

通道行人超越行为研究

吴娇蓉, 冯建栋, 陆苏刚

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 采用轨道交通双向通道监控视频数据进行分析, 提出以步为基本单位确定统计间隔, 按照超越者双脚重心投影位置确定行走轨迹的研究方法, 根据超越者轨迹, 提出超越的三个阶段划分方法和四个描述超越行为轨迹特征的空间指标. 深入分析了超越行为三个阶段行人横向间距、累计横向侧移、超越者行走直线距离等的特征和规律, 被超越者性别差异对各项空间指标的影响, 提出判别超越结束阶段超越者行走状态的方法, 分析了超越行为出现频率与人均空间的关系.

关键词: 行人通道; 行走轨迹; 横向间距; 纵向间距; 直线长度

中图分类号: U491.2

文献标识码: A

Research on Pedestrians' Overtaking Behavior in Passageway

WU Jiaorong, FENG Jiandong, LU Sugang

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

Abstract: An approach is proposed to extract individual pedestrian trajectory from surveillance digital video footage of bidirectional passageway in Shanghai (China) metro stations. According to the overtaking trajectory, three sections of overtaking and four spatial indexes are defined. By the research, a new insight into the analysis of overtaking trajectory is offered, such as the lateral spacing during the three sections, the influence of gender differences of the overtaken person on the pedestrians' lateral spacing, the initial longitudinal spacing in the first section of overtaking process, the total straight-line distance that overtaking pedestrians travel during the three sections, the state of overtaking pedestrian at the end of post-overtaking section. The relationship between the probability of overtaking behavior and pedestrian space is also explored. Based on the above analysis, the values of minimum effective sidewalk width are recommended to meet the overtaking requirement

at level of service C in China.

Key words: passageway; trajectory; lateral spacing; longitudinal spacing; straight-line distance

研究宏观上易于观测的行人流量、密度、速度相关关系对于洞察行人行为的本质方面提供的信息尚不充足, 当引起行人流群集行为(如各种自组织现象)的个体行为机理缺乏深入理解时, 讨论行人设施的安全性、改进高强度客流下行人设施的服务水平就变得相对困难. 个体行人行为通常包括正常行走、跟随、避让和超越行为, 这些典型行为可以独立出现, 又可以关联出现, 即跟随的同时进行超越或避让, 完成超越的过程中进行避让等. 正常行走是指行人可以自由地选择步行速度和行走方向, 而不受任何干扰; 超越和避让是行人行走过程中, 为了避免与同向、相反方向行进的行人身体擦碰, 采取的侧移让行行为.

从 20 世纪 70 年代开始, Wolff, Sobel 与 Lillith, Dabbs 与 Stokes, Willis 以及 Hill 先后分析了不同性别、种族、年龄、社会地位、携带行李、群体的行人相遇时, 遵循的避让规则和需要的最小侧身避让空间^[1-5]. 例如, 必须侧身避让以免正向碰撞的最小避让纵向间距约为 1.5 m. 低密度状态(5~15 人)平均避让距离为 2.1 m, 高密度状态(16~30 人)平均避让距离为 1.5 m^[1]. 基于已有研究, 在地位相同的人、或文化背景和经济背景相同的人一起行走时, 行人间通常保持较小的间距. Hogendoorn 和 Daamen 采用行人受控实验, 研究窄通道的通行能力和行人的跟随行为之间的关系^[5]. Pushkarev 和 Zupan 分析了行走过程中行人的可用空间^[6]. Miyazaki 等人采用受控实验研究 15 m 长通道中如果出现轮椅者, 行人群在超越轮椅者时速度递减的

规律^[7]. Umemura 指出行人每踏出一步都需要确定行走方向,以避免碰到移动的障碍物^[8].

