

基于激光测距机的公路横纵坡测量方法

何莉¹ 何明¹ 曹民^{2*} 张德津² 王磊¹ 陈泽¹

¹湖北工业大学电气与电子工程学院自动化系, 湖北 武汉 430068

²武汉武大卓越科技有限责任公司, 湖北 武汉 430223

摘要 公路横纵坡的传统人工检测方法速度慢、精度差、效率低、需交通管制,在实时性、灵活性和安全性等方面存在严重不足。采用4台激光测距机(LRF)形成激光测距阵列,结合全球定位系统(GPS)和惯性测量单元(IMU)构建测量平面,实现公路横纵坡的检测。设计了一种基于相对运动的标定方法,通过获取激光测距阵列的偏差角修正前期测量数据进行标定,从而有效提高了测量精度。最后在实际路段进行检测,结果显示经过标定后测量精度提高了5%左右,横纵坡数据测量重复度达到95%以上,相关度均达到99.9%,完全能满足公路路基路面现场测试规程要求。

关键词 测量;标定;激光测距机;横纵坡;惯性测量单元

中图分类号 U412.2 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.061201

Method for Measuring Slope and Cross-Fall of Highway Based on Laser Range Finders

He Li¹ He Ming¹ Cao Min² Zhang Dejin² Wang Lei¹ Chen Ze¹

¹Department of Automation, School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China

²Wuhan Wuda Zoyon Science and Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430223, China

Abstract The process to measure the slope and cross-fall of highway with traditional manual methods has disadvantages of speed, low accuracy, and low efficiency, which needs imperative traffic control and shows several shortcomings in real time, flexibility and security. We design a laser detection arrays composed of four laser range finders (LRF), and an inertial measurement unit (IMU) is combined with global positioning system (GPS) to form a measurement plane, which realizes the measurement of slope and cross-fall of highway. Then a calibration method based on relative movement is proposed, with which we can obtain the deviation angle of laser detection arrays and correct measurement data for calibration, then we can improve the measurement accuracy. The actual road test shows that with the proposed method the accuracy is improved about 5% after calibration. The repeatability of the slope and cross-fall experimental data is more than 95%, and the correlation reaches 99.9%, which can meet the requirements of the standard of field test methods of subgrade and pavement for highway engineering.

Key words measurement; calibration; laser range finder; slope and cross-fall; inertial measurement unit

OCIS codes 120.2830; 120.1880; 040.1880; 140.3290

1 引言

公路横坡和纵坡是判断道路结构性能的重要指标,设计不合理将直接影响交通运行效率及安全,降低公路通行能力,造成运输时间和经济上的损失,甚至诱发交通事故^[1]。研究公路横纵坡数据检测方法为交通运输部验收新道路、制定已运行公路的定期保养、维护或重修决策提供依据,具有重要理论价值和工程意义^[2]。

收稿日期: 2016-01-04; 收到修改稿日期: 2016-01-20; 网络出版日期: 2016-05-31

基金项目: 湖北省重大科技创新计划(2013AEA001)

作者简介: 何莉(1980—),女,博士,副教授,主要从事自动化检测算法方面的研究。E-mail: heli.edu@hotmail.com

*通信联系人。E-mail: 13307100949@189.com

国外学者为实现公路横纵坡数据自动检测开展了相关研究,国内关于横纵坡的研究主要关注设计及其对交通安全方面的影响^[3],而测量方法尚无报道。公路横纵坡均很小,且受车辆长期运行及环境等因素的影响,路面形成的车辙、纹理等会严重影响检测精度,测量困难^[4-5]。典型代表有惯导测量方法、超声波测量方法及激光测量方法^[6-7]。惯导测量方法是采用惯性导航传感器对路面横纵坡进行测量,如加拿大的 LCMS (Laser Crack Measurement System),该系统采用三维激光传感技术,结合 1 个高精度的惯性测量单元 (IMU) 获取路面的横纵坡数据^[8]。该方法忽略了车辆在行驶过程中与路面产生的夹角,因而测量不够准确。超声波测量方法将声波测距传感器和惯性导航单元相结合进行测量,如澳大利亚 GIPSI-TRAC (Global and Inertial Positioning System Integration for Tracking Route Alignment and Cross-fall),通过惯导系统协同声波测距传感器和全球定位系统 (GPS) 导航单元共同生成 3 维路面图,再分解得到公路横纵坡数据^[9]。该方法易受环境因素影响,检测局限性较大。激光传感器具有速度快、精度高、量程大、抗光电干扰能力强等优点,被广泛应用于测量与检测领域^[10]。国内外已有学者将激光传感器应用在车辙、平整度等公路检测行业^[11-12]。

