DOI: 10.3901/JME.2018.03.137

胎面花纹边界特征提取及重构方法研究*

董玉德¹ 张荣团¹ 宋忠辉¹ 房玉强¹ 白苏诚² 张方亮²

(1. 合肥工业大学机械工程学院 合肥 230009;

2. 佳通轮胎(中国)研发中心 合肥 230601)

摘要: 为解决轮胎硫化工序中制造成型花纹与设计花纹存在偏差的问题,提出一种从胎面扫描数据中提取花纹边界特征并进行加工特征重构的新方法。该方法依据花纹节距排布和挤压压延成型工艺确定空间分割方案,利用轮廓设计理论和主成分统计分析方法获取胎顶轮廓曲线,从而实现三维点云向二维灰度图像(带有深度值)的转化,根据花纹的增长规律并借鉴区域增长法的思想对花纹边界特征进行识别和提取。结合三次样条插值法将花纹边界离散化处理为一簇等间距坐标点的形式,最终根据最佳一致逼近的定义实现自适应相切连续圆弧直线的花纹曲线逼近。实验结果表明,该方法可在 90 s 左右的时间内完成各种半钢子午线轮胎花纹的重构,特征提取误差不大于 0.15 mm,重构误差绝对值均值不超过 0.25 mm,最大值不超过 0.4 mm。该方法不仅能快速有效提取胎面花纹边界特征并重构,并且解决了传统逆向工程技术在花纹重构中失真性的问题,为花纹开发效率的提高和综合性能的改善提供了指导方向。

关键词: 胎面花纹; 逆向工程; 特征提取; 重构; 逼近; 加工特征

中图分类号: TP391

Research on Boundary Features Extraction and Reconstruction for Tire Tread Patterns

DONG Yude¹ ZHANG Rongtuan¹ SONG Zhonghui¹ FANG Yuqiang¹

BAI Sucheng² ZHANG Fangliang²

(1. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009;

2. GITI Tire(China)R&D Center, Hefei 230601)

Abstract: In order to solve the deviation problem between tread pattern and design pattern in the process of tire vulcanization, a new method is proposed to extract and reconstruct tread pattern feature from tire tread scan data. Firstly, A new space segmentation method is determined according to the pattern pitch arrangement and the extrusion and calendaring process, secondly, obtained the Contour of the tire crest by contour design theory and principal component analysis method, and finally successfully transformed the dimensional point cloud to the two-dimensional gray image (with depth value). According to the growth rhythm of the pattern and the idea of regional growth law, the pattern border characteristics can be identified and extracted accurately. The cubic boundary spline interpolation method is used to discretize the pattern boundary into a series of equidistant coordinate points. And finally, the approximation of tread curve of Self - adaptive Tangent Continuous Circle and Line is realized according to the definition of optimal uniform approximation. The experimental results show that the method can be used to reconstruct the tire tread pattern of various semi - steel radial tire in about 90s, the feature extraction error is less than 0.15mm, the mean value of reconstruction error absolute value is less than 0.25mm, the maximum value is less than 0.4mm. This method can extract and reconstruct the tread pattern boundary feature effectively and deal the distortion problem in pattern reconstruction of traditional reverse engineering technology, as well as provides a direction for improvement of the efficiency of pattern development and the comprehensive performance of the tire.

Key words: tread pattern; reverse engineering; feature extraction; reconstruction; approximation; machining feature

* 国家自然科学基金资助项目(51275145)。20161220 收到初稿, 20170610 收到修改稿

0 前言

目前,国内的轮胎花纹结构设计技术还不完善,依旧有许多不足之处。由于逆向工程技术能根据最终的成品反求出其数字化模型,其近几年来广泛应用于飞机,汽车,玩具等模具行业中,有效提高了产品生产效率并降低了模具制造成本。然而逆向工程并没有在轮胎行业得到广泛应用,这是由于企业在利用逆向工程进行轮胎花纹重构时会面临以下问题。

(1) 逆向重构过程不规范,虽然逆向工程的大致流程都类似,但是对于不同对象,其操作过程却大相径庭,而不同设计人员,由于其知识背景与操作习惯都不尽相同,所以操作步骤的优先级也会相差很大,这就导致很难对轮胎逆向重构操作过程进行规范。