在已有文献中,行人如何绕过、避让障碍物的行为研究较多,采用实地观测和受控实验方法提出了避让距离、个人空间等指标,相关行为机理分析较为系统. 对于个人超越行为,已有研究从宏观角度提出了流量、速度等指标,微观层面仅有非常有限的研究提到了行走轨迹和空间特征,由于缺乏观测数据和个体行人轨迹分析技术,因此没有细致给出超越行为的机理和定量分析指标. 行走轨迹能够图示化行走路径和时间的关系,给出行人在行走方向上清楚、明确的横向、纵向位移. 因此,本文结合上海轨道交通双向水平通道的监控视频数据,分析行人个体的典型步行行为——超越行为,获取大量超越行为的完整轨迹,对超越过程进行分阶段划分,提出描述超越轨迹的微观指标,研究超越者、被超越者之间的相互影响关系,寻找各项微观指标特征和变化规律,研究成果不仅用于完善中国步行者行为机理,同时对于其他国家、地区的行人交通流研究也具有重要参考价值.

1 研究方法

Pushkarev 和 Zupan 提出当人均空间大于 3.7 m^2 时,行人流量只有最大流量的 20%,超越行为可以自由发生^[6]. 根据笔者多年对上海轨道交通车站行人行为观测,当人均空间在 $3 \sim 10 \text{ m}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ 时,超越行为出现概率较高. 因此,本文采集了密度范围 $3 \sim 16 \text{ m}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ 的轨道交通车站双向通道监控视频数据作为本次超越行为研究的基础数据,选取的观测时段为上午 7:00—10:30,观测到的行为样本绝大部分为 18—60 岁的中青年男性或女性,随身携带小包,流量变化范围为 $17 \sim 27 \text{ 人} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

整个观测区段主要由主观测区段和辅助观测区段组成. 主观测区段长 6.00 m,宽 4.43 m,见图 1. 为了后期准确识别行人轨迹,在通道的每块地砖边缘粘贴黑色胶布,是观测行人个体行为特征的主要区域. 辅助观测区段长 8.40 m,宽 4.43 m,是图中与主观测区域相连上方未贴胶带的区域,为观测行人个体行为特征的辅助区域,主要用于被跟踪的部分行人超越行为在主观测区 M 段未能全部完成而进入辅助观测区 A 段的情况.

本次双向通道监控视频安装在通道顶部,通道

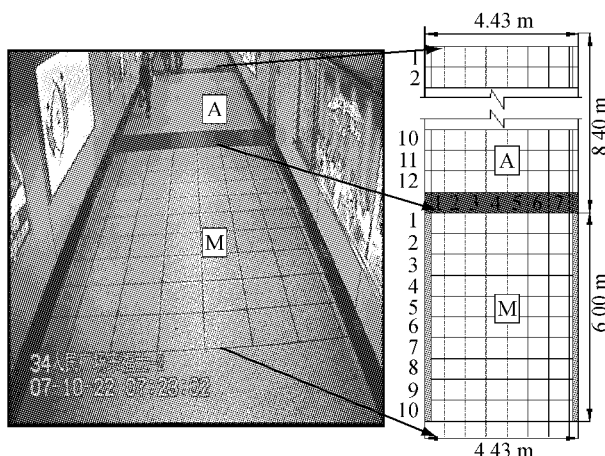


图 1 水平通道主观测区段示意图

Fig.1 Main observation and auxiliary observation sections of passageway

人流密度不高,前后遮挡的情况出现概率不高. 视频摄像机的角度不是完全垂直于地面,视频图像拍摄角度倾斜,因此,不能采用 Hoogendoorn 提出的方法获得轨迹数据^[5],行人重心投影位置的获取目前采用录像逐帧播放+人工识别的方法. 本次行人超越行为轨迹采集方法如下:

根据行人行走特点,以“步”为基本单位,确定行走轨迹的统计间隔,行人每迈一步,均记录行人重心的横向位置和纵向位置,从而得出行走轨迹,如图 2 所示.

