

基于视觉感知和行走行为的室内空间形态研究

陈 星^{1,2}, 刘 义³

(1. 扬州大学 建筑科学与工程学院, 江苏 扬州 225127; 2. 西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710055;
3. 扬州大学 水利与能源动力工程学院, 江苏 扬州, 225127)

摘要: 基于人体视觉感知和行走行为特点, 研究室内空间设计问题。首先进行 1:1 示范性空间中基于时间-碰撞次数-碰撞部位 3 个指标的视觉感知局限——人体行走碰撞触粉试验, 发现碰撞次数与步行时间呈反向增长态势; 人体侧面碰撞次数远大于正面碰撞次数; 人体上部的肩部和臂部侧面碰撞次数明显高于人体下部的胯部及腿部侧面, 而这两区域都存在碰撞部位越低碰撞次数越多的现象; 腿部和脚部正面碰撞次数远大于腹部和胸部。其次, 基于人体视觉感知局限性分析, 探讨了室内空间中视觉感知和碰撞行为的关系与碰撞机理。最后, 提出针对侧面和正面碰撞的 5 个设计要点及计算公式, 改善通行空间剖面形态, 促进室内空间中人体行走行为的舒适与便捷。

关键词: 建筑室内空间; 视觉感知; 碰撞; 行走

中图分类号: TU112.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)03-0411-07

Study on the design of indoor spatial form based on visual sensation and walking behavior

CHEN Xing^{1,2}, LIU Yi³

(1. College of Civil Science and Engineering, Jiangsu Yangzhou University, Yangzhou 225127, China;

2. College of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

3. School of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Jiangsu Yangzhou 225127, China)

Abstract: Underlying characteristics of visual sensation and walking, the thesis attempts to study on the design of architectural indoor spatial form. Firstly, the limits of visual sensation- walking impact and contacting powder experiment is taken in a 1:1 architectural prototype, which focuses on the three indexes: the time, the number of the impact times and the body parts impacted on. The result indicates that: The more walking time is wasted, the less number of impact times are got. The number of impact times on the sides of the body is much more than on the front of the body. The number of impact times on the top half of the body- the sides of shoulders and arms is much more than on the bottom half of the body- the sides of the crotch and legs, and the lower the body parts impacted on are, the more number of impact times are got for the top half and bottom half of the body respectively. The number of impact times on the front of legs and feet is much more than on the front of the abdomen and the chest. Secondly, through the analyses of limits of visual sensation, the thesis explores the relationship between visual sensation and the impact behavior emerging from walking in the architectural indoor space and the mechanism of the impact behavior. At last, based on the experiment and the related analyses, five design methods and formulas involved in them for the impact on the sides of the body and on the front of the body are proposed, which can improve the shape of the cross-section of the walking space to contribute to the comfortable and convenient of the walking behavior in a architectural indoor space.

Key words: architectural indoor space; visual sensation; impact; walk

1964 年世界卫生组织就提出了居住满意度包括: 安全(safety)、健康(health)、便捷(efficiency or convenience)和舒适(amenity or comfort)主要类别。而室内空间设计的恰适性-spatial design adequacy(SDA)则代表了与这些内容相关的空间设计质

量。SDA 除了被室内空间所影响外, 更与人体的感知体验息息相关^[1]。依据“行为设置理论”, 人、环境和行为被有机组织在 1 个相互关联的系统里^[2]。室内空间形态和家具布置等会直接影响人的感知、感知范围和由此所导致的行为方式^[3-4]。因