(2) 轮胎模型重构质量不稳定,模型重构质量的优劣与操作人员的经验、技巧以及水平等有很大关系,同一轮胎扫描数据往往由于处理方法不同导致最终结果相差很大。

(3) 轮胎模型重构效率低下,由于模型重构时需要进行噪点去除以及特征识别等大量重复操作,而这些烦琐性操作严重制约了模型重构效率。

点云的特征提取多采用经纬线扫描法、网格划分法、角度-弦高联合法、投影图像法^[1]、曲率法^[2]、基于曲率^[3]和基于切平面^[4]的方法。非加工曲线的圆弧直线逼近^[5-7],常用的拟合方法有等间距法、等弦长法、等误差法、最小误差法、等弧长法^[8]、双圆弧法^[9]、曲率圆法、三点圆法^[10]和相切圆法^[11]、三圆弧法、最小二乘法^[12]等。

卢维欣等^[13]利用半径渐变的主成分分析法识别建筑物目标,依据点的局部特征设置区域增长法生长准则对建筑物目标进行平面分割并对分割结果进行优化。HE等^[14]结合图像的灰度值和形态学特征提出了一个有效的多级河道识别和提取方法;庞世燕等^[15]采用结合主成分分析的区域增长法提取建筑物立面的平面特征。南京航空航天大学的丁尤蓉等^[16]提出了自适应阈值的算法,该算法是在利用全局阈值所提取的初始特征点的基础上通过动态局部阈值筛选出真实的特征点。中国科学技术大学的陈义仁等^[17]针对散乱点云提出了新的识别算法,该算法首先采用最小二乘法构造微切平面,然后将其邻域内的数据点投影到该平面上,最后通过分析这些投影点集的特性来实现提取特征点。空军工程大学的郇能建等^[18]提出了基于多元量化迭代

式的算法来提取特征点。程效军等^[19]采用切片技术和数学形态学方法提取点云的轮廓特征线,通过切片分层可将空间点云转换为不同层的平面切片点云,借鉴图像处理方法,将切片点云转换成二值图像,使用形态学运算提取其轮廓像素,将轮廓像素转换为轮廓特征点并采用B样条曲线拟合轮廓特征线。

借鉴图像轮廓提取的思想,利用空间分割和主成分分析方法实现投影灰度图像的转化,在此基础上引入区域增长法提取花纹的边界特征,并通过加工特征实现重构花纹的自适应逼近,旨在达到以下目的:

(1) 缩短花纹开发周期,通过快速准确地重构胎面花纹,组建参数化语义花纹库,以便开发工程师能够依照所需花纹的性能规则从语义花纹库中随意选型、裁剪、组合,以完成不同花纹的设计与开发工作。

(2) 改善轮胎的综合性能,根据重构的花纹集成参数化建模系统,重构数字化模型,在分析轮胎圆整度、胎面接地面积、花纹沟槽面积以及噪声等性能的基础上,指导花纹的设计,并建立语义模型库。

1 灰度图像转化方法

由于轮胎表面细微特征太多,扫描设备难以完整提取出细微特征点云,一般点云提取都是通过采用二次参数曲面逼近空间点集,然后计算出空间点的曲率和法向矢量,最后根据曲率和法向矢量提取出特征点,但这种方法提取出的特征点精度和完整性都不够。本文通过空间分割和主成分分析法将三维点云转化成灰度图像,从而获得比较完整的微细特征点云。

1.1 空间分割

空间区域分割根据对象特征不同可以选择同心圆分割(沿着径向分离),如图1所示,也可选择扇形分割(沿着周向分割),如图2所示。如图3所示,轮胎由多层结构挤压成型光胎,并经硫化工艺生成胎面花纹,制造工艺以及橡胶材料的特性决定了轮胎胎面不能达到理论状态的圆形。根据花纹沟和胎面到轮胎旋转轴半径的不同可借鉴同心圆分割方法将其沿径向划分为不同的层次区域;又因轮胎在设计与制造过程中不可避免地出现轻微的径向圆跳动问题,需要参考扇形分割方法视其在周向局部区域近似为圆。轮胎花纹一般由3~5个不同花纹节距单元按一定规则排列组合而成,如图4所示,

A、B、C、D 四个形状相似、尺寸不同的节距, 经过优化排列, 组成不同样式的花纹, 满足轮胎性能要求。在同心圆分割与扇形分割的基础上, 结合轮胎的造型规律, 在轮胎的空间区域划分中提出了一种同心圆与扇形相结合的混合分割方案, 如图 5 所示。