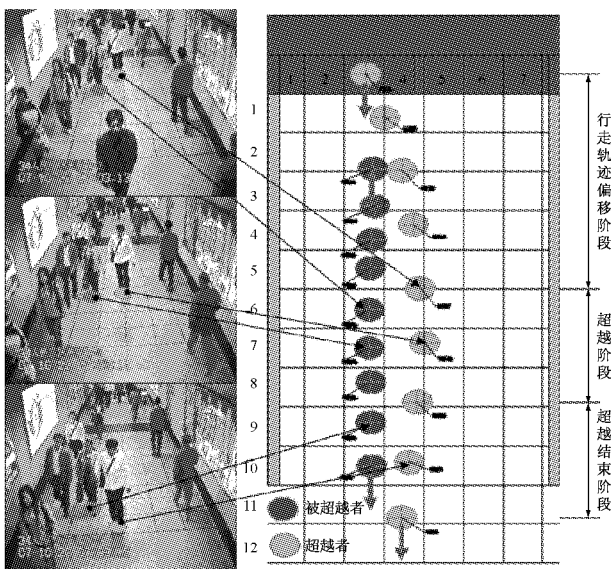


图 2 行人轨迹标定示意图

Fig.2 Walking trajectory determination method

图 2 中超越者重心投影位置确定方法:超越者每次跨步两脚并拢瞬时,两脚的脚尖、脚跟对角线交点即为重心投影位置,超越者重心投影位置确定的

同一瞬时,采用同样方法记录被超越者的重心投影位置,见图 3. 本次视频播放软件像素为 704×576 , 可以精确到一帧($1/25\text{ s}$),从技术上保证了重心投影位置的准确度.

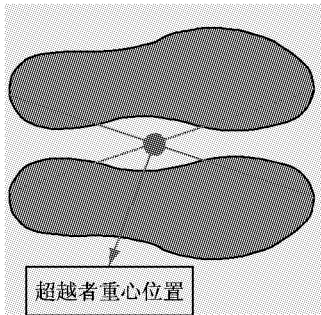


图 3 行人重心投影位置示意图

Fig.3 Projection center of pedestrian

2 超越行为的定义和分析指标

与机动车行驶中的超越类似,行走在同一步行道上的行人,若前方行人步速度低于后方行人的步速或期望速度,对后方行人形成阻碍时,后方行人需要通过改变步行道甚至加速超越到慢速行人前方来避免冲突.

超越行为可以划分为三个阶段,见图 2:行走轨迹偏移阶段,行人开始较大幅度偏移正常行走时的行走轨迹方向,从正常行走状态转变为超越状态;超越阶段,从行走轨迹偏移阶段末期到完成超越,避免冲突,当超越者同被超越者的纵向间距最小时(即超越瞬间),二者之间的横向间距反映了超越者变道时偏移的剧烈程度,也能揭示行人超越时需要与被超越者保持的最小横向间距;超越结束阶段,超越阶段

末期到开始转变为正常行走的阶段,表现为行人行走方向逐渐趋于稳定,行走轨迹与最短路径方向基本趋于一致.此时,超越者与被超越者间的横向间距可以分析超越结束时超越者是回到原来的步行道?还是占据了不同的步行道?

基于以上超越行为三个阶段的划分,对超越行为基本特征的分析将从超越者轨迹着手,提取反映超越轨迹特征的四个空间指标——行人横向间距 D_H 、行人纵向间距 D_V 、累计侧移距离 D_{Sm} 、行走直线距离 L_D ,深入分析超越行为三个阶段行人横向间距的差异、轨迹偏移阶段初始纵向间距特征、超越者经历三个阶段的超越过程后累计侧移距离和行走直线距离特征和规律.四个空间指标的定义和计算公式见图 4 和表 1,图 4 中正常 1,正常 2,正常 3,表示正常行走的三个行人.