此,提高建筑室内空间的 SDA 尤为重要。但是,SDA 所涉及的感知与行为的关系却很少被研究,且都集中在了交通空间共享、立体空间组合、功能空间的整合与压缩和空间外放等手法上^[5-6],并结合折叠家具以使传统居室的功能可以在狭小空间中实现,这些设计方法普遍注重空间的功能性和可操作性,人体行为成为了实现空间功能的工具,忽视了人体感知和行为之间的因果关系。例如:勒·柯布西耶的海岬小木屋和伦佐·皮亚诺的 6 m² 蜗居房的平面均由普通家具分隔,核心交通空间被各个功能区间共用,功能空间彼此整合且同时被极度压缩;XXS House^[7]和麦克·佩奇的立体房屋进行了立体空间的组合;Sleep Box^[8]用折叠桌板将上网等工作功能空间融入到就寝空间内等。这些设计实践都普遍忽视了人体感知,特别是视觉感知在狭小空间的局限性以及这种局限性对人体行为的影响^[9],视觉感知是很多行为发生的原因和目的,而存在于室内空间的视觉感知局限性以及这种局限性对人体行为的影响则需要深入的研究与探索^[10],且这一问题与 SDA 所涉及的“安全”、“健康”、“便捷”和“舒适”关系密切。

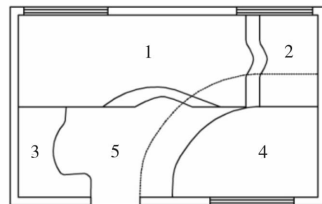
1 在建筑室内空间中进行的视觉感知局限-人体行走碰撞触粉试验

研究显示,80%~90%的外界信息是由人眼获取的,因此人们在室内空间中的活动必然需要极大地依靠视觉感知来获取必要的信息^[11]。视角与视距是影响视觉感知的两大因素,室内空间一般会使人拥有较小的视距,而较小的视距一方面能够使人得到较为清晰的视觉感知,但在另外一方面,则会限制人眼所感知的实际视野范围。因此,室内空间中可能存在着明显的视觉空间障碍问题,而这一问题有可能造成人体视觉感知的局限性,即对运动行为所需要的空间特征无法判断或判断失误,从而进一步造成碰撞行为的发生,而碰撞行为则与居住满意度关系密切。因此,有必要对这种室内空间中视觉障碍的产生,及其对人体行为的影响进行验证,并在此基础上获得更好的空间设计方法,提升建筑空间的 SDA。

1.1 测试条件与测试内容

本研究团队以 1:1 的比例搭建了一座示范性建筑,如图 1。示范性建筑选用木材搭建,采用现代榫卯和部分钢制节点构造。由于小空间更容易形成视觉空间障碍,所以将建筑层高设置为 2.20 m,

开间设置为 3.00 m,进深设置为 2.00 m,室内面积仅为 6.00 m²。卫生间、书桌和床头各开 1 个采光窗,室内布置隔墙、床、吊柜、橱柜、置物架等家具。室内家具和隔墙形体均采用倒角、曲线及曲面设计,减少因为物体形体设计问题造成的碰撞概率增加的情况,用以营造人体在室内空间中的自然行走情境。



1. 就寝区-蓝色色粉 2. 工作区-白色色粉 3. 烹饪区-绿色色粉
4. 淋浴间-红色色粉 5. 交通区

图 1 建筑平面及色粉布局

Fig. 1 Architecture prototype plan and the distribution of color powder

视觉感知局限——人体行走碰撞触粉试验采用真实空间的使用后评价方法(POE),将室内各个贴临人体活动区间的物体表面涂以色粉(不同色粉有助于辨别碰撞部位和碰撞次数),进行人体碰撞触粉测试,重点关注时间、碰撞次数和碰撞部位这 3 个指标,如图 2^[12]。实验人员选用 66 位身体健康的大学生,包括 33 位男生和 33 位女生。男生身高为 1.60~1.75 m,平均身高接近中国男性平均身高 1.67 m,体重为 60.0~70.0 kg,平均体重接近中国男性平均体重 66.2 kg;女生身高为 1.50~1.65 m,平均身高接近中国女性平均身高 1.56 m,体重为 50.0~60.0 kg,平均体重接近中国女性平均体重 57.3 kg;实验人员高矮、胖瘦适中,身体灵活度及视力良好,尽可能降低个体差异对于测试结果的影响。每位测试主体身着深蓝色连裤服,如图 2。根据测试观察,实验主体悠闲活动一圈的时长平均为 28 s,较为紧凑的活动时长平均为 23 s,十分匆忙的活动时长平均为 17 s。为每个实验主体设置这 3 个时长,结合对实验过程的观察,衣服的触粉情况和实验主体的记忆,对每位实验主体在相应时长内的碰撞频率和碰撞部位进行数据收集。

