

文章编号 1004-924X(2016)增-0690-11

剪切痕迹激光检测信号溯源系统的设计与实现

孙亚军¹, 潘楠^{1,2*}, 刘益³

- (1. 昆明理工大学机电工程学院, 云南昆明 650500;
2. 云南省高校振动与噪声重点实验室, 云南昆明 650500;
3. 昆明信诺莱伯科技有限公司, 云南昆明 650228)

摘要:针对目前图像及 3D 扫描方法难以通过痕迹有效快速溯源剪切工具的弊端, 设计并实现了一套剪切痕迹激光检测信号溯源系统, 该系统由运动控制子系统、激光检测子系统和显微摄像子系统三部分组成。通过夹持线缆断头, 首先控制单点激光位移传感器拾取剪切类线性痕迹的表面特征信号, 随后利用小波分解对拾取信号进行降噪, 得到降噪后的信号, 利用信号间方差大小差异度进行痕迹特征相似重合度匹配, 使用梯度下降法进行参数的机器学习, 构建相应的代价函数, 通过不断的迭代使得代价函数值的代价最小, 最终实现对应剪切工具的快速溯源。通过实际剪切痕迹多样本匹配试验对该系统效能进行测试, 基于 1000 组样本对 25 组测试数据进行批量溯源试验, 总计耗时近 1.5 s, 正确溯源率为 98%, 该实验证明了本系统对剪切痕迹激光检测信号溯源的准确性和有效性。

关键词:剪切工具; 激光检测; 梯度特征; 机器学习; 小波降噪

中图分类号: TN911.72, TH-39 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0690

Design and realization of laser detection signal traceability system with shearing trace

SUN Ya-jun¹, PAN Nan^{1,2*}, LIU Yi³

- (1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
2. Key Laboratory of Vibration and Noise under Ministry of Education of Yunnan Province, Kunming 650500, China;
3. Kunming Xinnuo Laibo Technology Co. Ltd., Kunming 650228, China)

* Corresponding author, E-mail: 15808867407@163.com

Abstract: Specific to disadvantage of current image and 3D scanning method difficult to make effective and rapid traceability shearing tool through trace, a set of laser detection signal traceability system with shearing trace was designed and realized; The system consists of three parts including motion control subsystem, laser detection subsystem and microscopic imaging subsystem. Through clamping cable breakage, firstly, single point laser displacement sensor was controlled to pickup surface characteristic signal of linear trace of shearing; secondly, wavelet decomposition was used to carry out noise

收稿日期: 2016-05-19; 修订日期: 2016-06-05.

基金项目: 公安部应用创新计划项目 (No. 2014JSYJA020, 2016JSYJA03); 云南科技计划项目 (No. 2016RA042); 昆明市科技计划项目 (No. 2015-1-S-00284); 昆明理工大学分析测试基金项目 (No. 2016T20130030)

reduction for pickup signal and obtain the signal after noise reduction. Variance diversity factor among signals was adopted to perform similarity coincidence degree matching of trace characteristic; and gradient descent method was used to implement parameter machine learning, and construct the corresponding cost function; by constant iteration, make cost function value minimum and finally realize the rapid traceability of shearing tool. System efficiency was verified through the actual shearing traces and multiple sample matching test. Batch traceability test for 25 groups of test data based on 1 000 groups of samples was put forward. Experiment results show that total time consuming is about 1.5 s; correct traceability rate is 98%; the experiment proves that this system has accuracy and validity for laser detection signal traceability system with shearing trace.

Key words: shearing tool; laser detection; gradient feature; machine learning; wavelet denoising

1 引言

目前,犯罪分子在偷盗铁路沿线通信电缆、贯通地线时多使用断线钳、线缆剪、破坏钳等大型剪切工具,剪切形成的线缆断头表面线性痕迹是案发现场中最为常出现的一种痕迹,其具有不易破坏、难以伪装、出现率频繁,鉴定价值高等特点,对于办案人员认定案件性质,确定作案工具,进而证实犯罪嫌疑人有着十分重要的意义^[1-2]。

近年来兴起的图像识别以及 3D 显微扫描技术,为剪切痕迹的数字化定量检验提供了一些新的解决方案^[3-5]。然而,由于犯罪现场发现的痕迹复杂且随机性较大、检验设备操作复杂、图片及 3D 文件体积过大造成计算复杂度增加、无法对 3D 显微扫描的拼接图片进行鉴定等问题,使得此类方法由于缺乏大数据批量比对,而不宜在办案一线推广,大大降低了其实用价值^[6-8]。

单点激光位移测试具有不损坏被测物体表面、不受光线环境影响、精度高、数据文件体积小、频响特性好等优于其他测量方式的特点,对于剪切线性痕迹细节特征的非接触式精准测量是非常有效的^[9]。若要将激光检测信号应用到案发现场剪切痕迹的自动匹配溯源中,需首先解决以下关键问题:

(1)激光找平:实际断头剪切角度的不同会导致其表面参差不齐,为了使检测数据基准一致,首先要保证激光传感器和断头表面的垂直角度一致,即自动找平;

(2)光路干涉:在进行激光检测的同时,需要对断头表面进行同步精准拍摄,以保证检测位置

正确,但由于激光位移传感器和显微摄像头不能垂直安装(避免互相遮挡),便需要设计一套光路系统,既要使激光能够穿透到截面并返回,不影响检测结果,又要能反射截面的散光,使显微镜头能捕捉到截面清晰的镜像;

(3)信号降噪:受限于实际的测试环境和线缆断头本身的差异性,激光传感器拾取的位移信号中往往夹杂有很多背景噪声,此类噪声来自于检测设备自身的机械误差以及外部干扰。为此,需要在保证信号准确的基础上,最大程度地降低噪声干扰,提高后续工作的质量与准确性;

