

基于智能手机的非机动车道路况分析^①

刘俊山^{②*} 詹志坤^{③*} 谷 林^{**} 赵玉良^{③***} 黎 捷^{*} 曹立强^{****} 李志方^{*****}

(* 燕山大学电气工程学院 秦皇岛 066004)

(** 中铁山桥集团有限公司 秦皇岛 066299)

(*** 东北大学秦皇岛分校控制工程学院 秦皇岛 066004)

(**** 秦皇岛市公路工程质量监督站 秦皇岛 066000)

(***** 秦皇岛市公路管理处 秦皇岛 066000)

摘 要 目前基于汽车承载方式的路面平整度检测方法并不能普遍适用于非机动车车道的路面检测,本文提出了一种基于智能手机的非机动车道路面平整度测量方法,以目前应用人群最为广泛的共享单车为测量载体,采用智能手机内置的加速度传感器,在骑行状态下,采集路面起伏激励后的车体加速度数据,并利用手机内置的全球定位系统(GPS)测量骑行距离,进而计算出国际平整度指数(IRI)。此外,本文基于加速度数据波形对非机动车道路表面的凸起和坑洞特征进行了有效识别。实验分析表明,本文结果与专业测量模块得到的结果呈强烈正相关,是一种新型有效的道路平整度检测方法,在以汽车为承载平台的专业测量工具无法达到的非机动车道路况检测上具有重要的应用价值。

关键词 国际平整度指数(IRI), 智能手机, 非机动车车道, 加速度传感器, 全球定位系统(GPS)

0 引 言

随着交通运输事业的飞速发展,各类道路路面的质量评价与路况分析已成为保证行车安全、乘客舒适度和道路得到及时维护的重要手段。在各种道路中,非机动车车道是交通道路的重要组成部分,承担了大量行人、骑行人员和少量轮椅使用者的出行任务,尤其在“绿色出行”倡议背景下,非机动车道的路面状况同样获得了出行人员的广泛关注。然而,目前关于道路路面质量评价的研究大多针对机动车车道和汽车车载检测设备来进行,而无法获取非机动车车道的路面状况,这一情况严重阻碍了非机动车道路况导航应用软件的发展。针对非机动车

车道进行路面质量评价研究,不仅可以补充目前在非机动车道路质量评价数据方面的缺失,还可以推动非机动车出行人员导航应用软件的积极发展。

对于道路质量,行业内常用平整度、破损度、强度、抗滑系数等参数来定量评价。其中,路面平整度是客观评价路面施工质量、使用效果及路面破损程度的主要指标^[1,2],与其他参数相比,该参数能够提供更准确和更全面的路面信息,从而帮助决策者做出是否进行路面维修、养护或翻修的决定。现有的路面平整度检测方法主要分为响应类和断面类^[1-3]。响应类检测方法通过量测承载车体的力学响应量来间接反映路面的平整度;断面类检测法则直接或间接测量路面纵断面形状,利用断面形状来分析路面平整度。研究人员已开发出颠簸累积仪、

① 国家自然科学基金(61503322,61503327)资助项目。
② 男,1992 年生,硕士生;研究方向:智能传感器;E-mail: ljswangyi@163.com
③ 通信作者,E-mail: zkzhan@ysu.edu.cn, zyl2012@qq.com
(收稿日期:2018-11-12)

水准仪、3 米尺和激光惯性测量仪等测量设备^[46],其中以车载式激光惯性平整度测量系统最为先进可靠。该系统采用激光扫描仪和加速度计记录纵向位移,采用水平位移记录仪测量距离,能够提供相对准确且重复性高的道路剖面模拟,并对其分析和统计而得到各种平整度数据。虽然这些设备可以提供准确的道路表面平整度信息,但成本很高,仅局限于公路工程的专业测量应用。另外,研究人员还开发了低成本、便携式、可移动的集成加速度传感器,可用于测量路面的平整度,其结果与专业测量仪器具有高度的相关性^[7,8],但其主要以体积较大的汽车为承载平台,因此限于测量机动车道。对于非机动车道路况,目前还未出现真正有效的测量方法。

近年来,智能手机的快速兴起为通信、医疗、康养等方面的各类应用提供了一种便携式解决方案,其关键技术就在于智能手机能够高度集成和综合运用各类精密传感器^[9-11],并实现了实时位置跟踪、数据传送和评价分析等。杨洪^[9]和 Zang 等人^[12],分别利用智能手机内置传感器模块,对道路路面情况进行了测量,并计算出国际平整度指数值(international roughness index, IRI),其结果与专业传感器测量模块相比,具有高度一致性。

本文在此基础上,以适用人群更为广泛的共享单车(hellobike)作为智能手机承载平台,基于智能手机内置加速度传感器和 GPS 定位系统,检测了各类非机动车道的路面情况,并计算出了各类路面的 IRI 值,从而实现了对于多种不同路面平整度情况的准确评价。此外,基于传感器原始加速度数据波形,本文识别了路面常见附属设施,即凹陷的井盖和凸起的减速带两类特征,进而为非机动车道行驶人员提供了出行路线参考。

