

信号控制交叉口行人过街行为虚拟实验

孙 剑, 杨 燕, 李克平, 王怀东

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 以交通系统微观仿真模型 VISSIM 为基础, 基于虚拟现实仿真理论开发了行人过街行为虚拟实验系统 (PCBVRS)。在上海市的中原社区和同济大学内招募了 29 名有代表性的出行者, 以上海市大连路与飞虹路交叉口为对象, 进行了行人过街行为虚拟实验, 获得了 230 份行人过街样本数据。运用实验科学中的信度与效度理论, 将实验数据与实测数据进行了对比分析。结果表明, PCBVRS 可以有效地模拟实际场景中的行人过街行为; PCBVRS 满足 VR(虚拟现实)系统沉浸性、交互性以及现实感等实验特点, 且造价便宜, 易于携带。经过进一步的研究改进, 将来可作为提高行人过街安全意识的培训工具。

关键词: 行人安全; 虚拟现实; 行人过街行为; 行人实验; 效度; 生存分析

中图分类号: U 491.13

文献标识码: A

Virtual Reality Experiment on Pedestrian Crossing Behaviors At Signalized Intersections

SUN Jian, YANG Yan, LI Keping, WANG Huaidong

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: A pedestrian crossing behavior virtual reality system (PCBVRS) was developed on the basis of the micro traffic simulation Software VISSIM and VR technology. 29 typical travelers from Zhongyuan Community and Tongji University were recruited and 230 crossing samples were obtained with PCBVRS in Shanghai. Reliability and validity theory in experimental science was adopted to comparatively analyze the data obtained respectively from field survey and PCBVRS experiment, which proved that PCBVRS could effectively catch pedestrian's crossing behavior. The characteristics of VR system, such as immersion, interaction and reality was satisfied by PCBVRS, and apart from that, PCBVRS was of the virtue of low building cost, high

portability, which, therefore, can acted as a training tool to promote safety awareness during pedestrian crossing after a further improvement.

Key words: pedestrian safety; virtual reality; pedestrian crossing behavior; pedestrian experiment; validity; survival analysis

在中国的大部分城市, 道路交叉口行人违章过街被认为是引起交叉口交通秩序混乱、安全隐患大、交通效率低的主要根源之一。交叉口行人违章的原因是多方面的, 既有环境因素, 又有行人自身心理的因素, 但更多的是被忽视了的交通设计和信号控制因素。在诸多城市可以看到主要的信号控制交叉口周期往往在 180 s 以上, 有的甚至达到 240 s, 300 s。行人过街等待时间达到 120 s 甚至 180 s, 远超行人过街最大可忍受等待时间, 诱发了大量的违章过街行为^[1]。因此研究行人违章的心理-物理影响因素、识别关键参数对研究行人违章机理、改善交叉口设计和信号控制、降低行人违章过街、提高行人过街安全性有着重要意义。

由于行人过街行为复杂的心理-物理影响因素, 运用数学解析方法对行人过街行为进行理论分析存在很大的难度, 而现场观测又受到实际场景的条件限制且存在安全问题, 因此对行人过街行为进行实验研究是近年来研究的热点。行人实验方法包括: 意向偏好 (stated preference, SP) 调查实验^[2]、虚拟现实 (virtual reality, VR) 实验^[3-5] 以及受控实验^[6]。

SP 实验主要以计划行为理论等心理学理论为基础, 用 SP 问卷调查的方式, 试图研究行人过街的心理成因。由于本文研究的是行人过街的违章行为, 通过问卷调查, 行人会保留自己的意见, 进而使实验

收稿日期: 2010-02-05

基金项目: 国家自然科学基金(50778133); “十一五”国家科技支撑计划(2006BAJ18B07)

第一作者: 孙 剑(1979—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为交通系统分析及交通仿真。E-mail: sunjian@tongji.edu.cn