1.2 测试结果与步行行为分析

关于这 3 个时间周期,总体碰撞次数随时间的缩短而增加。特别对于平均 23 s 到平均 17 s 这 2 个时长,碰撞次数急剧上升,如图 3。

关于碰撞的主要方位,除去视线绝对无法达到的身体后部的碰撞,身体侧面碰撞次数占总碰

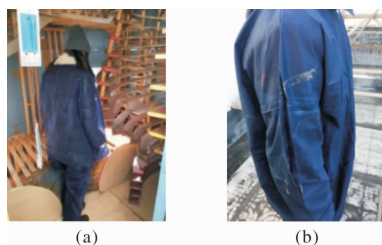


图2 建筑内部测试场景

Fig. 2 Impacting and contacting powder test in the architecture prototype

撞次数的 85.38%, 而身体正面碰撞次数占总碰撞次数的 14.62%, 如图 4.

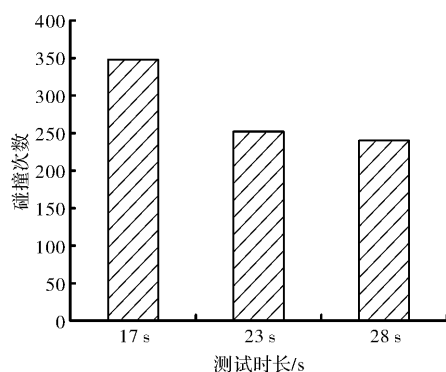


图3 3个时间区域内的碰撞次数

Fig. 3 The number of impact times on the body in different three time periods

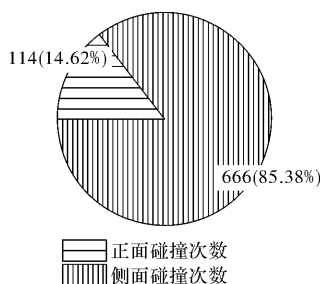


图4 人体正面和侧面的碰撞次数及比例关系

Fig. 4 The number of impact times on the front of the body and the sides of the body in all time periods and the proportion of each

关于身体的侧面碰撞, 人体的上半部分和下半部分的侧面碰撞次数鲜明地分成了 2 个有规律的区域. 身体上半部分的侧面碰撞次数明显地高于身体下半部分的侧面碰撞次数, 并且这两部分的碰撞次数明显随着身体部位高度的降低而急剧增加, 其中下臂侧和小腿侧被碰撞的次数最多, 如图 5. 身体上半部分的侧面碰撞次数明显地高于身体下半部分这一现象, 据观察有部分原因可能是由于人体行走时肩腰等身体部位首先发生偏移, 因此身体上半部分容易首先发生侧面碰撞, 造成身体停顿, 在一定程度上削弱了身体下半部分发生碰撞的几率.

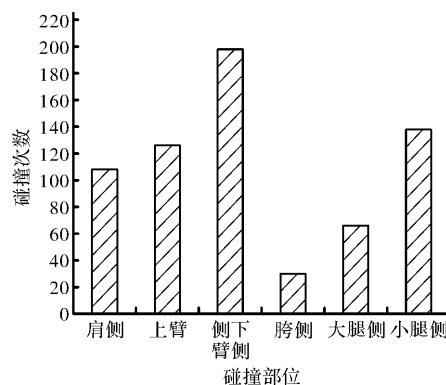


图5 人体侧面碰撞次数与碰撞的身体部位

Fig. 5 The number of impact times on the sides of the body and the impact body parts

关于身体的正面碰撞, 基本随着身体部位高度的降低, 碰撞次数呈明显增长态势, 如图 6. 而就具体数据来说, 66 名测试者胸部和腹部总的碰撞次数都仅有 6 次, 而大腿为 30 次、膝部为 22 次、小腿为 26 次、脚部为 24 次, 碰撞次数相对持平. 这一现象, 据观察有部分原因可能是由于人体行走时一般都先抬大腿, 在一定程度上削弱了小腿和脚部的碰撞.

