

一种新的激光车辙深度测量方法研究

张德津^{1,2} 李清泉^{1,2} 何 莉^{3*}

¹ 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079

² 时空数据智能获取技术与应用教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430079

³ 湖北工业大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068

摘要 车辙深度测量通常使用共梁式多路激光测距传感器测量路面多个离散点,由多个测量点组成的断面信息计算车辙深度,因横向采样点间距宽,导致测量误差较大。提出了一种新的激光车辙深度测量方法,采用线激光器和三维(3D)相机组合集成测量路面 3D 断面,通过 3D 断面解算车辙深度。3D 相机以一定夹角采集激光器投射在路面的线结构光图像,获取路面的 3D 断面数据,对断面数据通过拉依达准则进行异常值剔除,再进行旋转、平移和模型识别,最终计算路面左右轮迹和最大车辙深度。实际证明,数据重复性和相关性都达到 98% 以上,与传统方法相比较,该方法采样间距小、测量精度高、成本低、通用性强,具有广阔的使用推广价值。

关键词 测量;车辙深度;激光三角法;拉依达准则;三维相机

中图分类号 TP23; TP319; U418.6⁺8 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0112005

A New Method for Laser Rut Depth Measurement

Zhang Dejin^{1,2} Li Qingquan^{1,2} He Li³

¹ State Key Laboratory for Information Engineering of Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China

² Engineering Research Centre for Spatio-Temporal Smart Data Acquisition and Application (STSA), Ministry of Education, Wuhan, Hubei 430079, China

³ School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China

Abstract Share-beam multi-channel laser ranging sensor is usually used to detect rut depth by measuring several discrete points of the road which are used to form section information. The great transverse sampling distance causes large measurement error. A new laser method to detect rut depth is introduced; it measures three-dimensional (3D) section by integrating line laser sensor with 3D camera, which is used to resolve rut depth. 3D camera collects light image in the form of line structure projected on the road by laser at a certain angle, obtains 3D section data and rejects the abnormal value by the Pauta criterion. After rotating, translating and pattern recognition, left and right wheels mark and maximum rut depth are achieved. A case study shows that repeatability and correlation of data are over 98%. Compared with traditional methods, the proposed method has the better performance of short sampling distance, high accuracy, low cost, versatility and widely promotional value.

Key words measurement; rut depth; laser triangometric survey; Pauta criterion; 3D camera

OCIS codes 120.4290; 110.2945; 110.2970; 280.3400

收稿日期: 2012-07-24; 收到修改稿日期: 2012-09-11

基金项目: 国家 863 计划(2012AA112503)和高等级公路健康监测与养护技术开发及产业化项目资助课题。

作者简介: 张德津(1975—),男,博士研究生,主要从事激光测量、智能交通、空间信息服务等方面的研究。

E-mail: djzhang@whu.edu.cn

导师简介: 李清泉(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事摄影测量、智能交通、空间数据模型、空间信息服务、激光测量、交通影像处理等方面的研究。E-mail: qqli@whu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: heli.edu@hotmail.com

1 引言

截止 2011 年,我国公路通车里程达到 398.4 万公里,其中高速公路 7.4 万公里,二级及以上公路 50 万公里,民用汽车保有量达到 10578 万辆^[1],高速、准确的路面指标测量越来越重要。车辙是车辆在路面上行驶后留下的车轮永久压痕,是沥青路面主要的病害形式,通常由于沥青层及路面下层的塑性形变形成。许多公路机构和研究人员认同路面车辙导致车辆在潮湿天气下打滑和防滑性能下降,直接影响到行驶安全^[2];路面车辙也是路面病害的早期表现^[3],是典型的路面恶化的表征^[4]。国内常用的测量方法基本上采用共梁式多路激光测距传感器测量方法,通过在横断面方向上布设 7~9 个、23~25 个激光探头或 37 个超声探头采集道路横断面。随着传感器数目 n 的增加,车辙测量最大误差在 $n < 21$ 时减小较快,在 $n > 33$ 后衰减缓慢。因此,在一般准确度检测时,至少要选用 $n = 21$,才能保证车辙的最大误差不超过 5%^[5,6],使用成本偏高。随着 CCD 技术的发展,激光三角法开始被用于路面测量,文献[7]介绍了激光三角法结合 Delaunay 三角网计算车辙的方法的基础理论,但三角网建模解算物方坐标精度与标定的物方三角网密度有关,存在