结果失真^[3]. 虚拟实验法以虚拟现实环境为平台,通过实验人员与硬件的交互分析行人行为. 传统的硬件在环(hardware-in-the-loop, HIL)的虚拟实验,实验场景较为简单,且长时间实验可能导致行人不适(恶心、呕吐、耳鸣等),进而造成结果失真^[7-8]. 受控实验多用于疏散行为研究,而对过街行为的受控实验,实验方案受潜在安全因素影响,可调参数很少^[6]. 因此本文的着力点在于以实验科学为基础,以虚拟现实技术为指导,通过对成熟的交通仿真模型的二次开发,构建参与者与仿真场景可直接交互的行人过街虚拟实验系统(pedestrian crossing behavior virtual reality system, PCBVRS),并通过混合交通流仿真技术、3 维建模技术等,在较实际的场景中研究行人过街行为问题.

1 实验方法

1.1 实验人员选择

作者分别在同济大学嘉定校区和上海市杨浦区中原社区招募了 29 名志愿者,年龄在 18~65 岁之间呈正态分布,其中男性 16 名,女性 13 名. 根据行人到达交叉口的时间分布特征,每人做 8~10 轮实验,共获得有效样本 230 份. 该样本数总体上可反映行人过街行为特征^[5].

1.2 PCBVRS 构建

PCBVRS 以微观仿真模型 VISSIM 为基础,通过外部控制程序动态调用 VISSIM,使得实验人员可与仿真模型中的“自己”交互,并且同步主机和多个子机之间 VISSIM 模型的运行.

VISSIM 模型用来构建周边环境和交通运行场景,外部控制程序由通信模块、仿真控制模块和人机交互模块组成. 其构架如图 1 所示.

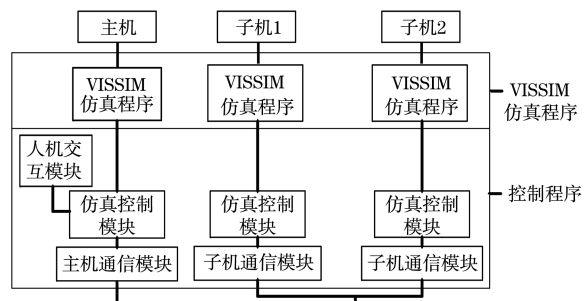


图 1 PCBVRS 架构

Fig.1 Structure of PCBVRS

通信模块使主机和子机的仿真同步运行,确保实验人员看到的画面在时间空间上的连续性. 仿真

控制模块通过组件对象模型(component object model, COM)接口与 VISSIM 软件交互,实时读取和改变仿真参数,达到改变仿真场景(交通流量、信号控制方式等)和读取 VISSIM 内部检测器采集数据的目的. 人机交互模块采集实验人员的键盘操作行为,将这一行为作为过街指令传达到 PCBVRS 中,实现行人敲击键盘空格或回车键控制 PCBVRS 中行人过街的功能.

1.3 实验方案设计

1.3.1 实验对象模型的建立

行人过街违章行为易发生在交叉口行人穿越干路时,因此选择上海市大连路与飞虹路交叉口作为实验对象,大连路为上海市的一条重要主干路,行人在飞虹路等待穿越大连路.

与传统的 VR 系统相比,PCBVRS 的优势之一就是可以较精确地再现交叉口的实际运行情况. 因此除了真实的 3 维场景建模外,实验对象交叉口的各类交通参与者的流量和信号控制方案数据也在 VISSIM 模型中体现. 实验交叉口周期为 180 s,三相位控制,行人穿越大连路的红灯时长为 155 s;大连路双向流量为 2 500 pcu · h⁻¹. 另外,车辆之间的可穿越间隙是诱发行人违章过街的重要因素,而车辆的到达分布主要取决于上游路口的流量和信号控制方案,因此上下游关联路口的交通需求和信号控制方案数据也在 VISSIM 模型中建立. 实验对象交叉口的实际场景与仿真场景对比如图 2 所示.

