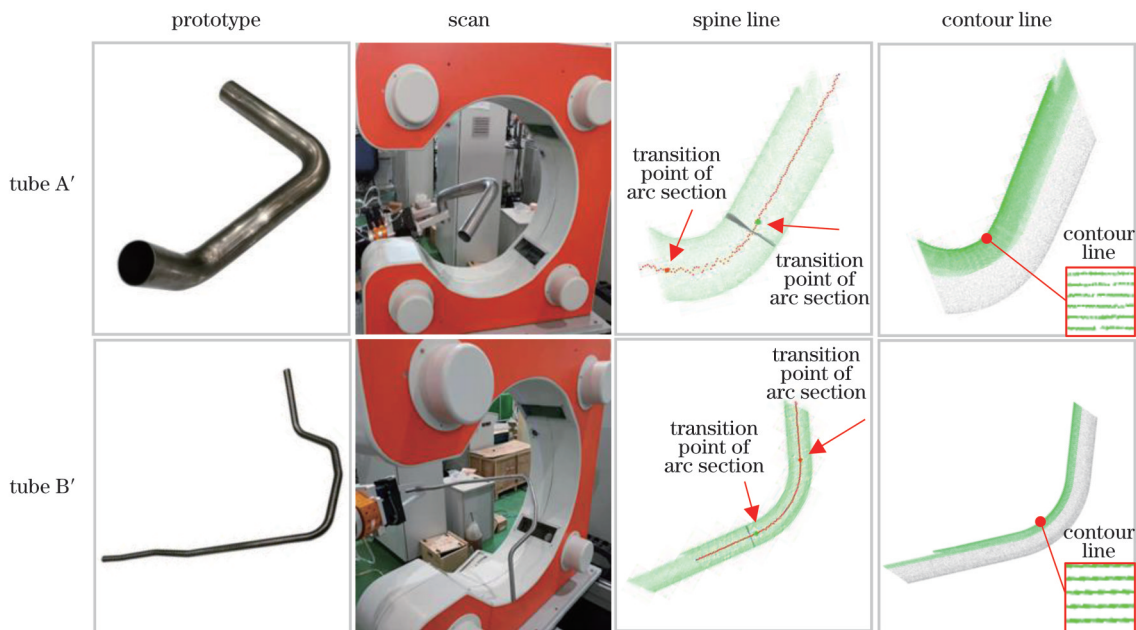


图 10 导管及其轮廓线

Fig. 10 Bend tubes and their contour lines

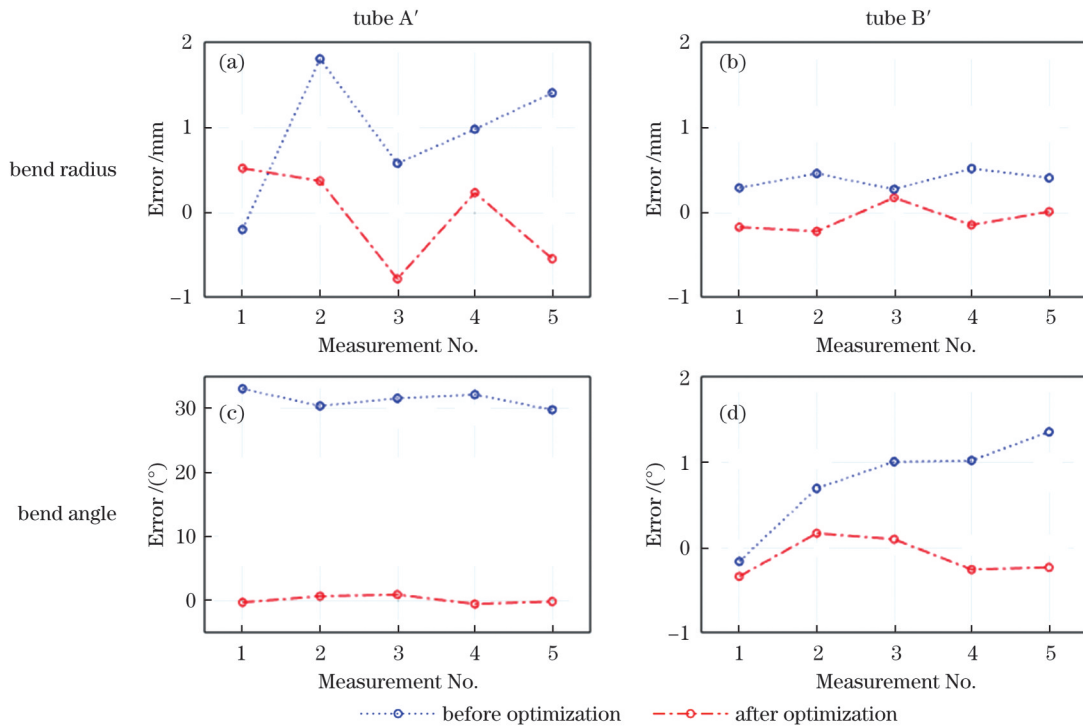


图 11 脊线重建误差分析

Fig. 11 Error analysis of spine line reconstruction

对于导管 A', TCT 模型优化后的弯曲角度较优化前出现大幅变动。图 12 为导管 A' 的重建结果。优化前, 圆弧右侧切线段被纳入圆弧段, 左侧切线段方向产生明

显偏差。优化后, 右侧切线段被正确识别, 左侧切线段可正确反映脊线点的分布情况。脊线点误差均值在优化后约为 -5.639×10^{-8} mm, 均方根误差约为 1.129 mm。

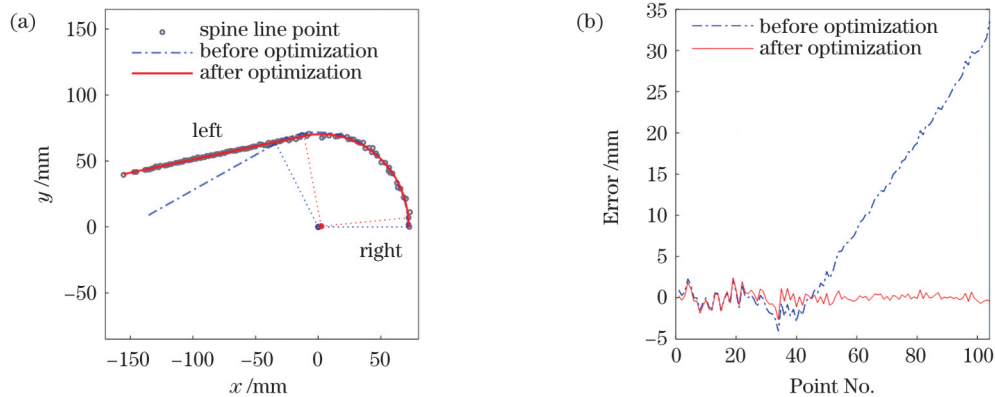


图 12 导管 A' 的重建结果。(a) TCT 模型匹配结果; (b) 脊线点误差

Fig. 12 Reconstruction results of tube A'. (a) Matching result of TCT model; (b) error of spine line point

对于导管 B', 虽然弯曲半径与弯曲角度在优化前、后的差异不大, 但这个变化对脊线形态重建已产生较大的影响。如图 13 所示, 优化前, 圆弧两侧切线段的脊线点与其模型的匹配度较差, 对应的脊线点误差呈线性变化。优化后, 脊线点与模型的匹配度明显提高, 重合较好, 各部分的脊线点的误差保持稳定。脊线点误差均值由优化前的 -0.026 mm 减至优化后的 -1.227×10^{-10} mm, 均方根误差由优化前的 0.297 mm 减至优化后的 0.171 mm。

出现上述现象的主要原因是 TCT 模型参数的获取方法不同。在优化前, TCT 模型初始参数是基于随

机采样一致性方法辨识的圆弧参数获得的。随机采样一致性方法筛选出了所有满足误差约束条件的脊线点并用其组成圆弧段。这会造成圆弧段两侧真实端部外的脊线点的误识别, 还会导致 TCT 模型的两个切线偏离实际直线段脊线。

