

灰度累积投影直方图在胎冠缺陷检测中的应用

韩延彬^{1,2*}, 王杰^{1,2}, 夏英杰^{1,2}, 李金屏^{1,2}

(1. 济南大学 信息科学与工程学院, 济南 250022; 2. 济南大学 山东省网络环境智能计算技术重点实验室, 济南 250022)

(*通信作者电子邮箱 ise_hanyb@ujn.edu.cn)

摘要:针对轮胎胎冠帘线搭接缺陷的自动检测问题,提出一种基于胎冠X射线图像的检测方法。首先,依据胎冠的X射线影像和投影角计算胎冠成像的灰度累积投影曲线;然后,计算曲线的局部峰值能量分布;其次,采用前 n 个最大峰值能量构造投影曲线的能量特征向量,并利用支持向量机(SVM)分类器进行最大投影曲线的判别;最后,利用位置反演计算对缺陷进行定位。仿真实验结果表明,所提方法可以对生产过程中采集的1000幅胎冠图像进行有效的缺陷检测,其最高检测正确率可达97.7%。

关键词:灰度累积;胎冠缺陷;帘线搭接;峰值能量;支持向量机

中图分类号: TP391.413 **文献标志码:** A

Application of gray cumulative projection histogram in detection of tire crown crack

HAN Yanbin^{1,2*}, WANG Jie^{1,2}, XIA Yingjie^{1,2}, LI Jinping^{1,2}

(1. School of Information Science and Engineering, University of Jinan, Jinan Shandong 250022, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Network Based Intelligent Computing, University of Jinan, Jinan Shandong 250022, China)

Abstract: For automatic detection of tire crown cord overlap defect, a detection method based on the crown X ray image was presented. Firstly, the gray cumulative projection curves that X-ray image was projected along different angles were obtained. Secondly, the local peak energy distribution of curves were calculated and the energy feature vector was constructed by the n largest peak energy values. Thirdly, the tire crown crack image was recognized by the maximum projection curve which could be distinguished through the energy feature vector by Support Vector Machine (SVM). Lastly, using the position inverse calculation, the tire crown crack was located. The experimental results demonstrate that the proposed approach was effective to detect the defects of tire crown which caused by tire cord overlap. The highest rate of correct detection can reach 97.7% in the 1000 crown images collected by the process of production.

Key words: gray cumulation; tire crown crack; cord overlap; peak energy; Support Vector Machine (SVM)

0 引言

随着轮胎结构缺陷引发的事故逐渐增多,制约轮胎行业发展的质量检测方法成为业内研究的重点^[1-2]。轮胎结构缺陷主要指因生产工艺以及生产设备等因素而导致胎侧和胎冠出现钢丝稀疏、弯曲、杂质、帘线搭接等问题。由于轮胎断面形状设计理论源于帘线受力与轮廓形状的关系,所以帘线的搭接质量影响轮胎的受力负荷,成为影响轮胎安全的重要因素^[3-4]。

轮胎的结构缺陷大多可以通过X射线技术清晰成像^[5]。目前许多基于图像分析技术的轮胎缺陷自动检测系统正在被研究和应用,从而减少由人工疲劳而产生的误检和漏检。国外如德国的科尔曼(Collmann)公司、依科视郎(Yklon)公司、法国的赛博耐特(Cybernetics)公司等,国内一些专家学者也在轮胎X射线成像的基础上通过改进图像处理技术提升检测的性能。如:文献[6]利用Canny边缘检测和Curvelet变换来检测轮胎表面的缺陷;文献[7]通过计算轮胎纹理周期,利

用纹理缺陷区域灰度异常的特点检测缺陷,但其检测效果受纹理基元尺寸和图像分块的大小影响;文献[8]分析了Canny算子在轮胎缺陷检测的应用,但其应用主要针对胎侧帘线的缺陷检测;文献[9]从结构缺陷和纹理曲线两方面分析缺陷检测的方法,其胎冠缺陷仍然采用纹理特征来进行分析。本文主要针对胎冠帘线搭接缺陷的检测方法进行讨论。

本文提出的算法主要利用灰度累积投影信息,获取不同角度上的灰度累积投影曲线,并据此计算体现局部区域波动性的峰值能量,进而采用代表曲线整体波动分布情况的前 n 个最大峰值能量组成投影曲线的能量特征向量,并构造支持向量机(Support Vector Machine, SVM)分类器实现最大灰度累积曲线的判别;最后利用位置反演计算完成缺陷区域定位。本文从理论上分析了缺陷区域的灰度累积投影曲线、最大投影曲线、曲线局部波动分布之间的关系,并利用实验仿真进一步说明了算法的有效性。本文使用图像数据均由山东玲珑轮胎股份有限公司提供。图1为本文提出方案的流程示意图。

从图1中可以看出,在获取胎冠图像后,代表灰度累积投

收稿日期:2014-04-15;修回日期:2014-05-15。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61203341);山东省高等学校科技计划项目(J12LN19)。