(4)信号匹配:痕迹检测信号之间的细节和位置匹配,两个痕迹检测信号是否能够重叠,在什么地方能够重叠,考虑到细节情况下的相似度等都是需要解决的问题。

(5)工具溯源:由于嫌疑人的连续作案,往往会在案发现场形数以千计的剪切断头,剪切工具的剪切面基本无法完整反映在线缆的断头上,承痕体上只保留部分剪切面特征(残缺痕迹),如进行逐数据点的比对,将大大增加算法计算量,为此,需要通过机器学习等手段实现大量痕迹激光检测数据特征的快速比对,以进一步实现痕迹所属剪切工具的溯源推断^[10]。

针对上述问题,设计开发了一套剪切痕迹激光检测信号溯源系统,其可实现对剪切工具的快速溯源。

2 检测系统硬件设计

为保障精密测量所必需的稳定条件,检测系统所有部件均置于减振台上,减振台主要由底座

和减震板组成,其可以使仪器在精确运转中减少外界的震动带来的干扰^[1]。

多功能载物台的平移、旋转和升降,实现了载物台上的承载体快速地空间位置调节和定位。电控角度位移台可以使电控角度位移台上的一个平面在 $\pm 15^\circ$ 内任意方向倾斜角度调节。显微镜装置主要把截面上微小痕迹放大并传输至计算机显示,通过控制高精度激光位移传感器和精密电动滑台,检测和提取截面上微小痕迹的特征。在水平方向上可以进行前后左右的快速移动调节,并且可以做 360° 旋转,在垂直方向上可以升降调节载物台的高度。其主要作用是使载物台上的被测量截头快速地进行空间位置调节和定位,以满足测量需要。

运动控制子系统主要由横向电控角度位移台和纵向电控角度位移台组成,它们重叠并相互垂直安装,可以使相垂直的两轴在 $\pm 15^\circ$ 内旋转,来调节角度,实现电控角度位移台上的一个平面在 $\pm 15^\circ$ 内任意方向倾斜。主要作用在于承载被检测物体,并精准调节检测截面使其与高精度激光位移传感器移动平面保持平行。

激光检测子系统采用 CD33-L50-422 型号的高精度激光位移传感器进行痕迹特征检测,其检测距离为 47.3 mm,检测范围为 ± 5 mm,分辨率为 $2.5 \mu\text{m}$ 。高精度激光位移传感器安装于纵向电动滑台,其可以在纵向上精确移动,检测截面上微小的痕迹,并将量化的数据传回上位机进行分析。

微摄像子系统由镀反光膜的透光镜、显微镜移动台、显微镜和侧光灯组成。镀反光膜的透光镜置于被测截面和高精度激光位移传感器间,经过显微镜镜筒后放大,在后端的电子目镜摄像头转换成清晰的图像,并传输到计算机中进行显示。其中显微镜由镜筒和电子目镜摄像头组成,镜筒可以调节放大倍数,电子目镜摄像头采用的是 CCD 成像方式的摄像头,计算机通过 RS232 接口即可进行控制和数据传输。其中显微镜移动台主要通过调节镜头与截面镜像的距离来调节焦距,使捕捉到的图像最清晰。

检测系统结构图及原理图分别如图 1、2 所示。

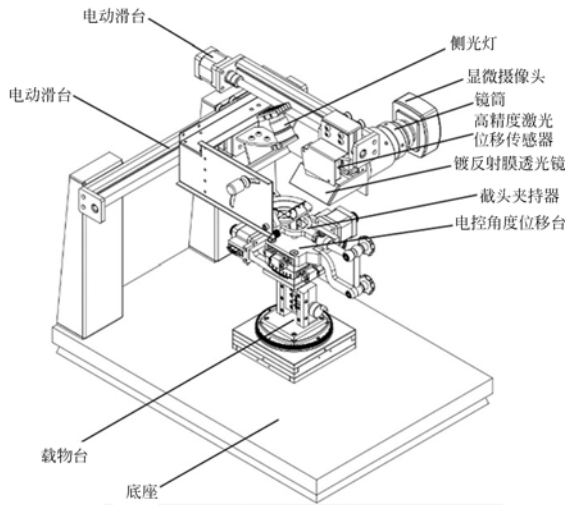


图 1 检测系统结构图

Fig. 1 Structural diagram of detection system

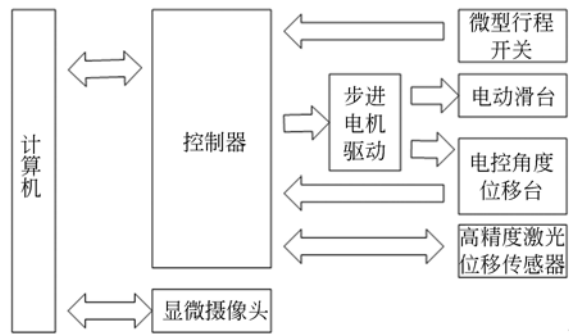


图 2 检测系统原理图

Fig. 2 Schematic of detection system

3 系统软件关键算法实现

工具推断的功能构建主要分为 4 部分:样本库建立-参数训练-相似计算-分组识别,即在达到使用之前需要进行样本库的建立,随之进行样本库的验证、参数的学习。

3.1 样本库建立

样本库是为鉴别痕迹信号所属工具的根本依据,样本库的质量与建立方式直接影响最终结果。样本库的建立通常遵循如下步骤:

(1) 确定需要鉴别的工具种类,范围,类型,然后设计一个命名规则,对每个工具进行一个编号,并且详细记录其参数信息。

(2) 为了排除检测时的偶然性,单个断头的一个痕迹需要检测至少两次,当两次的信号数据重

合度能够达到 99% 以上时,才能认定为合格数据。对于同一个断头,建议记录多个位置的不同数据,每个位置都采用如上的方式。必要的时候可以加入手工修正,以及一切有利于提高痕迹样本质量和代表性的手段。

