

用于路面车辙检测的线结构光图像处理流程

李 莉^{1,2}, 孙立军¹, 谭生光², 宁国宝³

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 江西赣粤高速公路股份有限公司, 江西 南昌 330025;

3 同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: 分析了激光线结构光车辙检测原理, 提出了适应沥青路面纹理特征和技术状况的线结构光图像处理流程, 包括路面横断面曲线提取和车辙特征参数提取。其中路面横断面曲线提取由光心提取、光心连接和光心曲线平滑实现。基于高斯拟合的光心提取用于确定线结构光位置, 光心连接用线性插值得到完整的路面横断面曲线, 而光心曲线平滑则可削弱路表纹理及其他干扰因素的影响。车辙特征参数提取在获取横断面包络线的基础上实现, 最大车辙深度和曲线填充面积均可作为车辙评价参数, 而路面横断面曲线也可用于路面横向变形特征的描述。模拟车辙试验表明, 线结构光检测可以精确测量车辙深度, 提出的图像处理流程具备可行性。

关键词: 路面变形; 路面检测; 车辙检测; 图像处理; 线结构光

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

Line-structured Light Image Processing Procedure for Pavement Rut Detection

LI Li^{1,2}, SUN Lijun¹, TAN Shengguang², NING Guobao³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Jiangxi Ganyue Expressway Co. Ltd., Nanchang 330025, China; 3. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The work principle of the Laser line-structured light in rut detection is introduced and a line-structured light image processing method is proposed to deal with the complicated characteristics of the pavement surface textures as well as the technical conditions. The image processing procedure can be divided into two parts, the extraction of the pavement cross-section curve and the output of the rutting parameters. The pavement transverse section curve can be obtained through three steps. First, the light center extraction, which aims to find the true center of the line-structured light through Gaussian fitting. Second, the light center connection, which restores the characteristics of the

entire pavement transverse section by linear interpolation. Third, smoothing of the light center curve, which can reduce the impact of pavement surface texture and other interferences. The output of the rutting parameters is based on the envelope line of the pavement transverse section curve. The maximum rut depth and the rut area can be calculated as the rutting parameters, and the pavement transverse section curve can also be used to describe the characteristics of the pavement transverse deformation. The rut sample is used to test the rut measurement method and the image processing procedure above. The result shows that the line-structured light can measure the rut depth accurately and the processing procedure proposed in this work has the potential to be applied in practice.

Key words: pavement deformation; pavement detection; rut detection; image processing; line-structured light

线结构光检测是一种基于光学三角测量原理的测距技术, 兴起于 20 世纪 70 年代, 主要用于工业测量和以智能机器人研究为导向的三维形貌测量^[1]。20 世纪 80 年代被引入路面变形检测领域, 早期使用的是投影结构光, 以 PASCO RoadRecon 检测车为代表^[2-4]。受当时技术条件和开发成本限制, 投影技术并未进一步发展, 并很快被激光结构光技术取代, 以日本 Komatsu 检测系统 (Automated Pavement Distress Survey System) 为代表^[5]。虽然由于操作的复杂性和技术的局限性 (如只能在夜间使用) 以及昂贵的成本该系统并未在实践中大量使用, 但却使激光结构光检测技术在路面变形检测领域被认识和接受。其后类似研究相继开展, 如 Romen Catcher LY 检测车^[6] 和 INO (Institute of National Optics) 车辙系统^[7] 等, 但应用均较为有限, 以试验和小范围使用为主^[4]。路面线结构光变形检测的研究在我国开展

收稿日期: 2012-04-28

第一作者: 李 莉 (1983—), 女, 工学博士, 主要研究方向为道路设施管理系统。E-mail: 622lilian@tongji.edu.cn

通讯作者: 宁国宝 (1977—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为先进载运工具与交通信息融合。E-mail: guobao.ning@tongji.edu.cn

较晚,且多处于理论研究或试验设计阶段^[8-10],少量研究成果逐渐开始产品化并投入测试,如拉普勒斯(Lapres)线激光路面车辙仪和南京理工大学的路面状况激光三维智能检测车^[11],但其实际工作能力尚待验证。