作者简介:韩延彬(1979-),男,山东潍坊人,副教授,主要研究方向:模式识别、图像处理;王杰(1989-),男,山东临沂人,硕士研究生,主要研究方向:图像处理、模式识别;夏英杰(1978-),男,山东济南人,讲师,硕士,主要研究方向:图像处理、模式识别;李金屏(1968-),男,河南焦作人,博士,CCF会员,主要研究方向:机器学习、图像处理。

影的能量特征向量作为检测方案的研究对象,而最大投影曲线的判别是分析图像是否存在缺陷的关键,缺陷区域的定位是通过位置反演计算实现的。

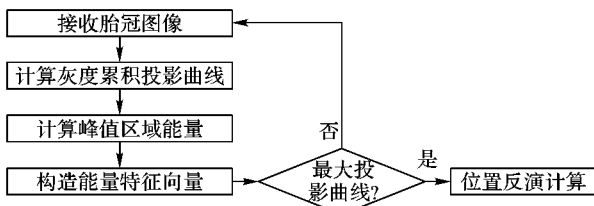


图1 胎冠帘线搭接缺陷检测流程

1 胎冠帘线搭接缺陷成像分析

胎冠X射线成像是依据轮胎内部各部分材料对X射线吸收不同,利用射线穿透能力形成灰度图像^[5],所以依据X射线可以清晰地展示帘线在胎冠中的分布。如胎冠中出现帘线搭接重叠(即某钢丝帘线胶层接口部分出现重合),则该区域断面组织密度高,X射线吸收较多,其透射成像灰度较暗(如图2(a)所示);反之胎冠中出现接口开缺陷(即某钢丝帘线胶层没有完全吻合),则该区域断面组织密度低,X射线吸收较少,其透射成像灰度较亮(如图2(b)所示)。

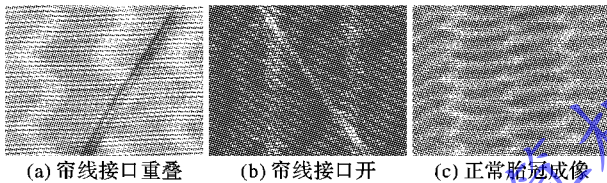


图2 胎冠X射线成像

从图2所示的结果来看(图像增强之后),利用X射线成像能够清晰看出胎冠内部的帘线结构,而根据轮胎生产工艺,胎冠X射线图像实际上是胎体层、带束层、胎冠层、胎面底胶、胎面花纹等射线图像的叠加,且胎冠中的带束层又由多层钢丝帘线构成^[10],不同规格的轮胎其胎冠图像也千差万别,其纹理结构极其复杂,所以利用传统纹理分析胎冠结构、帘线搭接缺陷较为困难^[11]。

从图2(a)和图2(b)可以看出,帘线接口缺陷成像区域的灰度和纹理结构异于其邻域,形成显著地裂痕带,称为胎冠裂痕;而理想情况下,胎冠断面组织密度取决于每层钢丝帘线和橡胶分布,其成像灰度明暗分布具有一定的规律(如图2(c)所示)。为了方便后续问题的讨论,把裂痕区域相异于邻域的灰度和纹理所形成的直线区域与水平坐标轴形成的夹角称为胎冠裂痕倾角。

从轮胎的生产工艺流程分析可以得出,同一规格型号的轮胎,其帘线对接的角度大致相同,也即针对同一规格型号轮胎,如果胎冠出现胎冠搭接缺陷,其缺陷的倾角方向大致相同。课题组对从生产中获取800幅不同轮胎规格的存在裂痕的样本图像进行倾角统计,发现其分布区间集中于 $[50^\circ, 70^\circ]$ 和 $[140^\circ, 160^\circ]$,所以实际对胎冠图像进行的灰度投影分析也集中在此区间。

2 灰度累积投影曲线

2.1 裂痕信息与灰度累积投影曲线

下面给出本文所涉及灰度累积投影以及相关的计算信

息。

定义1 灰度图像经过旋转后某一列上像素灰度的累积值称为该列的灰度累积投影值,旋转的角度称为投影角。由所有灰度投影值构成的曲线称为灰度累积投影曲线,简称投影曲线。灰度累积投影值是图像旋转后某列图像数据灰度统计信息的量化,其计算公式如式(1)所示:

$$V_i^\theta = \frac{\sum_{x,y} \delta(i - \text{Int}(x \cos(\theta) - y \sin(\theta))) P(x,y)}{\sum_{x,y} \delta(i - \text{Int}(x \cos(\theta) - y \sin(\theta)))} \quad (1)$$

其中: θ 为投影角(图像旋转角度); V_i^θ 表示图像在旋转 θ 角度之后,第 i 列的灰度累积投影值; P 表示胎冠X射线成像,且对于确定的 x,y 值, $P(x,y)$ 表示当前像素的灰度值; δ 为单位阶跃函数; $\text{Int}(\cdot)$ 为取整函数;分母为向量归一化因子,保证累积投影值分布范围为 $[0, 255]$ 。关于灰度累积投影存在如下结论。