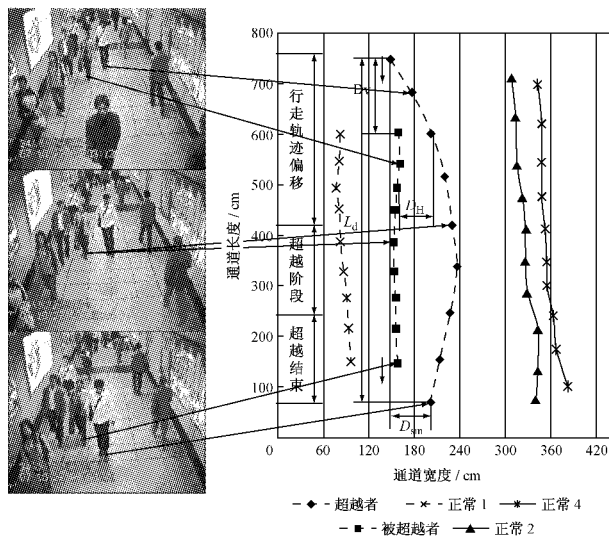


图 4 超越者轨迹特征指标

Fig.4 Characteristics of overtaker trajectory

表 1 超越行为分析指标定义和计算公式 单位:cm

Tab.1 Definitions and formulas of overtaking behavior analysis index (unit: cm)

序号	指标	定义	计算公式
1	行人横向间距 D_H	两行人重心投影横坐标差值的绝对值	$D_H = x_{pm} - x_{qm} $ x_{pm} 和 x_{qm} 为行走第 m 步,行人 p 和行人 q 的横坐标 x
2	行人纵向间距 D_V	两行人重心投影纵坐标差值的绝对值	$D_V = y_{pm} - y_{qm} $ y_{pm} 和 y_{qm} 为行走第 m 步,行人 p 和行人 q 的纵坐标 y
3	累计侧移距离 D_{Sm}	超越过程中,从第 1 步到第 m 步,累计的单步横向侧移距离	$D_{Sm} = \sum_{i=1}^m D_{Si} \quad (m = 1, 2, \dots, n)$ D_{Si} 为行人的单步横向侧移 $D_{Si} = x_i - x_{i-1}$ x_i 为第 i 步横坐标 x 值 x_{i-1} 为第 $i-1$ 步横坐标 x 值
4	行走直线距离 L_D	完成超越三个阶段,超越者走过的直线距离	$L_D = y_n - y_1 $ y_n 和 y_1 为第 n 步和第 1 步行人的纵坐标 y 值

3 数据分析

3.1 超越者、被超越者的横向间距关系

超越行为三个阶段行人的平均横向间距见表2。行走轨迹偏移阶段行人的平均初始横向间距最小;超越阶段行人平均横向间距(75.1 cm)大于超越结束阶段行人平均横向间距(67.4 cm)。三个阶段,超

越者的性别差异对横向间距的影响不显著,被超越者的性别差异对横向间距的影响见表3。超越者超越男性与超越女性相比,前者将保持较大的横向间距。初始超越阶段,超越者超越男性的平均横向间距为33.3 cm,超越女性为22.6 cm;超越阶段,超越者超越男性的平均横向间距为77.6 cm,超越女性为72.8 cm;超越结束阶段,超越者超越男性的平均横向间距为69.5 cm,超越女性为65.0 cm。

表2 行人超越三个阶段横向间距分析

Tab.2 Lateral spacing during three sections of pedestrian overtaking

阶段	交通参数	均值	标准偏差	样本数
行走轨迹偏移阶段	行人初始横向间距/cm	27.7	23.8	157
超越阶段	行人纵向间距最小时横向间距/cm	75.1	14.2	136
超越结束阶段	行人横向间距/cm	67.4	25.8	137

表3 被超越者的性别差异对横向间距的影响

Tab.3 The Influence of The Slow Person Gender on The Pedestrians' Lateral Spacing