一定的误差,特别对于较小车辙测量精度不够。

三维(3D)相机的出现使得利用 3D 相机获取被测物体表面断面成为可能,本文采用 3D 相机集成线激光器的车辙测量新方法,通过获取道路 3D 断面,经过异常值剔除、旋转、平移和模型识别,准确计算各种模型的车辙深度,经工程实测,车辙数据重复性和相关性都达到 98%以上,满足现在各行业标准及工程的要求。

2 激光车辙测量原理

根据激光三角测量原理,激光线从一侧以一定角度投射到被测对象表面,CCD 相机从另一侧以一定角度采集被测对象表面图像,在相机传感器上激光线就显示为被测对象的一个断面,如图 1 所示。如果对象表面有起伏,激光线由于被测对象表面的起伏而成曲线,从图像中提取出沿 x 轴(对象宽度)的曲线^[8],得到在图像上曲线的行列信息,列为在图像上的高度,在实际物方中为起伏的高度。在测量前对相机进行像素的标定,形成像素级标定表,利用标定表换算像方到物方坐标,可直接计算出曲线对应的物方实际坐标,从而获取被测对象表面的 3D 断面数据。

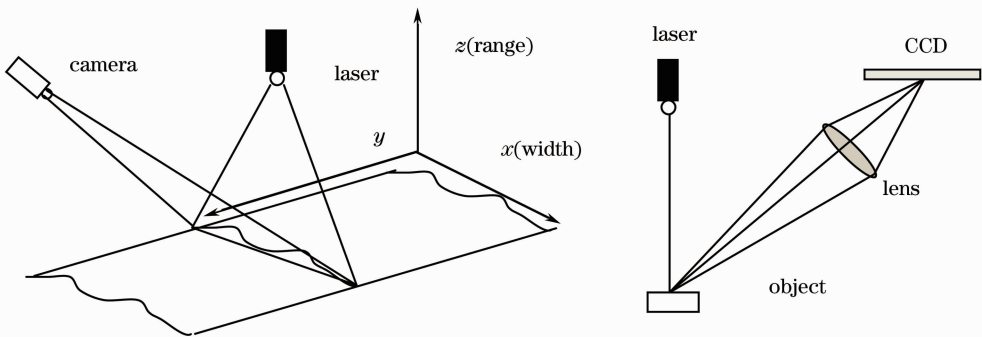


图 1 激光三角测量原理

Fig. 1 Principle of laser triangometric survey

3D 相机利用激光三角测量原理,通过采集激光线提取断面曲线,结合标定数据输出被测对象 3D 断面数据^[9,10]。相机与被测对象平面产生倾斜角度时,输出的断面数据和水平面会产生一定夹角,需要对断面进行线性旋转变换;采用多台相机时,多个相机会发生相对位移,需要对多个断面数据进行配准,再依据交通部公路路基路面现场测试规程规定的七种标准模型,计算左右轮迹的最大车辙和道路最大车辙。对被测对象表面反光等原因导致的断面数据异常点检测,格拉布斯准则和狄克逊准则有最佳检测效果,但该方法需要查表,拉依达准则^[11]虽然不

能对边远值进行可靠的检验^[12],但在样本数据较大的情况下,对异常值检测有一定效果且检测方法简单,鉴于本文实例断面数据样本点大于 3000,同时检测是为了消除特大异常值,最终选择了拉依达准则消除测量数据的异常点数据。

本方法集成的测量设备安装在一台机动车尾部两侧,包括 2 台 3D 相机和两台大功率照明线激光器(中心波长 $\lambda_0 = 810 \text{ nm}$,功率 $P = 7 \text{ W}$),激光器能在白天或夜晚适应不同路面的情况^[13],两台相机的视场在中间部分有 20 cm 的重合。激光器与铅垂面夹角 β ,相机与铅垂面夹角 α ,此时高度的测量分辨