综上所述, 在 6.00 m^2 较小室内空间中, 步行行为的碰撞, 在悠闲、较为紧凑和十分匆忙的活动时长内都是一种常态, 而这些测试结果虽然有一部分可以由人体行走的方式来解释, 但仍有一些主要问题需要借助视觉感知理论进一步分析与研究. 此外, 在 6.00 m^2 以上的空间, 包括 8 m^2 、 10 m^2 、 12 m^2 等单一功能居室空间中, 也进行了居住体验研究, 对碰撞的次数和部位进行了统计, 发现碰撞几率显著减少, 但碰撞部位仍然集中在 6.00 m^2 较小室内空间中人体行走碰撞触粉试验所检测到的碰撞部位. 碰撞原因也相似, 碰撞多发生于门框和家具等区域.

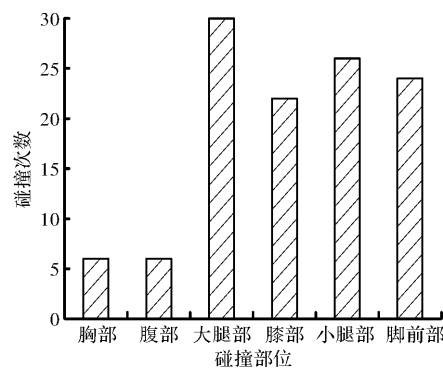


图6 人体正面碰撞次数与碰撞的身体部位

Fig. 6 The number of impact times on the front of the body and the impact body parts

2 建筑室内空间中视觉感知局限性对人体步行行为的主要影响

结合测试结果和人眼视野理论,分析在较小室内空间中,人体视觉感知局限性对人体步行行为的影响。

2.1 人体正面和侧面碰撞与视觉感知局限性的关系

理论上,由于在较小的室内空间中,人体行为所需的反应时间受到限制,在活动时可能经常来不及低头,因此人体的正面碰撞受垂直视野影响较大。同理,人体在活动时可能也经常来不及转头,因此,人体的侧面碰撞则要同时受到水平和垂直视野的双重影响。

正常人体的视野极限在垂直方向约为 130° (视水平线上方 60° , 视水平线下方 70°); 在水平方向约为 120° (两眼内侧视野重合约 60° , 外侧各 30°)^[13], 如图 7。对于人体正向视觉感知, 如按照亚洲人一般水平视线高度为 1.5 m 来计算, 人体无需低头就可以看到小腿及脚部前方 0.546 m 范围外的障碍物, 如图 7(a)。而人体的最佳视距一般根据物体的大小与形状, 在 0.38~0.76 m 中选择。因此, 在较小的室内空间中, 人眼也往往能够得到较好的正向视距, 这也就能够在一定程度上解释正面碰撞几率较少这一现象了。

对于人体侧向视觉感知, 在极限水平视野条件下, 人眼两侧 30° 区域基本都属于盲区, 如图 7(b)。这也就是说, 人体在不转头的情况下, 人眼是看不到肩部和臂部等身体侧面情况的。另外人体侧向的视觉感知还要受到垂直视野的影响, 这就能够在一定程度上解释身体侧面碰撞几率远大于正面碰撞几率这一现象了。

2.2 人体正面碰撞与侧面碰撞机理

在人体的极限视野边缘部分, 人眼对物体的形状与色彩感知有明显的削弱。人体有效视野在垂直方向约为 40° (视水平线上方 10° ~视水平线下方 30°); 在水平方向约为 30° (左右两眼与视中心线各 15°), 如图 8。

人体的正面碰撞与人体正向视觉感知局限有着直接关系。纵向视野对人体正向视觉感知的影响有着明显的高度局限, 即高度越低且离身体越近的物体, 人眼越难观察到。对于极限垂直视野, 在不转头的情况下, 按照亚洲人 1.5 m 水平视线高度, 小腿及脚部前方 0.546 m 范围内的物体基本很难被看到, 而有效垂直视野的 2.598 m 间距要

