

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.05.018

基于快速 Isomap 的曲面超声图像优化展开

王新征 卜雄洙 徐淼淼 于靖
(南京理工大学 机械工程学院 南京 210094)

摘要: 曲面工件超声成像检测时,采集点为三维数据,数量较大,观测时须进行旋转、移动操作,重构与显示缓慢,需对采集数据进行二维显示以便观测工件整体状况,实际检测中通常也要求结果为平面图像。基于此,提出了基于快速 Isomap 的曲面超声图像展开算法,首先对 N 个采集点进行 Landmark 点抽取,采用基于 Fibonacci 堆的 Dijkstra 算法计算 Landmark 点间的近似测地距离,利用多维尺度变换构造保持曲面拓扑结构的 2D 空间,根据剩余采集点到 landmark 点的距离确定其坐标,对曲面展开后各点的欧氏距离加权优化,使展开前后测量点间距尽可能保持相等。实验表明,该方法计算速度为 2~4 s,误差约为 0.1,与 Isomap 算法相比均有提高。

关键词: 超声成像; 曲面展开; Isomap

中图分类号: TB553 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Optimal flattening of surface ultrasonic image based on fast Isomap algorithm

Wang Xinzheng Bu Xiongzhu Xu Miaomiao Yu Jing

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In the ultrasonic imaging detection of surface parts, the structure of determined data is three dimensional, thus the rotation, movement and translation operation are commonly needed to observe the defects. However, due to the large amount of determined data, the 3-D reconstruction and display speed are very slow. So, the determined data should be in 2-D form for defect inspection. And the plane image is usually required to describe the results in the actual detection. Based on the above request, a surface flattening method based fast Isomap algorithm is proposed. First, n points are selected as landmark points. The geodesic distances between the points are computed by the Dijkstra method with Fibonacci heap. Then, MDS method is used to map a set of points into a flat domain. The rest of points coordinates are determined by sample interval. Finally, the weighted optimization method is performed on the flattening meshes. The experimental results indicate that the proposed method can flattening the surface with less distortion. Compared with Isomap method, the proposed algorithm has lower error value and less time, which is about 0.1, 2~4 s, respectively.

Keywords: ultrasonic imaging; surface flattening; Isomap

1 引言

曲面类构件在航空航天、核电等工业领域应用广泛^[1]。在制造过程中,由于曲面构件机加工工艺特殊性及其环境恶劣性,其内部会出现气泡、分层、裂纹等多种缺陷,影响系统正常运转,必须进行无损检测^[2-3]。超声检测作为无损检测的重要分支,与其他方法相比具有显示直观、

检测快速、穿透力强、安全等优点,逐渐成为无损检测的重要手段^[4]。曲面工件超声检测之前,需根据扫描路径或在线测量技术获取检测点,检测点为离散的三维数据^[5-6]。成像时需将各检测点作为像元进行显示,然而,由于其结构为三维形式,无法直接以二维形式进行显示,且检测工件的尺寸及采样间距要求使得采样点数据量较大,直接将采集数据进行三维显示对缺陷进行观测时需旋转、移动操作,重构与显示缓慢,不利于缺陷尺寸的计

树的根节点是这棵树的最小元素,通过指向整棵树的指针 $H.min$ 来访问 Fibonacci 堆的最小元素。

Fibonacci 堆基本操作包括 Union、Insert、Decrease-Key 和 Extract-Min, Union 可将两个子堆合并; Insert 作用为增加新元素,创建只有一个节点的树插入根表中并更新 $H.min$ 指针; Decrease-Key 可将堆中的一个节点元素值减小; Extract-Min 是从堆中移除包含最小元素值的根节点,该操作复杂度为 $O(\lg n)$, 前两者均为 $O(1)$, 因此 Fibonacci 堆适合最短路径 Extract-Min 操作次数相对少的问题。