(3)完成所有数据的采集后,同时采用此样本库的数据作为测试数据,针对每个特征进行测试,测试结果应当是每个样本数据和自己组别数据的相似程度明显高于其他组别的相似程度,如果是混杂在一起的,则数据无效,重新进行(1)-(2)步骤。

3.2 信号降噪

通过激光检测方式采集到痕迹特征信号,由于检测要求精度较高,容易受到外部细微振动的干扰,使得扫描的数据存在较多的锯齿,为了提升后续精确度,需要首先对采集到的痕迹检测信号进行处理,降低其杂讯。

小波降噪是一种现代的信号处理方法,其具有广泛的实用性。小波降噪的总体过程是通过将信号进行小波变换,将信号的特性分配到各个尺度的小波变换系数上,再根据小波变换系数的分析与处理,选择相关的阈值,从而降低噪声^[12]。

现有小波降噪研究当中,大部分小波降噪的方式都遵循如下基本步骤^[13]:

(1)使用小波变换将需要降噪的数据进行分解,使得其由变换域表示,也就是分解为不同缩放尺度的小波以不同的加权系数叠加的形式,其中加权系数值得就是小波系数,是描述信号特性的重要系数。

(2)选定一个阈值进行降噪,此阈值可以通过统计的方式确定或选用一个固定值,在选定了阈值之后,将分解成为不同系数小波的信号当中系数小于该阈值的所有系数清除,即置零,而大于该阈值的小波系数也可以做适当的处理。去除小于阈值的系数,也就是去除肉眼可见的“毛刺”部分的过程。

(3)完成了系数的清除之后,便可以通过逆小波变换过程,将处理过的信号数据反变换为时域信号数据,也就是降噪后的信号数据。为了更好地描述信号降噪的过程,做出如下定义:

$$f(t) = s(t) + n(t), t = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

其中: $f(t)$ 表示包含噪声的信号数据; $s(t)$ 表示原始信号数据; $n(t)$ 表示噪声的信号数据。

整个降噪过程,就是为了尽可能地去噪声信号 $n(t)$,而还原出 $s(t)$ 的部分。该过程可分为两步:(1)对信号 $f(t)$ 进行小波分解,并且选定母小波 mw 和分解层级 j 。计算包含噪声信号的小波分解系数。(2)对每层的系数都选定一个阈值 r ,根据阈值 r 对高频噪声信号进行处理,处理过程如下:

$$c_i = \begin{cases} 0, & |c_i| < r \\ g(c_i), & |c_i| \geq r \end{cases} \quad \text{其中 } g(c_i) \text{ 为一个处理函数,}$$

(3)使用去除噪声后的新的信号,进行重构,得到降噪数据。

在降噪之前,首先需要选定小波的类型。在实际的降噪过程中,需要对原始信号 $f(t)$ 进行多层的分解,分解的层数越多,对细节数据处理的越多,能够消除的噪声也更多,但是可能抹平的细节也更多。因此寻找一个平衡的分解层数就显得十分的必要^[14-15]。

在分解过程中,一般将原始信号分解为两部分,假设进行 n 层的分解,那么原始信号的构成可描述如下:

$$f = a_n + \sum_i^n d_i. \quad (2)$$

其中分层的信息可由下图 3 表示,图中的各节点同原公式对应为:(1) a_i 为第 n 层的近似,在图 3 中表示为 $(1,0)$ 。(2) d_i 为第 i 层的细节数据,在图的表示为 $(i,1)$ 。(3) f 为原始数据,在图 3 中表示为 $(0,0)$ 。

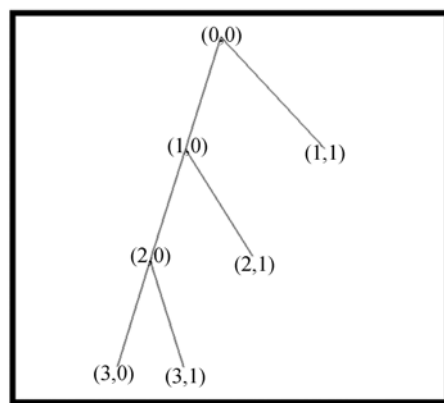


图 3 分解信息

Fig. 3 Decomposition diagram of image measuring system

其中 1-3 层的近似数据如下图 4 所示。

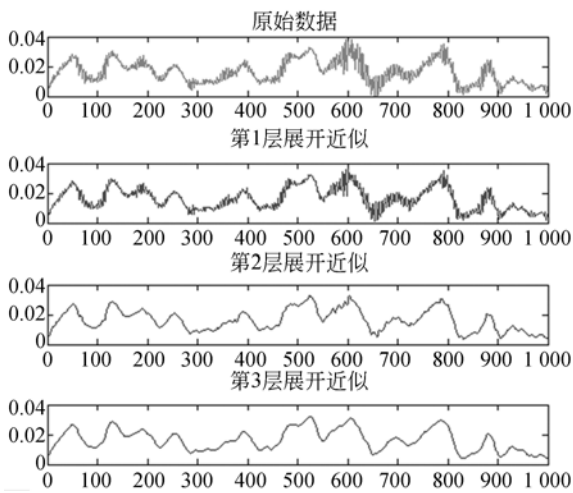


图 4 各层级近似信号

Fig. 4 Approximate signal at each level

三层的细节展开如图 5 所示。

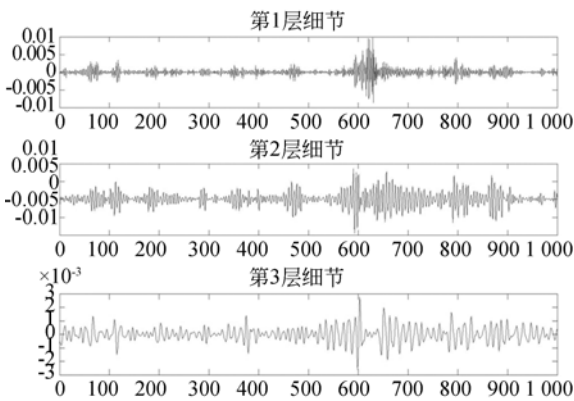


图 5 三层细节展开

Fig. 5 Detail expansion of three layers

通过分析上图中示例信号分解得出的近似数据和细节数据可以发现,对于当前的工具扫描来说,层级 1 展开得到的近似数据仍然有较多的毛刺,层级 2 的近似信号展开结果相比于层级 1 来说已经得到了极大的改善,绝大部分的毛刺得到了改善,而层级 3 中,近似信号则得到进一步的改善,从得到的图形来看,已经十分接近于所期望得到的样式了。因此,一般情况下,也是进行到层级 3 的展开。