在两个脊线点误差图中, 均存在中间部分的误差波动较大的现象。该部分脊线点对应的是导管弯曲段, 它们的生成质量相较直管段差, 因此误差波动较大。

此外, 导管 A' 的形态辨识误差比导管 B' 较大。这是因为导管 A' 截面比导管 B' 更大, 扫描点数由 74 万提升到了 218 万。为了提高脊线点生成速度, 对导管 A'

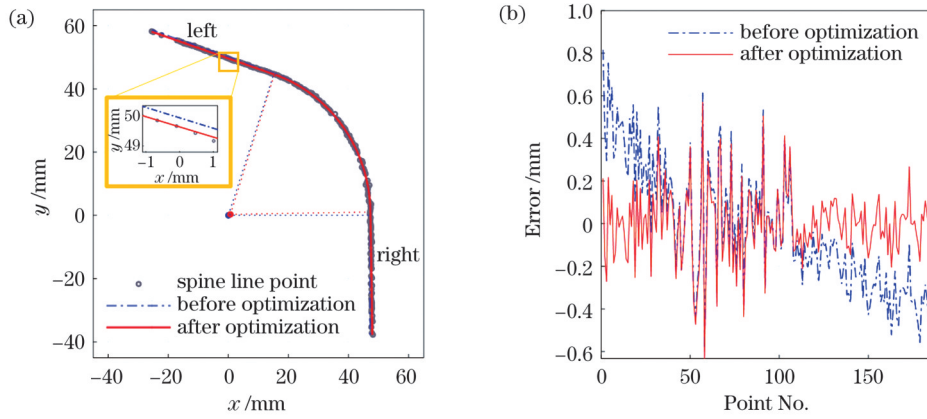


图 13 导管 B' 的重建结果。(a)TCT 模型匹配结果;(b)脊线点误差

Fig. 13 Reconstruction results of tube B'. (a) Matching result of TCT model; (b) error of spine line point

进行了较大尺度的降采样。由此造成导管 A' 的脊线点生成精度比导管 B' 差,最终它的辨识误差较大。

整体上,优化后的 TCT 模型已能较好反映脊线真实形态。

值得指出的是,导管褶皱变形分析对空间轮廓线的提取精度的要求并不严格,轻微的脊线重建误差几乎不会引起轮廓变形。因此,目前的导管形态分析精

度能够满足轮廓变形分析要求。

3.3 导管褶皱检测

如图 14 所示,一根明显褶皱变形的弯管被用来验证检测算法的有效性。利用本文方法成功提取了导管弯曲内侧的各条轮廓线,并定位了各个褶皱的波峰波谷,计算出了对应的褶皱深度。该导管的褶皱深度为 0.655 mm,褶皱度为 1.638%。