阶段	男性被超越者	女性被超越者	小计
行走轨迹偏移阶段的横向间距			
样本数	75	82	157
均值/cm	33.3	22.6	27.7
标准偏差/cm	25.3	21.2	23.8
t 检验	$ t =2.875 > t_{0.975}$, 有显著差异		—
超越阶段的横向间距			
样本数	67	69	136
均值/cm	77.6	72.8	75.1
标准偏差/cm	14.6	13.5	14.2
t 检验	$ t =1.978 > t_{0.975}$, 有显著差异		—
超越结束阶段的横向间距			
样本数	72	65	137
均值/cm	69.5	65.0	67.4
标准偏差/cm	26.9	24.6	25.8
Z 检验	$ Z =1.042 < z_{0.975}$, 有显著差异		—

在超越结束阶段,超越者往往有两种行走状态:逐渐回到原来的步行道正常行走;不回到原来的步行道,在新的步行道正常行走。如何确定超越者处于哪一种状态呢?

Hoogendoorn 发现,窄通道的最小有效宽度应该至少能容纳一条步行道(宽度约 100 cm),如果要建立两条步行道,需要的最小有效宽度为 140 cm^[5]。在超越结束阶段,如果行人的肩宽+行人横向间距小于 140 cm,可以认为超越者和被超越者处于同一条步行道,即超越者选择第 1 种行走状态,参考中国国标 GB-10000-88,男性平均肩宽为 49 cm^[9],则超越结束阶段横向间距应小于 90 cm。图 5 是超越三个阶段行人横向间距累计频率曲线,可以发现在超越结束阶段,80%的超越者将选择第 1 种行走状态,20%的超越者选择第 2 种行走状态。

3.2 超越者行走过的直线距离和初始纵向间距分析

超越结束时超越者行走过的直线距离见表4。该指标表明水平通道内快速行人要想超越或避开慢速

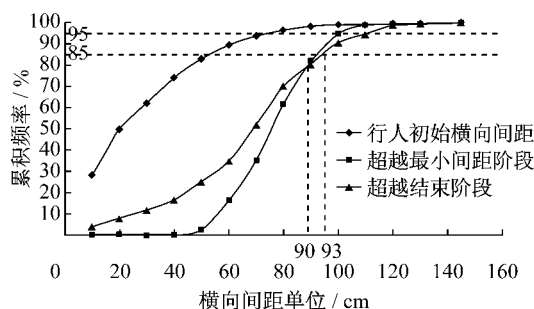


图5 超越三个阶段行人横向间距累计频率曲线

Fig.5 Cumulative frequency curve of lateral spacing during three sections

行人,并不是瞬时或走很短距离就可以完成的,而是需要“耗费”体力走过一定长度的直线距离,该直线距离平均值为 573.6 cm。按性别分类分析,超越男性慢速行人需要行走的平均直线距离约为 632 cm,超越女性慢速行人所需行走的平均直线距离约 517 cm。这两个指标值当显著性水平取 0.05 时,有显著性差异。

表 4 超越行为结束时超越者行走直线距离分析
Tab.4 The analysis on pedestrians' straight-line length of post-overtaking

超越者	被超越者	样本数	行走直线距离/cm		计算 t 值或 Z 值	比较结果
			均值	标准偏差		
男性	男和女	63	599.2	217.6	1.515	$ Z < Z_{0.975}$, 无显著性差异
女性	男和女	47	539.3	198.9		
男和女	男性	54	632.4	222.6	2.987	$ t > t_{0.975}$, 有显著性差异
男和女	女性	56	516.9	184.0		
男和女	男和女	110	573.6	211.0	—	—

轨迹偏移阶段初始纵向间距累积频率曲线见图 6,如果不考虑性别因素,在超越行为第一阶段,超越者与被超越者的初始纵向间距 85%分位值是 236 cm. 如果考虑性别因素,男性超越男性,男性超越女性的两条初始纵向间距累积频率曲线线型、85%分位值均较为接近;女性超越男性,女性超越女性的两条初始纵向间距累积频率曲线线型、85%分位值(160 cm;350 cm)均差异较大.