总体而言,激光线结构光(线激光)技术在路面变形检测领域的应用尚未成熟,我国的研究仍处于起步阶段。其原因除了路面检测的动态环境对硬件系统设计的要求较高外,主要还因为与线激光检测匹配的路面图像处理算法尚不完善,存在两方面的问题:①被测路面始终处于变化状态,路面材料和技术状况的差异带来结构光成像的差异,使结构光图像的批量自动化处理较难获得令人满意的结果;②沥青路面路表纹理和杂质的影响可能使结构光成像不完整或不均匀,成为粗细不一的破碎光条,影响检测的准确性。

本文针对沥青路面的上述特性,分析路面变形的线激光检测原理,设计适用于沥青路面的线结构光变形图像处理方法,并提出与之适应的沥青路面车辙评价指标。

1 线结构光车辙检测原理

线结构光车辙检测原理如图1所示(路面纵断面)。图中 L 为成像设备与线结构光发射器的间距; θ 为成像设备俯角; H 为成像设备的安装高度; X_h 为路面凸变形量; X_l 为路面凹变形量。

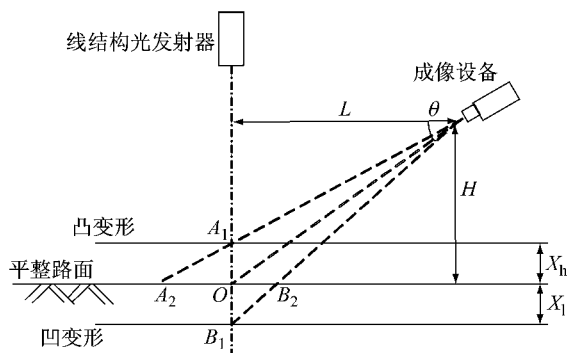


图1 结构光车辙检测原理

Fig.1 The configuration of the line-structured light rut detection system

设线结构光垂直投射于路面,当路面平整时,线结构光与路面交于 O 点;当路面有凸变形时,交于 A_1 点;而当路面有凹变形时,交于 B_1 点。另有一成像设备倾斜拍摄(拍摄俯角 θ),当路面平整时,像点位置不变,仍为 O 点;而当路面发生凸变形或凹变形

时,像点则会相应地平移至 A_2 点和 B_2 点,采集此时的线结构光变形图像,光条的变形程度反映了路面的变形程度。其中轮迹带处的凹变形即为路面车辙。

在上述检测系统中,成像设备和结构光发射器的相对位置可预先测定,也即 H 和 L 已知(或 θ 已知)。线结构光图像采集并保存后,可对光条图样进行处理并提取光条变形量,再根据成像系统与目标物的映射关系计算得到光条变形量对应的路面偏移量,也即 l_{OA_2} 和 l_{OB_2} 可通过图像处理得到,其中 l_{OA_2} 和 l_{OB_2} 分别为 OA_2 和 OB_2 的距离。因此,线结构光车辙检测系统的工作原理就变成了已知位置参数 H 和 L 以及光条实际变形程度 l_{OA_2} 和 l_{OB_2} ,求路面变形量 X_h 和 X_l 的问题。其计算过程可由式(1)或式(2)实现:

$$\begin{cases} X_h = H \cdot l_{OA_2} / (L + l_{OA_2}) \\ X_l = H \cdot l_{OB_2} / (L - l_{OB_2}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} X_h = l_{OA_2} \cdot \tan \theta \\ X_l = l_{OB_2} \cdot \tan \theta \end{cases} \quad (2)$$

此外,图1所示仅为路面横断面上一点的变形计算原理,该方法可推广至全断面,因此线结构光路面检测不仅可以检测车辙,还可以获得完整的横断面曲线。

使用大功率532 nm激光作为线结构光光源,相应的高速高清面阵成像设备采用双滤光片消光设计,以满足滤光要求和降低开发成本,如图2所示,图中CCD为电荷耦合器件。滤光片1为宽带滤光片,安装在镜头前,要求具备较高的截止范围和截止深度,排除大范围干扰光;滤光片2为窄带滤光片,安装在镜头与机身之前,用于进一步缩窄带宽。经过消光设计的成像系统可以获得质量较为稳定的结构光图像,从而为解决①创造了条件。