除了近似信号以外,还仍然有细节数据,虽然根据肉眼观察在层级三的时候近似数据已十分接近波形样式了,但是仍然是缺乏细节的信号,这是因为丢失了很多细小细节(这里的细节是小波里的细节,其绝大部分都是噪声,并非传统意义上认

为的细节)的数据,只能表示大致的趋势,不能准确表示痕迹。

那么根据降噪的式子

$$c_i = \begin{cases} 0, & |c_i| < r \\ c_i, & |c_i| \geq r \end{cases}, \text{其中 } c_i \text{ 表示第 } i \text{ 个分解小波系数。}$$

为了去除细节里的噪声,需要设定一个阈值,将小于阈值的数据全部清除。因为一般的噪声都是以高频无规律噪声存在的,其转化为细节部分的值都是较小的。因此可对每个细节设定一个阈值,进行过滤降噪。

$$f' = a_n + \sum_i^n d'_i, \quad (3)$$

其中: d'_i 为经过阈值降噪后的细节数据, f' 为降噪后的痕迹数据。

考虑到剪切痕迹的特性,通常采用 db4 或 haar 作为母小波,并根据数据检测精度进行 2-5 层的分解重构,分解后再进行相应的噪声去除,重构得到的波形信号就是降噪后的数据。

数据降噪部分的流程图如下所示。

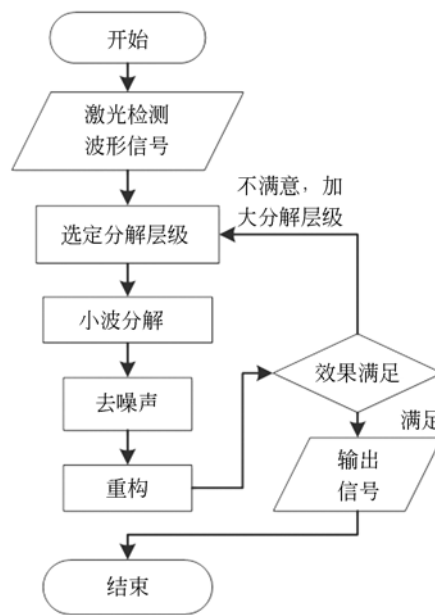


图 6 降噪流程图

Fig. 6 Flowchart of signal denoising

如图 7 所示,由于检测时受机械振动的影响,检测信号含有一个高频噪声。对其进行降噪,主要的考验就在能否正确的分离噪声和真正的痕迹部分。降噪效果表明,降噪后基本能够过滤掉全部高频噪声,而正常数据部分则不受干扰。

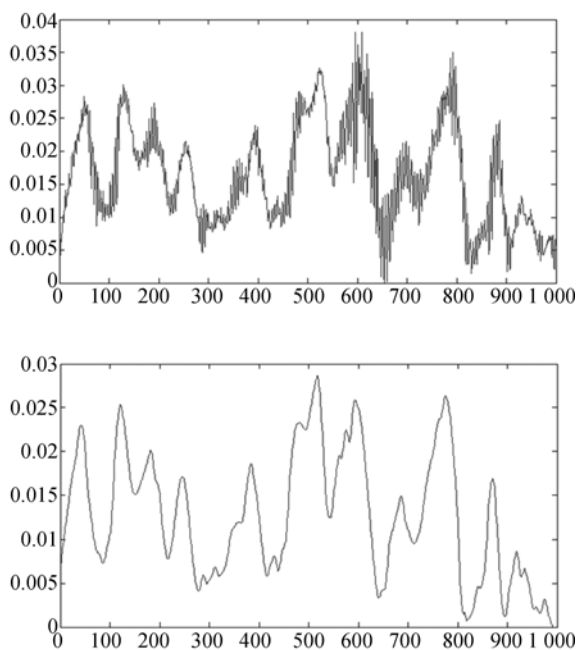


图 7 实际检测信号降噪

Fig. 7 Denoising performance of actual detection signal

3.3 特征匹配

在对痕迹信号进行相似比对处理之前,首先需要处理痕迹长度不定和部分重合这两个问题^[16-18]:

(1)痕迹长度不定,是指每次采集得到的痕迹检测信号的长度都是不一致的,匹配信号数据和待匹配信号的长度绝大部分情况下都不相同。

(2)部分重合,即两个痕迹检测信号很可能只是在某一部分有重合,这种情况对最后的重合度计算造成了很大的干扰。

在进行匹配运算过程中,算法也将会针对长度不定和部分重叠的问题进行优化,最终实现针对痕迹信号的匹配改善,其大致步骤如下:

(1)设输入的数据分别为 A 和 B,二者均是已经符合上述要求的数据。

(2)设定一个最小匹配长度 L,即二者如果重合必须要满足的最小重合长度,从 A 中选择最长长度到最短长度的部分到 B 中进行比对,相当于选择不同的位置进行多次匹配。

