

## 基于线激光的自然条件下路面车辙实时检测方法研究

洪梓铭<sup>1</sup>, 陈 昆<sup>1</sup>, 荆根强<sup>2</sup>, 艾青松<sup>1</sup>

(1. 武汉理工大学 信息工程学院, 湖北 武汉 430070; 2. 交通运输部公路科学研究所, 北京 100088)

**摘 要:** 对路面车辙线激光实时检测方法进行了研究, 在自然驾驶条件下, 采用激光器向路面连续发射线激光, 通过高分辨率相机动态获取路面车辙激光线的序列图像, 并对路面车辙进行实时检测。针对路面复杂背景强干扰条件下的车辙激光线难以提取问题, 对路面车辙激光线图像进行了特征分析, 给出了非负特征测度定义及非负强度计算公式, 提出了基于非负特征和峰值连续性的路面车辙激光线提取方法。该方法不再采用图像处理常规方法, 而是利用峰值连续性快速跟踪路面车辙激光线的显著脊点与非显著脊点, 实现路面复杂背景车辙激光线的快速和精确提取。在不封路、不停车、不阻碍交通的自然运行条件下, 进行了大量的路面车辙检测实验, 实验结果验证了文中提取方法的有效性和准确性, 解决了自然条件下路面车辙激光线的快速和精确提取问题, 为路面车辙的自动检测及路面质量评价提供技术支撑。

**关键词:** 路面检测; 车辙深度; 线激光; 非负特征; 峰值连续性

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0617007

## A real-time detection approach to pavement rutting based on line laser in nature condition

Hong Ziming<sup>1</sup>, Chen Kun<sup>1</sup>, Jing Genqiang<sup>2</sup>, Ai Qingsong<sup>1</sup>

(1. School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Highway Science Research Institute of Ministry of Transportation, Beijing 100088, China)

**Abstract:** A real-time laser path detection method of pavement rutting line was studied in this paper. In traffic running condition of normal driving mode, the lasers were used to continuously emit line laser to the pavement. A sequence of pavement rutting laser line images were acquired dynamically by a high-resolution camera and pavement rutting were detected in moving situation in real time. Aiming at the problem of difficult to extract the rutting laser line under the strong interference of the pavement complex background, the characteristics of the rutting laser image of the pavement were analyzed. The definition of non-negative feature measure and the formula of non-negative intensity were given. A method of extracting rutting laser line based on non-negative feature and peak continuity was proposed. Rather than using conventional methods of image processing, the significant and non-significant ridges of the rutting laser line were tracked rapidly using peak continuity to achieve fast and accurate extraction of the rutting laser line with complex background. A large number of verifying tests for different pavements were carried out under conditions of

收稿日期: 2017-10-17; 修订日期: 2018-01-18

基金项目: 国家自然科学基金(61305039)

作者简介: 洪梓铭(1997-), 男, 本科生, 主要从事电子信息方面的研究。Email: hzzzzmmmm@whut.edu.cn

导师简介: 艾青松(1981-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电子信息方面的研究。Email: qingsongai@whut.edu.cn

driving, opening traffic, and without blocking other transportation. The experimental results verify the effectiveness and accuracy of the proposed method and solve the problem of fast and accurate extraction of the rutting laser line under natural running conditions. It provides a key technical support for the automatic on-line detection of the pavement rutting and quality evaluation of road surface.

**Key word:** pavement detection; rutting depth; line laser; non-negative features; peak continuity

## 0 引言

车辙是路面经汽车轮胎反复行驶碾压产生流动变形、磨损、沉陷后,在行车轨迹上产生的纵向带状辙槽<sup>[1-2]</sup>,是路面永久性不能自复原的弯曲变形。以渠化交通为特征的现代公路,车辙已经成为影响行车安全性的一种主要病害<sup>[3]</sup>。随着国民经济的持续发展,国内的高速公路事业也在高速前进<sup>[4]</sup>。近年来,高速公路的里程和重型车数量都在快速增加,随之引起的路面车辙变形成为一个日益突出的问题。车辙同时也是高速公路进一步损坏的诱因,如果对其不进行及时修补,车辙则会进一步造成路面的松散、块裂等<sup>[5]</sup>,不仅引起车体颠簸,而且会加速车辆的损伤,引起交通事故。车辙的危害性主要有:对路面平整度造成一定影响,使行车舒适性降低;易于导致各种病害的发生;使路面抗滑性能降低,严重影响行车安全。因此,路面车辙是高速公路养护中重要的一项检测任务和质量指标<sup>[1-2]</sup>。

我国大部分公路原采用人工车辙检测技术,如直尺测量、水准测量,原理简单,但工作量大,耗费人力,效率低,同时影响正常交通<sup>[6]</sup>。随着视频检测技术发展,人们开始研制基于激光测距的多功能自动智能检测车。并且,现代化交通同时也要求路面缺陷检测能够在不封路、不停车、不阻碍交通的条件下高效进行。目前,车辙检测技术和设备朝着实时化、高精度、高稳定、智能化、全自动视频检测方向发展。