本文提出了一种采用激光测距阵列构建测量平面,获取测量平面与路面、水平面的角度关系,进而计算横纵坡值的检测方法。考虑激光测距机 (LRF) 安装方向与测量平面竖轴方向有相对角度,将导致检测系统测量精度降低甚至达不到检测要求,为此设计了一种基于相对运动的激光测距机方位标定方法。选取实际路段进行检测,实验数据显示本文提出的横纵坡检测及标定方法可有效提高测量精度,满足公路路基路面现场测试规程要求。

2 基于激光传感器的公路横纵坡检测方法

2.1 横纵坡检测原理

横坡的计算分两种情形:1)对无中央分隔带的道路,横坡指路拱表面直线部分的坡度;2)对有中央分隔带的道路,横坡指路面与中央分隔带交界处及路面边缘与路肩交界处两点的高程差与水平距离的比值。纵坡指沿道路行进方向、上下起伏的坡度,同横坡一样均以百分率表示。横纵坡值很小,一般公路纵坡值都在 9% 以下,横坡为 0.3%~5%,高速公路应不超过 3%,不易准确测量,实现快速检测更加困难^[13]。检测公路 (尤其是高速公路) 横纵坡值的方法及设备的选择十分重要。为满足高精度和高速情况下的测量要求,选用激光测距机,这类传感器测量精度高,采集频率快,且不易受环境因素影响,因而采用 2 个距离传感器构成 1 个测量单元。理想情形下,通过获得距离传感器连线及测距点连线的夹角,再结合 IMU 获取横滚和俯仰角,即可得到横纵坡值。

对于公路路况不良甚至恶劣的情形,如路面车辙深、起伏大、纹理复杂等,采用多个激光测距机共同形成激光传感器阵列,构建一个激光测量平面,获取该平面与路面的位置关系;同时,记录激光测量平面运动过程中随路面起伏出现的各种姿态信息,利用几何关系和三角原理获得公路横纵坡数据,如图 1 所示。沿道路前进方向的纵断面方向,由测量平面与路面及水平面的角度关系,可以得到公路纵坡数据;同理,在沿道路横截面方向,得到公路横坡数据。

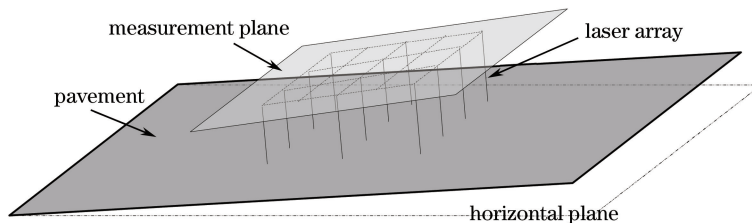


图 1 公路横纵坡检测系统检测原理

Fig.1 Principle of highway slope and cross-fall detection system

2.2 横纵坡检测平台结构

公路横纵坡数据检测平台主要由 1 个结合 GPS 的 IMU 和 4 个激光测距机组成,如图 2 所示。其中,4 台激光传感器分别安装在平台的 4 个角上,形成 1 个矩形激光测量平面。通过激光测量平面与路面的位置关系分解获得路面信息。惯性导航单元与激光测量平面平行安装,用于采集激光测量平面的姿态信息。在

进行实际道路检测时,根据激光测量平面与路面的角度关系获得路面横纵坡数据。平台尾端 2 台激光测距机用于测量路面横坡数据,同时前端 2 台激光器测量值作为横坡参考;平台左侧 2 台激光器用于测量路面纵坡数据,右侧 2 台激光器测量值作为纵坡参考。