(3)迭代执行每个位置的对比,每次都比对二者对应位置差异度(对应位置的)的方差大小,如果最小就记录当前状态。

(4)完成了(3)后,交换 A、B 的角色,继续完成一次 2、3。

(5)计算方差最小的差异度,输出匹配结果。信号匹配的处理流程如图 8 所示。

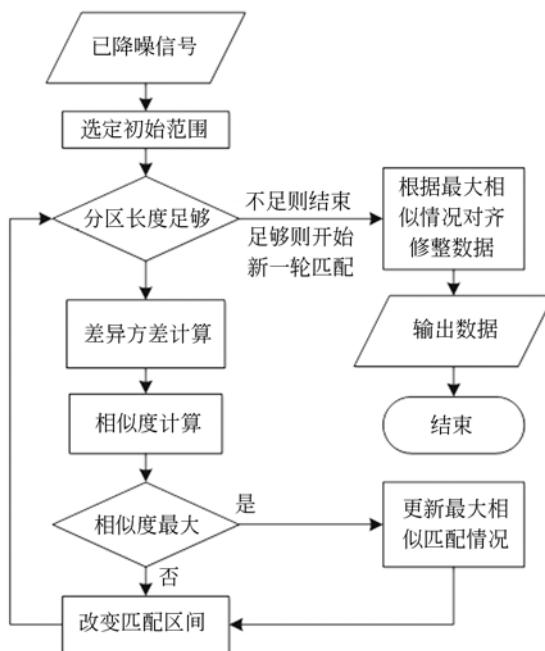


图 8 匹配流程图

Fig. 8 Flowchart of matching

图 9(彩图见期刊电子版)中,Data16 和 Data17 是同一个痕迹的重复检测信号,分别显示在第一栏和第二栏,经过信号的匹配,得到二者在最小差异情况下的差异,显示在第三栏,而第四栏就是叠加显示二者重合后的信号,分别用蓝色和红色显示,如果肉眼难以分辨出两条曲线的位置,证明其重合程度高,相似度高。由于在扫描过程当中,无可避免的会产生一些误差。根据测试结果,其相似度为 90%,证明二者得到了有效的对齐

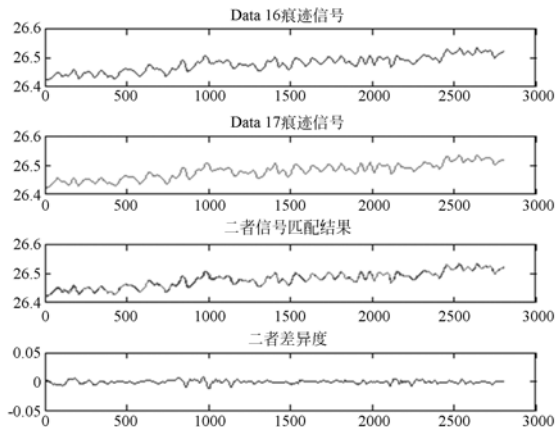


图 9 信号差异匹配

Fig. 9 Signal difference matching

匹配。

3.4 参数训练及相似计算

不同的工具,具有不同的刀口纹路,不一样的纹路使得剪切出来的痕迹形状等也不尽相同。其刀口的梯度(也就是刀口纹路的变化率)分布存在一定的规律,根据剪切痕迹上变化率的分布可以辅助判断痕迹的工具类型。在完成信号差异匹配之后,基于梯度特征,通过每个痕迹检测信号的变化速率去鉴别工具种类^[19-20]。

对于输入长度为 m 的信号样本 $I = \{i_1, i_2, \dots, i_m\}$, 则其两两之间的梯度变化为 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_{m-1}\}$, 长度为 $m-1$, 其中:

$$d_j = |i_j - i_{j+1}|. \quad (4)$$

然而,在实际的痕迹当中 d_j 的取值较为离散,取值数量多,范围较大,不利于后期比对,因此需要设法去改善此类问题。

图 10 描述了一个原始信号及其变化幅度示意图,以及变化幅度分布的直方图,可以看到的是变化幅度的分布取值较多。为了改善计算效率和增加容错性,在计算变化幅度是采用了分箱的计算方式。分箱是将数据按照某一个区间划分,所有属于区间内的数据全部划分到此分箱当中。

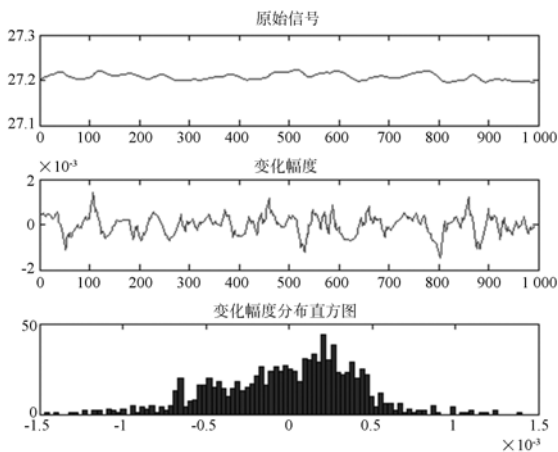


图 10 信号变化幅度

Fig. 10 Signal variation range

在痕迹检测信号中,按照固定规则将其变化幅度进行分箱后,计算每个分箱所占的分布比例,此比例描述了该痕迹在某一个变化幅度上的比重,能够从变化幅度的角度描述整个痕迹的特征。

在梯度特征识别过程中,相似度是根据二者重合的面积和二者全部覆盖面积的比值进行计算的。如果两个痕迹越相近,那么他们的变化幅度

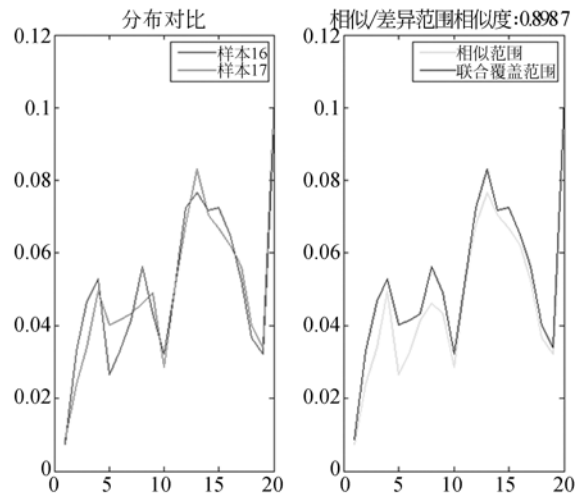


图 11 分箱后变化幅度统计与相似计算

Fig. 11 Variation range and similarity calculation after flasking

分布就会越相似,重合部分就会越大,反之,两个痕迹的重合幅度会降低。

特征的权重设定也会影响识别的准确率,因此使用特定的训练集去做参数训练,以降低失败的概率。参数的训练有如下基本步骤:

(1) 保证完成样本库建立步骤,样本之间都具有足够的代表性和区分度。

(2) 使用梯度下降法进行参数的机器学习,构建相应的代价函数,通过不断的迭代使得代价函数数值代价最小。

(3) 获得学习的参数后就可以结束参数训练。

(4) 当样本库改变或使用场景改变时,建议使用一个更加具有针对性的训练集进行参数的训练。

根据输入的样本痕迹检测信号变化梯度进行相似度计算,计算得到相似度数据后进行相应的分组识别,并溯源推断可能归属的工具。相似度计算需要计算样本与输入样例的相似程度大小,相似程度的大小可以映射到 0 到 1 的区间内,最小值 0 代表完全不相同,最大值 1 代表完全相同。

3.5 分组识别

在完成了相似计算后,将会得到待溯源推断痕迹数据同样本库中所有样本的比对结果,这些结果是一系列的样本同输入痕迹的相似程度的大小。不同种类工具、不同位置的剪切都会影响结果,而分组识别则是将此类数据进行分组聚合,找到最有可能的工具种类。

分组识别通常有以下的基本步骤:

(1)对输入痕迹数据和样本库中样本进行比对后得到相似度,进行排序,通常排序后可以仅适用前 10%~20%的数据进行比对。

(2)对前 10%~20%的数据进行加权处理,加权规则一般是排序越靠前的,其权重越大,反之则是权重低。

(3)根据加权后的成绩进行分组归类,计算出每一个组别在这前 10%~20%数据中所占比重的大小。

(4)根据每个分组所占的比例大小,排序,选择排序较为靠前的作为推倒的结果。

工具溯源流程如图 12 所示。

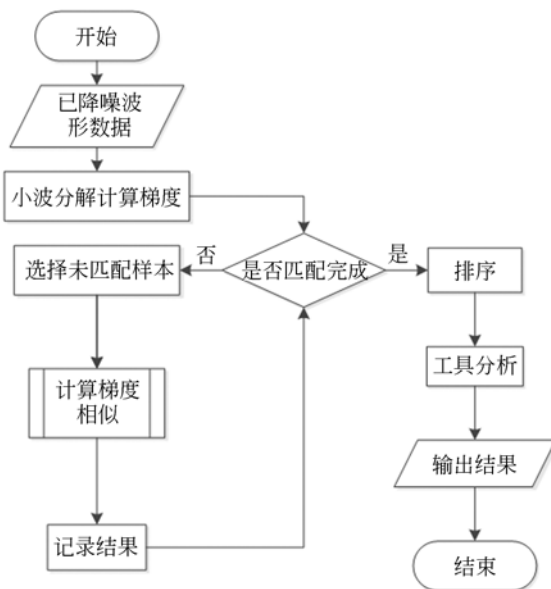


图 12 工具溯源流程

Fig. 12 Flowchart of tools tracing

4 实验验证

最后,通过实际实验验证本系统对实际剪切痕迹激光检测数据溯源推断的效果。实验所采用的样本编码规则为: $Ta-bc[R]$ 。

其中 T 为固定值, a 为工具编号,用于区别不同的工具样本组(如 T_1 代表第 1 个剪切工具、 T_2 代表第 2 个剪切工具,以此类推)。 b 代表痕迹编号。 c 代表当前痕迹经多次激光检测的次数,即是同一条痕迹的不同检测信号,每组测试数据在首次检测基准痕迹的基础上,进行了位移后再次检测。 $[R]$ 代表其测试方向相较于其他的样本为

反向,即在断头上检测痕迹的上下移动,进行了这两个方向移动后的数据,和原来的基准痕迹检测信号形成一定程度的错位。



图 13 实际测试

Fig. 13 The actual test

一共选取 4 个剪切工具:2 个同款断线钳、1 个破坏钳、1 个液压钳。使用这些工具分别剪切相同的 1 cm 直径铜棒。

激光检测试验台及线性痕迹显微照片分别如图 2、3 所示。采样参数设置:激光斑点直径为 $2.5 \mu\text{m}$,细分数 3 200 步/秒,同频率脉冲 1000,采样间隔 50 ms,采样频率为 20 Hz,采样点数根据断头横截面积大小确定。断头直径均为 1 cm,所有断头表面均使用本文第 2 章所述仪器进行检测。匹配程序相关算法利用 Matlab 2015b 验证后,采用 Eclipse+JSP 进行编写。在 CPU 为 Intel Core i5 2.9 GHz,内存为 8G DDR3 的 Think-Pad 笔记本电脑上运行。

实际测试现场图及部分测试用样本分别如图 13、14 所示。

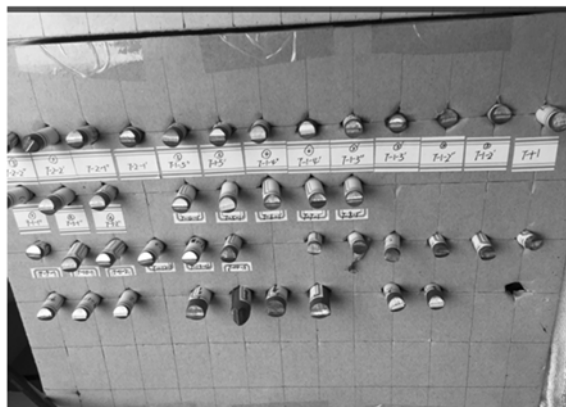


图 14 部分测试样本

Fig. 14 Part of test samples

溯源系统实际页面如图 15 所示。



图 15 溯源系统实际页面

Fig. 15 Web page of tracing system

进行多次检测,共形成 25 组待检测信号特征。样本库中有利用 10 种剪切工具剪切 1 cm 直径铜棒形成的 1 000 组样本,用于检测信号特征(包括前述含待检测的 25 组样本数据),数据点数并不一致。具体如表 1 所示。