与路面裂缝类病害视频检测不同,路面车辙检测中主要对路面断面车辙深度信息进行测定。路面常见的车辙横断面形态有7种<sup>[2,6]</sup>。车辙在路面图像上很难直观地反映出来,目前,一般采用多点激光、线激光车辙仪来检测路面车辙的深度曲线。多点激光要采用多个激光测距传感器<sup>[7]</sup>,传感器越多,测量到的车辙深度曲线也越精确<sup>[8]</sup>,受传感器数目限制,往往无法准确地获取车辙形态,少于13点的点激光

设备的误差尤为明显<sup>[9]</sup>。不同于多点激光,线结构激光检测技术具有高精度、速度快、非接触等优点<sup>[9]</sup>。线激光车辙仪采用线阵激光器向路面发射扇形高亮度线激光<sup>[3]</sup>,使表征车辙的激光线在路面上呈现亮度高于路面的光条状特征。当路面平坦时,路面车辙激光线为直线段;若路面凹凸不平则为曲线。激光线随着车辙深度形态的变化而发生弯曲变形,通过提取光条中心线,建立图像测量高度与车辙深度的关系,可计算车辙深度和形成深度曲线<sup>[3,6,9]</sup>。

基于线激光的车辙检测方法为:激光车辙仪安装在检测车上,采用线阵激光器连续向路面发射线激光,通过高分辨率相机实时获取路面车辙激光线图像,通过几何光学理论进行高程测量,将路面车辙深度的测量转化为基于图像像素测量<sup>[9]</sup>。激光线图像光条中心提取的准确性直接影响系统测量精度,激光线的精确提取一直是各国学者的研究热点。现有的路面车辙激光线提取方法主要有两种,即图像处理<sup>[3,10]</sup>和光条灰度重心法<sup>[4,11-12]</sup>。图像处理先进行灰度校正,设定分割阈值,对图像进行分割,得到光条块图像,然后进行细化处理,得到单像素宽的车辙激光线<sup>[3]</sup>。光条灰度重心拟合方法采用最小误差选取图像分割阈值和消除噪声,通过灰度重心判断准则<sup>[11]</sup>,快速计算一些样点,然后通过曲线拟合获取光条中心线。图像处理难以保证稳定性,同时耗时较多;灰度重心法提取速度快,但提取精度较低,与光点不能保持对应。路面差异带来成像差异,利用阈值分割不能适应所有路况及气候<sup>[10]</sup>;路面纹理、路标、喷涂、污损等干扰使图像背景复杂,影响提取结果。经细化及拟合计算所提取的单像素宽的车辙线与实际中心线有偏差,影响车辙深度的计算精度。

针对现有提取方法难以完成路面车辙激光线的精确提取,文中在对路面线激光图像进行了特征分析的基础上,提出基于非负特征和峰值连续性的脊线

提取算法,可精确地快速提取复杂路面车辙激光线。

### 1 线激光检测系统及车辙深度计算模型

在检测车尾部上安装与路面成固定角度的线激光器和高分辨率相机,构成车载式的路面车辙检测系统,见图 1。检测车保持 60 km/h 的速度,安装于检测车车身上的激光光源连续向路面发射线激光,激光光束以一定的角度在路面上横向成像<sup>[1]</sup>,高分辨率相机光轴对准路面激光线位置,实时获取路面车辙激光线图像,所捕获图像中车辙激光线的弯曲变形反映出路面车辙深度的变化。

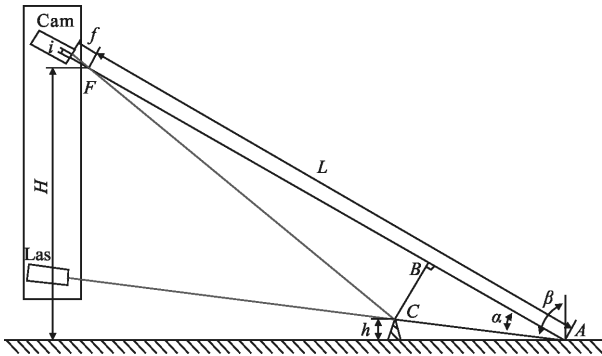


图 1 路面车辙深度检测系统及计算原理

Fig.1 Pavement rutting depth detection system and calculation principle

测点深度的高程计算基于三角测量原理,见图 1,其中 Las 为激光器安装位置, Cam 为相机安装位置, F 为相机焦点,  $\alpha$  为激光入射方向与相机光轴的夹角,  $\beta$  为激光入射方向与受光面法线的夹角,  $h$  为被测位置相对于基准面的高程,  $i$  为成像中对应测点位置的激光线变形量,  $L$  为相机镜头光心距成像物体的距离,  $f$  为镜头焦距,  $H$  为相机镜头光心距路面垂直距离。