3.1.2 Fibonacci 堆与 Dijkstra 算法结合

在 Dijkstra 算法中,以 V, E 表示 Isomap 近邻图 G 中采样点与边的集合, $D = (d_{ij})$ 为距离矩阵, n, m 表示近邻图中采样点与其所构成三角网格边的个数, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, $l(v_i)$ 表示 v_i 到 S 集中点的最短距离, S 为 V 的子集,从起点 s 到其他各点的最短路径步骤如下。

1) 初始化操作,顶点集合 S 初始化空, Q 初始化为 V , S 与 Q 互为补集,即 $S \leftarrow \emptyset$, $Q \leftarrow V \setminus S$, $l(v_i) \leftarrow \infty$, $l(s) \leftarrow 0$ 。

2) 判断 Q 是否为空集,若 Q 为空集则输出 S 停止,否则转步骤 3)。

3) 从最小队列中,抽取最小点,即从 Q 中选取一个具有最短路径估计的采样点 v_j , 加入到 S 中。

4) 执行松弛操作,对 Q 中 v_i 点进行计算后调整采样点,计算公式如下:

$$l(v_i) = \min\{l(v_i), l(v_j) + d_{ij}\} \quad (1)$$

$$l(v_{i+1}) = \min\{l(v)\}, S \leftarrow S \cup \{v_{i+1}\} \quad (2)$$

从上述过程可知, Dijkstra 算法在步骤 3) 上耗时多,需做 n 次 Insert、 n 次 Extract-Min、最多 m 次 Decrease-Key 操作,算法运算时间取决于构造的优先队列,原始线性方式复杂度为 $O(n^2 + m)$, 将步骤 3) 和 4) 中的操作采用 Fibonacci 堆的基本操作代替,则其时间复杂度为赋值时间 $O(1) + \text{Extract-Min } O(n \lg n) + \text{松弛操作 } m \cdot O(1) = O(n \lg n + m)$ 。由于 Isomap 近邻图中每个采样点至少通过一条边,最多有远小于 n 的 k 条边相连,因此 $n \leq m \leq kn$, 对 n 个采样点最短路径计算相结合的复杂度即转变为了 $O(n \lg n)$, 比原始方法计算量有了大幅度的提高。

3.2 改进的 Isomap 快速展开算法步骤

针对展开数据量大的问题,目前多采用结合标记点 Landmark 的 Isomap 算法解决,该方法采用 Landmark 标记点构造 $N \times n$ 最小距离矩阵估计测地距离,当 $n \ll N$ 时, Landmark-Isomap 的时间复杂度可大幅度的降低,但是该算法仍要求输入采集点尽量均匀稠密,以保证测地线精度,在采样点较多的情况下,计算量仍较大,因此本文根据超声检测采样点分布,对算法进行了改进,采用较多的采样点参与仅 Landmark 点之间的测地线估计,较少

的点参与特征值求解的思想,结合 3.1 节计算时间长的措施与实际检测情况,提出了改进的快速 Isomap 曲面展开算法,步骤如下。

1) 曲面 Landmark 点提取。从 N 个曲面测量采用点中选择 n 个 Landmark 点, $n \ll N$, n 的选择根据降维空间均匀选择、随机选择或根据自组织映射聚类^[15] 方式进行选择,如对于 p 维嵌入空间,一般需要 $p + 1$ 个 Landmark 点。本节根据曲面检测特点,采用基于曲面距离的方式各向等间隔均匀采样。

2) 采用 3.1 节方法,计算 n 个样本点之间的最短距离 $d_C(i, j)$, 以此构造 $n \times n$ 的距离矩阵代替原 Isomap 算法中的 D_C 。

3) 构建内积矩阵 B_n

$$B_n = -H_n \Delta_n H_n / 2 \quad (3)$$

式中: Δ_n 为关于 Landmark 点之间最短距离平方的矩阵, $(H_n)_{i,j} = \delta_{i,j} - 1/n$ 。

4) 求解内积矩阵 B_n 的特征值与特征向量,设 λ_i 为正的 eigenvalue,且 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p$, v_i 为对应的特征列向量,则所需的空间优化特征向量可表示为:

$$L = [\sqrt{\lambda_1} \cdot v_1^T \quad \sqrt{\lambda_2} \cdot v_2^T]^T \quad (4)$$