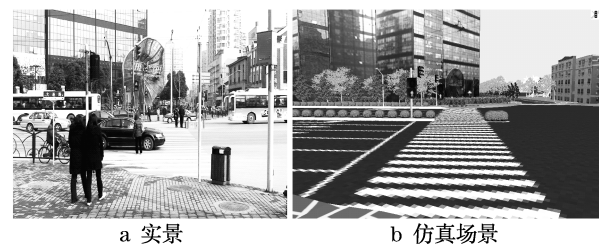


图 2 实验对象交叉口实景及仿真场景

Fig.2 Object intersection and simulation scenario

1.3.2 行人虚拟实验场景

在建立了实验对象的 VISSIM 模型后,为了表达行人在现实世界中的真实视角,通过 PCBVRS 系统在 3 个显示器上同步 VISSIM 模型的运行,分别表达行人的左、前、右 3 个方向的视角. 不同的实验人员可根据自身的观察习惯,调整显示视角. 行人虚拟实验场景如图 3 所示.

在行人信号红灯期间,参与实验人员按照正态分布出现在实验场景中,实验人员观察 VISSIM 模型中的

“自己”和周边交通环境,并判断是否可穿越街道.如果可以,即敲击“空格”或“回车”键盘,VISSIM模型中的“自己”即会穿越街道,相应的行人过街指标数据同时被记录下来.



图3 行人虚拟实验场景图

Fig.3 Pedestrian virtual experiments with PCBVRS

1.4 实验过程

为了使实验人员有更真实的实验感受,同时获得更丰富的实验调查数据.作者设计了三步骤实验方案:

第1步,行人实验环境预热.通过播放实验交叉口的实际行人过街视频录像和介绍材料,使参与实验人员熟悉实验场景,尽快地沉浸到实验环境中;并通过行人基本属性问卷填写(包括其个人特性和出行特性),使行人进一步融入角色.

第2步,行人上机虚拟实验.在工作人员的帮助下,实验人员进行第1轮虚拟实验体验,回答研究人员提出的问题.第2轮正式开始行人过街虚拟实验,按照正态分布产生行人红灯期间到达交叉口时刻,每个实验人员进行10轮左右的过街实验.为减少实验人员由于长时间沉浸在虚拟环境中造成眩晕等不适感觉,2个行人信号红灯间隙在中间屏幕播放放松画面.

第3步,行人问卷调查.行人完成上机虚拟实验后,将被要求进行行人问卷调查.调查包括两部分:一是按照实验科学理论对行人虚拟实验可信性和有效性的问卷^[9];二是按照计划行为理论对行人的过街的心理问卷^[10].在本文中,这些问卷资料仅用来对行人上机虚拟实验的数据进行质量控制,有关行人心理问卷数据和虚拟实验数据的对比分析,将另文发表.

1.5 行人虚拟实验采集数据

为了对比分析虚拟实验中的行人行为和实地观测的行人行为的异同,本研究延续作者在文献[1]中的工作,应用生存分析模型对行人过街行为进行建模分析,实验采集数据包括信号切换时间、行人等待时间、行人过街时车头时距及车头空距.

在我国,行人信号灯色分为红灯、绿灯、绿闪,如

图4所示.首先通过PCBVRS记录每周期内行人信号灯的切换时刻(图4中 t_0, t_1, t_2, t_5)、行人到达交叉口等待区时刻(t_3)及行人信号灯颜色、行人开始通行时刻(t_4).

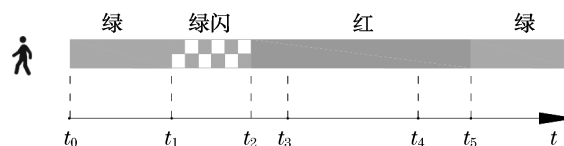


图4 行人信号灯色与行人过街时间

Fig.4 Pedestrian signal and crossing time

PCBVRS采集的指标体系,其定义如下:

行人红灯时间 T_{red} ,指交叉口的信号周期时长减去该方向行人绿灯时间,其值为图4中的 $t_5 - t_2$.