1 路面平整度测量原理

作为道路工程中的常用名词,路面平整度(road roughness, road irregularity, road unevenness)指的是道路表面相对于理想平面的偏差^[13],用来描述路面的起伏程度,是车辆行驶过程中的主要激励^[2]。路面平整度不能直接测量,而是需要依据测量结果进

行进一步的计算和推导得到。

为了定量评价路面平整度,各国学者提出了多种不同的评价指标^[14],例如可反映路面状况的最大间隙 h 、平整度标准差 σ 、功率谱密度 PSD 等,以及可反映行驶质量的竖向加速度均方根(RMSVA)、平均评分等级(MPR)、行驶质量数(RN)、颠簸累计值(VBI)、纵断面指数(PI)等^[14-18]。1982 年, Sayers 等人^[19]提出了国际平整度参数(IRI)并向各国推荐,该参数与前述各种参数具有良好的相关性,是统一各种不平度指标的唯一标准,已成为各国道路平整度评价的通用指标^[14]。Sayers 采用了四分之一车辆模型来计算国际平整度指数,该车辆以规定速度在路面断面上行驶,以在行驶距离内的动态反应悬挂系统的累积竖向位移量作为国际平整度指数。

1.1 IRI 值计算过程

IRI 值由一条单向纵断面计算得到,采用四分之一车模型,以 80 km/h 的速度在已知断面上行驶,计算一定行驶距离内悬挂系统的纵向累积位移作为 IRI 值^[19]。图 1(a)给出了一段车辆行驶道路路面纵断面示意图,车辆在行驶过程中,每隔一段时间即对道路表面的纵向偏移进行采集。

如图 1(b),在行驶距离 L 内, $t_i (i \in [1, N])$ 表示采样时间, h_i 是 t_i 处相对于水平路面的纵向位移,相邻采样时间点处的纵向相对偏移可表示为

$$V_{h_i} = |h_i - h_{i-1}| \quad (1)$$

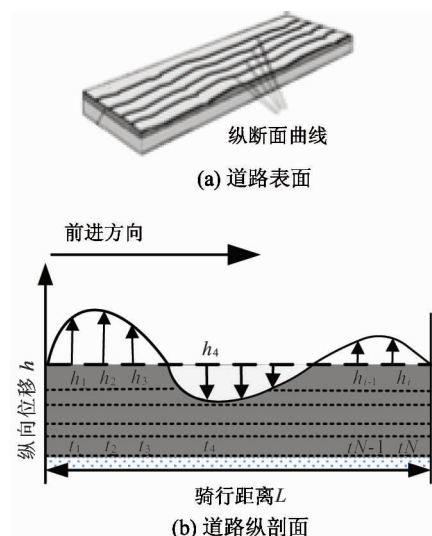


图 1 道路示意图

如果将相邻两个采样点处的纵向相对偏移累加,则可得到该段行驶距离内的纵向累积位移值,即:

$$\sum_{i=2}^n V_{h_i} \tag{2}$$

根据 IRI 定义,其计算公式为

$$IRI = \frac{\sum_{i=2}^n V_{h_i}}{L} = \frac{\sum_{i=2}^n |h_i - h_{i-1}|}{L} \tag{3}$$

其中,总的骑行距离 L 通过 GPS 定位系统计算得到。纵向偏移数值不能直接测量,而是需要依据加速度传感器的输出值进行推导。在物理学中,依据牛顿第二定律,速度、加速度和位移的关系可由式(4)、(5)进行描述^[12]:

$$V_v = \frac{dV_h}{dt} \tag{4}$$

$$a_v = \frac{dV_v}{dt} = \frac{d^2 V_h}{dt^2} \tag{5}$$

其中 t 是时间, V_v 是纵向速度, a_v 是纵向加速度, V_h 是纵向位移,因此:

$$\sum V_h = \int_{t_{start}}^{t_{stop}} |a_v| (dt)^2 \tag{6}$$

国际平整度指数 IRI 则可由下式计算得到:

$$IRI = \frac{\sum_{i=2}^n V_{h_i}}{L} = \frac{\int_{t_{start}}^{t_{stop}} |\alpha_v| (dt)^2}{L} \tag{7}$$

1.2 四分之一车辆模型

四分之一车辆模型是一个考虑黏性阻尼的 2 自由度车辆强迫振动模型,激励源是路面的高程变化,即平整性^[20],该模型能够代表典型四轮车的四分之一,虽然被高度简化,但仍能较好地给出由于道路不平坦而造成的车辆动态响应。在四分之一车辆模型中,如图 2(a) 所示,整车被划分为 3 部分:车身、悬挂系统和车轮。主悬架系统由簧载(弹性系数为 $K1$)和粘性阻尼减振器(阻尼系数为 Cs)组成,用于支撑车辆的簧载质体质量 $m1$ (即车辆悬架系统上方的质量)为车身质量的四分之一。非簧载质体质量 $m2$ 则包括了一个车轮的质量和与之相连的悬挂系统的质量^[21], $m2$ 通过轮胎的刚度与地面直接接触,轮胎则由刚度为 Kt 的线性弹簧来模拟。 $m1$ 、 $m2$ 和路面的垂向位移分别表示为 $x1$ 、 $x2$ 和 $x3$ 。由于轮胎阻尼与悬架系统的阻尼相比较小,因而可以忽