图 1 同心圆分割

图 2 扇形分割

图 3 轮胎结构分解

图 4 花纹节距排布

图 5 混合分割

对一般的轿车用子午线轮胎圆周长度范围是确定的, 进而可排布的花纹节距单元也是一定的, 在花纹海陆比满足要求的前提下, 即橡胶接地面积大于花纹沟槽的面积, 优先保证每一份扇形区域的周向弧长不小于一个花纹节距。综合轮胎的实际空间分割中扇形分割区域占周向总体比例的因素, 将扫描数据沿周向均匀划分为 20~30 份为宜, 至此可以近似将每一份区域视为一个圆弧, 在圆弧的基础上运用同心圆分割方案进行胎面数据与花纹沟数据的分离。

1.2 主成分统计分析

在轮胎结构设计过程中, 参照轮胎轮廓设计理论绘制胎顶轮廓曲线并旋转生成胎顶面, 然后将设计完成的二维花纹映射轮胎表面, 获得三维曲线, 最后利用三维曲线绘制 3D 花纹, 完成 3D 花纹建模。花纹设计时, 要兼顾考虑抓地力与排水性能等因素, 通常为取得较好的操控性, 会使花纹橡胶的接地面积大于花纹沟槽的面积, 如图 6 所示。对于

一条新胎不可避免地会存在一些特征的干扰, 如图 7 所示。为了求解花纹逆向重构问题, 借助主成分统计分析的思想, 在研究胎顶轮廓曲线时以胎面为主要研究对象, 在研究胎面花纹时可视花纹沟为主要研究对象。

图 6 花纹断面轮廓

图 7 新胎干扰特征示意

以一个截面的轮廓数据点为一组集合, 沿胎面轮廓增长方向所在的坐标轴为正方向, 采用堆排序法来实现坐标点数据从小到大的排列。根据排好序的数据, 找出最大值 M 、最小值 m , 则极差 $S_0 = M - m$, 组数为不小于样本总数平方根的最小整数, 组距为极差与组数的商, 然后根据这些数据, 对样本进行分组, 并统计出每组数据出现的频数及频率。参考得到的数据分布直方图, 将出现频率最高的一组数据的算术平均值作为胎面在圆弧上的等效点, 如图 8 所示。

图 8 胎顶截面轮廓数据

由图 8 可知, 利用混合方案可以很好的过滤掉横沟数据并统计出轮胎横截面数据, 但是在进行胎顶曲线的拟合前仍需过滤掉纵沟数据, 由正向设计过程可知, 通常情况下胎顶曲线关于中间数据点对称且中间数据点为最大值点, 受此启发, 可以利用两端数据相对中间数据点单调递增的原理来过滤掉纵沟数据, 如图 9 所示。

图 9 胎肩到胎冠的轮廓半径递增趋势

为了对上述过滤方法具体阐述, 本文采用三次样条插值方法, 此插值方法计算简单, 收敛性有保证, 稳定性好, 易实现, 能准确地将胎面数据离散化。

$$d_i = |A(x_i - x_{i-1}) - B(y_i - y_{i-1})| / \sqrt{A^2 + B^2} \quad (1)$$

式中, d_i 是点 P_i 到 P_{i-1} , P_{i+1} 两点连线的距离, A 为 P_{i-1} , P_{i+1} 两点间的高度差即 $y_{i+1} - y_{i-1}$, B 为 P_{i-1} , P_{i+1} 两点间的横向差即 $x_{i+1} - x_{i-1}$ 。

由于胎面数据存在噪声, 容易对后续的拟合产生影响, 因此在拟合之前根据弦高差偏移精简算法剔除噪点, 即 d_i 不符合要求的点。然后利用最小二乘法原理对离散数据进行五点三次平滑, 平滑后如图 10 所示。将数据空间沿某一坐标轴均等分, 间距可变, 通过判断拟合样条曲线在区间内通过的采样点个数计算出拟合误差, 发现间距越大, 拟合误差越大, 因此为减少拟合误差, 需要将数据空间的划分间距尽可能缩小直至拟合误差在允许偏差内。图 11 为使用三次样条插值法求出三次样条函数将胎顶轮廓离散化为一簇数据点, 其精度与扫描精度一样。

图 10 平滑处理后的胎面数据

图 11 离散化处理后的胎面数据

1.3 切片分层及图像转化

由于现有技术对三维空间点云难以操作, 因此需要利用点云切片技术将三维点云转化为二维平面点云^[19], 即在点云密集处的法线方向建立两个平行平面, 尽可能使平面之间的点云数目极少化, 然后将外侧的点云投影至平面上, 再利用主成分统计分析技术对得到的二维平面数据离散化处理。