如果图像中存在倾角为 φ 的直线,则一定存在投影角 θ 对应的灰度累积投影值最大,且 $\theta = 90^\circ - \varphi$,即待测直线在图像旋转后与 x 轴垂直时其灰度累积投影值最大。为说明此结论的正确性,设计如图3所示的成像示意图。

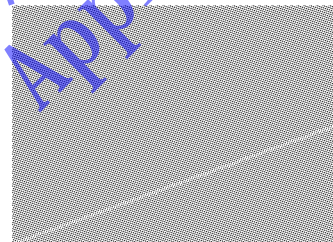


图3 灰度累积投影示意图

图3所包含的直线和水平线的夹角为 φ ,直线的灰度值为 g_1 ,背景的灰度值为 g_2 ($g_2 < g_1$);图像的坐标原点在左下方,即整个图像在平面第一象限内。假设图像旋转的角度为 θ ,旋转中心为原点,根据式(1),直线在图像旋转后原点的灰度累积投影值为:

$$V^\theta = \frac{\sum_{x,y} \delta(\text{Int}(x \cos(\theta) - y \sin(\theta))) P(x,y)}{\sum_{x,y} \delta(\text{Int}(x \cos(\theta) - y \sin(\theta)))} \quad (2)$$

由于图像中存在 g_1 和 g_2 两种像素,所以式(2)转换为式(3):

$$V^\theta = \frac{g_1 \sum_{P(x,y)=g_1} \delta(\text{Int}(x \cos(\theta) - y \sin(\theta)))}{\sum_{x,y} \delta(\text{Int}(x \cos(\theta) - y \sin(\theta)))} + \frac{g_2 \sum_{P(x,y)=g_2} \delta(\text{Int}(x \cos(\theta) - y \sin(\theta)))}{\sum_{x,y} \delta(\text{Int}(x \cos(\theta) - y \sin(\theta)))} \quad (3)$$

令

$$w_1 = \frac{\sum_{P(x,y)=g_1} \delta(\text{Int}(x \cos(\theta) - y \sin(\theta)))}{\sum_{x,y} \delta(\text{Int}(x \cos(\theta) - y \sin(\theta)))}$$

$$w_2 = \frac{\sum_{P(x,y)=g_2} \delta(\text{Int}(x \cos(\theta) - y \sin(\theta)))}{\sum_{x,y} \delta(\text{Int}(x \cos(\theta) - y \sin(\theta)))}$$

则

$$V^0 = g_2 w_2 + g_1 w_1 = g_2 + (g_1 - g_2) w_1; w_1 + w_2 = 1 \quad (4)$$

因为 $g_1 > g_2$, 根据式(4) 所描述的含义可以看出, 满足灰度累积投影值越大, 应使 w_1 越大。当 $w_1 = 1$, V^0 最大, 此时原点的灰度累积投影值完全取决于 g_1 , 分析图3 可以得出结论, 此时直线处于垂直状态, 也即投影角 $\theta = 90^\circ - \varphi$ 。该结论从理论上说明了缺陷区域和最大投影曲线的关系。图4 展示了胎冠X射线成像及其在倾角上的投影曲线。

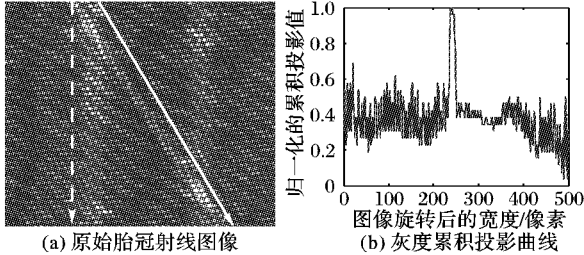


图4 胎冠X射线成像在特定角度上的灰度累积投影曲线

图4(a) 中的实线箭头描述了裂痕的倾角方向, 而图4(b) 曲线中的最大峰值正是由于图像中存在裂痕缺陷而导致的, 因此图像二维裂痕缺陷的检测转化为一维投影曲线分析。需要说明的是依据虚线箭头进行灰度累积也同样能够产生类似于图4(b) 的峰值, 这就是胎冠固有纹理结构带来的干扰, 而这种干扰可以根据第2章论述的先验倾角区间消除。针对帘线错搭产生的“暗”裂痕, 只需取反就可, 不再进行赘述。根据投影角的定义和第2章论述的倾角范围, 实际计算过程中投影角的取值范围是 $[-70^\circ, -50^\circ]$ 和 $[20^\circ, 40^\circ]$, 该角度区间即为先验投影角。

在此特别说明, 文中所涉及归一化操作实际是最大值归一化, 其表达式如式(5) 所示:

$$\bar{S} = \frac{S}{\max(s_i)}; s_i \in S \quad (5)$$

其中: S 为数据集, \bar{S} 为最大值归一化数据集, s_i 为源数据集中第 i 个元素。式(5) 所描述的归一化操作, 因将元素最大值视为1, 从而在不影响元素分布的基础上, 突出集合中较大值元素, 抑制集合中较小值元素。