略。在低频情况下,假设轮胎与地面总是接触的。IRI 值就是利用四分之一车辆模型中的簧载质体和非簧载质体之间的相对位移进行计算的,而该位移是由道路轮廓的不均匀性引起的。然而,在普通的自行车结构中,车身框架和车轮的弹性是非常有限的,因此在自行车模型中自行车被认为是刚性结构,而参数 $K1$ 、 Cs 和 Kt 被忽略不计,模型中仅保留质量 M 和 $x4$ ^[12],如图 2(b) 所示。实验过程中,要求骑行者尽量保持车身姿势平稳,以维持自行车在行进过程中的理想刚性结构,从而减少其他因素对数据采集过程的影响。由于刚性结构中不需要考虑弹性冲击效应,因而自行车车体随路面上下波动而产生的垂向位移 $x4$ 即为路面垂向位移。

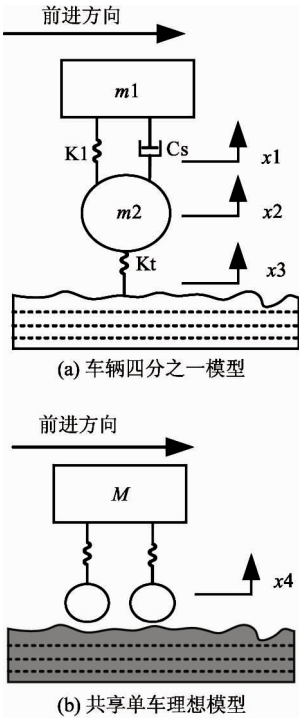


图 2 模型示意图

此外,智能手机在自行车上的安装位置会影响加速度数据采集的稳定性和准确性,根据自行车骑行网络平台(Cycling Weekly 和 Chinabike)和大量对自行车行驶力学稳定性的相关文献分析^[22-26],在所有的潜在安装位置中,车把中心位置是相对稳定的固定点之一。因此,本文将智能手机和专业加速度传感器模块固定在车把中心位置,并保证传感器 X 、 Y 、 Z 三个方向轴中的 Z 轴垂直向上,如图 3 所示。



图3 装置示意图

由式(7)可知,路面纵向累积位移值和车辆行驶总距离 L 是 IRI 值计算的关键,在上述构建的路面数据采集系统中,智能手机内置的加速度传感器模块和 GPS 定位模块能够提供原始数据对这 2 个参数进行准确推导和测量。

2 路面平整度测量实验方案及结果分析

对于路面平整度情况的分析,一般分为三个步骤:数据采集、数据预处理和数据分析与计算^[27, 28]。

2.1 数据采集前的准备工作

本文用于承载智能手机的自行车采用城市共享单车(hellobike),智能手机(内置加速度传感器型号为 LSM6DSM)和专业加速度传感器模块(型号为 MPU9250)可靠固定于车把中心位置,且保持传感器三轴中的 Z 轴垂直。实验要求骑行者以一定的速度在道路右侧行进,尽量保持车身稳定,并不刻意躲避或经过颠簸的路面,规定行驶距离内的平均速度接近于 9 km/h。本文实验在燕山大学校内进行,通过实际考查和专业电子地图向导,选择了 8 条不同材质和状况的路面,包括水泥公路、柏油公路和破损水泥公路,各类型路面的详细状况如图 4 所示。此外,为了验证骑行者体重对数据采集结果是否有影响,本文挑选了体重差别较大的 2 位志愿者(74 kg,48 kg)分别进行骑行采集实验。

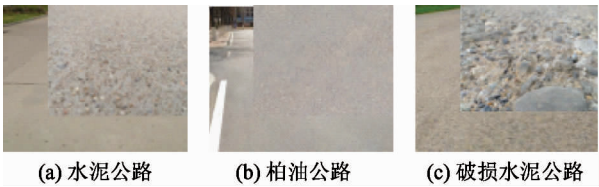


图4 路面材质图

本文通过上位机软件 Accelerometer Analyzer 将智能手机内置加速度传感器的采样频率设定为 200 Hz,对其在 X, Y, Z 三个方向上采集到的加速度原始数据以文本(.txt)形式存储在 SD 卡中。对于专业加速度传感器模块,采样频率初始值为 200 Hz,三轴加速度原始数据也以文本(.txt)形式存储在 SD 卡中,便于后续分析处理。为了消除某些意外因素(如车身大幅度振动、骑行速度突然变化等)对数据的不良影响,保证数据真实性,本文采用小波滤波方式对采集到的 Z 轴加速度数据进行预处理,可有效保护随机振动信号中的有意义尖峰和突变信号特征。

2.2 智能手机与专业加速度传感器模块的性能对比实验研究

近年来,便携型加速度传感器模块在路面数据采集方面得到了广泛应用,大量数据表明,该类传感器模块采集到的路面信息与专业路面平整度测量设备得到的信息相对一致,并呈现强烈的正相关,能够对路面平整度进行合理评价。为了验证基于智能手机内置传感器测量数据计算得到的 IRI 值的有效性,采用专业的加速度传感器模块作为对比设备,对二者采集到的数据进行对比分析研究,从而评价智能手机测量结果的有效性和可靠性。