为了便于胎面花纹边界特征的提取, 需要将胎顶面数据点集与花纹沟数据点集进行分离。首先按照每个分片区域内不同种类数据到所拟合胎顶曲线距离不同将扫描数据分为胎顶面点集与花纹沟点集, 其中花纹沟点集又包含沟壁以及沟底点集, 在胎顶面点集中, 花纹沟的灰度值为 0, 而在花纹沟点集里面, 胎顶面的灰度值为 0, 其中花纹边界特征识别是基于胎面点集, 图 12 是轮胎表面在分离前

后所投影的图像。

图 12 胎面数据分离前后对比图

2 花纹边界识别与提取

本文提出的边界特征提取算法是根据花纹边界的生长情况及其 K -邻域范围内胎顶面数据与沟壁沟底数据灰度值的异同而识别出一系列特征像素的集合。根据花纹设计性能的不同, 简单地可以分为纵向花纹和横向花纹, 依照整体与局部的分析方法, 对纵沟和横沟采取不同的局部边界特征提取方案。

2.1 纵沟边界信息提取

根据纵沟轮廓形状的不同, 将其分为直线型、波浪型和锯齿型纵沟, 如图 13 所示。本文提出基于中间点地址追踪的纵沟边界特征识别方法, 具体实现步骤如流程图 14 所示。

图 13 花纹纵沟特征分类

2.2 横沟边界特征提取

为彻底将每条花纹的边界特征点集识别出来, 本文通过分析归纳花纹增长的趋势特征, 在灰度图像的基础上提出了一种基于区域增长的花纹边界特征点提取方法, 具体实现步骤如流程图 15 所示。对花纹边界特征点提取过程中的一些关键问题处理如下。

(1) 定义花纹边界增长语义。按独立增长语义

图 14 纵沟边界特征识别流程

可分为：全封闭独立花纹语义类、半封闭(即增长到边界)的独立花纹语义类；按花纹间交汇增长语义可分为：“X”型交汇语义类、“T”型交汇语义类、“Y”型交汇语义类；按横沟与纵沟交汇增长语义可分为：独立交汇语义类、混合交汇语义类，如图 16 所示。

(2) 花纹边界初始搜索位置的确定。从灰度图像的坐标原点开始，沿着花纹边界增长方向所在的坐标轴进行搜索，以第一个灰度值为 0 的前一个胎面数据点以及最后一个连续灰度值为 0 的后一个胎面数据点分别作为花纹上、下边界。

(3) 花纹边界增长识别准则。从花纹初始搜索位置开始，沿着花纹边界增长方向所在的坐标轴进行搜索，通过确定搜索区间内符合上、下边界

条件的个数 N_1 和 N_2 来判断搜索是结束还是继续，若继续则判断出花纹边界增长的语义类型，并依据花纹增长语义的特征判定花纹的搜索方向。若 $N_1 = N_2 = 1$ ，认为是正常花纹边界，储存花纹上、下边界；若 $N_1 = N_2 > 1$ ，判断连续出现的次数，若小于 5 则继续搜索，否则，认为花纹出现交汇现象，执行逆向搜索，检索是否存在 $N_1 = N_2 > 1$ ，若不存在出现“T”型或“Y”型交汇，若存在则出现“X”型交汇，识别方法如图 17 所示，若搜索到花纹纵沟边界处，则跳过纵沟继续花纹的搜索。

(4) 花纹边界增长的结束条件。若 $N_1 = N_2 = 0$ 且连续出现 3 次，或搜索到灰度图像边界，则此条花纹搜索结束。

图 15 横沟花纹边界特征提取算法流程图

图 16 花纹边界增长语义

图 17 交汇花纹识别方法

3 花纹重构

3.1 离散化处理

由于扫描设备精度的问题,扫描的点云在花纹边界处通常会呈现锯齿状或者阶梯状波动的情况,这就需要对提取的特征点进行光顺处理。对光顺后的特征点进行三次样条线拟合之前,根据

最佳一致逼近原则,在误差允许范围内,筛选出样条曲线欲通过的采样点。根据采样点在某一坐标轴上的间距相等这一规律,我们提取了一种等分法采样点获取方案,如图 18 所示。离散化处理得到的等间距插值边界特征点如图 19 所示。具体操作流程如下。

(1) 计算每条花纹边界在初始位置和终止位置的斜率,近似看作是起始点和终止点处的一阶导数,即样条曲线的第一类边界条件。

(2) 搜索边界特征点中 X 坐标距离 $i(2 \leq i \leq n)$ 等分点 X 值最近的点,对初始、终止点以及等分点沿 X 方向进行排序,用追赶法解出相邻两点区间内的样条函数。