从图 1 中,可知:

$$\frac{i}{f} = \frac{BC}{L-AB} \quad (1)$$

$$AB = h \cos \alpha / \cos \beta \quad (2)$$

$$BC = h \sin \alpha / \cos \beta \quad (3)$$

将公式(2)、(3)代入公式(1),整理后可得:

$$h = \frac{iL \cos \beta}{f \sin \alpha + i \cos \alpha} \quad (4)$$

物距  $L$  与镜头安装高度  $H$  关系如下:

$$L = \frac{H}{\cos(\beta - \alpha)} \quad (5)$$

将公式(5)代入公式(4),有

$$h = \frac{iH \cos \beta}{\cos(\beta - \alpha)(f \sin \alpha + i \cos \alpha)} \quad (6)$$

由公式(6)可知,由 CCD 像平面测量值  $i$  可计算路面测点的相对高程  $h$ ,其中  $L, \beta, f, \alpha$  为常数,  $i$  通常为微米量级,焦距  $f$  为厘米量级,数量级相差较大,因此,  $i \cos \alpha$  项对于计算影响较小,  $i$  与  $h$  接近线性关系,工程模型可简化表示为:

$$\dot{h} = a \cdot i + b \quad (7)$$

式中:  $\dot{h}$  为测点高程;  $a$  为斜率,与系统参数及安装位置有关;  $b$  为基准偏差,一般为常量,实验中  $H=1.8 \text{ m}$ ,  $\alpha=22.60^\circ$ ,  $\beta=55.18^\circ$ 。

由图像测量值  $i$  可计算得到路面测点的相对高程  $h$  值,通过各横断面相对高程数据计算车辙深度<sup>[2]</sup>。线激光车辙仪是实现路面高程连续测量的仪器,要求分别计算各路段每个断面的最大车辙深度值和车辙深度平均值<sup>[1]</sup>。对典型车辙断面,为便于计算,采用对车辙值影响较大的 5 个关键点的相对高程进行平均作为断面车辙深度的平均值,其计算公式为:

$$D_{\text{ru}} = \sum_{i=1}^5 \omega_i h_i, \sum \omega_i = 1 \quad (8)$$

式中:  $D_{\text{ru}}$  车辙平均深度;  $h_i$  为关键点  $i (i=1, 2, \dots, 5)$  的相对高程;  $\omega_i$  为权系数;  $\omega_i$  之和为 1。

实验用激光器型号为 HK-810-7000-75-SD,波长 810 nm,功率 7 000 mW,扇面角  $90^\circ$ ,光束出光厚度 0.2 mm,投射宽度小于 4 m,相机视场角为  $52.35^\circ$ ,相机横断面分辨率 2 048 pixel,目标拍摄宽度 2 m,拍摄距离 2.13 m。

### 2 基于非负特征车辙激光线检测算法

在结构光测量技术中,当测量系统配置确定后,激光线光条作为测量过程中的唯一特征信息,其提取精度影响测量精度<sup>[13]</sup>。为了测量路面车辙深度,需要提取路面车辙激光线图像的光条中心线,将光强和宽度均不统一的光条转化为单像素宽的车辙激光线<sup>[6]</sup>。为能精确提取,首先对线激光的特性进行分析。线激光是由点激光经棱镜扩束得到,激光器输出光束一般为高斯光束,高斯光束经过棱镜扩束后形成具有一定厚度的连续光平面,光平面与路面相交,形成具有一定宽度的光条,光条有连续的峰值点,见图 2,

车辙激光线具有如下特征：线条状亮目标，有连续性，但光强和宽度不统一，路面背景复杂且场景变化。根据路面车辙激光线特征，先定义如下几个参数：

(1) 非负测度

$$\nabla(i, j; m, n) = P(i, j) - C(i+m, j+n) \quad (9)$$

式中： $P(i, j)$ 为当前像素点灰度值； $\nabla(i, j; m, n)$ 为当前像素点  $P(i, j)$ 与矩形窗口中的其他像素点的灰度差值，当 $\nabla < 0$ ，则 $\nabla = 0$ 。

(2) 非负强度

$$S(i, j) = \left\{ \sum_{m=-5}^5 \sum_{n=-2}^2 \nabla(i, j; m, n) \mid \nabla(i, j; m, n) > 0 \right\} \quad (10)$$

即窗口内满足条件 $\nabla(i, j; m, n) > 0$ 所有像素点的灰度值之和。

(3) 非负个数

$$N(i, j) = \left\{ \sum_{m=-5}^5 \sum_{n=-2}^2 \text{sign}(\nabla(i, j; m, n)) \right\} \quad (11)$$

式中：当 $\nabla(\cdot) > 0$ ， $\text{sign}(\nabla) = 1$ ；当 $\nabla(\cdot) \leq 0$ ， $\text{sign}(\nabla) = 0$ ，即统计窗口内与中心点非负像素值的像素个数num。