率 $\Delta z \approx \Delta x \cos \beta / \sin(|\alpha - \beta|)$ mm/pixel, 其中 Δx 为图像宽度分辨率^[14], 由此可知, 提高测量分辨率, 在相机角度固定的情况下, 可以通过提高图像纵向分辨率和增大激光器与铅垂面的夹角, 可使得测量分辨率达到 1 mm 以内。

3 车辙计算方法

3.1 三维断面预处理

由于车辆在行驶过程中会产生摇晃、扭动, 造成数据采集相机也随之左右旋转和上下移动。物理结构加强可以减少两台相机相对位移, 但无法完全消除影响, 特别是左右旋转带来的误差无法消除, 表现在断面数据上就是曲线整体向一个方向倾斜, 两条曲线在垂直方向有相对位移, 如图 2 所示, 其中方框

内为两个断面的重合部分。

车体摇晃引起的左右旋转导致曲线整体向某一个方向倾斜, 需要将曲线整体进行线性变换, 变换到以理想道路平面为参考的平面上。在进行旋转变换前, 先采用移动平均方法对曲线进行滤波处理, 再剔除滤波后数据可能存在的异常值(如路面反光引起的异常值)。根据拉依达准则, 在处理数据时以 2 倍标准差剔除可能的异常值, 处理后的数据采用最小二乘法拟合成一条直线 $y = kx + b$, 曲线上所有点参照拟合的直线进行 $y_i = y_i - (kx_i + b)$ 变换。旋转后两曲线在垂直方向上的位移根据中间重合的部分, 求取平均值进行平移, 如图 3 所示。对预处理完成后的数据进行下一步车辙计算。

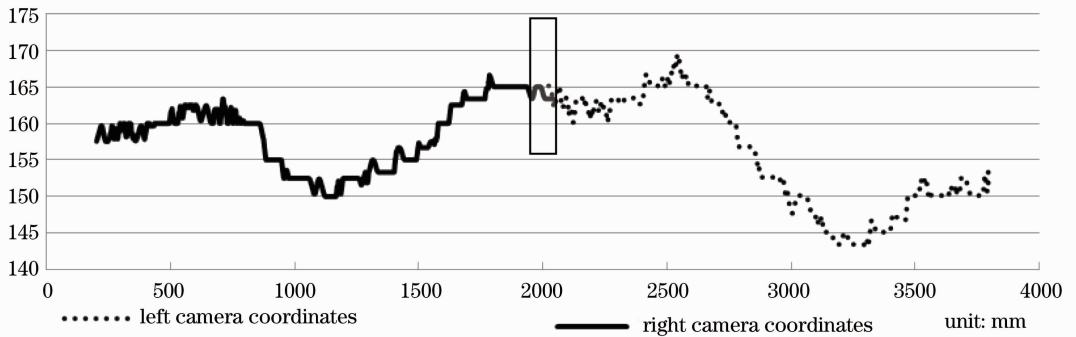


图 2 3D 原始断面数据

Fig. 2 3D original cross-section data

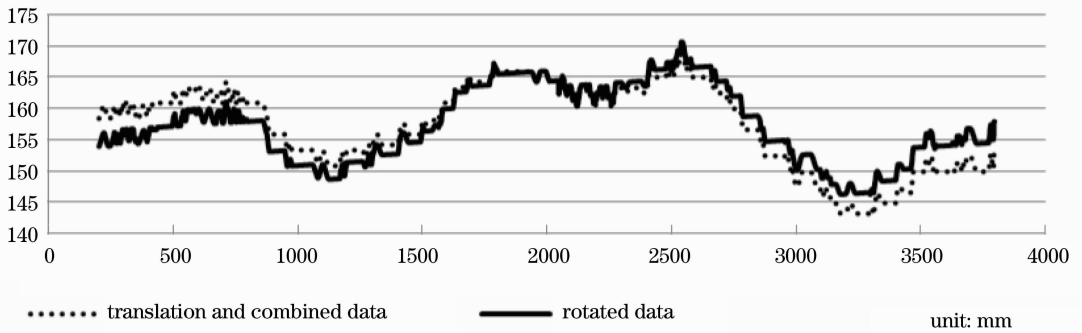


图 3 变换后的断面数据

Fig. 3 Transformed cross-section data

3.2 车辙算法

3.2.1 模型匹配

参照交通部公路路基路面现场测试规程规定, 车辙模型共分七种标准模型^[15], 七种模型可以简化为“W”和“U”两大模型, “W”模型又可分为凸凹两大类。对于凹“W”型和“U”需要通过参数界定, 如假设中间最高点与最低点的差为某个常数, 大于这