(3) 计算特征点处所对应样条函数上的 $\varphi(x_i)$ 值,使 $\max_{1 \leq i \leq n} |\varphi(x_i) - y_i| \leq [\varepsilon]$,若不满足条件则依次增加等

分点，直至满足条件为止。

图 18 采样点

图 19 插值点

3.2 自适应加工特征逼近

之前已经通过一簇离散化坐标点的形式表示了将要逼近的曲线方程。考虑到轮胎模具的加工要用圆弧、直线逼近花纹曲线并保证在连接点两段圆弧(直线)相切。本文采用圆弧逼近分段优化的方式，利用三点确定一段圆弧的方法拟合第一段圆弧，以前圆弧的终点为起点，并在此点与前圆弧相切的方法拟合后续圆弧。根据每条花纹拟合圆弧的效果进行整体上的优化，从而获得优化逼近圆弧。

(1) 逼近误差的计算

$$a = \frac{\begin{vmatrix} x_1^2 + y_1^2 - x_2^2 - y_2^2 & 2(y_1 - y_2) \\ x_1^2 + y_1^2 - x_3^2 - y_3^2 & 2(y_1 - y_3) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2(x_1 - x_2) & 2(y_1 - y_2) \\ 2(x_1 - x_3) & 2(y_1 - y_3) \end{vmatrix}}} \quad (2)$$

$$b = \frac{\begin{vmatrix} 2(x_1 - x_2) & x_1^2 + y_1^2 - x_2^2 - y_2^2 \\ 2(x_1 - x_3) & x_1^2 + y_1^2 - x_3^2 - y_3^2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2(x_1 - x_2) & 2(y_1 - y_2) \\ 2(x_1 - x_3) & 2(y_1 - y_3) \end{vmatrix}}} \quad (3)$$

$$c = \frac{\begin{vmatrix} x_1^2 + y_1^2 - x_2^2 - y_2^2 & 2(y_1 - y_2) \\ x_0 y_1 - y_0 x_1 & -(x_1 - x_0) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2(x_1 - x_2) & 2(y_1 - y_2) \\ y_1 - y_0 & -(x_1 - x_0) \end{vmatrix}}} \quad (4)$$

$$d = \frac{\begin{vmatrix} 2(x_1 - x_2) & x_1^2 + y_1^2 - x_2^2 - y_2^2 \\ y_1 - y_0 & x_0 y_1 - y_0 x_1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2(x_1 - x_2) & 2(y_1 - y_2) \\ y_1 - y_0 & -(x_1 - x_0) \end{vmatrix}}} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \left| \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} - \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} \right| \quad (6)$$

由公式(2)和(3)可求得过 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) 三点，半径为 r 圆弧的圆心坐标 (a, b) ；由公式(4)和(5)可计算出与圆心坐标为 (x_0, y_0) 的圆相切于点 (x_1, y_1) ，并过 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) 两点，半径为 r 圆弧的圆心坐标 (c, d) ；由公式(6)即可计算出离散点 $(x_i, y_i)(i=2,3,4\dots)$ 到圆心坐标为 (x_0, y_0) 并过点 (x_1, y_1) 拟合圆弧的逼近误差。

(2) 自适应逼近方法。

步骤 1：以 $P_1(x_1, y_1)$, $P_2(x_2, y_2)$ 作为初始圆弧的前两个点，依次向后搜索第三个点 P_i ，计算曲线 $[P_2, P_i]$ 区间上离散化点到过 P_1, P_2, P_i 三点圆弧(直线)的逼近误差绝对值，使之小于设定的最大允许极限误差，从而初步确定出第三个点 $P_i(x_i, y_i)$ 的位置 T_P 。

步骤 2：以 $P_1(x_1, y_1)$ 作为初始圆弧的起始点，依次向后搜索第二个点 P_i 和第三个点 P_j ，计算曲线 $[P_2, P_j]$ 区间上离散化点到过 P_1, P_i, P_j 三点圆弧(直线)的逼近误差绝对值，使之小于设定的最大允许极限误差，从而重新确定出第二个点 $P_i(x_i, y_i)$ 和第三个点 $P_j(x_j, y_j)$ 的位置 a, b 。

步骤 3：再次确定第一个点 $P_i(x_i, y_i)(1 < i < a)$ ，第二个点 $P_j(x_j, y_j)(a \leq j < b)$ 和第三个点 $P_k(x_k, y_k)$ 的位置 aa, bb, cc ，使得曲线 $[P_1, P_k]$ 区间上离散化点到过 P_i, P_j, P_k 三点圆弧(直线)的逼近误差绝对值小于允许极限误差。