求, 在较小的室内空间中实现的难度较大。这也就能够在较大程度上解释身体正面碰撞的原因和碰撞次数基本会随着身体碰撞部位高度的降低呈明显增长态势这一现象了。

人体的侧面碰撞与人体侧向视觉感知局限有着直接关系。水平视野对侧向视觉感知有着决定性的影响, 在不转头的情况下, 人眼是看不到身侧的, 而在有效水平视野条件下, 仅有身体前方 40° 区域内的物体能被人眼较好地感知到, 如图 7(b), 8(b)。另外, 垂直视野对侧向视觉感知也带来了明显的高度局限, 这也就能够较好地解释身体侧面碰撞的原因和身体上下两部分的侧面碰撞次数明显随着身体碰撞部位高度的降低而急剧增加这一现象了。

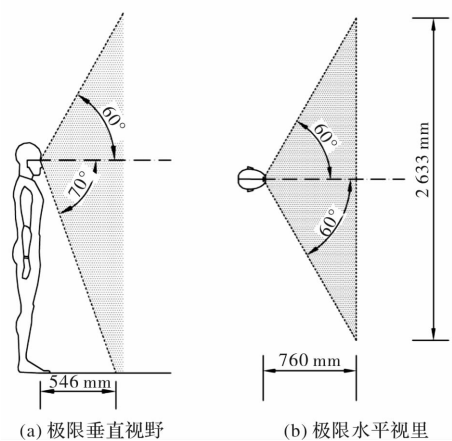


图7 人体极限视野

Fig. 7 Extreme visual range of the body

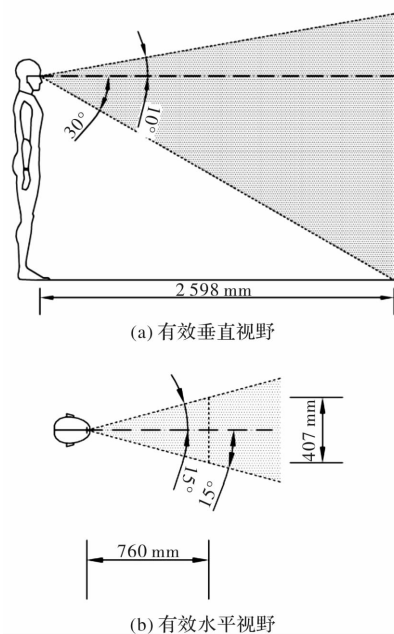


图8 人体有效视野

Fig. 8 Effective visual range of the body

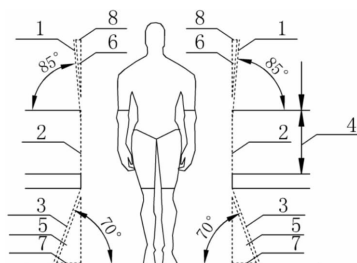
3 基于人体视觉感知和步行行为特性的建筑室内空间设计要点

3.1 针对人体侧面碰撞问题的建筑室内空间设计要点

从测试结果可以看出,人体侧面碰撞的次数几乎是人体正面碰撞次数的6倍。因此,侧面碰撞应是建筑室内空间设计最应关注的问题。针对人体侧面碰撞问题的室内空间设计要点分为3点,且这3点可以独立或同时应用:

(1) 行走区域外缘下臂高度区间的柔性设计

从测试结果来看,人体的下臂侧是碰撞次数最多的部位,其次是小腿侧、上臂侧和肩侧。下臂侧对于家具设备、建筑隔墙及围护结构的碰撞很难避免,尤其是下臂处的高度区间恰好是工作台面集中的区域,例如餐桌、书桌和烹饪台等。因此,可以依据人体平均或居住者的个人身高体征,在设计中将人体行走范围外侧下臂处高度区域内的物体侧面或侧沿进行软包等柔性化处理,减轻碰撞的冲击及伤害,如图9。



1. 上臂及以上高度区间的空间消减界面;
2. 下臂高度区间的柔性设计界面;
3. 小腿高度区间的空间消减界面;
4. 高度区间 H ; 5. 消减空间面积 S_1 ;
6. 消减空间面积 S_2 ; 7. 三角形底边 L_1 ;
8. 三角形底边 L_2