行人所需等待时间 T_{wait} ,指行人在到达交叉口等待区的时刻与该方向行人变为绿灯时刻的差值,其值为图4中的 $t_5 - t_3$.

行人等待的生存时间 T_{sur} ,指行人到达等待区的时刻与行人开始通行时间的差值,其值为图4中的 $t_4 - t_3$.

行人过街车头时距 H_t :指行人开始违章过街时,车辆到达行人冲突点的时间.假如是多车道场景,取各个车道可穿越间隙的最小值.

行人过街车头空距 H_d :指行人开始违章过街时,车辆到达行人冲突点的距离.假如是多车道场景,取各个车道可穿越空挡的最小值.

在行人过街行为的样本数据中,既包括违章过街行人样本,又包括遵章过街行人样本.为综合考虑这两类数据的影响,本文采用生存分析(survival analysis)模型对样本数据进行处理.限于篇幅,生存分析模型详细计算过程参见文献[1].按照生存分析模型整理得到的行人过街生存率表如表1所示.

2 虚拟实验信度与效度分析

判断一个实验方法是否科学合理,不仅仅需要对实验结果进行对比分析,还需要从实验科学的角度进行全过程论证^[3].在抽样调查与实验科学研究中,信度(reliability)与效度(validity)均特指测量工具(如问卷、实验等)去除可能影响测量结果因素后的准确程度.吴统雄^[10]曾预期“分析信度与效度(或至少是分析信度)会成为调查研究中不可或缺的步骤”,但在这项预期10余年之后,国内信度与效度分析仍没有得到足够的重视;而在国外,自本世纪初以来信度与效度分析已成为实验科学研究的热点.

表 1 行人生存率计算表
Tab.1 Survival table of pedestrian waiting time

秩次 i	已经过的等待时间/s	期初等待人数/人	期内删失人数/人	违章人数/人	违章概率	遵章概率	活过该时的生存率	生存率标准误差
1	0	230	2	25	0.11	0.89	0.890 8	0.020 6
2	10	203	5	20	0.10	0.90	0.802 0	0.026 5
3	20	178	3	18	0.10	0.90	0.720 2	0.030 0
4	30	157	5	21	0.14	0.86	0.622 3	0.032 6
5	40	131	3	18	0.14	0.86	0.535 8	0.033 9
6	50	110	13	12	0.12	0.88	0.473 7	0.034 4
7	60	85	9	5	0.06	0.94	0.444 3	0.034 7
8	70	71	15	10	0.16	0.84	0.374 3	0.035 6
9	80	46	9	6	0.14	0.86	0.320 2	0.036 6
10	90	31	9	2	0.08	0.92	0.296 0	0.037 7
11	100	20	7	1	0.06	0.94	0.278 1	0.039 4
12	110	12	4	0	0	1.00	0.278 1	0.039 4
13	120	8	1	0	0	1.00	0.278 1	0.039 4
14	130	7	3	0	0	1.00	0.278 1	0.039 4
15	140	4	4	0	0	1.00	0.278 1	0.039 4

2.1 PCBVRS 信度分析

信度指的是测量工具本身的准确程度,主要反映的是测量工具的可靠性和稳定性.

假设 PCBVRS 所测得的值为 X_o .(通常以平均数代表),则 X_o 可分解为

$$X_o = X_t + X_e$$

式中: X_o 为观察值; X_t 为真实值; X_e 为误差值.而假设测量所得的变量为 V_o ,同理 V_o 可分解为

$$V_o = V_t + V_e$$

其中真实变异量与观察变异量之比,即为信度,即

$$R_{tt} = V_t / V_o$$

但是从统计的角度来看, V_t 很难直接估计,因此信度改为

$$R_{tt} = (V_o - V_e) / V_o = 1 - (V_e / V_o)$$

信度即为 1 减去误差变异量与观察变异量之比.