个常数为“W”型, 否则为“U”型。本文实验时采用阶梯比例方法, 即先对车辙分段, 在每个分段内设置不同的参考值, 如车辙分为 10、15、20 mm 及以上, 参考值为 2、3、5 mm 及以上。

模型匹配算法基于变换后的断面数据。实验数据显示, 车辙分布通常在车道路面的 500~3500 mm 以内范围^[16]。据此, 图 4 中 a 到 b 为可能的有效车辙

范围,在 ab 范围内确定最高点 c ,然后左右方向各确定最低点 d, e ,以 d, e 为参考,向左确定 f ,向右确定 g ,连接 fg 两个最高点为参考基准线,对于断面数据中大于基准线端点最小值(图 4 中的 g 点)的所有点 p_i ,利用向量叉乘右手法则,逐一计算向量 fg 与向量 fp_i 的关系,分别表示为 $f(x_0, y_0), g(x_1, y_1), p_i(x_i, y_i)$,则有如下公式

$$\begin{cases} d_1 = (x_1 - x_0)(y_i - y_0) \\ d_2 = (x_i - x_0)(y_1 - y_0) \end{cases} \quad (1)$$

若 $d_1 > d_2$ 则 fg 在 fp_i 顺时针方向,若 $d_1 < d_2$,则 fg 在 fp_i 逆时针方向,否则,两向量重合。若有断面点满足重合或在逆时针方向,则模型为凹“W”型,否则判断为凸“W”型。

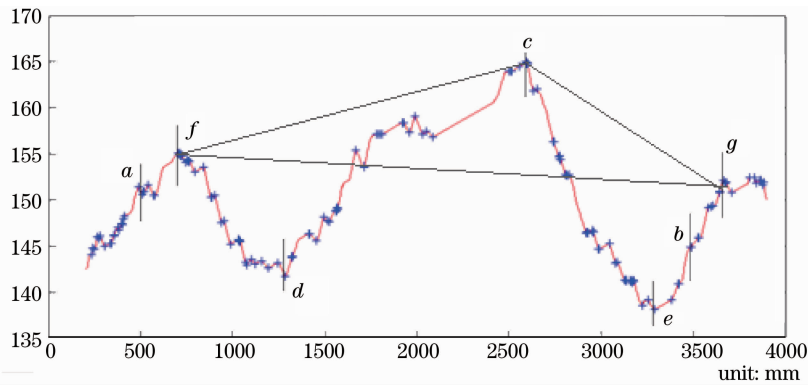


图 4 模型匹配

Fig. 4 Example of model matching

4 实验结果及误差分析

实验采用标准量块测量和实测路段测量两种方法进行,标准量块尺寸 $60\text{ cm} \times 60\text{ cm}$,高度 $10 \sim 60\text{ mm}$ 。选择一条平整道路,纵向每间隔 1 m 摆放任意高度 3 个量块一组,共摆放 10 组,量块横向间距 1 m ,整体覆盖道路宽度 3.8 m ,采样间隔设置为 1 m 采样一次,能模拟实际道路车辙和工作情况。采用 3 m 直尺实测人工值。实验时速按照 30 km/h ($30\text{L} \setminus 30\text{R}$), 50 km/h ($50\text{L} \setminus 50\text{R}$) 重复测量 8 次。标准量块测试结果重复性和相关性都在 99% 以上。路段测量结果如表 1 所示。

依据表 1 可计算左右轮迹车辙重复性如表 2 所示。

从表 2 可以得出,直接测量重复性都在 95% 以上,同时可以计算出测量数据的速度变异系数都在 95% 以上,表示测量结果与速度无关。

表 1、2 记录的是实际测量数据,测量设备在实际测量前需要根据标准量块进行拟合标定,建立测

3.2.2 车辙计算

模型匹配后,求取三个最高特征点 f, c 和 g 点,如图 4 所示。模型为“W”型时,利用三个高点建立两个直线 fc 和 gc 的方程 $y = kx + b$,在 fc 和 gc 段分别计算所属点到直线 fc 和 gc 的垂线距离 $h_{ai} = kx + b - y_i$ 和 $h_{bi} = kx + b - y_i$ 则有

$$\begin{cases} R_{ap} = \max(h_{a1}, \dots, h_{an}) \\ R_{bp} = \max(h_{b1}, \dots, h_{bn}) \end{cases} \quad (2)$$