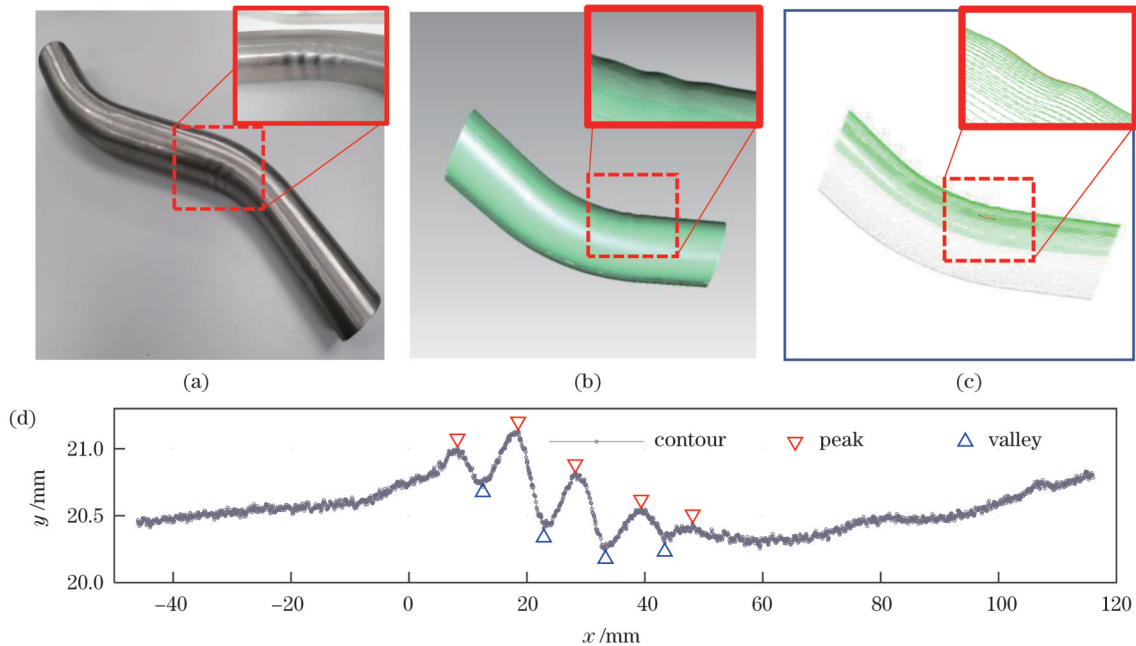


图 14 带有明显褶皱的导管。(a)导管实物图;(b)导管扫描结果;(c)褶皱变形的检测结果;(d)展平后的最大褶皱所对应的轮廓线
Fig. 14 Bend tube with obvious wrinkles. (a) Physical diagram of bend tube; (b) scanning result of tube; (c) detection result of wrinkle deformation; (d) contour line corresponding to largest wrinkle deformation after flattening

3.4 标准件验证

由于标准褶皱呈空间曲面形状,既难以在弯管上加工制备,又难以准确计量,因此,无法直接使用带有标准褶皱的弯管验证褶皱度分析精度。为了实现褶皱变形分析精度的验证,在标准直径为 62 mm 的圆柱上加工了 4 个同轴的空间环形槽(W1, W2, W3, W4),如图 15 所示。该标准管是由圆管车削加工获得,由此可保证 4 个环形槽与圆管的同轴性,以及每个环形槽在

不同位置的槽深一致。加工生成的表面均已使用三坐标测量机进行测量,并获得了对应的形貌数据。

将该标准件假设为导管的第一直管段,以保证它的轮廓线提取过程与导管轮廓线的提取过程一致。在获得脊线点后,通过假定弯曲中心、弯曲中心轴以及第一过渡点,即可获得轮廓线数据,并进行褶皱辨识。某一条轮廓的褶皱辨识结果如图 16 所示。