对比实验选择在如图 5 所示的 8 条实验路线上进行,其中 1、2、3、4、5 路线为正常路面的水泥路,长度均在 1 km 以内,6、7 路线为柏油路,长度不超过 300 m,第 8 条线路为粗糙度较高的破损水泥公路,长度接近 300 m。实验中,体重差别较大的两位志愿者分别沿图中箭头标示方向靠右侧平稳骑车行驶,并反复骑行多次,传感器连续记录原始的加速度数据。

图 6 给出了分别采用智能手机和专业传感器集成模块采集得到的原始加速度数据。从图中可以清楚地看出,在骑行路面情况一致时,智能手机所测的数据比传感器集成模块所测的加速度原始数据要稳定,异常值少。

图 7 和图 8 分别给出了基于智能手机内置传感器和加速度传感器模块测量数据计算得到的 IRI 值,横轴表示实验中选取的 8 种路面,纵轴为计算得

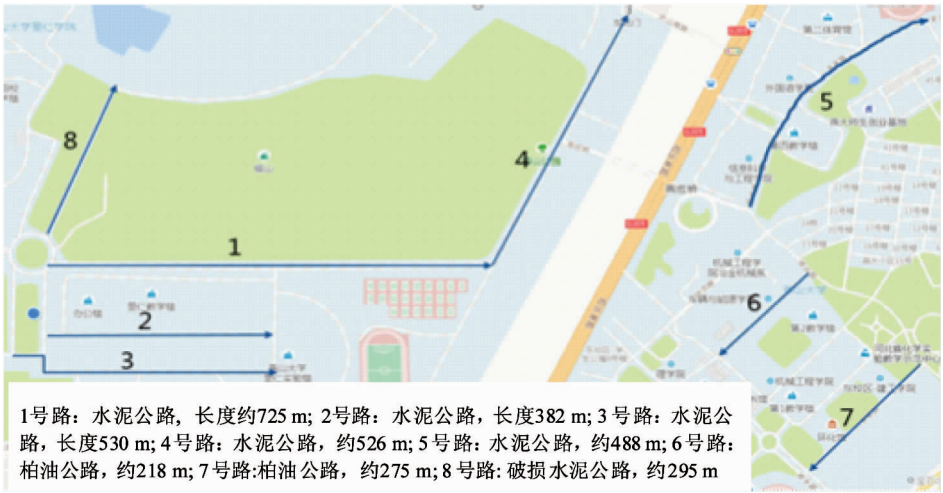


图5 8条实验路线的详细信息图

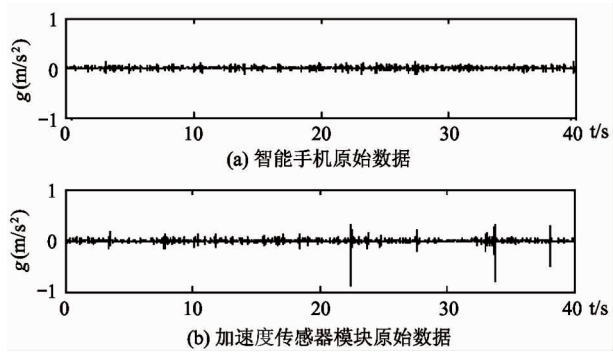


图6 水泥公路加速度值原始数据图

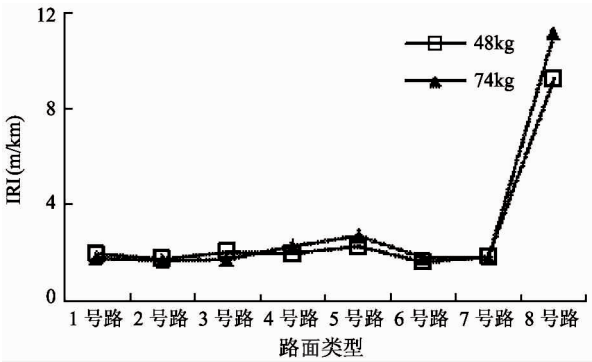


图7 基于智能手机内置传感器数据计算出的路面 IRI 值

到的 IRI 值。从图中可以看出,骑行者体重对于测量结果的影响并不大,因此后续各项骑行采集实验均安排体重为 74 kg 的志愿者完成。图 7 中,基于智能手机内置传感器测量数据得到 5 条正常的水泥路面的 IRI 平均值约为 2.000 m/km,2 条柏油路 IRI 平均值为 1.762 m/km,而破损水泥路 IRI 值为 11.121 m/km,明显高于前两种路面,说明其不平度较高,路况较差。图 8 所示的基于加速度传感器模块测量数据计算得到的 IRI 值中,正常水泥路平均值为 1.134 m/km,柏油路平均值为 1.043 m/km,破损水泥路约为 5.043 m/km,也明显高于前两种路面。本实验证明了文中所提出的实验方法,即利用自行车载智能手机测量路面信息进而计算其 IRI 的方法,能够完成对道路路面状态的合理分析和评价。