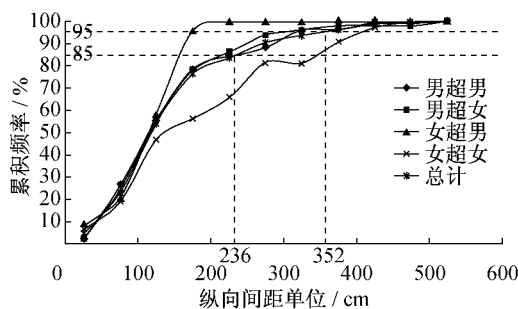


图 6 轨迹偏移阶段初始纵向间距累积频率曲线
Fig.6 The cumulative frequency distribution curves of initial longitudinal spacing between pedestrians in course change section

3.3 超越者累计横向侧移分析

表 1 中给出了累计侧移距离 D_{sm} 的计算方法,即超越过程中从第 1 步到第 m 步,累计的单步横向侧移距离. 由于超越行为发生时,前后两个人具有速度差、加速度差,图 7 采用横向累积侧移和行走直线距离指标分析了正常行走者、超越者的轨迹指标差异. 图中数据为“行走轨迹偏移阶段”第 1 步与“超越结束阶段”的最后一步的相对横向侧移距离. 对超越者不考虑超越的方向(实际观测中选择左侧超越的行人比例超过 82.3%),正常行走者最大累计横向侧移距离不超过 16 cm,远小于超越者的累计横向侧移距离. 通过回归分析,超越行为累计横向侧移距离随行走直线距离变化的回归曲线与二次抛物线方程十分接近,相关系数达 0.944 3. 表明超越者累计侧移距离行走直线距离增长而逐渐增长,即轨迹逐渐偏移

初始的最短路径方向;当直线行走距离约为 600 cm 时,累计横向侧移距离达到最大值 70 cm;然后累计侧移距离逐渐减小,超越者表现出逐渐回到初始步行道的趋势. 观测到的样本表明,无论超越者行走的直线距离有多长,累计横向侧移距离不会很大,通常不会超过 100 cm,即行人超越时,横向侧移量只要保证避免超越者的手与慢速行人的手相碰即可,此时可以理解为超越者的超越负效益最小^[10].

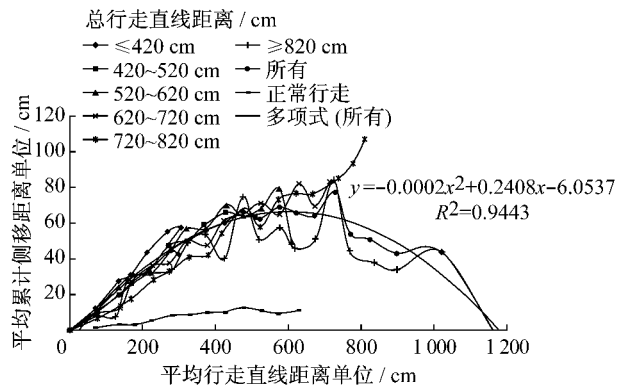


图 7 正常行走、超越行为的直线距离与累计横向侧移距离关系曲线比较
Fig.7 The correlation between the straight-line length and cumulative lateral distance for normal walking and overtaking

3.4 超越行为与正常行走行为的步速差异

超越行为发生时,被超越者的速度、加速度与正常行走基本没有差异;超越者和正常行走的步速差异见表 5,不论是对男性还是女性都有显著差异,即超越时行人的步速要比正常行走时明显大,男性超越者平均步速提高约 20%,女性超越者提高约 10%. 正常步速与超越步速都是通过观测样本的轨迹数据得到的,表中给出了有效样本数.