对标准件重复扫描分析 25 次,最终的褶皱度统

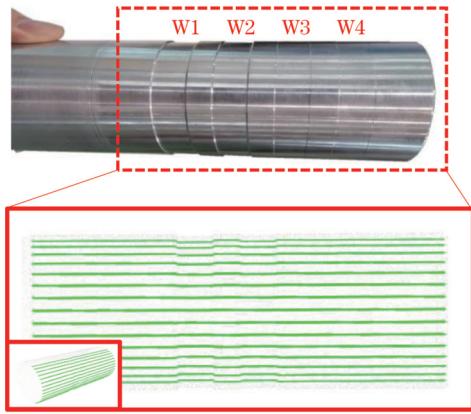


图 15 标准件及其轮廓线

Fig. 15 Standard part and its contour lines

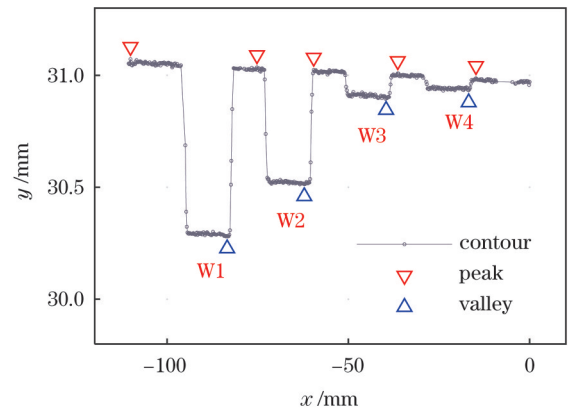


图 16 标准件轮廓线的分析结果

Fig. 16 Contour line analysis result of standard part

计结果如表 2 所示。本文方法能够稳定识别各个褶皱,各部分褶皱深度的误差稳定在 0.007 mm 左右,

标准差均值约为 0.004 mm,褶皱度误差均值约为 0.011%。

表 2 标准件的分析结果

Table 2 Analysis results of standard part

Space annular groove	Wrinkle depth /mm				Wrinkle degree /%		
	Nominal value	Measured value	Error	Standard deviation	Nominal value	Measured value	Error
W1	0.751	0.756	0.006	0.005	1.211	1.220	0.009
W2	0.500	0.507	0.007	0.005	0.807	0.818	0.011
W3	0.101	0.108	0.007	0.004	0.163	0.174	0.011
W4	0.049	0.057	0.008	0.002	0.079	0.092	0.012
Average	—	—	0.007	0.004	—	—	0.011

3.5 小 结

由于标准褶皱弯管的制备与计量方法的局限性,本文将实验验证拆分成了三部分。首先,使用典型标准弯管验证了形态参数辨识算法,由此保证轮廓线的提取精度。然后,使用带有褶皱的弯管验证了褶皱识别算法在轮廓线上正确识别褶皱波峰波谷的能力。最后,使用带有不同深度环形槽的标准件验证了本文扫描设备对不同深度褶皱的生成能力以及褶皱识别算法对不同深度褶皱的分辨力。

通过以上三部分实验,共同验证了轮廓线的生成精度与褶皱的辨识能力,确保了本文算法检测分析弯管褶皱度的可靠性。

4 结 论

为了快速高效地分析导管弯曲内侧面的褶皱变形,研究了基于导管扫描点云的数值化分析方法,并利用多根典型导管与褶皱标准件验证了所提方法的有效性。

针对导管脊线的重建,提出了一种切线圆弧切线模型以提取脊线形态参数。优化后,脊线点的误差均值接近于零,均方根误差由优化前的 0.297~15.439 mm 降至优化后的 0.171~1.129 mm。

提出了褶皱分析所需的轮廓线的提取方法,以表

面点在对应脊线截面下的极角为参数,实现了轮廓线的管理与提取,并且避免了褶皱轮廓的失真。

对于各条轮廓线,结合它们的径向方位,计算了相应的弯曲半径,以实现轮廓线的展平,避免褶皱分析被导管自身形态干扰。

利用典型弯管与标准件共同验证了所提方法的有效性与可靠性。实验结果表明,所提方法可以有效辨识不同深度的褶皱,褶皱度误差稳定在 0.011%。

参 考 文 献

- [1] Ahmetoglu M, Altan T. Tube hydroforming: state-of-the-art and future trends[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 98(1): 25-33.
- [2] Boyer R R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry[J]. Materials Science and Engineering: A, 1996, 213(1/2): 103-114.
- [3] Yang H, Li H, Zhang Z Y, et al. Advances and trends on tube bending forming technologies[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(1): 1-12.
- [4] Elyasi M, Paluch M, Hosseinzadeh M. Predicting the bending limit of AA8112 tubes using necking criterion in manufacturing of bent tubes[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(9): 3307-3318.
- [5] Jiang L F, Zhang S Y, Wang Y Q, et al. Research on bending forming method of large diameter-thickness ratio thin-walled tubes for aerospace[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102(9): 3037-3049.