车辙激光线上光点强度在截面上为类高斯分布，其像素灰度值比周围要高一些，呈现为波形曲线，将灰度峰值点，即具有一定宽度的激光线光条中心的光强点(光心)<sup>[10]</sup>称为脊点，一系列连续的脊点构成了一条单像素宽的脊线，即路面车辙激光光条的中心线。

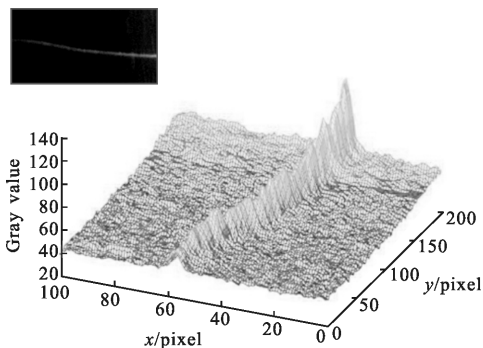


图 2 路面车辙激光线图像灰度值的三维显示

Fig.2 3D illustration of gray values of pavement rutting laser line image

基于上述定义，就可把路面的车辙激光线提取问题转化为一系列的脊点的寻找和确认问题。由于路面背景复杂及各种因素干扰，在图像列方向上，每列像素灰度曲线上可能会有多个波形峰值点，而脊点的峰值也可能被一些强光淹没，最大峰值点可能

并非脊点，这需要利用脊点的连续性来确定。

文中算法主要包含如下 4 个模块。

(1) 图像滤波模块，主要有如下 2 步：

Step1、对采集的路面车辙激光线图像进行归一化处理，使图像灰度值在 0~255 之间；

Step2、采用宽度大于高度的矩形高斯平滑滤波器对归一化后的图像进行滤波，其作用主要是增强车辙激光线的线性目标特征的连续性，平滑一些噪声，同时保护峰值点。车辙激光线目标是从左向右的细条形目标，故将滤波器窗口设为宽大于高的矩形。

(2) 非负特征强度计算模块，主要有 5 步：

Step1、以当前像素点为中心，采用合适大小的滑动窗口，将窗口中心与当前像素点重合，在滑动窗口覆盖的图像区域内，计算当前像素点与窗口内其他像素点的差异值 $\nabla(i, j; m, n)$ ；

Step2、计算当前像素点的非负个数 num 和非负强度值  $S(i, j)$ ；

Step3、对当前点的非负强度进行赋值，设定一个合适的阈值 Th，若非负个数比值 $< Th$ ，则当前点的非负强度直接置为 0，若非负个数比值 $\geq Th$ ，则用平均非负强度值来赋值；

Step4、重复以上过程，以像素为单位，从左到右，从上到下，在整幅图像上滑动窗口，计算每一个窗口所对应的当前像素点的非负特征强度值；

Step5、将赋值后整图的非负特征强度值归一到 [0~255]，得到一幅与原图大小一致的非负特征强度图。

(3) 显著脊点跟踪模块，为了快速、准确地提取路面车辙激光线，对激光线脊点像素目标进行逐列定位和逐点确认，主要有如下 5 步：

Step1、确定种子点。在非负特征强度图中，设置一个小阈值，小于阈值为 0，大于阈值保持不变，得到阈值处理后的非负特征强度图和强度值大于阈值的一些连通域。计算连通域的长度，找出长度最大的连通域，在此连通域上，将强度值最大且有脊点特性的点确定为种子点。

Step2、以种子点为起点，利用车辙峰值连续性特点，对激光线的脊点进行逐点跟踪，分别向左右两边跟踪单像素的脊点目标，以向右跟踪为例，主要包含如下几步：

① 将种子点所在图像坐标列的下一列像素的

一些峰值点作为候选点，以与种子点为邻的候选点确定为该下一列的脊点；

② 继续进行下一列像素灰度曲线的一些具有波形峰值点的脊点确认，以与上一个脊点为邻的候选点确定为该列的脊点，将该候选点标识为 1，其他候选点标识为-1，如果该列的候选点不能确定为脊点，则该列标识为 0，表明要留待确认；

③ 逐列寻找和确认脊点并进行标识，直至图像的最右端。

Step3、以同样的方式向左跟踪脊点，直至图像最左端。

所设计模块主要功能以种子点为起点，完成向左右两方向的脊点跟踪，图像列上标识为 1 的峰值点为脊点，标记为 0 的列，则表明这些列的脊点不能确定，2 个临界脊点之间会有断裂部分，即标记为 0 的列。

(4) 不显著脊点跟踪模块，对标记为 0 的一些列，表明其上脊点要留待进一步确认，要进行第二次跟踪和重新寻找，主要有如下几步：

Step1、从左边开始，沿脊点轨迹向右寻找 2 个临界脊点区间，即断裂部分，同时在列方向上，根据 2 个临界脊点的坐标确定合适的上下范围，得到较小的局部的矩形区域，并记录各脊点的方向码，方向码用来表示上一脊点与当前脊点连接关系，分别用 0~7 来表示 8 个方向，见图 3；