5) 求取 $N-n$ 个剩余采样点所在位置,根据超声采样点路径曲线及三维一环邻近点关系,获取采样点低维坐标 x_{new} 。

6) 加权优化各边,重新调整低维坐标 x_{new} , 即 $\min(W \cdot E - l)$, W 为权值, l 为实际采样点之间弧长,该最小化目的是继续调整低维坐标所构成的各边,以获得最小的误差。

上述过程仅需计算 n 个样本点测地线距离,使用了较少的样本参与特征值求解,采用了 3.2 节方法估计测地线距离,结合了实际采样间隔情况确定低维坐标,极大的降低了计算量,并对求取结果进行了优化以保证精度。

4 实验结果与分析

本节分别用原始 Isomap 算法、本文改进的快速 Isomap 算法进行曲面展开,实验基于 Intel Core 2.3GHz、win7 系统、4G 内存、MATLAB 平台实现的,改进方法采用采样间隔 1:3 方式均匀取点。

以典型不可展半球面为例对进行说明,其采样顶点及其三维网格如图 3(a) 所示,其三维成像结果如图 3(b) 所示。表 1 给出了两种算法在展开中的实验数据对比,采用相对误差与时间指标对算法性能进行了比较。相对误差公式为:

$$E = \left(\sum_{i=1}^m |l_i - l'_i| / l_i \right) / m \quad (5)$$

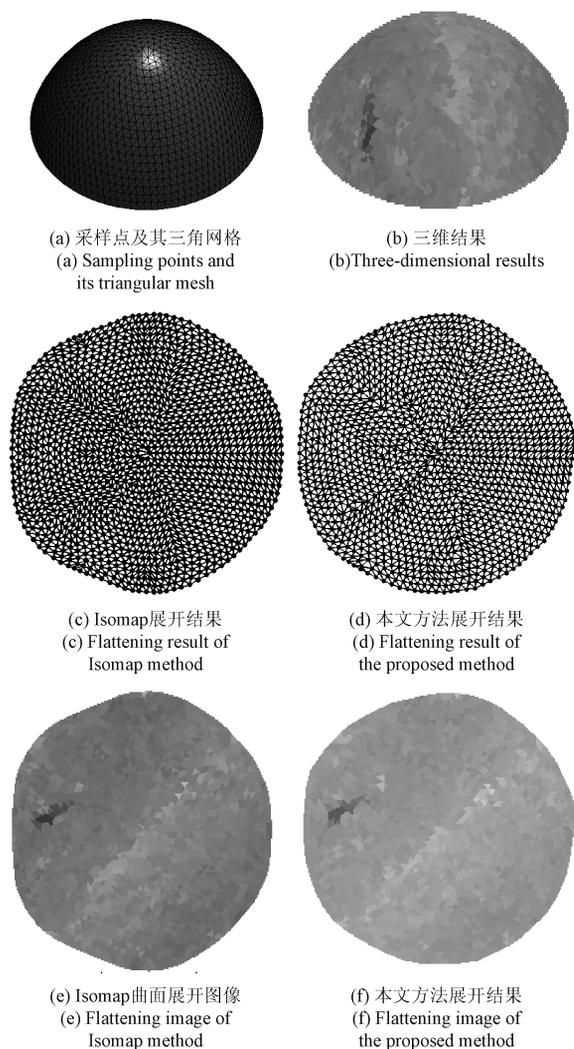


图 3 半球面曲面展开
Fig. 3 Hemisphere surface flattening

表 1 曲面展开实验结果

Table 1 The experimental results of surface flattening

方法	顶点、边、面的个数	时间/s	误差	
图 3	Isomap	顶点 1 324、	110.02	0.099
	本文方法	边 3 860、面 2 537	2.88	0.090
图 4	Isomap	顶点 1 694	218.51	0.116
	本文方法	边 4 912、面 3 218	3.96	0.110