步骤 4：拟合过 P_{aa}, P_{bb}, P_{cc} 三点的第一段圆弧，若点 P_{aa} 不是起始端点则以三点圆弧为延伸对象，第一点为边界点进行延伸，计算弧中点到弧弦长的距离是否小于 0.01，若是以直线代替圆弧，计算弧长，判断是否大于设定弧长阈值，若不大于设定阈值，执行步骤 5 进行连续圆弧的拟合，否则执行步骤 6 进行相切连续圆弧的拟合。

步骤 5：令 $aa = cc$ ，即以前一段圆弧的终点作为起点，根据步骤 1 和步骤 2 所采用方法搜索出第二个点和第三个点，拟合圆弧并计算弧长是否大于设定阈值，若不大于设定阈值，循环执行步骤 5，否则执行步骤 6。

步骤 6：令 $aa = cc$ ，根据相切条件搜索出第三

个点,然后计算出第一个点和第三个点的弧长中点,即第二个点,拟合圆弧并计算弧长是否大于设定阈值,若大于设定阈值,循环执行步骤 6,否则执行步骤 5。

步骤 7: 检测不相切的分段连续圆弧直线,并进行过渡相切处理,完成花纹加工特征的逼近。

(3) 花纹重构的优化处理。

根据 2D 花纹线展开到胎顶面上的 3D 投影曲线和 3D 边界特征点拟合的 3D 花纹曲线,借助 CAA(Component application architecture)提供的 CATIA V5 应用程序接口函数 API(Application programming interface),利用 SpaceAnalysisInterfaces 对象封装的接口 CATIMeasurableInContext 测量出两条曲线间的最大距离,用以评价加工特征逼近花纹曲线质量的好坏。通过调整允许逼近误差以及加工特征的长短与段数,实现花纹重构的优化。

4 方法实现

该轮胎花纹逆向系统以 CATIA V5R19 作为设计平台,Microsoft SQL Server 2008 为数据管理平台,Microsoft Visual Studio 2005 和 CAA_RADE 为开发工具,制定了集花纹的研发设计、轮胎模型性能分析、花纹语义单元管理为一体的研发平台。将花纹逆向设计的操作处理进行了封装整合,实现了花纹的逆向层次化快速建模。为此,将花纹提取与重构执行系统结构设计为三个层次,即数据处理层、数据应用层和数据存储层,如图 20 所示。

图 20 逆向系统体系结构图

在灰度图像转化的过程中,每个分割区域均离散化为一簇胎顶面轮廓的数据点集,将灰度图像中每个横向截面作为重构胎顶曲面的扫描截面数值。通过借助达索公司提供的可视化集成开发环境 RADE(Rapid application development environment),利用 GSMInterfaces 对象封装的函数 CreateSplinePoints()创建胎顶轮廓样条线,函数 CreateCurveSmooth()光顺处理样条线,在将光顺样条线由特征要素 CATSpecObject 转化为拓扑要素 CATBody 后通过全局功能函数 CATFrFTopologicalSweep()扫描生成实际胎顶面。最后将逼近的 2D 加工特征利用全局函数 CATCreateTopProject()投影至胎顶曲面上,完成花纹的重构。

5 试验结果及分析

为验证花纹重构算法的正确性和有效性,通过对半钢子午线轮胎花纹(包括但不限于对称花纹、非对称花纹、单导向花纹)中出现含有波浪型纵沟的独立花纹、独立纵沟横沟花纹、纵沟横沟交汇花纹、纵沟横沟混合交汇花纹 4 种现象的扫描样本进行了试验。试验结果如表所示。表 1 中 205/55R16 表示轮胎的型号,BSER300 为带有波浪型型纵沟的独立花纹类型,MAXXIS656 为直线型纵沟的独立花纹类型,GOODYEAR 为含有横沟与纵沟交汇的花纹类型,GT220-250 为混合横沟与横沟,横沟与纵沟交汇的花纹类型。表中第一行图片是利用德国 Dr.Noll 公司生产的 TriScan Tire 4A 胎面磨损分析设备扫描的轮胎三维点云数据,第二行图片为轮胎胎面点云投影的深度图像,第三行图片是采用混合分割方案和数理统计思想提取的胎面深度图像和灰度图像,第四行图片是根据分离后的深度图像进行特征提取的 3D 横沟花纹边界,并与原始点云进行对比,以验证区域生长法提取边界的准确性,第五行图片是基于灰度图像采用区域生长方法提取到的 2D 横沟花纹边界特征点,第六行图片是利用自适应相切连续直线圆弧拟合的 2D 花纹曲线边界,第七行图片是将 2D 花纹曲线展开到胎顶面上的效果图。表 2 是从轮胎花纹中随机抽取的几个部位,用于验证重构之后花纹与扫描之前轮胎花纹之间的误差。从表中图片和数据可以明显看出,本文提出的基于灰度图像及区域生长的花纹重构算法可以有效地提取出花纹边界特征点,并保证自适应拟合的精确性。