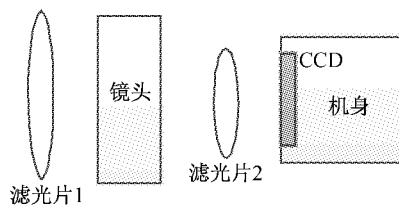


图2 双滤光片系统

Fig.2 Dual filter system

2 线结构光图像处理流程

从线结构光检测原理可知,路面车辙(变形)检测的关键在于对线结构光变形图像的有效处理。采

用线结构光检测系统输出的是 ROI (region of interest) 光条图像, 通过可批量化、自动化控制的硬件预处理输出, 由此便可获得成像质量稳定、尺寸均匀的结构光图像, 从而有效解决了问题①. 典型图像形式如图 3 所示.

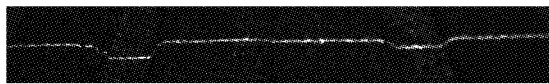


图 3 典型目标区域光条图像

Fig. 3 A typical region of interest image

图像处理的目的是分析原始 ROI 光条图像, 并最终得到可用于车辙评价的特征参数, 其流程设计必须针对问题②, 可排除路表纹理和杂质的影响. 为此设计了图 4 所示的图像处理流程, 整个处理流程可分为两部分: 路面横向变形曲线提取和车辙特征参数提取.

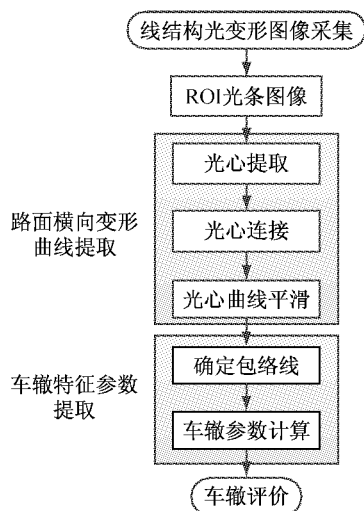


图 4 线结构光图像处理流程

Fig. 4 Line-structured light image processing procedure

3 路面横向变形曲线提取

3.1 光心提取

为了测量路面变形, 首先需要确定线激光投射于路面的准确位置, 也即提取线结构光光条的光心, 将光强和宽度均不统一的光条转化为单像素的光线. 为此, 有必要先研究线激光的特性.

线激光由点激光经棱镜扩束得到. 激光器输出光束一般均为结构特殊的高斯光束^[12], 光斑直径随着与光源距离的增大而增大, 同时中心光强逐渐减弱, 而高斯分布的趋势不变. 理想情况下, 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

截面也应近似地服从高斯分布, 其峰值即为光条中心光强. 但由于实际检测环境的复杂性, 如不稳定的环境光照(自然光、照明灯光)、被测物面纹理引起的反射光干扰、成像设备感光元件的成像噪声以及采样、量化误差等, 使实际拍摄到的结构光截面光强不完全符合高斯分布, 峰值偏移. 因此, 光心提取首先需要寻找正确的光条截面高斯峰值.

3.1.1 光条截面的高斯拟合

光条截面的高斯峰值可通过高斯拟合得到. 图 5 为典型的光条实测截面光强近似偏峰的高斯分布, 用高斯曲线拟合实测截面光强分布, 找到拟合峰值位置 P_{\max} , 将其作为该截面光强的中心位置. 理论上, 对整个光条逐截面拟合便可得到最接近真实值的光心曲线, 但在实际操作中由于沥青路面纹理或其他干扰的影响, 成像后的光条可能存在“断线”现象. “断线”的截面光强分布受背景光强控制, 可能不具备高斯分布特征或拟合出错误峰值(背景光强峰值). 因此, 有必要在高斯拟合之前对光条截面进行预处理.