从图 3(c)与(d)中可以看出, Isomap 算法与本文方法均能获得失真较小的网格展开图,通过三角片颜色赋值所得超声图像如图 3(e)与(f)所示,通过与图 3(b)中三维图像对比可知曲面展开的方法有助于观察曲面整体情况,且两种方法均可获得二维平面至原始曲面的映射关系。

从表 1 中数据可以看出,本文所提出的快速 Isomap

方法在精度与时间上较 Isomap 算法均有提升,其中时间缩减幅度较大,其原因是改进的 Isomap 算法只需要计算 n 个 landmark 点之间的最短路径,其余点坐标则可根据采样点间隔邻域关系获取,从而节省了最为耗时的最短路径计算步骤。

以图 4(a)所示的采样顶点形成的不可展回转曲面为例进一步说明本文算法有效性,其三维成像结果如图 4(b)所示。图 4(c)与(d)为对曲面以一侧母线设置剪口后的展开图像,由图表明本文方法与 Isomap 算法展开结果差距不大,但均匀性较好,如展开网格左侧中上部,其最终成像结果如图 4(e)与(f)所示。通过表 1 中实验数据对比可知,本文方法计算速度与误差均表现良好。

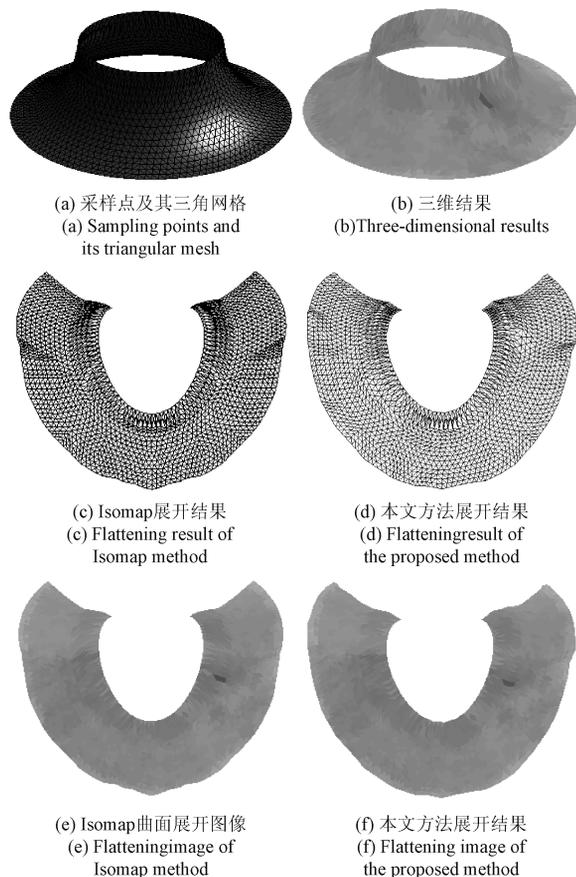


图 4 回转曲面展开
Fig. 4 Revolving surface flattening

5 结论

本文为解决超声检测时曲面成像存在的问题,提出了基于快速 Isomap 算法的曲面展开方法,算法首先选取 Landmark 点进行近邻图与内积矩阵计算,获取关于 Landmark 点的初始定位,然后根据 landmark 点获取整体低维坐标并加权优化。实验结果证明,本文所提出方法展开误差比 Isomap 算法略优,但耗时明显降低,实际检