4 超越行为出现频率与人均空间的关系

采集了通道的各种行为轨迹数据,然后开展超

表 5 正常行走与超越步速对比

Tab.5 Speed Difference of Overtaking and Normal Walking

分组编号	行为	性别	有效样本数	步速/cm/s ⁻¹		计算 Z 值	比较结果
				均值	标准差		
1	正常	男性	46	141.232	14.404	-4.331	Z > Z _{0.975} , 有显著性差异
	超越	男性	67	169.794	51.561		
2	正常	女性	37	138.371	16.418	-3.243	Z > Z _{0.975} , 有显著性差异
	超越	女性	49	152.089	23.250		
3	超越	男性	67	169.794	51.561	2.506	Z > Z _{0.975} , 有显著性差异
	超越	女性	49	152.089	23.250		

越行为、避让行为、正常行走出现频率与人均空间的关系分析.双向通道超越行为、避让行为、正常行走的发生频率与人均空间柱状图见图 8,可以看出人均空间在 3~5 m²·人⁻¹范围内,随着人均空间增大超越行为出现频率由 25.7%逐渐升高至 41.8%;人均空间为 5~13 m²·人⁻¹时,随着人均空间增大超越行为出现频率由 14.4%逐渐降低至 5.1%;避让行为的变化趋势和超越行为相类似.在高密度人流出现时,超越行为发生的概率非常低;因此高密度情况下试图深入分析超越行为轨迹特征指标,基本不

可能.人均空间 3~4.5 m²·人⁻¹可以对应于美国通行能力手册 2 000 行人设施服务水平 B 级和 C 级上限,在该服务水平下,双向通道中正常行走出现频率为 38.7%,超越行为(36.2%)和避让行为(25.1%)出现频率之和超过 60%,通道有超越行为、避让行为、超越和避让行为同时出现的轨迹图见图 9.图 9 中虚线表示从主观测段进入辅观测段的行人轨迹,实线表示从辅观测段进入主观测段的行人轨迹,避让 1,避让 2 表示相互避让的两个行人.