根据(2)式最大车辙为 $R = \max(R_{ap}, R_{bp})$ 。模型为“U”型时,只需要一条参考线,计算方法与“W”型一致,计算结果显示,最大车辙并不一定在 3D 断面曲线的最低点处。

量值与标准值之间的线性对应关系,车速 50 km/h 下左右轮迹系统测量数据、人工测量数据和标定拟合后的相关性修正数据如表 3 所示。

根据表 3 可以计算标定后的相关性都在 98% 以上,修正后的测量值和人工测量值平均误差控制在 3% 以内,相关性标定结果如图 5 所示,实线系列为实测数据,虚线为标定拟合的方程。

系统测量误差主要来源于车辆颠簸导致相机旋转、相机分辨率和相机与激光器安装角度。车辆颠簸导致相机旋转,在数据处理时需要对面数据进行最小二乘拟合旋转可能引入误差,经多个工程试验验证,这种误差可以忽略不计。相机分辨率的提高直接导致数据量的增大,和高频率采集需求相矛盾。相机与激光器的夹角对测量精度影响最大,因为变量在像方是像素而直接对应到物方是变形高度,因此,提高精度、降低误差最可行的办法是适当提高相机分辨率,保证相机与铅垂面夹角的情况下,尽量加大激光器与铅垂面夹角,也就是保证一个像

素对应的实际高度 Δz 足够小,实验证明相机与激光器夹角在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 之间较为合适。

通过实验及实际工程验证,本方法与传统方法相比具有较大的优势,具体见表 4 所示。

表 1 路段实测车辙值

Table 1 Measured rut value of road segment

Measurements	a /mm	b /mm	c /mm	d /mm	e /mm	f /mm	g /mm	h /mm
30L	13.491	12.399	13.225	13.097	13.336	14.310	12.908	13.348
	14.737	13.479	14.211	14.164	13.988	15.276	14.391	14.477
	14.143	13.989	14.223	14.193	14.323	14.406	14.388	14.546
	12.816	13.531	13.681	13.730	13.757	12.970	13.968	13.989
	19.000	19.350	20.050	18.641	19.521	17.668	19.598	19.792
30R	20.451	20.588	20.033	20.163	20.547	20.236	20.173	20.360
	19.605	19.366	19.308	19.491	19.247	19.461	19.450	19.494
	19.054	18.653	18.625	18.798	18.486	19.281	19.077	18.804
	15.449	15.545	15.174	15.407	15.658	14.960	15.541	15.942
	12.424	12.015	12.431	12.387	12.133	11.808	12.504	12.686
50L	14.668	14.645	14.400	12.720	14.221	14.356	13.551	14.005
	15.049	15.199	15.881	13.125	14.378	15.804	14.239	14.617
	13.864	14.256	14.745	12.750	14.196	14.663	14.236	14.321
	12.927	13.245	13.519	13.330	13.423	13.291	13.538	13.537
	18.250	18.684	18.609	19.257	18.639	19.142	19.291	19.177
50R	20.113	21.514	20.765	19.882	19.763	19.652	20.031	20.654
	20.428	20.242	20.922	20.003	20.327	20.536	19.982	20.232
	18.595	18.443	18.116	18.524	18.321	18.498	18.447	18.404
	14.976	14.948	15.370	14.404	15.034	15.878	15.369	15.306
	12.348	12.033	12.827	11.972	12.174	12.195	12.266	12.254