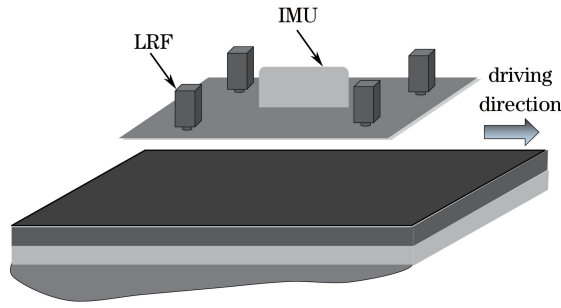


图 2 公路横纵坡检测系统结构

Fig.2 Structure of highway slope and cross-fall detection system

2.3 横纵坡计算方法

检测系统结构如图 2 所示,假设后左激光测距机的读数为 B_L ,后右激光测距机的读数为 B_R 2 个激光测距机的出射光线与横梁垂直,根据三角原理可得

$$\phi = \beta - \gamma = \beta - \arctan\left(\frac{B_L - B_R}{D}\right), \quad (1)$$

式中 ϕ 为路面横坡值,表示路面与水平面的夹角; β 为 IMU 输出的横滚角; γ 为载车横向轴线与水平线的夹角,通过左右 2 个激光器输出的距离求得; D 为尾部左右 2 台激光测距机的距离。同理,纵轴方向上,2 个激光传感器获取激光测量平面与路面及水平面的纵断面夹角,从而获得纵坡角度。

3 公路横纵坡激光检测系统几何标定

为满足测量精度要求,测量前需要对检测系统进行标定,一些学者对公路检测系统中激光传感器的标定方法进行了深入的研究,如邹媛媛等^[14]针对线结构光视觉传感器提出了基于量块的标定方法,提高了精度和效率、降低了成本;Li 等^[15]提出激光态弯沉检测仪的标定方法,解决了激光多普勒仪几何角度标定问题;Haselich 等^[16]在 Unnikrishnan 和 Herbert 标定算法的基础上提出了三维激光相机标定方法,提高了标定效率和相机检测精度;余祖俊等^[17]针对三维激光扫描测量系统提出了基于移位坐标的标定方法,与常规三维坐标法相比精度明显提高;黄钊等^[18]基于 TDC+STM32 激光测距系统,应用拟合算法设计了对测量结果进行标定的方法,使测距系统能实时反映目标距离值。然而,目前关于公路横纵坡检测系统标定方法的文献尚不多见。

由于激光测距机难以做到平行测量,前述方法测得的公路横坡和纵坡信息通常不准确。同时,惯性导航单元存在系统误差,需要对惯性导航补偿系数进行标定,下面分别介绍相应的标定方法。

3.1 激光传感器角度的标定

为标定激光传感器相对角度,设计了一种基于相对运动的标定方法。将测量平面静止放置,移位平台水平置于测量平面下,其侧面图如图 3 所示。移位平台在垂直方向 ± 200 mm 范围内移动,该平台下方距离传感器可跟踪测量其移动距离为 s 。由

$$s = S_1 \cos \alpha_1 = S_2 \cos \alpha_2 = S_3 \cos \alpha_3 = S_4 \cos \alpha_4, \quad (2)$$

式中 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 和 α_4 分别为左前、右前、左后、右后 4 个激光测距机与竖直方向的夹角,测得移位平台移动距离分别为 S_1, S_2, S_3 和 S_4 。通过测量获得 s, S_1, S_2, S_3 和 S_4 的值,计算得到需要标定的角度 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 和 α_4 。

3.2 惯性导航单元比例系数的标定

对于惯性导航单元,有 3 个补偿系数需要标定,分别为惯导的仪器偏差 ω_0 、惯导迟滞误差 Δt 以及补偿系数。 ω_0 和 Δt 容易确定,可通过反复试验(约 10 次)获得,因此主要针对横滚补偿系数 K_g 设计了一种标定方法。当测量平面随汽车以固定角度倾斜而发生姿态变化时,采集 4 个激光传感器到地面的距离值计算得到测量平面与路面的夹角,连续重复测量以标定 IMU 姿态角。