表 1 样本编码

Tab. 1 Coding of samples

样本编码	工具编号	痕迹编号
T1-11	1	1
T1-12	1	1
T1-13R	1	1
T1-14	1	1
T1-15	1	1
T1-21	1	2
T1-22	1	2
T1-23R	1	2
T2-11	2	1
T2-12	2	1
T2-13R	2	1
T2-11	2	1
T2-21	2	2
T2-22	2	2
T3-11	3	1
T3-12	3	1
T3-13R	3	1
T3-21	3	2
T3-22	3	2
T3-23	3	2
T4-11	4	1
T4-12	4	1
T4-13	4	1
T4-21	4	2
T4-22	4	2

进行推断溯源计算前,首先将样本中与待测试样本完全一致的数据加以剔除,根据检测结果定义识别标准:

(1)无法溯源出同种工具剪切的同一痕迹,定义为错误溯源。

(2)溯源到同种工具,但并无法精确溯源实际对应工具,定义为溯源。

(3)精确溯源到对应工具和实际对应痕迹,定义为识别准确溯源。

为保证试验的可重复性及算法稳健性,每个待检测样本均进行 10 次溯源推断,将匹配度最高的样本作为最为相似的样本,10 次均溯源到同一工具剪切痕迹则认定为准确匹配。25 组数据总计 250 次测试。其结果为如表 2 所示,样本匹配耗时近 1.5 s,选取相似度程度最高的样本作为匹配结果,只有 5 次错误匹配,匹配率约为 98%。

表 2 本文算法样本溯源结果

Tab. 2 Sample tracing results by proposed algorithm

待检样本	最高匹配	准确溯源	溯源	错误溯源
T1-11	T1-12	100%	0%	0%
T1-12	T1-13R	100%	0%	0%
T1-13R	T1-13	100%	0%	0%
T1-14	T1-13	100%	0%	0%
T1-15	T1-14	80%	0%	20%
T1-21	T1-23R	100%	0%	0%
T1-22	T1-21	90%	0%	10%
T1-23R	T2-22	10%	80%	10%
T2-11	T2-11	100%	0%	0%
T2-12	T2-12	100%	0%	0%
T2-13R	T2-11	100%	0%	0%
T2-11	T2-12	100%	0%	0%
T2-21	T1-21	0%	90%	10%
T2-22	T2-21	100%	0%	0%
T3-11	T3-13R	100%	0%	0%
T3-12	T3-13R	100%	0%	0%
T3-13R	T3-12	100%	0%	0%
T3-21	T3-23	100%	0%	0%
T3-22	T3-23	100%	0%	0%
T3-23	T3-21	100%	0%	0%
T4-11	T4-13	100%	0%	0%
T4-12	T4-13	100%	0%	0%
T4-13	T4-11	100%	0%	0%
T4-21	T4-22	100%	0%	0%
T4-22	T4-21	100%	0%	0%

表 3 文献^[6]算法样本溯源结果

Tab. 3 Sample tracing results by ref. [6] algorithm

待检样本	最高匹配	准确溯源	溯源	错误溯源
T1-11	T2-11	10%	90%	0%
T1-12	T2-11	10%	90%	0%
T1-13R	其他	0%	0%	100%
T1-14	T2-12	30%	60%	10%
T1-15	T2-12	20%	80%	0%
T1-21	T2-22	30%	70%	0%
T1-22	其他	0%	0%	100%
T1-23R	其他	0%	0%	100%
T2-11	其他	0%	0%	100%
T2-12	T2-12	100%	0%	0%
T2-13R	T2-11	100%	0%	0%
T2-11	其他	0%	0%	100%
T2-21	T1-13R	0%	80%	20%
T2-22	其他	0%	0%	100%
T3-11	其他	0%	30%	70%
T3-12	其他	0%	0%	100%
T3-13R	其他	20%	10%	70%
T3-21	其他	0%	10%	90%
T3-22	其他	0%	10%	90%
T3-23	其他	0%	0%	100%
T4-11	其他	0%	20%	80%
T4-12	T4-13	100%	0%	0%
T4-13	T4-11	100%	0%	0%
T4-21	其他	0%	0%	100%
T4-22	其他	0%	20%	80%

参考文献:

- [1] 杨敏, 彭颖. 基于专家知识的工具痕迹系统构建研究[J]. 中国人民公安大学学报(自然科学版), 2013, 2(2): 1-5.
YANG M, PENG Y. Toolmarks system construction based on experts knowledge[J]. *Journal of People's Public Security University of China(Science and Technology)*, 2013, 2(2): 1-5. (in Chinese)
- [2] BUNCH S, VEVEER G. Application of likelihood ratios for rearm and toolmark analysis[J]. *Science and Justice*, 2013, 53(2): 223-229.
- [3] 杨敏, 李冬云, 王纬东. 基于局部小波能量工具痕迹识别的研究[J]. 中国人民公安大学学报(自然科学版), 2008, 56(2): 73-75.
YANG M, L D Y, WANG W D. The study of tool mark identification based on local wavelet energy [J]. *Journal of People's Public Security University of China(Science and Technology)*, 2008, 56

为了与本文提出技术进行比对,利用文献[6]算法,提取相同剪切痕迹激光检测一维信号的PCA特征作为样本。随后使用基于核函数的SVM模型分拣匹配样本,25组数据总计250次测试。其结果为如表3所示,样本匹配耗时近3min,错误溯源141次,匹配率约为43.6%。