表 2 实测车辙重复性

Table 2 Measured rut repeatability

	Left /mm	Stdev /mm	Error /mm	RPT /mm	Right /mm	Stdev /mm	Error /mm	RPT /mm
1	13.264	0.543	0.041	0.9591	20.319	0.199	0.010	0.9902
2	14.340	0.530	0.037	0.9630	19.428	0.115	0.006	0.9941
3	14.276	0.175	0.012	0.9877	18.847	0.269	0.014	0.9857
4	13.555	0.437	0.032	0.9678	15.460	0.298	0.019	0.9807
5	19.203	0.761	0.040	0.9604	12.299	0.288	0.023	0.9766
6	14.071	0.199	0.010	0.9902	20.297	0.633	0.031	0.9688
7	14.787	0.115	0.006	0.9941	20.334	0.304	0.015	0.9850
8	14.129	0.269	0.014	0.9857	18.419	0.147	0.008	0.9920
9	13.351	0.298	0.019	0.9807	15.161	0.429	0.028	0.9717
10	18.881	0.288	0.023	0.9766	12.259	0.261	0.021	0.9787

表 3 标定后数据的相关性修正

Table 3 Correlation corrections of calibrated data

System /mm	Manual /mm	Fit /mm	Error /mm	System /mm	Manual /mm	Fit /mm	Error /mm
14.071	12.630	13.018	0.031	20.297	17.760	17.722	0.002
14.787	13.140	13.798	0.050	20.334	17.160	17.761	0.035
14.129	13.950	13.681	0.026	18.419	16.930	16.790	0.008
13.351	12.310	12.233	0.006	15.161	11.580	12.438	0.074
18.881	18.360	18.261	0.005	12.259	9.730	9.452	0.029

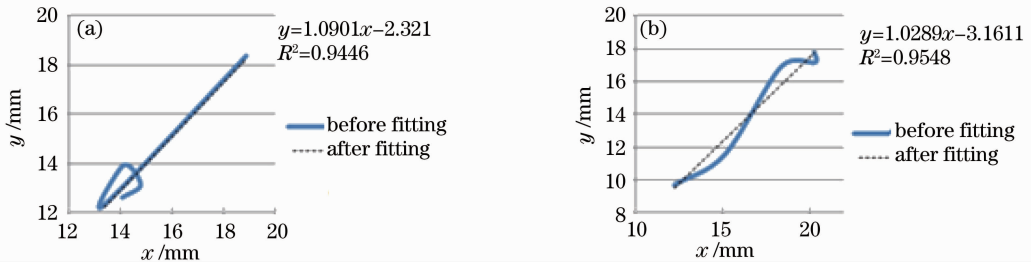


图 5 相关性标定结果。(a)修正后的测量值；(b)人工测量值

Fig. 5 Results of correlation calibration. (a) Measured data after correction; (b) artificially measured data

表 4 新方法与传统方法比较

Table 4 Contrast of new and traditional methods

Item	Multi-sensor	2D Camera	3D Camera
Speed /(km/h)	0~120	0~120	0~120
Cross-sectional sampling	<35	>1600	>1600
Longitudinal sampling /mm	1	10	1
Sensors	>13 sensors	2 CCD camera	2 CCD camera
Cost	High	Low	Low
Expand	Increase sensors	Increase resolution	Increase resolution
3D Road shape	No	Sample	Full road shape

5 结 论

本文给出了 3D 相机结合线结构光测量车辙的方法,工程应用结果表明该方法能准确测量路面车辙,测量结果相关性、重复性都达到 98% 以上,能解决现有测量方法在精度、效率方面不足。此方法的优点如下:

1) 处理数据时考虑测量载体的测量姿态,对获取的断面数据进行了最小二乘拟合的旋转变换,同时对异常数据采用拉依达准则进行剔除,减少了测量误差;

2) 提出了通用的车辙模型判断方法,保证车辙深度计算的正确性,同时提出了利用标准量块测量标定测量值的方法。

本方法能完全满足现有国内车辙测量的需求,同时,由于采用的相机具有高的采样频率,可以用来进行高速连续采集,理论上,该方法可以用于道路路面三维模型的建立,并结合路面图像实现路面病害的自动提取,这将是后续研究的重点。

参 考 文 献

1 Ministry of Transport, PRC. Statistics of Highway Mileage between Year 1998 and 2010[EB/OL]. [2012-05-08]. http://www.moc.gov.cn/zhuzhan/tongjigongbao/hangyenianjian/201009/t20100927_844402.html
中华人民共和国交通运输部. 1998 年~2010 年公路里程数统计表[EB/OL]. [2012-05-08]. http://www.moc.gov.cn/zhuzhan/tongjigongbao/hangyenianjian/201009/t20100927_844402.html