为了比较在同等实验条件下,两种采集方式得到结果的具体差异,本文将每一实验点处的差值进

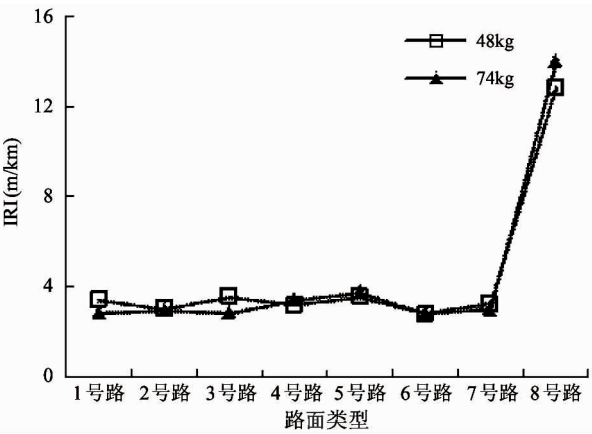


图8 基于加速度传感器模块数据计算出的路面 IRI 值

行了计算,如图 9 所示。可以看出,基于智能手机得到的加速度数据在数值上明显高于加速度传感器模块,这可能是因为:(1)手机内置的加速度传感器由于自身硬件和 Android 系统的影响,在测量性能上

不同于专业的加速度传感器模块;(2)手机内置传感器采集到的数据单位为 m/s^2 ,需要转换为重力加速度 g ,而加速度传感器模块所测数据则不需要转换,而前者在转换过程中必然存在一定的误差;(3)由于智能手机更新换代更快,总体性能上要优于传统的传感器测量模块。上述原因都可能导致二者所测数据产生差异,但这并不影响采用智能手机内置传感器测量方案对道路表面做出客观评价的研究任务。

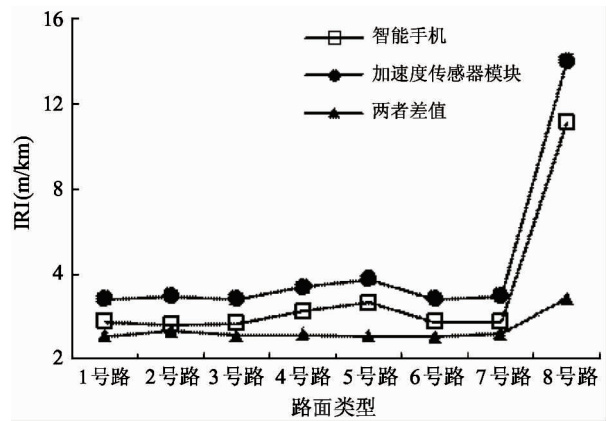


图9 两种设备所测 IRI 值对比

由于专业的加速度传感器模块与车载式激光颠簸仪所测的数据呈现强烈的正相关,而由图9可知,基于智能手机的检测结果与加速度传感器模块检测结果也具有较好的一致性,因此证明本文提出的测量方法是有效的。

2.3 非机动车路面平整度检测结果及分析

对于骑行者、行人或轮椅使用者来说,非机动车路面材质呈现出多样化特点,不仅经常在水泥、柏油等材质的通用公路上行驶,更多则是需要在由大小方砖或瓷砖铺成的路面、甚至是少量土路路面上行进。此外,路面上的一些附属设施,如减速带、井盖等,也增加了非机动车路面的复杂度,如图10所示。准确采集和识别上述信息,对于规划路径、提高出行舒适度、及时进行道路检修和维护等都具有重要意义。因此,本文不仅对各种材质的路面不平度进行了测量和计算,还对路面的凸起和凹陷特征进行了识别。本部分实验忽略骑行者体重这一因素对数据采集的影响,通过固定在共享单车车把中心的智能

手机内置传感器来记录路面纵向位移数据和骑行距离。对在不同路面上骑行采集到的原始加速度数据进行滤波后,得到各种路面的原始加速度信息,如图11所示。该结果能够直观地显示出,小方砖路面的颠簸程度是最高的,其次是土路和大方砖路,而水泥公路和柏油公路的颠簸程度相近,说明二者的路面不平度状态是相近的。