表 1 花纹重构效果图

轮胎型号	205/55R16	205/55R16	225/55R17	225/55R17
图片类型	BSER300	MAXXIS656	GOODYEAR	GT220-250
三维扫描点云
点云投影图像
胎面灰度图像
3D 特征点提取
2D 特征点提取
2D 花纹拟合
3D 花纹重构

表 2 轮胎花纹测量数据与重构花纹相同位置误差对比

mm

	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5	位置 6	位置 7	位置 8	位置 9	位置 10	位置 11	平均值
1 测量数据	21.16	20.71	23.42	26.92	27.37	27.33	26.90	26.17	30.13	26.27	30.16	
1 重构数据	20.79	20.56	23.03	27.00	27.18	27.25	27.00	25.92	30.05	26.15	30.23	
误差值	0.37	0.15	0.39	-0.08	0.19	0.08	-0.10	0.25	0.08	0.12	-0.07	0.17
2 测量数据	21.93	20.04	21.75	27.83	27.94	27.93	27.64	38.22	38.65	38.53	38.69	
2 重构数据	22.014	20.33	21.9	27.86	27.97	27.98	27.8	38.22	38.37	38.36	38.29	
误差值	-0.09	-0.29	-0.15	-0.03	-0.03	-0.05	-0.16	0.00	0.28	0.17	0.40	0.15
3 测量数据	38.73	38.52	40.16	23.76	31.88	23.77	31.86	22.65	33.70	22.60	33.60	
3 重构数据	38.40	38.15	39.88	23.67	31.60	23.71	31.59	22.54	33.52	22.58	33.33	
误差值	0.33	0.37	0.28	0.09	0.28	0.06	0.27	0.11	0.18	0.02	0.27	0.21
4 测量数据	25.42	22.34	24.10	38.05	30.64	32.40	23.91	35.83	38.77	35.32	39.29	
4 重构数据	25.38	22.51	23.72	37.84	30.73	32.18	23.76	35.53	38.72	35.00	29.19	
误差值	0.04	-0.17	0.38	0.21	-0.09	0.22	0.15	0.30	0.05	0.32	0.10	0.18

注：1——BSER300，2——MAXXIS656，3——GOODYEAR，4——GT220-250。

6 结论

(1) 借助混合空间分割分案和主成分统计分析方法完成了胎顶轮廓曲线的重构, 为逆向建模和微细特征的提取提供了基础保障。

(2) 引入灰度图像和区域增长方法, 在维度转化的基础上解决了交汇花纹的识别问题, 节省了花纹重构的时间与效率。

(3) 针对花纹硫化成型过程中使用加工模具的限制, 提出了一种自适应加工特征逼近的花纹重构方法。为语义花纹库的构建做好了准备, 输出的参数信息为花纹开发设计工程师与性能分析工程师提供了参考借鉴价值。