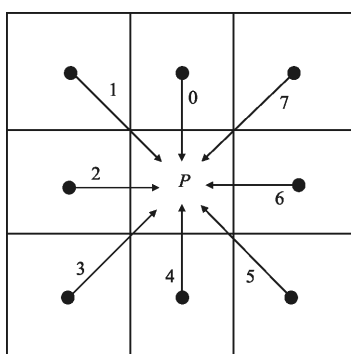


图 3 当前脊点的方向码

Fig.3 Direction code of the current ridge point

Step2、在小矩形区域内，在当前脊点的邻域中搜索下一个脊点。先利用其对应的非负特征强度图中找出峰值点，如有一个点是明显的局部最大，并且它的方向与先前脊点的方向基本一致，它们的方向码差值在-1,0,1 范围内，那么这个点可被确认为下

一个脊点，如峰值点因平滑而较小，不易确认，则需利用矩形区域的原图信息来确认脊点。

Step3、如果有 2 个或多个点都为峰值点，或者都为最大值，为了确定哪一个点为下一个脊点，需要利用连续性，比较这些点与先前脊点的方向码，与先前脊点的方向码一致的或绝对误差最小的候选点作为下一个脊点，并将其标记为 1。

Step4、重复以上过程，直到右端，将断裂部分的不显著脊点全部找到。

由此，可得到一条完整的单像素宽的路面车辙激光脊线。

### 3 实验结果与分析

文中提出的路面车辙激光线提取算法在 Dell i5-4570 CPU, 3.10 GHz 及 VC++6.0 运行环境下进行了测试。为了对激光车辙提取精度进行客观量化评价，此处采用检出率来客观评价激光车辙提取效果，其定义用如下计算公式<sup>[14]</sup>表示：

$$R=L_r/L_b=\sum_{(i,j)} g(i,j)f(i,j)/\sum_{(i,j)} g(i,j) \quad (12)$$

式中： $L_b$  代表激光车辙的实际长度，通过人工逐点标定和手工编辑得到，作为基准车辙激光线； $L_r$  代表提取的激光车辙线像素点与实际车辙线光点是完全对应一致的车辙线长度，为人工标定得到的路面激光车辙二值图像，为提取的车辙路面激光车辙二值图像。由公式(12)可知，检出率主要测量提取光点位置与实际光点位置完全一致的对应情况。

图 4(a)为路面车辙激光线图像，大小 1 024×384，为了测定算法的提取效果，需要有一个车辙激光线基准做比较，为此，在原图上用单色对车辙激光线所有光点进行手工标定，得到人工标定车辙激光线见图 4(b)，提取单色图层得到二值的车辙激光线见图 4(c)，作为基准车辙激光线。

对图 4(a)高斯滤波后的结果见图 5(a)，非负特征强度图见图 5(b)，种子点选取结果见图 5(c)中的标识点+。以种子点为起点，向左右方向跟踪所得到的显著脊线见图 5(d)，中间有断线，二次跟踪后所得到的不显著脊线见图 5(f)中的连线部分，完整的车辙激光线的脊线见图 5(g)，耗时 0.12 s，其检出率为 99.51%。

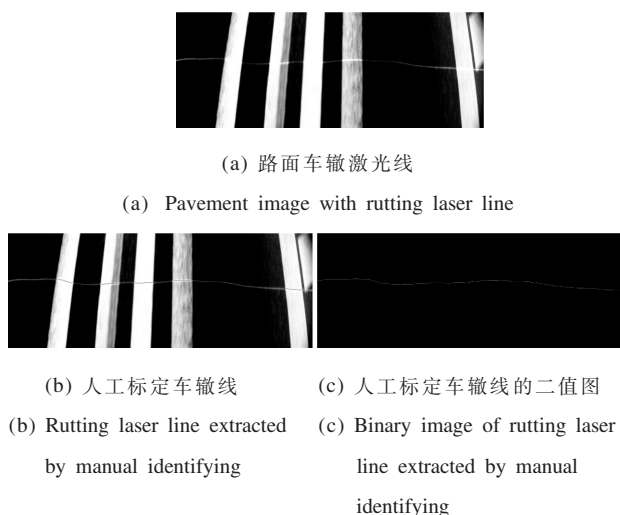


图 4 路面车辙激光线及其人工标定车辙线

Fig.4 Pavement rutting laser line image and rutting laser line extracted by manual identifying