- [6] Keyence. Optical Comparators[EB/OL]. [2022-02-03]. <https://www.keyence.com.cn/products/measure-sys/image-measure/lm/>.
- [7] Tao L M, Xia R B, Zhao J B, et al. A convenient and high-accuracy multicamera calibration method based on imperfect spherical objects[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 5016715.
- [8] Zhao H J, Liu C H, Jiang H Z, et al. Multisensor registration using phase matching for large-scale fringe projection profilometry [J]. Measurement, 2021, 182: 109675.
- [9] Xu X B, Fei Z W, Yang J, et al. Line structured light calibration method and centerline extraction: a review[J]. Results in Physics, 2020, 19: 103637.
- [10] Geng Z H, Bidanda B. Review of reverse engineering systems - current state of the art[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2017, 12(2): 161-172.
- [11] 余佳杰, 周建平, 薛瑞雷, 等. 基于结构光视觉和光照模型的焊缝表面质量检测[J]. 中国激光, 2022, 49(16): 1602019.
Yu J J, Zhou J P, Xue R L, et al. Weld surface quality detection based on structured light and illumination model[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(16): 1602019.
- [12] 张世宽, 吴清潇, 林智远. 焊缝图像中结构光条纹的检测与分割[J]. 光学学报, 2021, 41(5): 0515002.
Zhang S K, Wu Q X, Lin Z Y. Detection and segmentation of structured light stripe in weld image[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(5): 0515002.
- [13] Feng H J, Ren X K, Li L F, et al. A novel feature-guided trajectory generation method based on point cloud for robotic grinding of freeform welds[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 115(5): 1763-1781.
- [14] Yao Z B, Wang R J, Zhi J N, et al. Robust locally weighted regression for profile measurement of magnesium alloy tube in hot bending process[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020: 7952649.
- [15] Wang Z P, Yin M, Ou D Y, et al. Optical measurement method for blade profiles based on blade self-features[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(2): 2067-2076.
- [16] 王乐, 王昊, 王凡, 等. 轮廓测量系统激光不共面误差修正方法[J]. 中国激光, 2022, 49(6): 0604002.
Wang L, Wang H, Wang F, et al. Correction method for laser noncoplanar error for rail profile measurement system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(6): 0604002.
- [17] Zou H B, Xia R B, Zhao J B, et al. An external calibration method for the circular scanning device used for bend tube intelligent inspection[C]//2021 3rd International Symposium on Robotics & Intelligent Manufacturing Technology (ISRIMT), September 24-26, 2021, Changzhou, China. New York: IEEE Press, 2021: 299-303.
- [18] 庄金雷, 李瑞峰, 曹雒清, 等. 3 维细长管路测量系统扫描路径自主规划[J]. 机器人, 2019, 41(5): 628-636.
Zhuang J L, Li R F, Cao C Q, et al. Autonomous scan path planning of measurement system for 3D long and thin tube[J]. Robot, 2019, 41(5): 628-636.
- [19] 林冬云, 卢嘉祺, 李纯明, 等. 基于空间点云三维曲面重建的距离测量[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(14): 1415018.
Lin D Y, Lu J Q, Li C M, et al. Distance measurement based on three-dimensional surface reconstruction of spatial point cloud[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(14): 1415018.
- [20] 韩家杰, 周建平, 薛瑞雷, 等. 线结构光管道焊缝表面形貌重建与质量评估[J]. 中国激光, 2021, 48(14): 1402010.
Han J J, Zhou J P, Xue R L, et al. Surface morphology reconstruction and quality evaluation of pipeline weld based on line structured light[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 1402010.
- [21] Tagliasacchi A, Delame T, Spagnuolo M, et al. 3D skeletons: a state-of-the-art report[J]. Computer Graphics Forum, 2016, 35(2): 573-597.
- [22] Jayadevan V, Delp E, Pizlo Z. Skeleton extraction from 3D point clouds by decomposing the object into parts[EB/OL]. (2019-12-26) [2022-02-04]. <https://arxiv.org/abs/1912.11932>.
- [23] Kerautret B, Krähenbühl A, Debled-Rennesson I, et al. 3D geometric analysis of tubular objects based on surface normal accumulation[M]//Murino V, Puppo E. Image analysis and processing: ICIAP 2015. Lecture notes in computer science. Cham: Springer, 2015, 9279: 319-331.