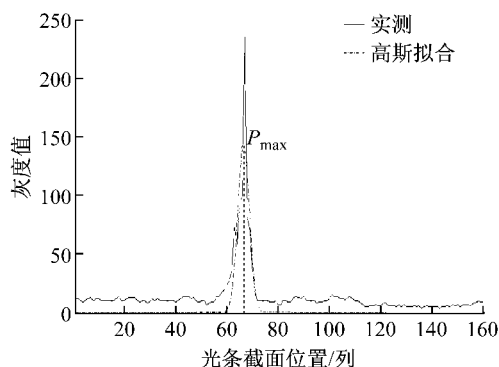


图 5 光条截面实测与高斯拟合灰度值

Fig. 5 Gaussian fitting of the cross-section light intensity

3.1.2 高斯拟合前的预处理

预处理的目标是找出光条“断线”位置并标记, 将“断线”截面从原光条中剔除. 由于采用的成像设备上装有滤光片, 可大幅削弱环境光强的影响, 使 ROI 图像中的光条与背景灰度差异巨大, 因此可从像素灰度入手查找“断线”位置. 经试验发现, 组成图像背景的低灰度像素主要集中在灰度值为 0~50 的区间内, 因此可取 50 为灰度阈值, 对原始光条图像逐截面取灰度极值, 若极值低于 50 则视为背景, 标记为“断线”位置.

对图 3 所示的 ROI 光条图像用上述方法预处理, 剔除“断线”位置, 然后对其余光条截面逐一高斯拟合, 得到各截面峰值位置, 如图 6 所示.

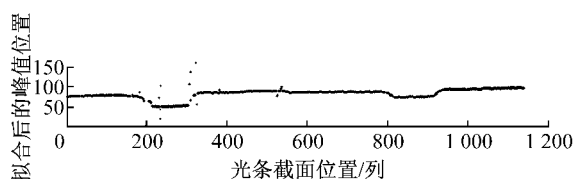


图6 预处理后的高斯拟合结果

Fig.6 Light center curve by Gaussian fitting after the image preprocessing

此时得到的光心拟合峰值图已基本反映线结构光光条的光心位置,但在部分区域尚存在明显偏离光条区域的散点,这些散点主要由图像背景噪声引起,因此有必要对拟合峰值图进一步去噪。

3.1.3 高斯拟合后的去噪

尽管光心曲线在宏观上是一条变形曲线,但在微观的像素级别,相邻区域内的像素取值却应接近于连续变化。根据这一特性,取宽度为5的窗格对高斯拟合后的光心图像去噪,计算方法如图7所示。对第 n 个光条截面而言,其中心坐标应不明显偏离相邻2个截面中心位置的均值。以该均值的 $\pm 5\%$ 为过滤区间,超过此区间的取值视为背景噪声。图6去噪后的效果如图8所示,去噪后背景噪声显著减少,虽然部分光心值有所削弱,但削弱程度轻微,可在随后的光心连接操作中修复。

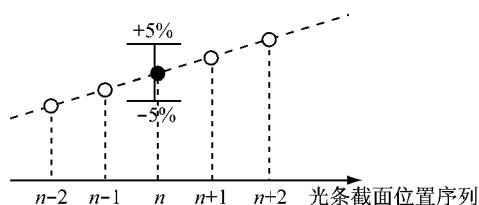


图7 结构光光条截面去噪算法

Fig.7 Denoising window for the cross-sections of the line-structured light

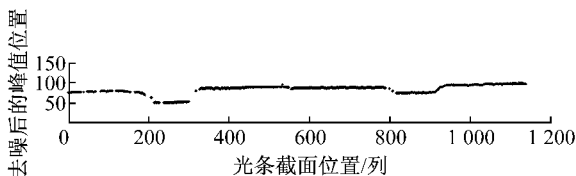


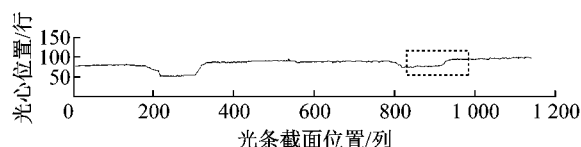
图8 去噪后的高斯拟合结果

Fig.8 Light center curve by Gaussian fitting after denoising

3.2 光心连接

用高斯拟合提取光心能最大限度地获得光心位置真值,但无法解决由路表纹理或其他干扰引起的“断线”问题。而用线结构光检测沥青路面变形时不仅要求测得变形参数,还希望获得完整的路面横断面曲线。从检测的角度看,完整的路面横断面能提供