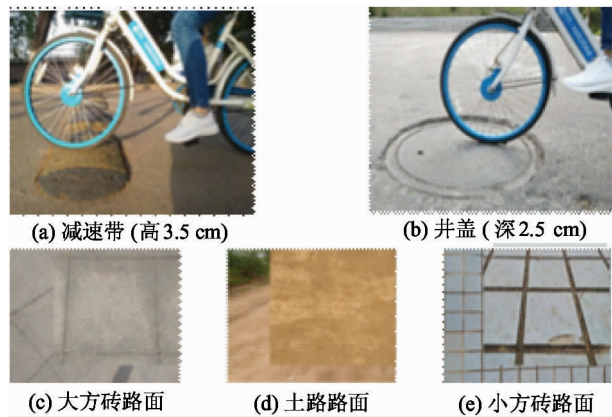


图10 凸起和凹陷特征和特殊非机动车车道路面情况图

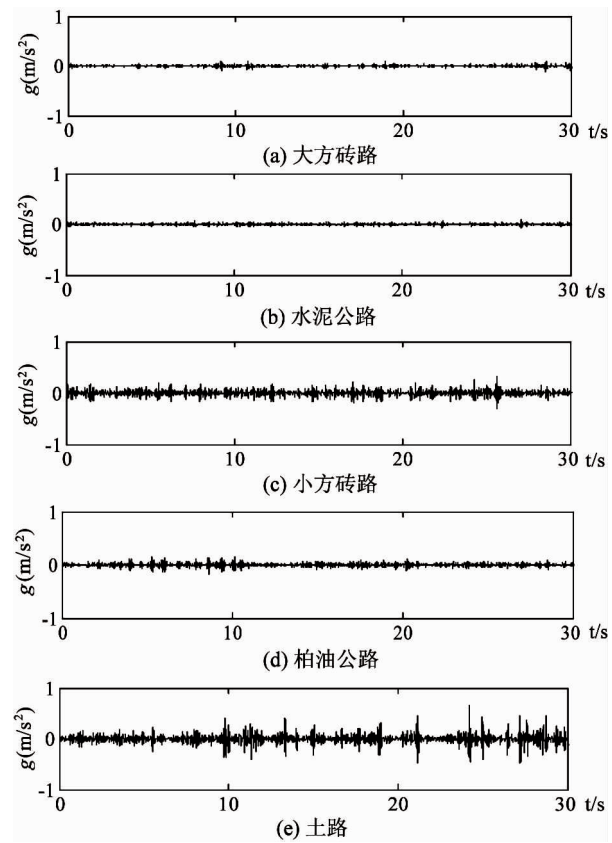


图11 智能手机内置传感器采集的加速度原始数据波形图

基于上述原始数据和国际平整度指数 IRI 计算公式,推导得到所测各类路面的 IRI 值,如图 12 所示。可见 IRI 值最高的是破损水泥公路,最低的是大方砖路,因 IRI 值越大,路面平整性越差,骑行的舒适性越差,这与实验中志愿者对骑行道路直观的颠簸程度感受是相同的。6 种路况的 IRI 值标准偏差范围为 0.02 ~ 0.7 之间,误差相对较小。该实验结果可为判断道路的表面不平度提供参考,为各类非机动车路面的平整度等级划分提供依据。

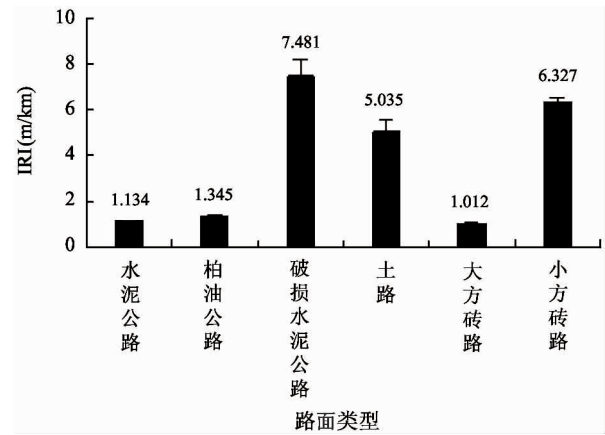


图 12 IRI 对比图

为了研究骑行距离这一因素对 IRI 值计算的影响,本文进行了多次重复实验,骑行距离分别设定为 20 m, 40 m, 60 m, 80 m, 100 m 和 120 m, 得到的 IRI 值如图 13 所示。可见随着骑行距离的增加,基于智能手机所测加速度数据计算得到的 IRI 值变化逐渐趋于平缓,并在一定范围内波动,说明骑行距离在 60 m 以上时,即可得到相对稳定的加速度原始数据,并可用于计算得到较为准确的路面 IRI 值。

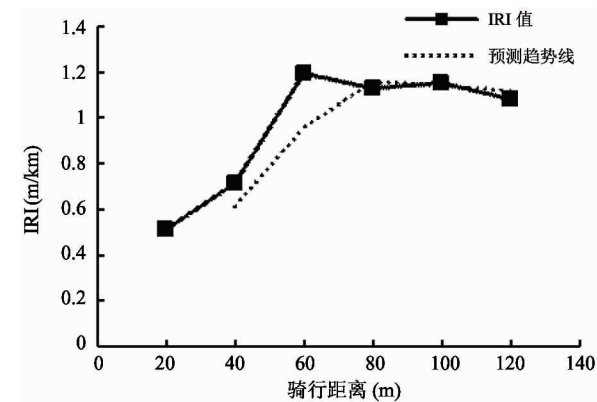


图 13 水泥公路分段测量 IRI 值

另外,本文对路面的凸起(图 10(a)中高度约为 3.5 cm 的减速带)和凹陷(图 10(b)中深度约为 2.5 cm 的井盖)进行了识别。在骑行过程中,共享单车经过这两种路况时,智能手机即可检测到异常变化,体现在其原始加速度数据的波形变化上。