2.2 投影曲线分析

根据前面的论述, 只需计算在特定投影角上的投影曲线即可, 这将大幅度减少系统的时间开销。限于篇幅, 图5 给出了图5(a) 在先验投影角 $\theta = -54^\circ$ 、 -62° 和 -66° 的投影曲线。

由于裂痕范围较宽, 图5(a) 所示裂痕的倾角区间是 $[144^\circ, 146^\circ]$, 对应投影角区间为 $[-56^\circ, -54^\circ]$ (在先验投影角的区间内), 取其 -54° 的投影曲线如图5(b) 所示。从图5(b) 所示的结果看出, 明显存在相异于其他区域的波动区间(虚线框所示), 该区域的峰值是由裂痕区域灰度累积产生; 而胎冠成像在 -62° 和 -66° 投影角上的投影曲线(如图5(c) 和图5(d)) 则不存在类似图5(b) 所示的波动区域, 因此说明灰度累积投影曲线能够表征裂痕缺陷存在。在此定义最大累积投影的相关概念。

定义2 胎冠图像在裂痕倾角方向上产生存在显著局部波动区域的投影曲线称为最大投影曲线, 该角度对应的投影角称为最大投影角, 且最大投影角和裂痕倾角互余。

定义3 投影曲线中波峰和相邻谷之间的邻域称为峰值

邻域, 如图5(b) 虚线框所示。

定义4 最大投影曲线中波动异常于邻域的峰值邻域称为最大投影区域, 如图5(b) 虚线框所示。

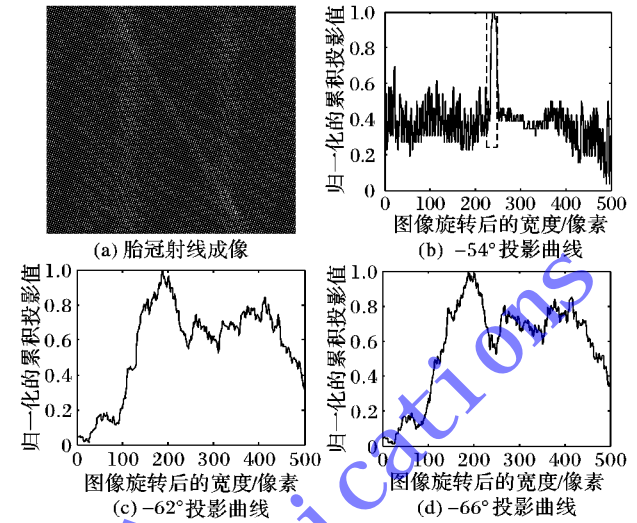


图5 不同投影角上的灰度累积特征曲线

图5(b) 所示的最大投影区域经过位置反演计算恰好对应于图5(a) 所示裂痕区域, 进一步说明了最大投影曲线、最大投影区域和胎冠裂痕之间的关系。裂痕位置的反演计算如图6 所示。

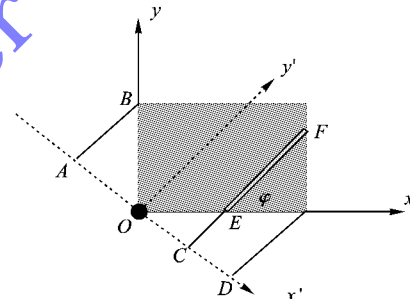


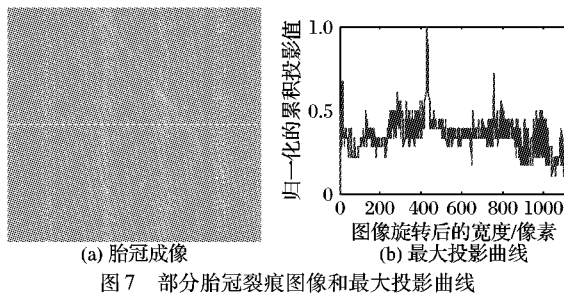
图6 裂痕位置反演计算示意图

图6 中灰色区域是胎冠成像图, EF 是裂痕, 实线坐标系 (xOy) 是图像所在的原始坐标系, 虚线是图像旋转后的坐标系 $(x'Oy')$ 。设裂痕的倾角为 φ , 则图像旋转 $90^\circ - \varphi$ 之后, 裂痕 EF 的延长线 $FC \perp x'$ 轴, 且在累积特征向量中, A 点对应于0 标号, C 点对应的标号 i 满足裂痕灰度累积投影值最大, 而 $CO = CA - OA = i - OB \times \cos \varphi$, 设图像的高度为 h , 则 $CO = i - h \times \cos \varphi$, 而 $EO = OC / \sin \varphi$, 所以 CF 在坐标系 xOy 中的表达式如式(6) 所示:

$$y = \left(x - \frac{i - h \times \cos \varphi}{\sin \varphi} \right) \tan \varphi \quad (6)$$

式(6) 称为裂痕位置反演公式, y 代表了裂痕在原图像中的线性表达式(位置)。该公式验证了图5(b) 中最大投影区域、投影角和图5(a) 的裂痕位置关系, 也验证了利用灰度累积投影进行裂痕检测的有效性。