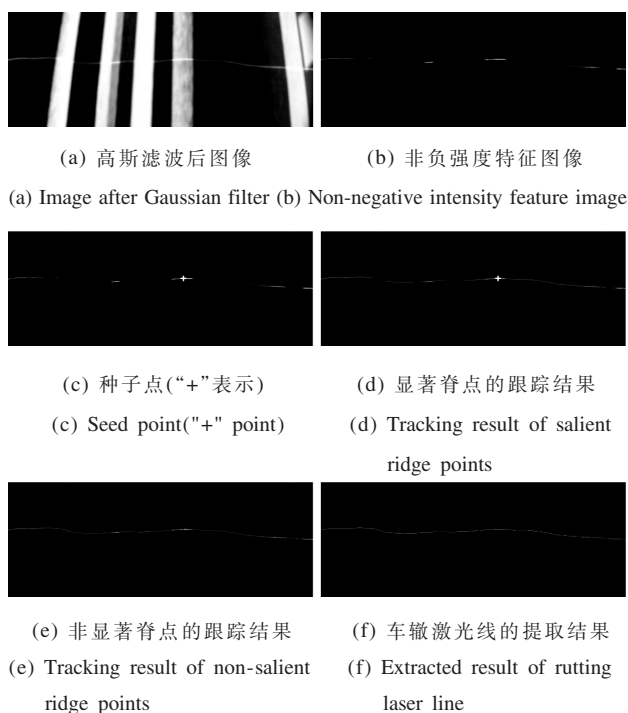


图 5 文中提取算法的分步测试结果

Fig.5 Test results step-by-step by the proposed method

将文中方法与两种常用的激光线车辙提取经典方法，即图像处理方法和灰度重心法进行对比。图 6(a)、(c)、(d)分别为图像处理方法、灰度重心法及文中方法对图 5(a)的提取结果。检出率分别为 82.70%，59.63%，99.51%，耗时分别为 2.68、3.62、0.12 s。检出率对比表明文中方法更为准确。从视觉上可看出，图像处理方法和灰度重心法提取的车辙激光线与实际车辙激光线上的一些光点是不对应的，存在偏差，文

中方法提取的车辙激光线与实际车辙激光线的光点基本上是对应的，与实际车辙线最接近。以上对比表明了文中方法提取的车辙激光线是准确的、连续的和完整的，且速度快。

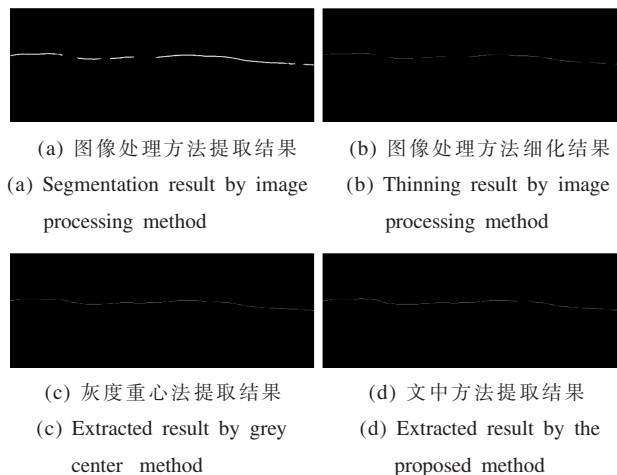
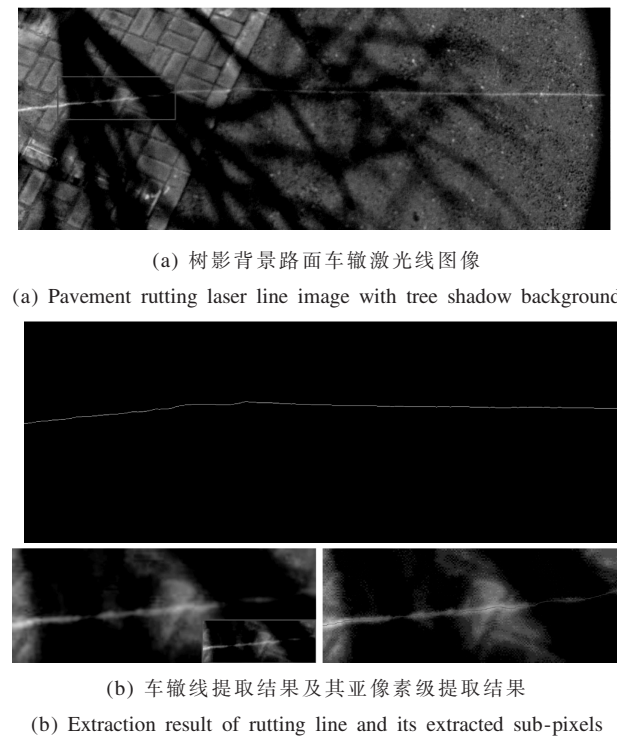
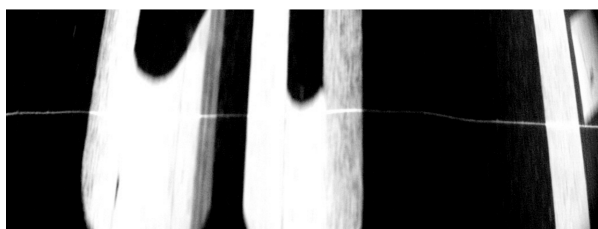