由于共享单车车体为刚性结构,在经过这些路况时,前轮和后轮分别振动而产生 4 个振荡,在原始数据波形上则表现为 4 个连续波峰,与其他正常加速度数据具有明显不同,由此判定为自行车经历了凸起或凹陷路况。以道路路面上较为常见的井盖和减速带作为坑洞和凸起的代表,我们量取了井盖的凹陷深度值和减速带的凸起高度,按前文的实验要求骑行经过这两种特征的路面,得到的原始加速度数据,如图 14(a)、(b)所示。图 15 则给出了识别出减速带凸起和井盖凹陷这两种典型特征的算法实现步骤。

3 结 论

本文利用智能手机内置加速度传感器和 GPS 定位模块,以共享单车为承载平台,对各类非机动车车道的路面情况进行了测量和分析,并给出道路表面坑洞和凸起的识别方法。实验结果表明,利用本文方法测量得到的路面 IRI 值与专业加速度传感器模块测量结果呈强烈正相关,得到的路面平整度数值大小与志愿者在道路表面骑行时的舒适感也是一致的,说明本文提出的方法是可靠有效的。此外,基于手机测量得到的原始加速度数据波形,对道路表面的坑洞和凸起数目进行了准确识别,这一数据可

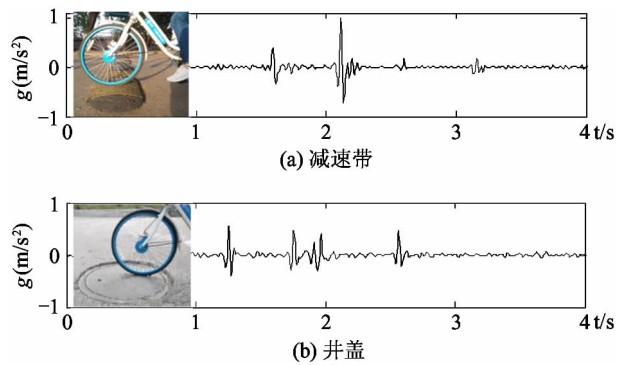


图 14 凸起和凹陷特征及对应加速度数据波形图

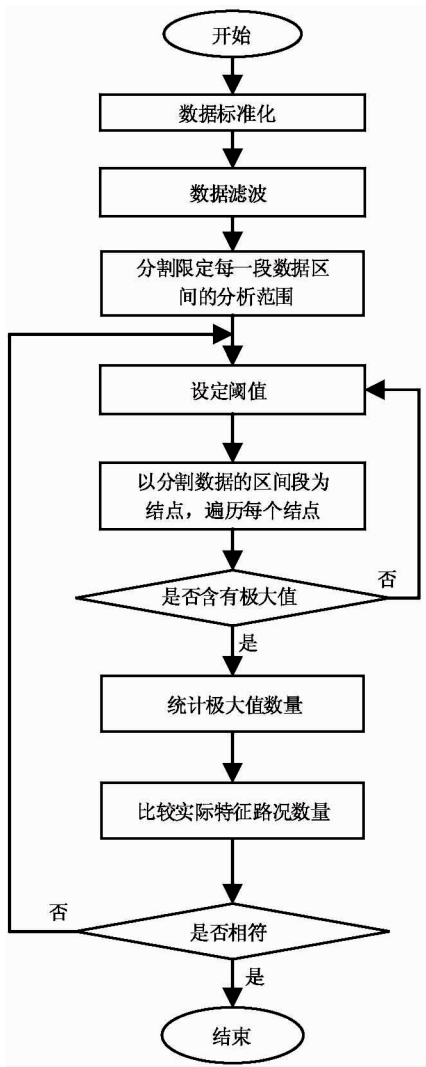


图 15 算法实现步骤

以为非机动车道使用者(特别是轮椅使用者)选择出行路线提供有意义的参考。

本文在实验过程中,要求志愿者尽量保持骑行速度和骑行姿势的稳定,但这在现实中难度较大,从而对数据采集的准确性产生一定影响,因而只能通过数据预处理手段予以部分消除,但这一问题并不阻碍本文方法未来在城市的广泛应用。

现阶段,在我国各个城市中,共享单车的骑行人群数量都非常庞大,若将本文提出方法与手机应用软件相结合,通过骑行人群的大数据汇总,就可绘制出整个城市中的道路平整度分布地图,并明确标注骑行道路上的坑洞或凸起特征,这将有力推动城市道路建设,为道路维护和检修提供可靠信息。此外,在恶劣天气中坑洼和凸起被覆盖或者骑行者视线受

阻时,结合地图应用软件则可以实时提醒骑行人员进行有效避让,提高行人出行质量,避免意外的发生。

参考文献

[1] 周晓青, 孙立军, 颜利. 路面平整度评价发展及趋势 [J]. 公路交通科技, 2005, 22(10): 18-22

[2] 段虎明, 石峰, 谢飞, 等. 路面不平度研究综述 [J]. 振动与冲击, 2009, 28(9): 95-101

[3] Sayers M W, Karamihas S M. Interpretation of road roughness profile data [R]. Contract DT FH 61-92-C00143. Washington: Federal Highulay Administration, 1996