根据图5 可以看出, 存在裂痕的胎冠图像也只有最大投影角附近才能产生诸如图5(b) 的最大投影曲线, 角度一旦发生变化, 其灰度累积投影值迅速降低, 甚至消失, 如图5(c) 和5(d)。而实际不存在裂痕缺陷的胎冠图像在先验投影角上的投影曲线都不存在如图5(b) 所示的最大投影区域。图7 列出了另一幅存在裂痕的胎冠图像及其最大投影曲线。



3 最大投影曲线的最大投影区域分析

3.1 投影曲线局部区域波动分析

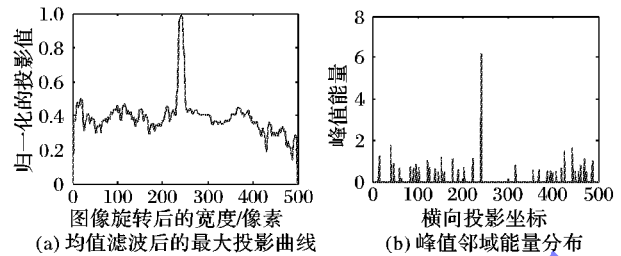
根据上述分析可以看出,最大投影曲线中的最大投影区域对应于帘线搭接缺陷,因此如何从灰度累积投影曲线中分析出有效的最大投影区域是检测胎冠裂痕缺陷算法的关键。从图5、图7的投影曲线来看,存在裂痕缺陷的胎冠图像其最大投影曲线存在波动异常的最大投影区,而一般投影曲线出现这种状况的几率很低。本文采用曲线局部的 Laws 能量^[12]表征峰值邻域能量,其计算公式如式(7)所示:

$$E_i = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} (x_j - \bar{x}_i)^2 \quad (7)$$

其中: x_i 为邻域中心, \bar{x}_i 为邻域均值,邻域半径为 $n/2$ 。整个公式描述了区域数据围绕均值的波动情况,如果局部区域波动较大,则 E_i 较大;反之较小。针对图5(b)所示的最大投影曲线,其峰值邻域局部能量(简称峰值能量)分布如图8所示。

为了消除曲线噪声对波峰定位的干扰,计算峰值能量分布的投影曲线为平滑后曲线,图8(a)所示投影曲线为滤波后

数据。从图8中可以看出最大投影区域的波动幅度最大(图8(a)),对应峰值区域的能量也最大(图8(b)),且其能量异于曲线其他峰值区域的能量分布。



3.2 投影曲线的特征提取

根据2.1节所述投影曲线局部区域不稳定性分析,最大投影区域的波动往往较为剧烈,其局部能量也最大;而其他局部区域的曲线波动往往相似,因此其峰值邻域的能量分布也类似,所以投影曲线能量分布可以表征投影曲线本身,即如果投影曲线的最大峰值能量异于其他峰值能量分布,则认为该投影曲线为最大投影曲线,进而最大峰值区域为最大投影区域;否则该曲线为一般投影曲线。图9列出图7所示投影曲线峰值邻域能量的前10项(消除了曲线边界的峰值邻域能量的干扰,相关数据均归一化)。

从排序之后的能量分布(图9)可更加清晰地看出,由于最大投影区域的波动状况比其他区域的波动情况剧烈,因此其能量远远高于其他区域的能量,且归一化操作突出了这种特性,而正常胎冠图像形成的投影曲线没有类似信息,如图10所示。