在本研究中,PCBVRS 采集的信度相关参数为实验人员的每次重复实验的红灯等待时长,利用 α (克伦巴赫)系数信度分析模型计算各指标相关性. α 系数是目前社会研究最常使用的信度指标^[11],其定义为

$$\alpha = \frac{K}{(K - 1)} \left(1 - \sum_{i=1}^K \sigma_{Y_i}^2 / \sigma_X^2 \right)$$

式中: K 为测试项数; $\sigma_{Y_i}^2$ 为实验人员第 i 个测试项的方差; σ_X^2 为实验人员各测试项总得分的方差.

α 系数评价的是各测试项得分间的一致性,属于内在一致性系数.一般实验的 α 系数在 0.5~0.7

认为可信.本实验的 α 系数为 0.67,因此 PCBVRS 通过信度检验.

此外,进一步利用皮尔逊相关度计算 PCBVRS 中行人的等待时长、碰撞概率、车头时距等各个指标之间的相关性,如表 2 所示.

表 2 相关度分析表

Tab.2 Correlations of key indicators in PCBVRS

指标	等待时间	碰撞	车头时距
等待时间		- 0.234 **	0.126 *
碰撞	- 0.234 **		- 0.130 *
车头时距	0.126 *	- 0.130 *	

注: ** 表示 $P < 0.01$; * 表示 $P < 0.5$.

从表 2 中可以看到,等待时间和碰撞成反比,其可信区间为 99%.证明实验中的等待时间和碰撞之间具有很高的统计显著性,等待时间越长的行人在过街后与车辆碰撞的概率越小,表明他花了越多的时间判断交通情况,从而取得更安全的过交叉口的时机;等待时间越长的行人选择过交叉口时的可接受空当越大;车头时距与碰撞的关系表明,过交叉口时可接受空当越大,行人碰撞的概率越小,这是符合行人过街现实的.

2.2 PCBVRS 效度分析

效度指的是测量工具能正确测出所测量对象的特质的程度,它反映的是测量结果的有效性.在行为科学分析领域,自上世纪 90 年代以来,不同的学者发展了多种效度测度模型,包括内容效度、预测效度及构建效度等^[3-10].本研究先对参与实验的行人进

行表面效度测量,在确认了参与实验人员准确理解了实验场景后,再用预测效度理论对 PCBVRS 的有效性进行验证.

2.2.1 表面效度

在虚拟实验中,表面效度是指实验人员对实验环境真实程度和对实验环境不适感的直观判断.在本研究中,通过问卷调查实验人员对虚拟环境以及实验人员感受两个层面的问题获得实验的表面效度.每个问题分为 5 级,以虚拟实验环境中的车辆真实度为例,5 表示虚拟环境中的车辆与实际车辆运动一致;1 为与实际环境完全不一致.仿真不适度中,5 表示不适感严重,1 表示没有不适感觉.表 3 列出了涉及表面效度的 7 个参数的调查结果.

表 3 PCBVRS 表面效度
Tab.3 Face validity of PCBVRS

表面效度	期望值	标准差
虚拟环境综合真实度	3.93	0.75
场景真实度	3.97	0.73
车辆真实度	4.41	0.63
虚拟环境综合不适度	1.34	0.48
晕眩	1.14	0.57
眼疲劳	1.28	0.45
方向感丧失	1.03	0.19

PCBVRS 系统的环境真实度在 4 左右,表明实验人员认为 PCBVRS 的真实度比较高,能够反映客观真实的场景.PCBVRS 的不适度在最低的 1 左右,62%的实验人员在 20~40 min 的实验结束后(根据实验人员的实验进行情况有所不同)报告没有任何可察觉的不适症状,34%的实验人员报告有轻微不适,只有 1 名实验人员感到中度不适.而使用头盔设备(head mounted device,HMD)进行 20 min 左右的实验,就有 61%以上的实验人员报告有晕眩、眼疲劳和方向感丧失症状^[8].因此得出结论,PCBVRS 比 HMD 能够减少虚拟环境不适症状.