[4] 周波, 朱先祥, 孙文. 车载式颠簸累积仪在路面平整度检测中的应用 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2004, 27(9): 1095-1098

[5] 于长喜. 车载式公路平整度检测设备 [J]. 华东公路, 2006(1): 68-73

[6] 陆键. 各种路面平整度仪的相关分析研究 [J]. 公路, 2002(9): 91-94

[7] 刘庆华, 夏鹏飞, 江燕燕, 等. 路面不平度采集系统设计 [J]. 测控技术, 2014, 33(11): 34-36

[8] González, O'brien E J, Li Y Y, et al. The use of vehicle acceleration measurements to estimate road roughness [J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(6): 483-499

[9] 杨洪. 基于智能手机的路面状况快速检测技术研究与应用 [D]. 南京:东南大学交通学院, 2017

[10] Douangphachanh V, Oneyama H. A model for the estimation of road roughness condition from sensor data collected by android smartphones [J]. Infrastructure Planning Review, 2015, 70(5): 103-111

[11] Vittorio A, Rosolino V, Teresa I, et al. Automated sensing system for monitoring of road surface quality by mobile devices [J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2014, 111: 242-251

[12] Zang K, Shen J, Huang H, et al. Assessing and mapping of road surface roughness based on GPS and accelerometer sensors on bicycle-mounted smartphones [J]. Sensors, 2018, 18(3): 914

[13] Das A, Rosauer V, Bald J S. Study of road surface characteristics in frequency domain using micro-optical 3-D camera [J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2015, 19(5): 1282-1291

[14] 张明, 叶巧玲, 冯晓. 路面平整度检测技术现状与发展 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2007, 26(4): 112-114

[15] 陈洪凯, 唐红梅. 泥石流两相冲击力及冲击时间计算方法 [J]. 中国公路学报, 2006, 19(3): 19-23

[16] 陈洪凯. 公路泥石流研究及治理 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2004

[17] 唐邦兴, 章书成. 泥石流研究 [J]. 中国科学院院刊, 1992, 7(2): 119-123

[18] 吴积善, 田连权, 康志成, 等. 泥石流及其综合治理 [M]. 北京: 科学出版社, 1993

[19] Sayers M W. On the calibration of international roughness index from longitudinal road profile [J]. *Transportation Research Record*, 1995

[20] Perera R W, Kohn S D. Issues in pavement smoothness; a summary report [R]. NCHRP Project 20-51(1). Plymouth: Soil and Materials Engineers Inc, 2002

[21] Blum N C. System Identification of Vehicle Dynamics and Road Conditions Using Wireless Sensors [D]. Washington: UMCP Department of Civil and Environmental Engineering, 2015

[22] 黄绍书, 蒋金团. 自行车稳定性问题的研究与诠释 [J]. 物理通报, 2017, 36(11): 67-70

[23] 林修成, 张朝阳. 自行车行驶稳定性及后进动性的力学分析 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2001, 24(2): 287-291

[24] 刘延柱. 关于自行车的稳定性 [J]. 力学与实践, 2012, 34(2): 90-93

[25] 徐华峰. 自行车运动稳定性研究 [J]. 振动与冲击, 1994(3): 70-75

[26] 吕恒豪. 自行车运动力学分析 [J]. 中国科技信息, 2018(6): 31-33

[27] 张玲华, 郑宝玉. 随机信号处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003

[28] 岳雅茹, 朱嘉林, 朱士龙. 基于小波分析的振动信号去噪处理 [J]. 软件导刊, 2018, 17(5): 179-182

Roughness assessment of non-motorized vehicle lanes based on bicycle-mounted smart phones

Liu Junshan^{*}, Zhan Zhikun^{*}, Gu Lin^{**}, Zhao Yuliang^{***}, Li Jie^{*}, Cao Liqiang^{****}, Li Zhifang^{*****}
(^{*} School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)
(^{**} China Railway Shanhaiguan Bridge Group Co. Ltd., Qinhuangdao 066299)
(^{***} School of Control Engineering, Northeastern University, Qinhuangdao 066004)
(^{****} Qinhuangdao Highway Engineering Quality Supervision Station, Qinhuangdao 066000)
(^{*****} Qinhuangdao City Highway Management Office, Qinhuangdao 066000)

Abstract

Currently available vehicle-mounted methods for measuring road surface roughness are not universally applicable for measuring the roughness of non-motorized vehicle lanes. This paper proposes a new method to measure the roughness of non-motorized vehicle lanes using smart phones equipped with acceleration sensors and global positioning system (GPS) modules. The phones are fixed on shared bicycles, a widely used means of transport in today's cities. The trip distance and acceleration data are easily recorded. Using these data, the international roughness index (IRI) of several types of roads is calculated. The road features including bulge and pothole using the original acceleration waveform are also identified. It is experimentally demonstrated that the results obtained from the proposed method are in strong positive correlation with those measured by the technical integrated accelerometer. This method, proved to be an innovative and effective alternative to their vehicle-mounted counterparts for measuring the roughness of non-motorized vehicle lanes, is expected to have many practical applications in the future.

Key words: international roughness index (IRI), smart phone, non-motorized vehicle lane, acceleration sensor, global positioning system (GPS)