更丰富的数据点,减少计算错误。因此,有必要对断裂、破碎的光心曲线进行连接操作。在本试验条件下,光心曲线虽有破碎,但整体变化趋势保留完好,断裂比例经计算均不足4%,因此可用线性插值法连接。图8插值连接后的光心曲线如图9。



a 光心位置与光条截面位置



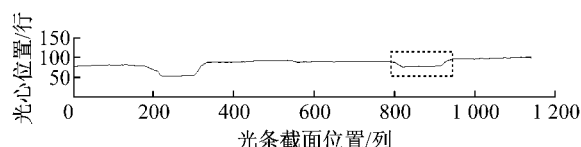
b 放大后的曲线形状

图9 连接后的光心曲线

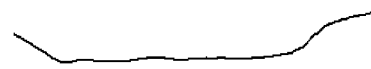
Fig.9 Light center curve after connection

3.3 光心曲线平滑

插值连接后的光心曲线已能初步反映路面变形特征,但在微观的像素级别仍存有大量毛刺,反映出路表纹理对线结构光变形曲线的影响,而纹理的不均匀性(如沥青路面粘结料散失引起的麻面甚至破碎)直接影响车辙计算精度。为了最大限度地减少路表纹理的影响,应对插值连接后的光心曲线进行平滑。本文选用宽度为9的低通滤波器平滑光心曲线,平滑效果如图10所示。



a 光心位置与光条截面位置



b 放大后的曲线形状

图10 平滑后的光心曲线

Fig.10 Light center curve after smoothing

至此,破碎的结构光光条经过处理成为光滑、连续的结构光曲线,问题②得到了有效解决,在此基础上可进行车辙计算。

4 车辙特征参数提取

线激光车辙检测获得的图形是经过变形的(放大或缩小)路面横断面轮廓线,虽然较实际断面有所变形,但曲线形式并没有本质变化,因此可用测量断面车辙的方法测量其变形情况。根据横断面轮廓线测量路面车辙的方法可分为3类:正负面积(positive

and negative area)法、填充面积(area of fill)法以及车辙深度(rut depth)法^[13],其中车辙深度法又分为模拟人工直尺检测的 SEM(straight edge model)法和基于包络线测量的 WM(wire model)法^[14].

在面积类检测方法中,填充面积的物理意义最为直观,且与路面汇水面积有一定联系;而在深度类检测方法中,WM 法计算迅速,参数更适合自动化提取.此外这 2 种方法都基于包络线,具有相同的计算基础,有利于提高计算效率,因此是自动化车辙检测的首选,为此需要先确定光心曲线的包络线.

4.1 确定包络线

路面横断面包络线的一般定义^[15]是:沿横断面逐点连接峰值点,且连线在峰值点处的外转折角应不小于 180° .其算法如图 11 所示,可描述如下:①将横断面起点 P_1 记为第 1 个峰值;②依次计算峰值后每点与峰值间的斜率,找到斜率最大(t_{\max})的点为下一个峰值 P_2 .③从新的峰值起重复步骤②的操作,直至查找到横断面结束点 P_n ;④将横断面结束点 P_n 记为最后一个峰值;⑤依次插值连接各峰值.



图 11 包络线算法

Fig.11 Calculation of the envelope line

包络线算法涉及逐点运算和循环操作,相对较为耗时,因此更适合较光滑的断面曲线,以提高计算速度.由此也进一步说明平滑光心曲线的必要性.

4.2 车辙参数计算

4.2.1 车辙深度法

基于 WM 法的车辙深度计算以断面最大车辙深度为准,如图 12 所示.采用这一参数的优点是便于与人工检测结果校核.图像处理结果可直接输出最大车辙深度所在横向位置及车辙深度值.此时车辙输出单位是像素,须根据物像关系转化为路面实际变形量.以图 12 所示断面为例,其最大车辙深度位置在图像的第 249 列,车辙深度为 33 像素,根据其对应的物像关系,线激光实际变形量为 17.2 mm,代入式(2)(俯角 50°)计算得到实际车辙深度应为 20.5 mm,与人工测量结果(21.0 mm)接近.图像计算值与人工测量值间的差异主要由拍摄角度测量误差引起.