图9 人体通行空间横向断面形态

Fig. 9 Shape of the circulation space cross-section of the body
高度区间公式为

$$H = h_1 - h_2 + 0.05 \quad (1)$$

其中: H 为需要柔性设计的高度区间, h_1 为人体臂肘到地面高度, h_2 为人体指尖到地面高度,0.05 m为人体行走存在的最大垂直移动距离^[14]。在设置时,以 h_2 为起点高度,向上进行软包等柔性化处理。

(2) 行走区域外缘小腿高度区间的空间消减

小腿侧的碰撞问题,联系建筑及家居布置并依据人体平均或居住者的个人身高体征,在设计中将人体行走范围外侧小腿高度区域的空间完全留出或留出一定宽度。设计可结合正面碰撞问题一道解决,留出接近人体步宽的较大宽度,或留出

的宽度由高往低依次递增,来顺应极限垂直视野的下侧视野界限的角度 70° 或小于 70° 的角度,以此可在人体极为贴近物体的情况下,降低小腿侧与物体产生碰撞的几率,如图9。

一侧消减空间面积公式为

$$S_1 = \frac{1}{2} (h_3 + 0.05)^2 \times \cot \theta_1 \quad (2)$$

式中: S_1 为一侧消减空间面积, h_3 为人体膝部到地面高度, $\theta_1 \leq 70^\circ$ 。当三角形底边 $L_1 = \frac{1}{2} (h_3 + 0.05m)^2 \times \cot \theta_1$ 超过人体步宽或室内空间允许宽度时,可应用如下公式:

$$S_1 = \frac{1}{2} (h_3 + 0.05)^2 \times \cot \theta_1 - \frac{1}{2} \{ (h_3 + 0.05) \cot \theta_1 - d_1 \}^2 \times \tan \theta_1 \quad (3)$$

式中: d_1 为人体步宽或室内空间允许宽度。当 $\theta_1 = 0^\circ$,属于空间完全留出状态。在设置时,以 h_3 为起点高度,向下消减空间。

(3) 行走区域外缘上臂及以上高度区间的空间消减

上臂侧和肩侧的碰撞问题,联系建筑及家居布置并依据人体平均或居住者的个人身高体征,将人体行走范围外侧的臂肘高度及以上的空间完全留出或留出一定宽度,以此降低肩侧和上臂侧产生碰撞的几率。该宽度由垂直线从胯部高度向外侧旋转 5° 或大于 5° 得出,符合行走时人体骨盆的运动幅度。该方法可在人体极为贴近物体的情况下,降低上臂侧和肩侧与物体产生碰撞的几率,如图9^[15]。

一侧消减空间面积公式为

$$S_2 = \frac{1}{2} (h_5 - h_4 + 0.05)^2 \times \cot \theta_2 \quad (4)$$

式中: S_2 为一侧消减空间面积, h_4 为人体肘部到地面高度, h_5 为人体肩部到地面高度, $\theta_2 \leq 85^\circ$ 。当三角形底边 $L_2 = (h_5 - h_4 + 0.05) \times \cot \theta_1$ 超过室内空间允许宽度时,可应用如下公式:

$$S_2 = \frac{1}{2} (h_5 - h_4 + 0.05)^2 \times \cot \theta_1 - \frac{1}{2} \{ (h_5 - h_4 + 0.05) \cot \theta_1 - d_1 \}^2 \times \tan \theta_1 \quad (5)$$

当 $\theta_1 = 0^\circ$,属于空间完全留出状态。在设置时,以 h_4 为起点高度,向上消减空间。

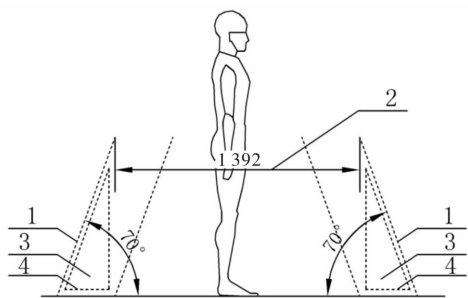
3.2 针对人体正面碰撞问题的建筑室内空间设计要点

从测试中可以看出,正面碰撞的次数较少,但也应进行相应的空间处理,提高人体空间活动的舒适性。依据图6所表明的大腿及大腿向下的部位是人体正面碰撞频率最高的区域,而人体行走