图 6 几种方法提取结果对比

Fig.6 Comparison of rutting line results extracted by different methods

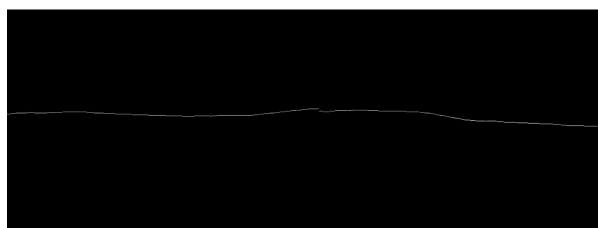
图 7 为不同类型的复杂路面车辙激光线图像，其中图 7(a)有树影干扰，图 7(c)有路标干扰，文中方法提取的车辙激光线结果见图 7(b)、7(d)，检出率分别为 99.32%，99.51%。其中，图 7(b)下方对应于路面图 7(a)中的矩形框图像插值放大的亚像素提取结果。实验结果表明文中方法有很强适应性及稳定性，可实现车辙激光线的亚像素级定位。





(c) 路标背景路面车辙激光线图像

(c) Pavement rutting laser line image with signpost background

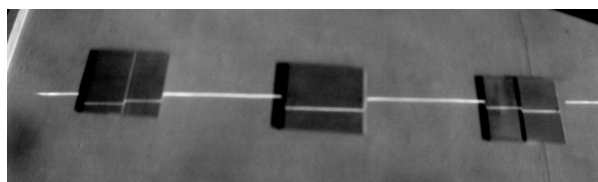


(d) 车辙线提取结果

(d) Extracted result of rutting line

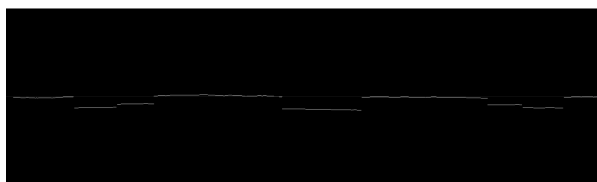
图 7 几组复杂路面车辙激光线图像及车辙激光线提取结果  
Fig.7 Rutting laser line images on complex road conditions and the extracted rutting laser lines

车辙深度与激光器参数和相机及安装位置参数等有关,但由于安装角度、位置等测量有误差,为规避相机内外参数和安装参数测量误差影响,通过人工标定块来确定车辙深度计算公式(7)的参数。在基准面上,放置高度已知的一些标定块,见图 8(a),其中左、右相同梯形标定块高度为 30 mm,25 mm,中间方形标定块高度 35 mm。提取结果见图 8(b),其中单色线为基准线,从图 8(b)中获取标定块的图像像素高度(以像素为单位)。通过公式(7)可计算出  $a$  为 0.7849,  $b$  为 0.0,据此,可建立车辙图像像素高度与实际高度的关系。利用公式(7)可计算路面车辙各测点深度。



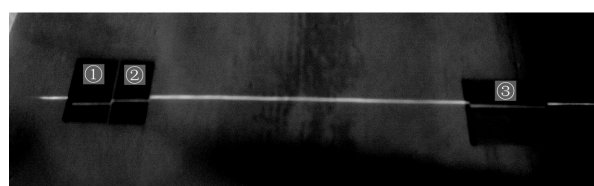
(a) 人工深度标定块

(a) Standard depth calibration blocks



(b) 标定块激光车辙线的提取结果

(b) Extraction result of rutting laser line of calibration blocks



(c) 标准深度量块及测点①②③

(c) Standard depth measurement blocks and measurement points ①②③



(d) 标准量块车辙激光线的提取结果

(d) Extraction result of rutting laser line of standard measurement blocks

图 8 路面标定块图像车辙激光线与车辙深度标定  
Fig.8 Rutting laser line and rutting depth calibration of pavement calibration block image

为了验证图像测量误差,在路面上设定 3 个测点进行实验,见图 8(c),提取结果见图 8(d),实际深度值与图像测量计算结果及误差见表 1,由表 1 可知,图像测量值与实际深度值相对误差 < 3%,符合车辙检测误差标准要求<sup>[1]</sup>。

表 1 车辙深度实际值与图像测量结果对比  
(单位: mm)

Tab.1 Comparison of real value and image measurement value of rutting depth  
(Unit:mm)

	Point ①	Point ②	Point ③
Real value	10	5	5
Measurement value	10.203 7	5.101 9	5.101 9
Relative error	2.037%	2.038%	2.038%

利用车辙深度标定,可建立车辙激光线图像像素测量高度与车辙实际深度之间的关系,对路面车辙深度进行检测,计算各断面车辙深度及平均深度。

#### 4 结 论

文中研究了基于线结构光的路面车辙实时检测方法,在行车状态下,采用线阵激光器连续向路面发

射线激光,通过高分辨率相机实时获取路面车辙激光光线序列图像。针对车辙激光光线因路面复杂背景的动态变化存在难以提取问题,提出了基于非负特征和峰值连续性的路面车辙激光光线提取方法,此方法已装载在智能检测车上,在京开、京沈等路段进行了大量测试实验,验证了文中方法的准确性和稳定性,检出率较高,漏检少,能克服路标、路面喷涂、污迹等外部因素的干扰和适应背景变化,解决了路面复杂背景车辙激光光线的快速精确提取问题。为在不封路、不停车、不阻碍交通的自然条件下的路面车辙自动检测和路面质量评价提供关键技术。