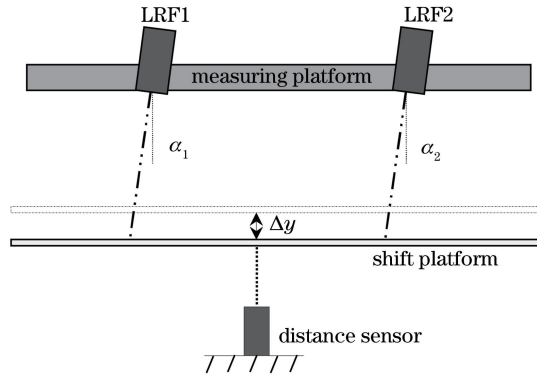


图3 公路横纵坡检测系统标定侧面图

Fig.3 Profile of the calibration for highway slope and cross-fall detection system

假设 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 是 4 个激光传感器测得的自身到移位平台的距离值,有

$$\begin{cases} S_1 = s_{b1} + s_{t1} + L_0 / \cos \theta_1 \\ S_2 = s_{b2} + s_{t2} + L_0 / \cos \theta_2 \\ S_3 = s_{b3} + s_{t3} + L_0 / \cos \theta_3 \\ S_4 = s_{b4} + s_{t4} + L_0 / \cos \theta_4 \end{cases}, \quad (3)$$

式中, s_{b1} 、 s_{b2} 、 s_{b3} 和 s_{b4} 分别为 4 个激光传感器随测量平面产生姿态变化后的位移, s_{t1} 、 s_{t2} 、 s_{t3} 和 s_{t4} 分别为 4 个激光点在移位平台上实际偏移, L_0 为测量平面静止状态时与移位平台之间的距离, θ_i 为第 i 个激光传感器的误差角度。

假设 ω_t 为惯性导航单元测得的 t 时刻的横滚角度, L_{12} 为 1、2 两台激光传感器的距离, 可通过测量得到。于是有

$$S_{b1} - S_{b2} = K_g \times L_{12} \times \sin(\omega_t + \omega_0 + \Delta t), \quad (4)$$

因为标定时移位平台静止, 则 s_{t1} 、 s_{t2} 、 s_{t3} 和 s_{t4} 的值均为 0。结合(3)、(4)式可得

$$S_1 - S_2 = K_g \times L_{12} \times \sin(\omega_t + \omega_0 + \Delta t). \quad (5)$$

由此可标定得到横滚补偿系数 K_g 。同理, 可对惯性导航单元俯仰补偿系数进行标定。

4 实验结果分析

为满足高速测量和高精度的要求, 实验方案选用的激光测距机采集频率为 16 kHz, 测量精度为 0.01 mm; 选用的惯性导航单元采集的横滚和俯仰角精度为 0.1° , 采集频率为 100 Hz。选取一段水平地面, 先标定激光测距机和惯性导航单元姿态参数, 然后结合横纵坡检测原理进行公路横纵坡测量。在进行实际道路横纵坡数据检测时, 通过分析激光测量平面与路面和水平面的角度即可计算得到该路段横纵坡数据。针对车载平台静止和行驶两种状态, 分别进行测试, 得到不同的检测数据, 并得到相应的结论。

4.1 静态测试数据及分析

公路横纵坡检测系统静态标定误差实验数据如表 1 所示, 主要测试了横坡和纵坡分别为 $\phi_{\text{real}} = -2.4\%$ 和 $\phi_{\text{real}} = 2.41\%$ 的两种情形。表 1 中, R 为横滚值, P 为俯仰值, B_L 为后左激光传感器测量值, B_R 为后右激光传感器测量值, ϕ_{man} 为传统人工测量得到的横纵坡值, ϕ_{cal} 为计算得到的横纵坡值, E_{man} 为采用人工测量方式的测量误差, E_{test} 为经过标定后的测量误差, $D = 1542$ mm 为后左、右激光传感器距离值。