测中可根据检测精度、曲面弧度调整采样个数,以满足精度要求。另外在使用本文算法对复杂曲面进行展开时,可根据需要进行分区操作。

参考文献

- [1] 何改云, 贾红洋. 基于 CAD 模型的自由曲面自适应采样策略[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(10): 835-840.
HE G Y, JIA H Y. Adaptive sampling strategy for free - form surface based on CAD model [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(10): 835-840.
- [2] 乔玉晶, 王浩然, 赵燕江. 大尺寸曲面零件的双目视觉测量网络规划研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(4): 913-918.
QIAO Y J, WANG H R, ZHAO Y J. Study on binocular vision measurement network layout for large curved surface parts [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(4): 913-918.
- [3] 张杨, 周晓军, 郑慧峰, 等. 基于模板的大型复杂曲面超声 C 扫方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(7): 1626-1633.
ZHANG Y, ZHOU X J, ZHENG H F, et al. Ultrasonic C-scan method of large sculptured surface based on templates[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(7): 1626-1633.
- [4] 靳世久, 杨晓霞, 陈世利, 等. 超声相控阵检测技术的发展及应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(9): 925-934.
JIN SH J, YANG X X, CHEN SH L, et al. Development and application of ultrasonic phased array inspection technology [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(9): 925-934.
- [5] 闫勇刚, 邓小玲, 姚丽峰, 等. 基于主成分分析的大型管道三维表面重建[J]. 仪器仪表学报, 2014(11): 2567-2573.
YAN Y G, DENG X L, YAO L F, et al. Three-dimensional surface reconstruction of large-scale pipe combining principle component analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014(11): 2567-2573.
- [6] 南刚雷, 张瑞峰, 张梓然. 基于 PCL 的柴油机缸盖三维特征提取技术[J]. 电子测量技术, 2016, 39(2): 80-82.
NAN G L, ZHANG R F, ZHANG Z R. Technology about cylinder head's 3D feature extraction based on PCL[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(2): 80-82.
- [7] 吴思源. 曲面工件超声自动检测中若干关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

WU S Y. Research on ultrasonic detection of complex surfaces[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.

- [8] 王炯, 李东升, 李小强. 整体壁板蒙皮曲面几何展开方法研究[J]. 塑性工程学报, 2006, 13(6): 57-60.
WANG J, LI D SH, LI X Q. Research on geometric development method of integral panel skin surface [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2006, 13(6): 57-60.
- [9] WANG C C L. Towards flattenable mesh surfaces [J]. Computer Aided Design, 2008, 40(1): 109-122.
- [10] GONG C, ZHOU L S, AN L L, et al. A novel surface flattening method based on mesh edges [C]. International Conference on Intelligent System Design & Engineering Application, IEEE, 2012: 129-133.
- [11] SHIN K H. A method for planar development of free-form surfaces made of anisotropic materials [J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2011, 25(11): 2817-2825.
- [12] 刘杰. 基于曲面重构的三角网格参数化方法比较[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
LIU J. The comparison of triangular mesh parameterization methods based on surface reconstruction [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [13] SHAO C, HUANG H. Selection of the optimal parameter value for the ISOMAP algorithm [J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(9): 968-979.
- [14] 屈太国, 蔡自兴. 一种快速的 Isomap 算法 [J]. 信息与控制, 2014, 43(4): 476-482
QU T G, CAI Z X. A fast Isomap algorithm [J]. Information and Control, 2014, 43(4): 476-482
- [15] 圣少友, 李斌. 一种快速映射 Isomap 算法 [J]. 模式识别与人工智能, 2009, 22(6): 908-912.
SHENG SH Y, LI B. A fast mapping Isomap algorithm [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2009, 22(6): 908-912.

作者简介



王新征, 1986 年出生, 博士研究生, 主要研究方向为超声无损检测及图像处理。

E-mail: wxinzheng@163.com

Wang Xinzheng was born in 1986, Ph. D. candidate. Her research interests include ultrasonic NDT and image processing.

卜雄洙, 1966 年出生, 通讯作者, 博士, 教授, 主要研究方向为智能测控、动态测试及机器视觉等。

E-mail: buxu105@mail.njust.edu.cn

Bu Xiongzu (Corresponding author) was born in 1966, Ph. D., professor. His



research interests include intelligent control, dynamic testing and machine vision.



徐淼森, 1991 年出生, 博士研究生, 主要研究方向为表面波及信号处理技术。

E-mail: ck_xumiao@foxmail.com

Xu Miaomiao was born in 1991, Ph. D. candidate. His research interests include surface acoustic wave and signal processing technology.