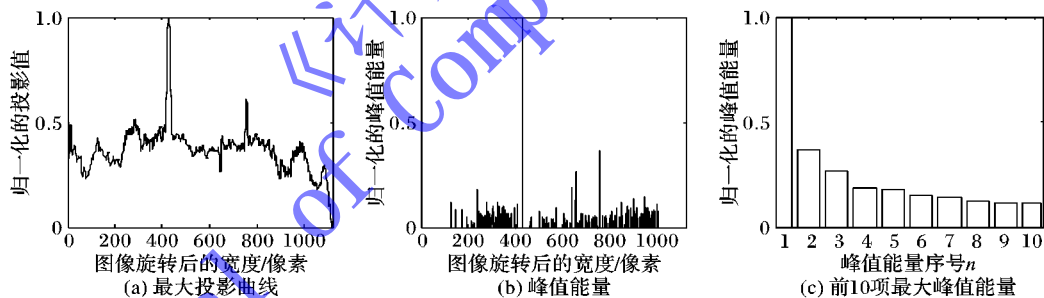


图9 最大投影曲线局部能量部分示意图

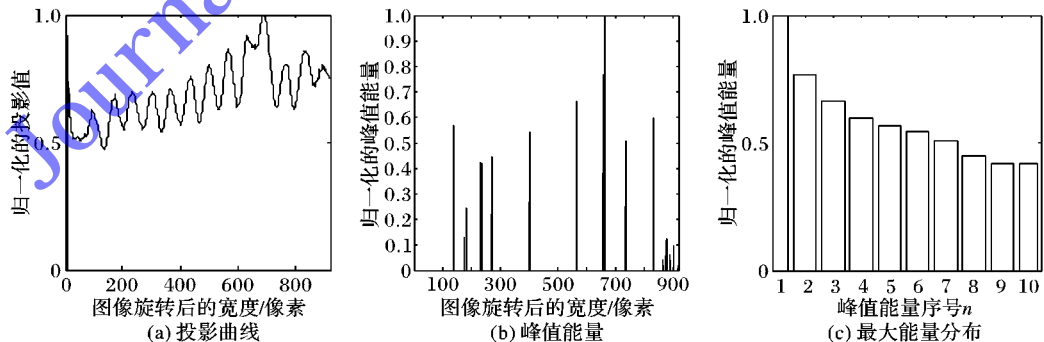


图10 正常胎冠图像的投影曲线、峰值能量、最大能量分布

综上所述,如果前 n 项最大能量分布比较均衡则表明曲线波动中无明显异常;否则表明该曲线存在波动异常区域,即该曲线为最大投影曲线。因此,前 n 个最大峰值能量的分布体现了投影曲线中最大峰值邻域波动和其他峰值邻域波动的关系,据此能够进行最大投影曲线的识别和最大投影区域的检

测,并利用最大能量峰值对应位置和式(6)定位裂痕位置。在此把前 n 个峰值量构成的特征向量称为能量特征向量,从而将能量特征向量和最大投影曲线的判别关联起来。

3.3 最大投影曲线的判别和曲线位置的定位

根据前面论述胎冠图像的裂痕缺陷和最大投影曲线相

关,而最大投影曲线和能量特征向量相对应,因此通过对能量特征向量的有效分类能够完成裂痕曲线的判别,且利用最大投影区域所在的位置和式(6)标定裂痕区域。本文利用SVM分类器对能量特征向量进行分类、判别。该分类器是基于结构风险最小化理论在特征空间中建构最优分割超平面,并且针对线性不可分的情况下通过使用非线性映射算法将低维输入空间线性不可分的样本转化为高维特征空间使其线性可分,其分类性能优异^[13]。下面是投影曲线判别和定位的算法流程。

第1步 依据先验投影角 φ ,计算胎冠图像的投影曲线。

第2步 提取投影曲线的峰位 $T(T_i \neq 0)$,表示对应投影曲线位置为峰)和谷位 $V(V_i \neq 0)$,表示对应投影曲线位置为谷),并以峰位为 T_i 中心,以 i 左右 V_i 不为0的最小区域为邻域,计算峰值能量 $M(M_i = 0)$,表示投影曲线当前位置不是峰位)。

第3步 将 M 进行降序排序,取前 n 个峰值能量作为能量特征向量 Φ ,并保留最大峰值能量位置 m 。

第4步 将 Φ 输入SVM分类器进行分类判别,如果是最大投影曲线则转第5步;否则转第1步。

第5步 根据 m 和 φ 反演计算裂痕位置。

4 实验结果分析

在整个实验过程中,设计两种方案分别测试算法定位缺陷和检测缺陷的能力。为了提高计算效率,将投影角区间离散化,分别对 -70° 、 -66° 、 -62° 、 -58° 、 -54° 、 -50° 、 20° 、 24° 、 28° 、 32° 、 36° 、 40° 共12个角度的投影曲线进行分析。

第1套方案 以800幅缺陷图像为研究对象。首先在12个先验角度上提取每幅图像代表投影曲线的能量特征向量,形成 n 维能量特征空间,每一个特征向量代表一个样本点。因此800幅图像将产生9600(800×12)个样本点,其中800

个样本点对应于最大投影曲线。设计本方案目的是检验仅利用能量特征向量和SVM分类器能否正确区分最大投影曲线和一般投影曲线对应的样本点,即检验缺陷定位是否准确。

第2套方案 在第1套方案的基础上添加200幅没有缺陷的胎冠图像,即样本点的规模扩大至12000个。设计本方案的目的是检验仅利用能量特征向量和SVM分类器能否正确检测出存在缺陷的胎冠图像,并不考虑缺陷定位引起的误差。

两套方案均取4次交叉验证来检测算法的性能。为了保证样本的多样性,每份样本集中含有200个样本点对应于最大投影曲线(占缺陷图像总量的1/4)。图11体现了能量特征向量的维数对检测正确率的影响。

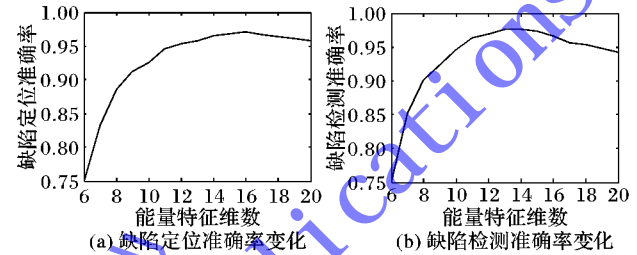


图11 缺陷检测准确率随能量特征维数变化趋势

依据图9~10的最大能量排序分布,在本文讨论的实验方案中,能量特征向量维数取值范围是 $[6, 20]$ 。从图11可看出随着向量维数的增加,缺陷定位准确率和检测准确率大幅提高,在维数取14和15时分别达到最高的检测准确率0.977和0.972,这是因为随着引入能量分量的增加最大投影曲线和普通投影曲线的能量分布差别迅速扩大;但是随着维数的增加,能量特征向量越来越侧重整体曲线能量的分布描述,虽然两者之间的差别逐步缩小,但前几项能量差别在分类中仍起主要作用,所以检测正确率虽然开始下降,但是变化幅度较小。图12列出了最大投影曲线和一般投影曲线前40个特征分量,展示了利用欧氏距离测度分析两种曲线的差异度随向量维数增加的变化曲线。