上述两组测试方案分别代表横坡和纵坡测量, 且选取了横坡值较小的情形。由传统人工检测结果与本文的检测方法测试结果对比可知, 两组测试方案系统测量误差在 0.05% 以内, 统计标准差为 0.016, 公路横纵坡检测系统标定后静态检测精度高, 系统稳定性好。

表 1 静态标定误差实验数据

Table 1 Experiment data of static calibration error

Project	ID	$R / (^\circ)$	$P / (^\circ)$	B_L / mm	B_R / mm	$\phi_{\text{man}} / \%$	$\phi_{\text{cal}} / \%$	$\phi_{\text{real}} / \%$	$E_{\text{man}} / \%$	$E_{\text{test}} / \%$
Cross-fall	1	-0.24	0.02	-7.26	-65.1	-2.29	-2.39	-2.4	0.1	0.01
	2	-0.59	0.03	-7.75	-56.63	-2.35	-2.41	-2.4	0.06	-0.01
	3	-1.23	0.01	-9.63	-41.4	-2.43	-2.41	-2.4	-0.02	-0.01
	4	-2.24	0.07	-6.65	-11.43	-2.37	-2.42	-2.4	0.05	-0.02
	5	-2.98	0.03	-9.45	6.79	-2.42	-2.38	-2.4	-0.04	0.02
Slope	6	0.01	3.43	32.46	59.34	2.46	2.43	2.41	0.05	0.02
	7	0.02	2.07	27.12	17.53	2.38	2.43	2.41	-0.03	0.02
	8	0.02	1.88	26.76	12.2	2.42	2.42	2.41	0.01	0.01
	9	0.04	1.66	33.19	12.87	2.45	2.41	2.41	0.04	0
	10	0.01	0.21	27.34	-32.28	2.41	2.42	2.41	0	0.01

4.2 动态测试数据及分析

为验证标定后的公路横纵坡检测系统动态检测结果的准确性,选取长度为 50 m 的实际路段,进行实验。以人工测量值作为参考数据,将检测系统沿测试路段分别以 30 km/h、60 km/h 的速度进行路面横坡数据采集,获得的结果如图 4 所示。其中,manual 为人工测量数据,orientation 系列为未标定时测量数据,test 系列为标定后测量得到的数据。

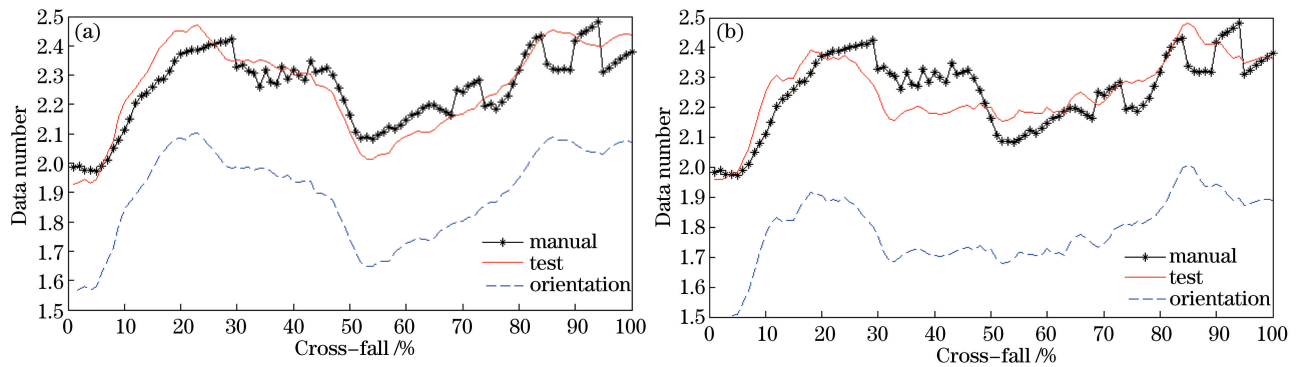


图 4 路面横坡数据动态测试结果。(a) 30 km/h ;(b) 60 km/h

Fig.4 Dynamic test results of cross-fall. (a) 30 km/h; (b) 60 km/h

将获得的 50 m 检测数据及人工值以每 5 m 作平均,得到 9 组数据,并计算其测量重复性和相关性,再挑选一条平均纵坡为 2% 左右的 50 m 路段,如上述方法进行纵坡测量,得到的数据如表 2 所示。