由此可见,与文献[6]提出的方法相比,本文提出的溯源技术无论在运算精度、稳定性及速度上均有着数量级上的明显优势,针对犯罪现场剪切痕迹溯源问题更具有工程实用价值。

5 结 论

本文针对犯罪现场剪切痕迹随机性强、易受背景噪声干扰等问题,设计并实现了一套剪切痕迹激光检测信号溯源系统,介绍了该系统的硬件结构及关键软件系统(算法)设计。最后,通过实际剪切痕迹多样本匹配试验对该系统效能进行了测试,基于1000组样本对25组测试数据进行批量溯源试验,总计耗时近1.5s,正确溯源率为98%,该实验证明了本系统对剪切痕迹激光检测信号溯源的准确性和有效性,该方法能够应用于实际犯罪案件侦破之中。

(2): 73-75. (in Chinese)

- [4] KASSAMAKOV I, BARBEAU C, LEHTO S, *et al.*. CSI Helsinki: Comparing three-dimensional imaging of diagonal cutter toolmarks using confocal microscopy and SWLI [C]. *Three-Dimensional Imaging, Visualization, and Display 2010 and Display Technologies and Applications for Defense, Security, and Avionics IV, Orlando, FL, United States, April 6-8, 2010*, 7690: 76900Y.
- [5] BUNCH S, VEVEER G. Significance of angle in the statistical comparison of forensic tool marks [C]. *Technometrics*, 2013, 55(4): 548-561.
- [6] GAROL G, PATRICK M, LORETTA K, *et al.*. Forensic surface metrology: Tool mark evidence [J]. *Scanning*, 2011, 33 (5): 272-278.
- [7] ROBERT F, CLAU V. Forensic ballistic analysis using a 3D sensor device [C]. *14th ACM Multimedia and Security Workshop, MM and Sec 2012, Coventry, United Kingdom, Sep 6-7, 2012*, 67-75.
- [8] MEIZMANN M. Techniques for the segmentation of

- striation patterns[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2006(3):624-631.
- [9] HU S X, XIA Y Y, ZAHNG A W. Research and development of 3D scanning system for dam monitoring based on singlepoint laser sensor[J]. *Chinese Optical Society*, 2011, 31(S1).
- [10] 潘楠, 伍星, 刘益, 等. 线性痕迹激光检测信号自适应匹配算法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(6): 1372-1380.
- PAN N, WU X, LIU Y, *et al.*. Research on the adaptive matching algorithm for laser linear mark detection signals[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(6): 1372-1380. (in Chinese)
- [11] 刘益, 潘楠, 沙生, 等. 一种警用线性痕迹激光检测系统, 中国专利: CN 105300996 A, 20160203[P].
- LIU Y, PAN N, SHA S, *et al.*. One police laser detection system for linear traces China Patent: CN 105300996 A, 2016, 02, 03 [P]. (in Chinese)
- [12] 崔洪亮, 刘野, 于森, 等. 小波降噪在分布式光纤干涉振动检测及定位系统中的应用[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(10): 71-76.
- CUI H L, LIU Y, YU M, *et al.*. Application of wavelet denoising in distributed optical fiber interferometric vibration detection and location system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10): 71-76. (in Chinese)
- [13] 叶树亮, 张玉德, 张炜. 齿轮视觉检测中的尺度与方向相关性联合降噪[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(6): 1622-1630.
- YE SH L, ZHANG Y D, ZHANG W. Scale and directional correlation combined denoiseing in gear visual inspection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1622-1630. (in Chinese)
- [14] 张明照, 牟建华, 刘扬, 等. 应用复 Morlet 小波变换分析条纹图相位[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(3): 643-650.
- ZHANG M ZH, MOU J H, LIU Y, *et al.*. Phase extraction for fringe patterns based on complex Morlet wavelet transform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3): 643-650. (in Chinese)
- [15] OGAWA K, SAKATA M, LI Y. Adaptive noise reduction of scintigrams with a wavelet transform [J]. *Hindawi Publishing Corporation*, 2012; 4.
- [16] ZHENG Y, XIAO L M, TANG W Q, *et al.*. Parallelization of dynamic time warping on a heterogeneous platform[J]. *Maruzen Co., Ltd.* 2014, E97A(11): 2258-2262.
- [17] LI H L. On-line and dynamic time warping for time series data mining [J]. *Springer Verlag*, 2014, 6(1): 145-153.
- [18] DUPAS R, TAVENARD R, OPHÉLIE F. Identifying seasonal patterns of phosphorus storm dynamics with dynamic time warping[J]. *Blackwell Publishing Ltd*, 2015, 51(11): 8868-8882.
- [19] JIA N N, LAM E Y. Machine learning for inverse lithography: Using stochastic gradient descent for robust photomask synthesis[J]. *Journal of Optics*, 2010, 12(4): 045601.
- [20] SHAO J, YANG J Y. Multi-robot reinforcement learning based on learning classifier system with gradient descent methods[J]. *Binary Information Press*, 2010, 6(8): 2449-2455.

作者简介:



孙亚军(1990—),男,江苏盐城人,硕士研究生,2015年于滨州学院获得学士学位,主要研究方向为信号处理、刑侦特种设备研发。E-mail: 339636298@qq.com



刘益(1978—),男,四川乐山人,大学专科,1998年毕业于白城师范学院,现任昆明信诺莱伯科技有限公司总经理,主要研究方向为刑侦特种设备研发。E-mail: maIius@163.com

通讯作者:



潘楠(1986—),男,安徽怀远人,博士、硕士生导师,2008年于安徽理工大学获得学士学位,2012年于昆明理工大学获得博士学位(硕博连读),主要研究方向为信号处理、刑侦特种设备研发。E-mail: 15808867407@163.com