#### 参考文献:

- [1] He Song, Chang Licheng, Jing Genqiang, et al. Vehicle bearing road laser rut-meter JT/T677-2009. People's Republic of China Transport Industry Standards [S]. Beijing: People Transportation Press, 2009. (in Chinese)  
和松,常成利,荆根强,等.车载式路面激光车辙仪行业标准 JT/T677-2009,中华人民共和国交通行业标准[S].北京:人民交通出版社,2009.
- [2] He Song, Li Fujin, Chang Chengli, et al. Field test methods of subgrade and pavement for highway engineering JT/T677-2009. People's Republic of China industry standards [S]. Beijing: People Transportation Press, 2008. (in Chinese)  
和松,李福晋,常成利,等.公路路基路面现场测试规程 JTG E60-2008,中华人民共和国行业标准[S].北京:人民交通出版社,2008.
- [3] Xu Weidong, Yan Kai, Wang Xin. Pavement rutting detection system based on structured light [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2009(6): 55-66. (in Chinese)  
徐卫东,颜凯,王鑫.基于结构光的路面车辙检测系统[J].公路交通科技,2009(6): 55-66.
- [4] Cao Ting, Wang Weixing, Yang Nan, et al. Detection method for the depth of pavement broken block in cement concrete based on 3D laser scanning technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0206006. (in Chinese)  
曹霆,王卫星,杨楠,等.基于三维激光扫描技术的路面断板深度检测[J].红外与激光工程,2017,46(2): 0206006.
- [5] Shi Y, Cui L, Qi Z, et al. Automatic road crack detection using random structured forests [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016,17(12): 3434-3445.
- [6] Wang Xin, Tang Zhenming. A new automatic rutting detection method for pavement [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(10): 246-248. (in Chinese)  
王鑫,唐振民.一种新的自动路面车辙检测方法[J].计算机工程与应用,2008,44(10): 246-248.
- [7] Han Yi, Wu Chuna, Li Shanhu. Research and realization of multi beam common beam laser wheel tracking detector [J]. *Computer Engineering and Design*, 2010, 31(6): 1347-1350. (in Chinese)  
韩毅,吴初娜,李山虎.多路共梁式激光车辙检测仪的研究与实现[J].计算机工程与设计,2010,31(6): 1347-1350.
- [8] Guo Xinxin, Hui Bing. Assessment of rut depth measurement accuracy of point-based rut bar systems using 3D line laser imagine technology [J]. *Road Machinery and Construction Mechanization*, 2016, 33(9): 113-118. (in Chinese)  
郭鑫鑫,惠冰.基于三维激光技术的多点激光车辙检测误差分析[J].筑路机械与施工机械化,2016,33(9): 113-118.
- [9] Li Zhonghua. Application of laser profiler in pavement roughness and rut detection [J]. *Transportation Science and Technology*, 2004(3): 7-9. (in Chinese)  
李中华.激光断面仪在路面平整度及车辙检测中的应用[J].交通科技,2004(3): 7-9.
- [10] Li Li, Sun Lijun, Tan Shengguang, et al. Line-structured light image processing procedure for pavement rut Detection [J]. *Journal of Tongji University*, 2013, 41(5): 710-715. (in Chinese)  
李莉,孙立军,谭生光,等.用于路面车辙检测的线结构光图像处理流程[J].同济大学学报,2013,41(5): 710-715.
- [11] Huang Xuemei, Liu Zhiwei, Zhao Jibin. Surface detection method with line structured light in complex environment [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(10s): 682-689. (in Chinese)  
黄雪梅,刘志伟,赵吉宾.复杂环境下线结构光曲面检测方法[J].光学精密工程,2016,24(10s): 682-689.
- [12] Liu Wei, Zhang Yang, Gao Peng, et al. Sub-pixel center extraction method of laser stripe center based on hierarchical processing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(10): 1017010. (in Chinese)  
刘巍,张洋,高鹏,等.结合分层处理的激光光条亚像素中心提取方法[J].红外与激光工程,2017,46(10): 1017010.
- [13] Feng Ping, Liu Zhen. Automatic localization method of the multi-planar strip in rudder angle measurement [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6): 911-916. (in Chinese)  
冯萍,刘震.舵面角度测量中结构光光条图像自动定位方法[J].中国光学,2014,7(6): 911-916.
- [14] Xu Wei, Tang Zhenmin, Lv Jianyong. Pavement crack detection based on image saliency [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2013, 18(1): 69-77. (in Chinese)  
徐威,唐振民,吕建勇.基于图像显著性的路面裂缝检测[J].中国图像图形学报,2013,18(1): 69-77.