Wrinkle Degree Measurement Method for Bend Tube Based on Multi-Line Structured Light Scanning Point Cloud

Zou Hangbo^{1,2,3}, Xia Renbo^{1,2*}, Zeng Yuansong⁴, Zhao Jibin^{1,2**}, Chen Yueling^{1,2}, Zhang Tao^{1,2,3}, Zhang Tianyu^{1,2}, Fu Shengpeng^{1,2}

¹State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China;

²Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, Liaoning, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100049, China

Abstract

Objective Aviation tubes have been widely used in various systems of aerospace equipment owing to their excellent physical and chemical properties. It is important to ensure the manufacturing quality of aviation tubes for the safety of aircraft. Aviation tubes are manufactured by bending straight tubes. Under the action of the bending moment, the inner side of the tube is wrinkled and deformed owing to compressive instability. Although numerous researchers have investigated various manufacturing methods in the past few decades, wrinkle deformation is still unavoidable. The wrinkle degree of the tube is a key indicator of tube deformation, with the key geometric parameter being the wrinkle depth. Conventional manual inspection methods cannot guarantee the measurement efficiency and reliability of measurement results. Using a digital 3D measurement method can effectively avoid these shortcomings. Such methods quickly capture the surface shape data of the target object and have been widely used in welding seam detection and contour deformation detection.

Methods The wrinkle degree can be measured using the scanning point cloud of the bent tube. First, combined with the shape characteristics of the bent tube, a tangent-arc-tangent model method is proposed to reconstruct the spine line of the tube and determine its shape parameters. It assumes that the spine line of the bent part is an arc, and the spine lines of the two straight tubes on both sides are the tangent lines of the end points on both sides of the arc. Thus, it ensures G1 smoothness between the straight and bent spine lines. By using the nonlinear least square method to optimize the distance between each spine line point and the corresponding spine line, the parameters of the spine line model are calculated. Subsequently, the contour lines are managed using the pole angle of each surface point under the respective spine line cross-section. Using this method, the contour line of the inner side of the bend can be quickly extracted, and distortion of the contour line in the wrinkle area can be avoided. Finally, a flattening method of the contour line is proposed. The wrinkle identification is not affected by the bent shape of the tube because of the flattened contour, so the peak and valley of each wrinkle can be correctly identified. The maximum wrinkle depth on the tube surface is then used to calculate the wrinkle degree.

Results and Discussions Spine line reconstruction validation is performed by using two typical bent tubes with radii of 7.5 mm and 26 mm. For all five scans, the spine lines are successfully reconstructed and the contour lines are successfully extracted (Fig. 10). The model parameters before optimization are different from the actual parameters (Figs. 11–12). There is a systematic deviation in the error of the spine line points. This is because there may be large deviations in the direction of the straight spine line. After optimization, the average error of the bending radius is $-0.073-0.042$ mm, and the average error of the bending angle is $-0.114-0.195^\circ$. The average error of the spine line point is close to zero, and the root mean square error is reduced from 0.297–15.439 mm to 0.171–1.129 mm. The optimized spine line shape parameters reflect the real shape of the spine line well. The spine line error remains stable. The maximum depth of wrinkles can be accurately identified on the bent tube with obvious wrinkles (Fig. 14). Further, the accuracy of the wrinkle analysis is verified using the standard part (Fig. 15). The depth errors of different wrinkles are stable at 0.007 mm, and the wrinkle degree errors are stable at 0.011%. Therefore, the method proposed in this study can stably and reliably analyze wrinkle deformation of the bent tube.

Conclusions To measure the wrinkle degree of bent tubes quickly and efficiently, a numerical analysis method based on the scanning point cloud of bent tubes is proposed. The effectiveness of the proposed method is verified using several typical tubes and a standard part. The experimental results show that the method proposed in this study can effectively identify the shape parameters of the bent tube and extract the contour lines. The reconstructed tube spine line fits well with the spine line points of each tube part. The contour flattening method proposed in this study can identify the wrinkle without any interference from the bending shape and accurately extract the wrinkle with the largest depth. Additionally, the proposed method can stably identify wrinkles with different depths on the standard part, with the wrinkle degree error stabilizing at 0.011%. Therefore, the proposed method can be used to accurately measure the wrinkle degree of bent tubes.

Key words measurement; industrial inspection; wrinkle degree; point cloud processing; spine line reconstruction; contour line extraction; bend deformation