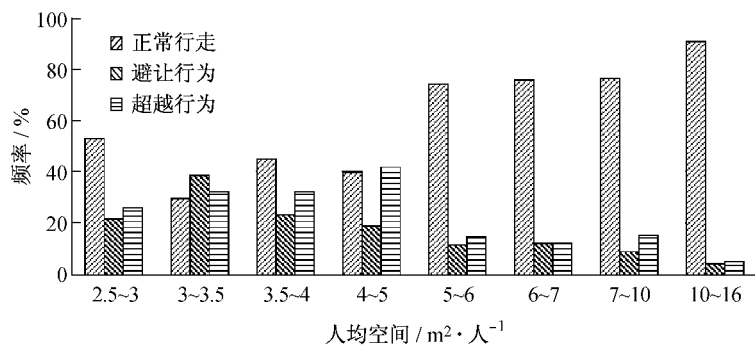


图 8 三种典型行为发生频率与人均空间关系

Fig.8 Average space and the probability of three kinds of behavior

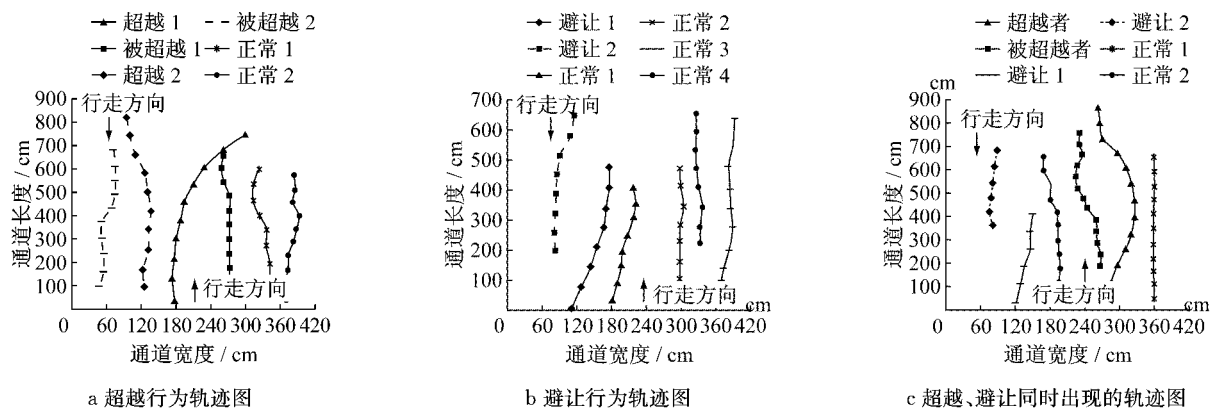


图 9 超越、避让行为轨迹图

Fig.9 The trajectory of overtaking and avoiding behavior

5 结论与建议

本文提出以步为基本单位确定统计间隔,按照超越者双脚重心投影位置确定行走轨迹的方法能够克服视频数据拍摄角度不垂直的缺陷.界定了超越行为的三个阶段——行走轨迹偏移阶段,超越阶段和超越结束阶段.从超越行为轨迹着手,分析微观层面的行人横向间距、纵向间距、行走直线距离、累计侧移距离指标的特征和变化规律,指出正常行走与超越时的步速有明显差异.以上研究结论可用于完善中国步行者行为机理.

由于样本数据来源于轨道交通车站的双向通道监控视频,行人的年龄很难直接判别,因此没有进行不同年龄分组下各项微观轨迹指标特征的分析;乘坐轨道的行人以通勤为主,绝大部分携带小包,因此没有分析携带不同尺寸行李对微观轨迹指标的影响.后续研究建议采集不同设施、不同环境下的行人视频数据,对不同年龄分组、携带不同尺寸行李的行人进行抽样,继续开展典型行为微观轨迹指标的分析与论证,建立反映中国人行为特征的个人超越行为分析模型.

参考文献:

[1] Wolff M. Notes on the behaviour of pedestrians[C]//Peoples

In Places: the Sociology of the Familiar, New York: Praeger Publishers, 1973: 35-48.

- [2] Sobel R S, Lillith N. Determinant of nonstationary personal space invasion[J]. Journal of Social Psychology, 1975, 97:39.
- [3] Dabbs J M, Stokes N A. Beauty is power: the use of space on the sidewalk[J]. Sociometry, 1975, 38(4):551.
- [4] Frank N Willis Jr, Joseph A Gier, David E Smith. Stepping aside: correlates of displacements in pedestrians[J]. Journal of Communication. 1979, 29(4): 34.
- [5] Hoogendoorn S P, Daamen W. Pedestrian behavior at bottlenecks[J]. Transportation Science, 2005, 39(2): 147.
- [6] Pushkarev B, Zupan J M. Urban space for pedestrians[M]. Cambridge: The MIT Press, 1975.
- [7] Miyazaki K, Matsukura H, Katuhara M, et al. Behavior of pedestrian group overtaking wheelchair user[C]//Pedestrian and Evacuation Dynamics, London: CMS Press, 2003: 267-278.
- [8] Umemura H, Watanabe H, Matsuoka K. Investigation of the model for path selection in open space[J]. Electronics and Communication in Japan, 2005, 88(1):18.
- [9] 中国国家技术监督局. GB-10000-88. 中国成年人人体尺寸[M].北京:中国标准出版社,1989.
China Bureau of Technical Supervision. GB-10000-88 Human dimensions of Chinese adults[M]. Beijing: Standards Press of China, 1989.
- [10] ZIPF G K. Human behavior and the principle of least effort [M]. Cambridge: Adison-Wesley Press, 1949.