表 2 动态横纵坡测量结果分析

Table 2 Analysis of cross-fall and slope dynamic testing results

ID	Manual	30 km/h		60 km/h		ID	Manual	60 km/h	
		Cross-fall repeatability / %	Cross-fall repeatability / %	Cross-fall repeatability / %	Cross-fall repeatability / %			Slope	Repeatability / %
1	2.08	2.11	95.13	2.12	93.88	1	-2.08	-2.10	97.18
2	2.33	2.42	99.01	2.36	97.84	2	-2.07	-2.09	97.95
3	2.37	2.38	96.86	2.35	97.14	3	-2.08	-2.08	97.48
4	2.30	2.32	95.27	2.23	94.06	4	-1.99	-1.99	98.14
5	2.22	2.16	92.85	2.19	97.09	5	-2.25	-2.27	97.09
6	2.13	2.07	96.41	2.14	92.09	6	-2.09	-2.09	97.49
7	2.22	2.16	96.47	2.19	97.21	7	-1.96	-1.97	99.06
8	2.28	2.30	96.76	2.30	95.39	8	-2.30	-2.30	98.53
9	2.38	2.43	96.66	2.46	93.96	9	-2.41	-2.40	99.12
Ave.	2.26	2.26	96.16	2.26	95.41	Ave.	-2.15	-2.16	97.93
Correl.		99.935		99.966		Correl.		99.902	

测试数据的重复度体现了系统的稳定性,该值越高越好;相关度体现两组值的相似程度,值越高说明两

组值越接近。由实验数据可知:1)系统标定后的检测结果与人工值的绝对误差均在 0.1% 范围内;2)标定后,横纵坡测量数据的重复性有较大提高,横坡数据重复度由 90% 左右提高到 95% 以上,纵坡数据由 95% 左右提高到 97% 以上;3)横纵坡测量相关度也有较大提高,标定后测试数据的相关度均达到 99.9%。

通过以上分析验证,提出的检测系统可以对公路横纵坡数据进行有效检测,设计的标定方法明显提升了公路横纵坡数据检测的精确性。比较 4.1 节和 4.2 节可以得出结论:1)对于动态或静态测试要求,该测量方法均能满足公路路基路面现场测试规程要求(测量重复度达到 95% 以上);2)相同条件下,静态测试较动态测试数据准确,更接近真实值。因为动态测试情况下,系统可能会受到颠簸等因素而影响测量效果,也说明检测系统行驶速度对测量精度有一定程度的影响;3)对于动态测量,检测系统的行驶速度越慢,获得测量数据的相关度和重复度越高。

5 结 论

提出采用 4 台激光测距机构成激光测距阵列,并结合惯性导航单元构建测量平面,实现对公路横纵坡的检测。为提高精度,设计了一种基于相对运动的标定方法,通过获取激光测距阵列的偏差角修正前期测量数据进行标定,从而有效提高了测量精度。通过实验,验证提出的检测及标定方法有效、实用,在重复度和相关度方面均有提升。而工程中如何降低系统检测速度对测量精度的影响,使系统能在更高速度下达到测量精度要求,是下一步的研究重点。