4.2.2 填充面积法

除了车辙深度,填充面积也可以用来描述车辙特征,如图 13 所示.填充面积与路面汇水区域存在关联,而水损坏对路面性能影响极大,因此填充面积

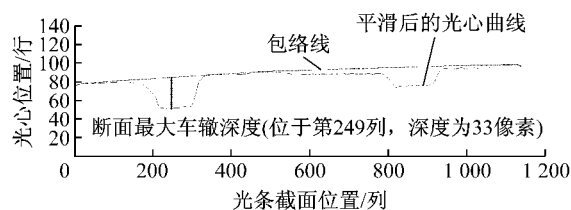


图 12 车辙深度提取

Fig.12 Rut depth as the rutting parameter

是一个很有价值的评价指标.线激光图像处理可直接得到准确的车辙面积,以图 13 所示图像为例,断面填充面积累计为 8 240 像素单位,根据物像关系换算得到实际断面填充面积应为 $5\,106.4\text{ mm}^2$.

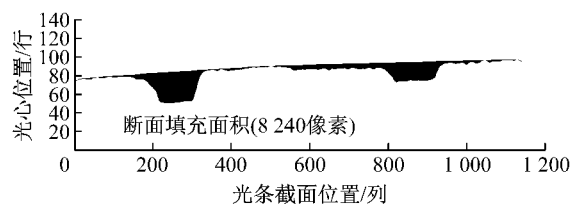


图 13 车辙填充面积提取

Fig.13 Rut area as the rutting parameter

5 试验验证

以目前沥青路面检测中常用的车辙评价指标车辙深度为例,验证上述线结构光检测方法的有效性.由于搭载检测设备的车辆平台尚不完备,试验中以车辙板模拟实际沥青路面,如图 14,用不同的 5 个断面作为平行试验断面,各断面人工检测结果见表 1.

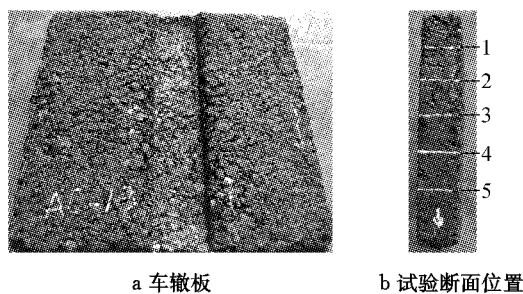


图 14 用车辙板模拟有车辙的沥青路面

Fig.14 Modeling the rutted asphalt pavement by rut sample

表 1 人工检测车辙深度结果

Tab.1 Manual test results					mm
断面 1	断面 2	断面 3	断面 4	断面 5	
21.5	24.0	24.0	22.5	21.0	

用线激光检测装置对图 14 所示的 5 个断面进行车辙检测,并采用不同的成像角度重复检测 4 次,以获取较多的平行试验结果.运用上述线结构光图像处理流程对检测结果进行处理,得到车辙深度如

表2所示。

表2 线激光检测车辙深度结果

Tab.2 Line-structured light test results mm					
编号	断面1	断面2	断面3	断面4	断面5
1	23.444	24.036	24.468	23.567	22.959
2	22.802	24.389	24.359	23.928	23.096
3	23.232	23.383	24.394	23.843	23.668
4	23.072	24.132	24.228	24.256	22.879
平均	23.138	23.985	24.362	23.899	23.151

从表2可以看出,线结构光检测得到的断面车辙深度一般略大于人工检测值,以本文检测环境来看,线结构光检测与人工检测的偏差约为1~2 mm。这是因为线结构光检测可获得完整的道路横断面,精确地测量其逐点变形,并输出最大变形量为车辙深度。由于其计算过程在本质上是一种“点计算”,因此在计算过程中不可避免地受到路表构造深度影响,而人工检测的精度一般低于路表构造深度的波动程度,因此对构造深度不敏感,如图15所示。从这个意义上来说,线激光检测是一种更为精确的测量车辙深度的方法。