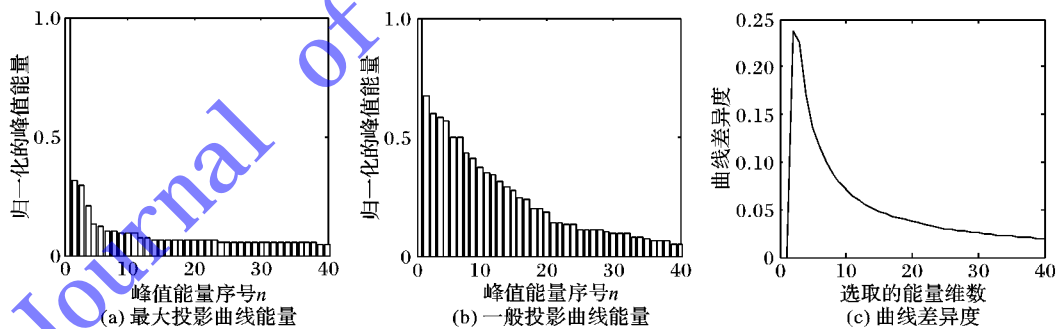


图12 投影曲线能量特征(前40特征分量)

欧氏距离测度公式如式(8)所示:

$$d_n = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (8)$$

其中: x_i, y_i 分别是两种曲线的能量特征的第 i 个分量, d_n 越大代表两种曲线的差别越大。从图12所示的数据来看,随着维数的增加,两种曲线的能量特征分量相差越来越小,特别是当 $n > 25$ 时 $|x_i - y_i| \rightarrow 0$,对计算两类曲线的差别贡献丧失,导致距离测度 d_n 降低,可以证明 $\lim_{n \rightarrow \infty} d_n = 0$ (如图12(c)所示),因此依据能量特征向量分类的准确率并不随维数的增加而增加。

另外,图11(a)所示的缺陷定位准确率误差主要由较宽

裂痕产生,即在2个以上的倾角对应的投影角产生最大投影曲线(如3.2节分析),因此其裂痕位置反演计算产生误差;而图11(b)胎冠缺陷检测准确率误差主要是由于正常胎冠图像噪声干扰了投影曲线的计算,产生了存在类似最大投影区域的投影曲线,导致没有缺陷的胎冠图像误检为缺陷图像。

5 结语

本文依据胎冠搭接缺陷在X射线成像中的特性,提出一种基于灰度累积投影的胎冠帘线搭接缺陷检测方法,从而将二维图像理解转换为一维信号分析。该方法从胎冠帘线搭接

工艺入手分析帘线搭接倾角范围,进而利用从先验倾角上的灰度累积投影曲线提取的峰值能量构造投影曲线的能量特征向量,最终利用SVM分类器、位置反演计算实现缺陷图像的判别和裂痕缺陷的定位。该方法的创新点在于充分利用缺陷成像区域的灰度和纹理相异于其邻域信息的特性,摆脱了纹理基元分析在胎冠帘线搭接缺陷检测中的局限性,使算法具有普适性。但该算法仍然依赖于胎冠帘线工艺决定的搭接倾角,因此在如何去除裂痕角度先验知识以及降低算法复杂度等方面均需要作进一步的研究。

致谢 感谢山东玲珑轮胎股份有限公司对课题的资助,尤其感谢张彩明教授、郭强博士在课题研究中给予的支持和有益的讨论。

参考文献:

- [1] ABOU-ALI M G, KHAMIS M. TIREDDX: an integrated intelligent defects diagnostic system for tire production and service [J]. *Expert Systems with Applications*, 2003, 24(3): 247-259.
- [2] REN L, AN D, SHEN Y. Causes for defects of carcass ply cord in TBR tire and their countermeasures [J]. *Tire Industry*, 2004, 24(9): 559-561. (任利利, 安登峰, 申玉德. 全钢载重子午线轮胎胎体帘布质量缺陷原因分析及解决措施[J]. 轮胎工业, 2004, 24(9): 559-561.)
- [3] CHU C-H, SONG M-C, LUO V C S. Computer aided parametric design for 3D tire mold production [J]. *Computers in Industry*, 2006, 57(1): 11-25.
- [4] TÖNÜK E, ÜNLÜSOY Y S. Prediction of automobile tire cornering force characteristics by finite element modeling and analysis [J]. *Computers and Structures*, 2001, 79(13): 1219-1232.
- [5] HE Q, JI X, ZHAO S, *et al.* X-ray inspection line for all-steel radial truck tire [J]. *Tire Industry*, 2003, 23(8): 478-482. (何清滨, 姬新生, 赵松善, 等. 全钢载重子午线轮胎X光检验线[J]. 轮胎工业, 2003, 23(8): 478-481.)
- [6] ZHANG Y, LI T, LI Q. Defect detection for tire laser shearography image using curvelet transform based edge detector [J]. *Optics and Laser Technology*, 2013, 47: 64-71.
- [7] HUANG Z, LIU Z, ZHU M, *et al.* Defects on-line detection of tire textures based on statistical features [J]. *Optical Technique*, 2009, 35(1): 60-62. (黄战华, 刘正, 朱蒙, 等. 基于统计特征的轮胎纹理缺陷在线检测[J]. 光学技术, 2009, 35(1): 60-62.)
- [8] FENG X, HAO Z, FENG Y, *et al.* Edge detection in the tire X-ray detection [J]. *Computerized Tomography Theory and Applications*, 2010, 19(3): 61-66. (冯霞, 郝振平, 冯燕, 等. X射线在轮胎边缘检测中的应用[J]. CT理论与应用研究, 2010, 19(3): 61-66.)
- [9] ZHU Y, LIU W, QIU X. Development of all-steel radial tire inspection and defect recognition system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(5): 129-133. (朱越, 刘文耀, 裘稀石. 全钢子午线轮胎缺陷识别系统的研制[J]. 光电工程, 2009, 36(5): 129-133.)
- [10] ZHU Z, LI Z, HE H, *et al.* Application of finite element method in structure analysis of passenger car radial tire [J]. *Tire Industry*, 2012, 32(1): 15-21. (朱振华, 李治国, 何豪明, 等. 有限元法在轿车子午线轮胎结构分析中的应用[J]. 轮胎工业, 2012, 32(1): 15-21.)
- [11] HAN Y, YIN J, LI J. Research of an improved LBP algorithm in texture classification based on rotation invariance and statistical phase distribution [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2011, 34(3): 583-592. (韩延彬, 尹建芹, 李金屏. 基于图元旋转不变性和相位统计信息的LBP算法在纹理分类中的研究[J]. 计算机学报, 2011, 34(3): 583-592.)
- [12] LI J, LI Q. Detection of camouflaged moving objects based on laws energy and varying frequency [J]. *Chinese Journal of Stereology and Image Analysis*, 2011, 16(1): 18-23. (李金屏, 李倩. 基于Laws能量和变化频次的伪装色移动目标检测[J]. 中国体视学与图像分析, 2011, 16(1): 18-23.)
- [13] CRISTIANINI N, SHAW-TAYLOR J. An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods [M]. LI Z, WANG M, ZENG H, *et al.*, translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. (CRISTIANINI N, SHAW-TAYLOR J. 支持向量机导论[M]. 李正国, 王猛, 曾华军, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2004.)
- [7] BREUNIG M M, KRIEGLER H P, NG R T, *et al.* LOF: identifying density-based local outliers [J]. *ACM SIGMOD Record*, 2000, 29(2): 93-104.
- [8] XUE A, JU S, HE W, *et al.* Study on algorithms for local outlier detection [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2007, 30(8): 1455-1463. (薛安荣, 鞠时光, 何伟华, 等. 局部离群点挖掘算法研究[J]. 计算机学报, 2007, 30(8): 1455-1463.)
- [9] MOUNCE S R, MOUNCE R B, BOXALL J B. Novelty detection for time series data analysis in water distribution systems using support vector machines [J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2011, 13(4): 672-686.
- [10] TIAN J, GU H. Outlier one class support vector machines [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2010, 32(6): 1284-1288. (田江, 顾宏. 孤立点一类支持向量机算法研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(6): 1284-1288.)
- [11] BUDALAKOTI S, SRIVASTAVA A, AKELLA R, *et al.* Anomaly detection in large sets of high-dimensional symbol sequences, NASA TM-2006-214553 [R]. Moffett Field: NASA Ames Research Center, 2006.
- [12] HILL D J, MINSKER B S. Anomaly detection in streaming environmental sensor data: a data-driven modeling approach [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2010, 25(9): 1014-1022.
- [13] BASU S, MECKESHEIMER M. Automatic outlier detection for time series: an application to sensor data [J]. *Knowledge and Information Systems—Special Issue on Mining Low-Quality Data*, 2007, 11(2): 137-154.
- [14] POKRAJAC D, LAZAREVIC A, LATECKI L J. Incremental local outlier detection for data streams [C]// CIDM 2007: Proceedings of the 2007 IEEE Symposium on Computational Intelligence and Data Mining. Piscataway: IEEE Press, 2007: 504-515.
- [15] NG W W, PANU U S, LENNOX W C. Chaos based analytical techniques for daily extreme hydrological observations [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 342(1): 17-41.
- [16] FAWCETT T. An introduction to ROC analysis [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2006, 27(8): 861-874.

(上接第2220页)