时是由大腿带动膝部、小腿和脚部的,因此能够避免大腿区域的碰撞相当重要.针对人体正面碰撞问题的建筑室内空间设计要点分为2点,且这2点可以独立或同时应用:

(1)行走区域外侧腿部高度区间的空间消减

对于人体正面碰撞的问题,可以在设计中将人体行走区域外侧大腿及以下高度区间的空间完全留出或留出一定宽度.留出宽度可直接留出接近人体步宽的较大宽度,或留出的宽度由高往低依次递增,来顺应极限垂直视野的下侧视野界限的角度 70° 或小于 70° 的角度,以此可在人体极为贴近物体的情况下,降低腿部与物体产生的正面碰撞的几率,如图10.



1. 腿部高度区间的空间消减界面; 2. 人体行走区域宽度 D ;
3. 消减空间面积 S_3 ; 4. 三角形底边 L_3

图10 人体通行空间纵向断面形态

Fig. 10 Shape of the circulation space cross-section of the body

这种方法在理论上较好,一是因为这种空间设计方法从根本上排除了身体下部视野盲区;二是可以同时解决小腿侧和大腿侧的碰撞问题;三是因为可能会有有 70° 或小于 70° 以下的斜度,腿部碰撞也不会过于剧烈.

一侧消减空间面积公式为

$$S_3 = \frac{1}{2}(h_6 + 0.05)^2 \times \cot \theta_1 \quad (6)$$

式中: S_3 为一侧消减空间面积, h_6 为人体胯部到地面高度, $\theta_1 \leq 70^\circ$.当三角形底边 $L_3 = (h_6 + 0.05) \times \cot \theta_1$ 超过人体步宽或室内空间允许宽度时,可应用如下公式:

$$S_1 = \frac{1}{2}(h_6 + 0.05)^2 \times \cot \theta_1 - \frac{1}{2}[(h_6 + 0.05) \cot \theta_1 - d_1]^2 \times \tan \theta_1 \quad (7)$$

式中: d_1 为人体步宽或室内空间允许宽度.当 $\theta_1 = 0^\circ$,属于空间完全留出状态.在设置时,以 h_6 为起点高度,向下消减空间.

(2)行走区域宽度设置

在空间允许的条件下,人体行走区域的最小

宽度或长度最好为极限垂直视野底部盲区距离的两倍加人体足长(如按照亚洲人一般水平视线高度为1.5 m,足长0.3 m来计算,则为 $2 \times 0.546 + 0.3 = 1.392$ m),如图7(a)和图10.这样可使人体站在行走区域的中部能够看到底部家具设备的边沿,减少正面碰撞的几率.但是,这种方法跟人体的站位有较大关系,不能完全排除视野盲区,例如人体没有站在行走区域的中间位置,就会造成一侧的极限垂直视域受限.

人体行走区域最小宽度或长度公式为

$$D = 2 \times h_7 + d_2 \quad (8)$$

式中: D 为人体行走区域最小宽度或长度, h_7 为极限垂直视野底部盲区距离, d_2 为人体足长.

4 结论

空间对人的影响包含行为和情感等多方面问题^[16-17],建筑则应适时地针对人体空间感知、体验的个性化和即时性进行调整^[18],而这也正是建筑室内空间设计所面临的一项挑战和机遇.观察、碰撞、行走是本文研究的3个紧密关联的内容,包含了视觉、触觉和动觉^[19]三种人体感知及人体运动学等方面的内容.

(1)理论的整合应用

针对人体正面和侧面碰撞问题的设计要点可以彼此整合应用,且设定高度区间时应考虑人体行走存在的最大5 cm的垂直移动.