于靖, 1989 年出生, 博士研究生, 主要研究方向新型传感与信号处理技术。

E-mail: njustyujing@126.com

Yu Jing was born in 1989, Ph. D. candidate. His research interests include new sensing and signal processing technology.

泰克为 DisplayPort 1.4、Type-C 和最新 HBR3 所有数据速率提供业内速度最快的一致性测试解决方案

自动发射机测试将缩短测试时间, 对高达 HBR2 的数据速率测试时间降至 7 h 以下, 对 HBR3 数据速率降至 11 h 以下

泰克科技公司日前发布 DisplayPort 和 Type-C 发射机测试解决方案增强功能, 全面支持最新的 DisplayPort 1.4 规范。该解决方案支持 HBR3 数据速率 (8.1 Gb/s), 提供了业界最快的一致性测试方案, 对 HBR2 及以下测试速度将测试时间降至不到 7 小时, 对 HBR3 测试速度则测试时间不到 11 h。这些时间明显要快于其他竞争对手的产品。泰克最近为 Gen1 和 Gen2 发布了 USB 3.1 Type-C 自动测试解决方案, 集成了 SigTest 和 DPOJET 测量功能, 提供了全面一致性测试及更深入的分析能力。

对处理整体 Type-C 设计的工程师来说, 必须测试 USB, 并支持其他 Alt 模式, 确保设计满足这些标准。泰克积极保证其解决方案满足所有这些最新的技术规范。

除缩短 DisplayPort 测试时间外, 泰克还解决了与设置和管理被测器件 (DUT) 有关的挑战。除支持最新规范外, 泰克还推出一种新型独立式应用, 在测试前监测 DUT 行为。凭借这一解决方案, 工程师只需从简单的图形用户界面中选择所需的测试, 然后就能在执行测试的同时执行其他任务。

“在 DisplayPort 发射机测试方面, 泰克较竞争对手明显改善了调试功能。”泰克科技公司高性能示波器总经理 Brian Reich 说, “我们实现了最快的测试时间, 提供了完整的测试覆盖范围, 无缝支持深入调试功能, 同时支持实时信号分析和预录信号分析。竞争对手的解决方案明显要慢得多, 提供的调试支持有限, 没有预录模式信号分析功能。我们的解决方案是当前唯一的全方位 DisplayPort

测试和调试解决方案。”

最新 DisplayPort 发射机解决方案的主要功能包括:

- 对 HBR2 及以下数据速率, 全自动一致性测试时间不到 7 h, 对 HBR3 数据速率测试时间不到 11 h。
 - 一个应用同时适用于标准和 Type-C DisplayPort 测试。
 - 集成开关矩阵 (选项 SWX-DP), 免提自动操作。
 - 采用默认滤波文件或使用泰克串行数据链路分析 (SDLA) 应用创建的自定义滤波文件, 实现灵活的反嵌功能。DisplayPort 1.4 测试要求在 HBR3 眼图分析过程中结合使用 DFE 和 CTLE 滤波器。
 - 从一致性测试无缝迁移到调试和全面集成泰克 DPOJET DisplayPort 1.4 测量程序库。用户可以简便地更深入地挖掘故障, 执行根本原因分析。
 - 增强报告选项, 帮助用户生成 .html、.mht、.pdf 和 .csv 格式的报告。可按测试通过/未通过标准、通路或数据速率查看报告, 获得进一步定制选项。
 - 支持保存波形, 进行离线分析 (另外也支持实时分析)。与竞争对手的产品不同, 应用在执行过程中采集和保存波形, 然后用于详细的离线分析。
- 泰克还提供 DisplayPort 接收机解决方案, 支持其在 Design Con 2017 上推出的最新 BSX BERTScope 系列。这款最新的 BERTScope 系列是业内第一台能识别协议的 32 Gb/s 误码率测试仪, 简化了第四代标准接收机测试。它拥有内置去加重、PCIe 4.0 快速协议握手、USB 3.1 接收机验证和调试功能。