2.2.2 预测效度

预测效度常用在学科考试或一般心理实验上,目的是分析某一项实验可以预测到多少研究者想探究的特质,这个特质通常是另一项测验的分数或是某种行为.为验证通过 PCBVRS 实验的行人过街行为数据能够反映现实中的行人过街等待行为,本文利用实验数据建立了行人过街行为的生存分析模型及相应的生存曲线,并将此生存曲线和实证数据生存曲线做对比分析,从而验证虚拟实验的有效性.大连路、飞虹路实测数据生存曲线和实验数据生存曲线对比如图 5 所示;不同实验人员的生存曲线对比如图 6 所示.

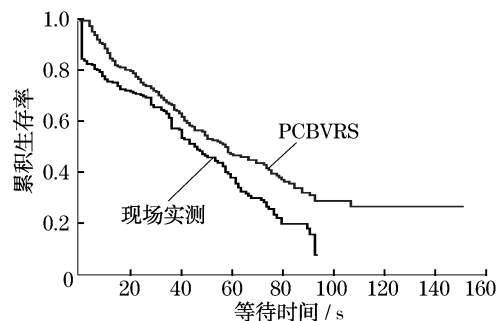


图 5 全样本实验数据与实测数据生存分析对比
Fig.5 Comparison between survival curves of experiment with PCBVRS and field survey

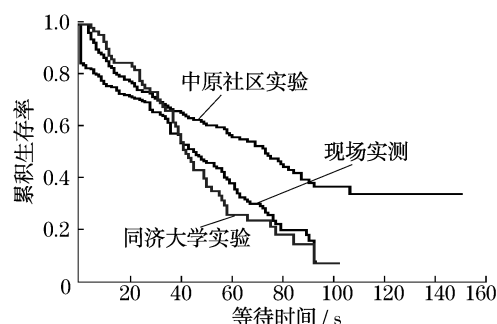


图 6 不同实验对象生存分析曲线对比
Fig.6 Comparison between survival curves of different object in PCBVRS

从图 5 中可以看出,PCBVRS 中行人等待时间的生存曲线和现场采集数据得到的行人等待时间的生存曲线基本吻合.PCBVRS 中总体的期望等待时间(50%行人违章时间)同现场实测的等待时间相对误差小于 20%,因而可以说 PCBVRS 能够像现场采集数据一样,表达行人随交叉口信号灯等待时间变长而逐渐失去耐心的变化过程.图 6 将在中原社区和在大学校区内采集的数据同实地调查数据对比,从图中可以看到,大学校区内年轻人在短时间(30 s 左右)内,表现出更大的耐心,但长时间等待会使其失去耐心,85%行人在等待时间达 90 s 时已违章过街,同基于实际数据的研究完全相同^[1],而 50%的行人在等待时间为 41 s 时违章,也与实测值(46 s)很接近.对于中原社区的实验人员来说,由于对 PCBVRS 不了解和新鲜感,因而产生了更长的等待时间;另一方面,在实际过街场景中,由于某个行人违章而引起别的行人的“从众行为”,在 PCBVRS 中没有得到很好的体现,这也是造成社区实验数据和校区实验数据以及实测数据的差异.

3 PCBVRS 推广应用探讨

除了按照信度与效度理论进行验证外,根据 David C. Schwebel 教授的研究,虚拟实验系统至少满足沉浸感、交互性以及现实感才可能具有更一般意义的应用^[3]。

传统的 VR 系统一般要求实验人员在特定的硬件环境中,身穿辅助设备(如头盔、感应设备等),实验人员沉浸感很强。通过三步骤的实验策略,PCBVRS 提供了具有一定水平的沉浸感,同时有效地减轻了参与人员的不适感,在所有受试人员中,90%的人认为有很强的沉浸感,且在实验时段没有传统 VR 系统的不适感觉。

PCBVRS 同样提供了良好的人机交互界面,行人可以通过敲击键盘来观察自己通过人行横道的过程,同时可以通过上下键调整自己的步行速度。

由于 PCBVRS 的后台基础建模工具是 VISSIM 交通仿真模型,因此它提供了高质量的 3 维场景和混合交通流运行特征,经过校正的 VISSIM 模型交通流精度指标可以达到 95%以上^[12],使 PCBVRS 更具有现实感。