(2)理论的个性应用

根据住户个人的身高体征来进行个性化的室内空间设计,则是最为理想的.因此,公式(1)~(8)中的 $h_1 \sim h_7$ 和 $d_1 \sim d_2$ 可以为人体平均尺寸,也可以是住户个人尺寸,同时应适当考虑个人着装影响.

(3)理论的综合应用

可以依据设计要点,适当拓宽应用范围,除应用于室内空间形体设计外,也可用于家具在室内空间的布置,及家具形体设计等.

综上所述,本研究能够更好地改善室内空间形体,特别是提高一些小型公寓类空间设计的恰适性(SDA).

参考文献 References

- [1] RAHMAN S, SAHAKIAN B J, CARDINAL R N, et al. Decision making and neuropsychiatry. [J] Trends

- Cogn, 2001, 5, 271-277.
- [2] MC LAREN, L, Ecological perspectives in health research. [J] Epidemiol. Community Heal. 2005, 59:6-14.
- [3] LEE Sangwon, HUSSAIN H Alzoubi, KIM Sooyoung. The effect of interior design elements and lighting layouts on prospective occupants' perceptions of amenity and efficiency in living rooms. [J] Sustainability, 2017, 1119(9):1-30.
- [4] 柴彦威, 空间行为与行为空间[M]. 南京: 东南大学出版社, 2014:43.
- CHAI Yanwei, Spatial behavior and behavioral space [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2014: 43.
- [5] 席佳, 极小型居住空间设计探讨[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- XI Jia, The research of the design of minimal living space [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [6] 张璐, 潘永刚, 适应我国城镇集约化小户型住宅的设计探索[J]. 建筑学报, 2012(7):157-160.
- ZHANG Lu, PAN Yonggang, An exploration of small apartments design adapting to chinese urban intensification[J]. Architectural Journal, 2012(7):157-160.
- [7] ALJOA D, TINA G, MATEVZ P. XXS house[J]. Environment Design, 2010(1):352-355.
- [8] SUH K, Mobile architecture[M]. Seoul: Damdi Publishing Co, 2011: 142-149.
- [9] MERLEAU P. Phenomenology of perception[M]. Donald A. Landes, London/NY: Routledge Press, 2012: 209.
- [10] MERLEAU P. Phenomenology of perception [M]. Donald A. Landes, London/NY: Routledge Press, 2012:209.
- [11] 卢兆麟, 李升波, 徐少兵, 等. 基于眼动跟踪特征的汽车造型评价方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2015, 55(7):775-781.
- LU Zhaolin, LI Shengbo, XU Shaobing, et al. Automobile style evaluation based on eye tracking[J]. J Tsinghua Univ(Science and Technology), 2015, 55(7): 775-781.
- [12] ZIMMERMAN A, Martin M. Post-occupancy evaluation: benefits and barriers. [J]. Build. Res. Inf. 2001, 29:168-174.
- [13] 李国美, 人机工程学与汽车主动安全系统设计[J]. 汽车技术, 2004, 55(1):8-11.
- LI Guomei, Man-machine system engineering and design of active automotive safety system[J]. Automobile Technology, 2004, 55(1):8-11.
- [14] 赵凌燕, 人体步态模型实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- ZHAO Lingyan, The experiment study on human gait model[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008.
- [15] ELENA M G, ASA B, YVONNE H A, et al, Characteristic gait kinematics in persons with lumbosacral myelomeningocele[J]. Gait and Posture, 2003(18): 170-177.
- [16] MARK H, A place for sharing: The emotional geographies of peer-sharing in UK university halls of residences, emotion[J]. Space and Society, 2017, 22: 4-12.
- [17] HOLL S, PALLASMAA J, PÉREZ GÓMEZ A. Questions of perception: phenomenology of architecture[M]. San Francisco: William Stout, 2006:34.
- [18] SEAN A, LEAH K, COSTANZA C. Multisensory architecture: the dynamic interplay of environment, movement and social function[J]. Architectural Design, 2017, 87(2):90-99.
- [19] ÇELİK Z, KINAESTHESIA. Sensorium: embodied experience, technology, and contemporary art[M]. Cambridge MA: MIT Press, 2006: 159-162.

(编辑 吴海西 沈 波)