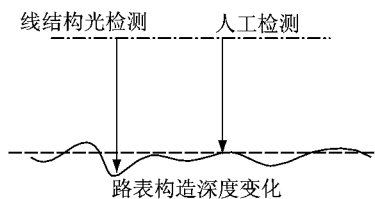


图15 路表构造深度对检测结果的影响

Fig.15 The impact of surface texture depth on rut measurement results

6 结 语

(1) 利用大功率线激光可实现对路面车辙的自动化快速检测;线结构光变形图像处理基于可批量输出的ROI图像,同时采用了双滤光片消光设计,可有效减少环境因素的干扰。

(2) 针对沥青路面纹理粗糙、技术状况变异性较大的特征,设计了包括光心提取、光心连接和曲线平滑在内的线结构光图像处理流程,最终得到完整光滑的路面横断面曲线。

(3) 基于包络线的最大车辙深度和填充面积都可作为自动检测条件下的路面车辙评价指标,而路面横断面曲线也可用于路面横向变形特征的描述。

(4) 模拟车辙试验表明,线结构光检测可以精确测量车辙深度,本文所述线结构光图像处理流程具备可行性。

参考文献:

- [1] Will P M, Pennington K S. Grid coding: a preprocessing technique for robot and machine vision [J]. Artificial Intelligence, 1971, 2(3): 319.
- [2] PASCO. PASCO road survey system for pavement maintenance and repair planning[R]. Tokyo: Road Survey Department, 1984.
- [3] Dubose J B. Evaluation of continuous photographic survey vehicles for conducting detailed distress surveys [C]// Proceedings of 2nd North American Pavement Management Conference. Ontario: Ministry of Transportation and Communications, US Federal Highway Administration, 1987: 3.325-3.330.
- [4] Mcghee K H. Automated pavement distress collection techniques - a synthesis of highway practice[R]. Washington D C: Transportation Research Board of The National Academies, 2004.
- [5] Fukuhara T, Terada K, Nagao M, et al. Automatic pavement-distress-survey system [J]. Journal of Transportation Engineering, 116(3): 280.
- [6] Nichireki. Introduction of Romen Catcher LY [EB/OL]. [2011-12-08]. http://www.nichireki.co.jp/english/pro-duct/consult/consult_list05/consult05_01.html.
- [7] INO. Introduction of laser rut measurement system [EB/OL]. [2011-08-20]. <http://www.ino.ca/en-CA/Achievements/Description/project-p/laser-rut-measurement.html>.
- [8] 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.
WANG Xin, TANG Zhenmin. New method for automatic road rut detection [J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(10): 246.
- [9] 王明辉.沥青路面检测中的图像处理技术研究[D].武汉:武汉理工大学,2006.
WANG Minghui. Research on image processing techniques in asphalt pavement surface inspection [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.
- [10] 柳钰.沥青路面车辙深度检测系统研究[D].武汉:武汉理工大学,2007.
LIU Yu. The research on the depth of rut in asphalt pavement surface detection system [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.
- [11] 南京理工大学.路面状况激光三维智能检测车.中国:ZL 03113468.8 [P]. 2004-11-24.
Nanjing University of Science and Technology. Intelligent 3D laser road state detecting vehicle. China: ZL 03113468.8 [P]. 2004-11-24.
- [12] 贺俊吉,张广军.结构光三维视觉检测中光条图像处理技术研究[J].北京航空航天大学学报,2003,29(7):593.
HE Junji, ZHANG Guangjun. Study on method for processing image of strip in structured-light 3d vision measuring technique [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(7): 593.
- [13] Simpson A L. Characterization of transverse profiles [J]. Journal of the Transportation Research Board, 1999, 1655: 185.
- [14] Mallela R, Wang H Q. Harmonising automated rut depth measurements—stage 2 [R]. Wellington: Land Transport New Zealand, 2006.
- [15] 李强.高速公路路面车辙检测、评价与预测技术研究[D].南京:东南大学,2007.
LI Qiang. Research on highway rut detection, evaluation and prediction technology [D]. Nanjing: Southeast University, 2007.