总之,PCBVRS 基本具备了典型 VR 系统的特征,可以作为行人行为虚拟实验的基础工具。进一步的工作是增强人机交互功能,如多人同时参与实验,行人红灯倒计时实验等,这些工作会随着研究对象的不同而相应调整。

4 结论

(1) 基于 VISSIM 模型开发的行人过街行为虚拟实验系统科学地描述了行人过街行为,可以用来作为研究行人过街行为的实验手段,经过进一步的改进,也可以作为行人安全教育和培训的工具。

(2) 对诸如行人过街行为这样一类受心理-物理众多因素影响的行为科学调查研究,信度和效度分析是保障其科学性的基础,特别是内在信度和预测效度是必不可少的验证手段。

(3) 对于行人过街虚拟实验,要注意处理单个行人的过街需求和其“从众行为”,否则可能会导致实验结果失真。

(4) 通过大连路与飞虹路交叉口的实验分析,等待时间过长是诱发行人违章的重要因素。建议通过增加行人过街安全岛等设计手段,减少行人绿闪

清空时间,进而缩短信号周期和行人等待时间,减少行人违章过街的概率。

进一步的工作是利用 PCBVRS 进行行人红灯倒计时设置、中小学生过街等实际应用探索研究,在实践中逐步完善 PCBVRS 的实验性能,这部分工作正在进之中。

参考文献:

- [1] SUN Jian, LIU Guangxin, LI Keping, et al. Survival analysis on pedestrian's maximum waiting time at signalized intersections [C]//TRB 89th Annual Meeting Compendium of Papers. Washington D C: National Academy of Science, 2010: 10-1428.
- [2] Emilio Moyano Diaz. Theory of planned behavior and pedestrians' intentions to violate traffic regulations [J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior, 2002, 5(2): 169.
- [3] Schwebel D C, Gaines J, Severson J. Validation of virtual reality as a tool to understand and prevent child pedestrian injury [J]. Accident Analysis and Prevention, 2008, 40(5): 1394.
- [4] Landis B W, Petritsch T A, Mcleod P S, et al. Video simulation of pedestrian crossings at signalized intersections [J]. Journal of the Transportation Research Board, 2005, 30(1): 49.
- [5] Simpson G, Johnston L, Richardson M. An investigation of road crossing in a virtual environment [J]. Accident Analysis and Prevention, 2003, 35(4): 787.
- [6] Daamen W, Hoogendoorn S P. Experimental research on pedestrian walking behavior [C]//Transportation Research Record. Washington D. C.: National Academy of Science, 2003: 20-30.
- [7] Bullock D, Johnson B, Wells R B, et al. Hardware-in-the-loop simulation [J]. Transportation Research Part C, 2004, 12(1): 73.
- [8] Howarth P A, Costello P J. The occurrence of virtual simulation sickness symptoms when an HMD was used as a personal viewing system [J]. Displays, 1997, 18(2): 107.
- [9] ZHOU Ronggang, Horrey W J, YU Ruifeng. The effect of conformity tendency on pedestrians' road-crossing intentions in china: an application of the theory of planned behavior [J]. Accident Analysis and Prevention, 2009, 41(6): 491.
- [10] 吳統雄. 態度與行為之研究的信度與效度: 理論、應用、反省 [J]. 民意學術專刊, 1995, 20(3): 29.
WU Tongxiong. Reliability and validity in attitude and behaviors: theory, application and self-questioning [J]. Special Issue on Public Opinion, 1995, 20(3): 29.
- [11] Lee J C, Shavelson R J. My current thoughts on coefficient alpha and successor procedures [J]. Educational and Psychological Measurement, 2004, 64, (3): 391.
- [12] 孙剑, 杨晓光, 刘好德. 微观交通仿真系统参数校正研究 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(1): 48.
SUN Jian, YANG Xiaoguang, LIU Haode. Study on microscopic traffic simulation model systematic parameter calibration [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(1): 48.