参 考 文 献

- Liang Xia, Guo Zhongyin, Fang Shouen. Statistic analyses of relations between road alignment and road safety[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2002, 30(2): 203-206.
梁 夏, 郭忠印, 方守恩. 道路线形与道路安全性关系的统计分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2002, 30(2): 203-206.
- Deng Xuejun. Road subgrade and pavement engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2008.
邓学钧. 路基路面工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- Meng Xianghai, Guan Zhiqiang, Zheng Lai. Safety evaluation of mountainous expressway based on geometric alignment indexes[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(2): 103-108.
孟祥海, 关志强, 郑 来. 基于几何线形指标的山区高速公路安全性评价[J]. 中国公路学报, 2011, 24(2): 103-108.
- Ministry of Transportation Industry Standards. JTG F80/1-2004, Quality inspection and evaluation standards for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
交通部行业标准. JTG F80/1-2004, 公路工程质量检验评定标准[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- Ministry of Transportation Industry Standards. JTG H10-2009, Technical specifications of maintenance for highway[S]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2009.
交通部行业标准. JTG H10-2009, 公路养护技术规范[S]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2009.
- Zhang Dejin, Li Qingquan. A review of pavement high speed detection technology[J]. Journal of Geomatics, 2015, 40(1): 1-8.
张德津, 李清泉. 公路路面快速检测技术发展综述[J]. 测绘地理信息, 2015, 40(1): 1-8.
- Zhou Jinnan, Wu Zhanjun, Fan Zhe, et al.. Research on kalman filter algorithm for vehicle laser Doppler velocimeter[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1102006.
周金男, 邬战军, 范 哲, 等. 车载激光多普勒测速仪的卡尔曼滤波算法研究[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1102006.
- Laurent J, Lefebvre D, Samson E. Development of a new 3D transverse laser profiling system for the automatic measurement of road cracks[C]. 6th Symposium on Pavement Surface Characteristics, Portorož, Slovenia, 2008.
- Zhao Yifei, Xu Yaya. Highway geometry alignment detection technology[M]. Beijing: China Communications Press, 2004.
赵一飞, 许娅娅. 公路几何线形检测技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- Silvano D. Electro-optical instrumentation: Sensing and measuring with lasers[M]. Zhao Hong, Wang Zhao, Yang Yuxiao, et al.. Transl.. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2006.
西尔瓦诺·多纳特. 光电仪器: 激光测量与传感[M]. 赵 宏, 王 昭, 杨玉孝, 等译. 西安: 西安交通大学出版社,

- 2006.
- 11 Zhang Dejin, Li Qingquan, He Li. A new method for laser rut depth measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0112005.
张德津, 李清泉, 何莉. 一种新的激光车辙深度测量方法研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0112005.
- 12 Fang Yong, Zhang Yingsong, Wu Huaxia, *et al.*. Depth anti-aliasing algorithm based on classified mapping for volumetric true-3D display[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0233001.
方勇, 张应松, 吴华夏, 等. 基于分类映射的真三维显示深度抗锯齿算法[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0233001.
- 13 Ministry of Transportation Industry Standards. JTG D20-2006, Design specification for highway alignment[S]. Beijing: China Communications Press, 2006.
交通部行业标准. JTG D20-2006, 公路路线设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- 14 Zou Yuanyuan, Zhao Mingyang, Zhang Lei. Direct calibration method of laser stripe vision sensor based on gauge block [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(11): 1108002.
邹媛媛, 赵明扬, 张雷. 基于量块的线结构光视觉传感器直接标定方法[J]. *中国激光*, 2014, 41(11): 1108002.
- 15 Li Qingquan, Zou Qin, Mao Qingzhou, *et al.*. Efficient calibration of a laser dynamic deflectometer [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2013, 62(4): 806-813.
- 16 Haselich M, Bing R, Paulus D. Calibration of multiple cameras to a 3D laser range finder [C]. *IEEE International Conference on Emerging Signal Processing Applications*, 2012: 25-28.
- 17 Yu Zujun, Yang Yanan, Zhu Liqiang. Study on calibration method for 3-D laser scanning systems [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2007, 21(6): 31-35.
余祖俊, 杨娅楠, 朱力强. 三维激光扫描测量系统标定方法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2007, 21(6): 31-35.
- 18 Huang Zhao, Gu Guohua, He Weiji, *et al.*. Design of the method of calibration of laser ranging system based on TDC+STM32[J]. *Laser and Infrared*, 2010, 40(12): 1288-1292.
黄钊, 顾国华, 何伟基, 等. 基于 TDC+STM32 激光测距系统标定方法设计[J]. *激光与红外*, 2010, 40(12): 1288-1292.