2 T. Fwa, H. Pasindu, G. Ong. Critical rut depth for pavement maintenance based on vehicle skidding and hydroplaning consideration [J]. *J. Transportation Engineering*, 2012, **138**(4): 423~429
3 Hongzhi Wang. Development of Laser System to Measure Pavement Rutting [D]. Tampa: University of South Florida, 2005
4 Young-Chan Suh, Nam-Hyun Cho, Sungho Mun. Development of mechanistic-empirical design method for an asphalt pavement rutting model using APT [J]. *Construction and Building Materials*, 2011, **25**(4): 1685~1690
5 Ma Ronggui, Sha Aimin, Song Hongxun. Error analysis in road rut measurement with multi-sensors[J]. *J. Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2007, **27**(5): 34~40
马荣贵, 沙爱民, 宋宏勋. 路面车辙多路传感器检测误差分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2007, **27**(5): 34~40
6 Han Yi, Wu Chuna, Li Shanhu. Research and development of rut detector based on multiway laser sensor [J]. *Computer Engineering and Design*, 2010, **31**(6): 1347~1354
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): 1347~1354
7 Li Qingquan, Lei Bo, Mao Qingzhou et al.. A fast method for pavement ruts measuring with laser triangulation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, **35**(3): 302~307
李清泉, 雷波, 毛庆洲等. 利用激光三角法进行快速车辙检测[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, **35**(3): 302~307
8 Zhang Xuping, Wang Jiaqi, Zhang Yixin. Large-scale three-dimensional stereo vision geometric measurement system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0315002
张旭苹, 汪家琪, 张益昕等. 大尺度三维几何尺寸立体视觉测量系统实现[J]. 光学学报, 2012, **32**(3): 0315002
9 Zeng Xiangjun, Huo Jincheng, Wu Qingyang. Calibrate method for scanning direction of 3D measurement system based on linear-structure light [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(1): 0108002
曾祥军, 霍金城, 吴庆阳. 线结构光三维测量系统扫描方向的标定[J]. 中国激光, 2012, **39**(1): 0108002

- 10 Liu Zhen, Zhang Guangjun, Wei Zhenzhong *et al.*. An accurate calibration method for line structured light vision sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3124~3128
刘震, 张广军, 魏振忠等. 一种高精度线结构光视觉传感器现场标定方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3124~3128
- 11 Xiao Mingyao. Error Theory and Applications [M]. Beijing: China Metrology Press, 1985
肖明耀. 误差理论与应用[M]. 北京: 中国计量出版社, 1985
- 12 Zhang Yicai. Analysis of criteria for the gross errors of experimental data [J]. *J. Hunan University*, 1984, **11**(3): 8~24
张益才. 实验数据粗差判别准则的分析[J]. *湖南大学学报*, 1984, **11**(3): 8~24
- 13 M. Grondin, D. Leroux, J. Laurent. Advanced 3D technology for rut measurements; apparatus on board of the Quebec ministry of transportation multifunction vehicle [C]. Virginia: Proc. Pavement Evaluation Conference, Roanoke, 2002. 01443224
- 14 SICK IVP corporation. Ranger E/D Reference Manual [M]. Waldkirch: SICK IVP corporation, 2006
- 15 He Song, Li Fupu, Chang Chengli *et al.*. Field Test Methods of Subgrade and Pavement for Highway Engineering (JTG E60-2008) [M]. Beijing: Institute of Highway, Ministry of Transport, 2008
和松, 李福普, 常成利等. 公路路基路面现场测试规程(JTG E60-2008) [M]. 北京: 交通部公路科学研究院, 2008
- 16 Ji Yang-beibei, Su Kai, Sun Lijun. Field investigations and causes analysis of rutting failure in high grade asphalt concrete pavements [J]. *Highway*, 2010, **7**(7): 182~189
姬杨蓓蓓, 苏凯, 孙立军. 高等级公路沥青混凝土路面车辙病害现场调查及原因分析[J]. *公路*, 2010, **7**(7): 182~189

栏目编辑: 何卓铭