(4) 建立了 3D 花纹的逆向设计流程, 为工程技术人员提供了一整套理论方法, 辅助花纹的设计与开发。

参 考 文 献

- [1] 钱锦锋, 陈志杨, 张三元, 等. 点云数据压缩中的边界特征检测[J]. 中国图象图形学报, 2005(2): 164-169.
QIAN Jinfeng, CHEN Zhiyang, ZHANG Sanyuan, et al. The detection of boundary point of point cloud compression[J]. Journal of Image and Graphics, 2005(2): 164-169.
- [2] 欧阳徕. 轮胎断面轮廓重构关键技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
OUYANG Lai. Key technology research on contour reconstruction of tyres section[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [3] YI An, ZHUO Hanli, CHENG Shao. Feature extraction from 3D point cloud data based on discrete curves[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 6: 87-118.
- [4] 孙殿柱, 范志先, 李延瑞. 散乱数据点云边界特征自动提取算法[J]. 华中科技大学学报, 2008, 36(8): 82-84.
SUN Dianzhu, FAN Zhixian, LI Yanrui. Automatic extraction of boundary characteristic from scatter data[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2008, 36(8): 82-84.
- [5] HUANG S, WANG C. Genetic algorithms for approximation of digital curves with line segments and circular arcs[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2009, 32(4): 437-444.
- [6] KAEWSAIHA P, DEJDUMRONG N. Modeling of Bézier curves using a combination of linear and circular arc approximations[C]//Proceedings of the 9th International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization (CGIV), July 25-27, 2012, Hsinchu, Taiwan. 2012: 27-30.
- [7] SARKAR B, SINGH L K, SARKAR D. Approximation of digital curves with line segments and circular arcs using genetic algorithms[J]. Pattern Recognition Letters, 2003, 24(15): 2585-2595.
- [8] SHU S H, LIN Z Z, DING Y. B-Spline curve approximation with nearly arc-length parameterization[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 513-517: 3372-3376.
- [9] ZHANG Z Q, YAN Q S, ZHENG Z D. Error estimate of approximate double circular arc interpolated method for curve smoothing[J]. Materials Science Forum, 2004, 471: 92-95.
- [10] SABITOV I K, SLOVESNOV A V. Approximation of plane curves by circular arcs[J]. Computational Mathematics and Mathematical Physics, 2010, 50(8): 1279-1288.
- [11] YUE Y. Bi-arc approximation algorithm for NURBS curve in the numerical control machining[C]//Control Conference (CCC), Beijing, July 29-31, 2010.
- [12] MAIER G, JANDA F, SCHINDLER A. Minimum description length arc spline approximation of digital curves[C]//Image Processing (ICIP), 2012 19th IEEE International Conference, September 30-October 3, 2012, Florida. 2012: 1869-1872.
- [13] 卢维欣, 万幼川, 何培培, 等. 大场景内建筑物点云提取及平面分割算法[J]. 中国激光, 2015(9): 344-350.
LU Weixin, WAN Youchuan, HE Peipei, et al. Extracting and plane segmenting buildings from large scene point cloud[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015(9): 344-350.
- [14] ZHU H, LI C, ZHANG L L, et al. River channel extraction from SAR images by combining gray and morphological features[J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2015, 34(7): 2271-2286.
- [15] 庞世燕, 刘亚文, 左志奇, 等. 结合区域增长法和 TIN 边缘分割的建筑物立面几何特征提取[J]. 武汉大学学报, 2015(1): 102-106.
PANG Shiyan, LIU Yawen, ZUO Zhiqi, et al. Combination of region growing and TIN edge segmentation for extraction of geometric features on building facades[J]. Journal of Wuhan University, 2015(1): 102-106.
- [16] 丁尤蓉, 王敬东, 邱玉娇, 等. 基于自适应阈值的 FAST 特征点提取算法[J]. 指挥控制与仿真, 2013(2): 47-53.
DING Yourong, WANG Jingdong, QIU Yujiao, et al. FAST feature detection algorithm based on self-adaptive threshold selection [J]. Command Control & Simulation,

- 2013(2): 47-53.
- [17] 陈义仁, 王一宾, 彭张节, 等. 一种改进的散乱点云边界特征点提取算法[J]. 计算机工程与应用, 2012(23): 177-180.
- CHEN Yiren, WANG Yibin, PENG Zhangjie, et al. Improved algorithm for extraction of boundary characteristic point from scattered point cloud [J]. Computer Engineering and Applications, 2012(23): 177-181.
- [18] 邵能建, 吴德伟, 戚君宜. 基于改进 SIFT 的高鲁棒性特征点提取方法[J]. 航空学报, 2012(12): 2313-2321.
- TAI Nengjian, WU Dewei, QI Junyi. A method to extract high robust keypoints based on improved SIFT [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012(12): 2313-2321.
- [19] 程效军, 方芳. 基于形态学的散乱点云轮廓特征线提取[J]. 同济大学学报, 2014(11): 1738-1743.
- CHENG Xiaojun, FANG Fang. Morphology-based scattered point cloud contour extraction[J]. Journal of Tongji University, 2014(11): 1738-1743.
-
- 作者简介:** 董玉德(通信作者), 男, 1966 年出生, 博士, 教授。研究方向为计算机辅助设计(CAD/CAE/PDM)。
E-mail: dydjiaoshou@126.com
- 张荣团, 男, 1990 年出生。研究方向为数字化设计与制造。
E-mail: rongtuan_zhang@163.com