

SCIENTIA SINICA Informationis

中国科学 信息科学

第44卷 第11期 2014年11月 1361-1494 ISSN 1674-7267 CN 11-5846/TP

图形算法研究

特约编辑：周昆 彭群生

中国科学院 主办
国家自然科学基金委员会

《中国科学》《科学通报》

荣誉总主编：周光召

总 主 编：朱作言

《中国科学：信息科学》编辑委员会

主 编：李未 北京航空航天大学

顾 问：

王阳元
北京大学
李衍达
清华大学
赵伟
澳门大学

孙家广
清华大学
沈昌祥
海军计算技术研究所
柴天佑
东北大学

许宁生
中山大学
林惠民
中国科学院软件研究所
郭光灿
中国科学技术大学

怀进鹏
北京航空航天大学
金亚秋
复旦大学
黄维
南京工业大学

副 主 编：

赵沁平(常务)
北京航空航天大学

尤肖虎
东南大学

张纪峰
中国科学院数学与系统科学研究院

秦玉文
国家自然科学基金委员会

黄如
北京大学

编 委：

马平西
中国电子信息产业集团国民技术公司
王东明
东南大学
王戟
国防科学技术大学
龙腾
北京理工大学
孙富春
清华大学
许可
北京航空航天大学
吴一戎
中国科学院电子学研究所
应明生
清华大学, University of Technology Sydney
张霖
北京航空航天大学
杜利民
北京沃克斯技术院
周志华
南京大学
金海
华中科技大学
胡事民
清华大学
徐宝文
南京大学
高文
北京大学
彭群生
浙江大学
葛树志
National University of Singapore
廖桂生
西安电子科技大学

马建峰
西安电子科技大学
王龙
北京大学
王耀南
湖南大学
刘德荣
中国科学院自动化研究所
庄越挺
浙江大学
许军
清华大学
吴伟仁
探月与航天工程中心
张钦宇
哈尔滨工业大学
李乐伟
电子科技大学
陈建二
Texas A&M University
孟洛明
北京邮电大学
胡占义
中国科学院自动化研究所
唐志敏
中国科学院计算技术研究所
殷勤业
西安交通大学
隆克平
北京科技大学
敬忠良
上海交通大学
谢维信
深圳大学

蔡维德
Arizona State University
王子宇
北京大学
王江舟
University of Kent
田捷
中国科学院自动化研究所
吕建
南京大学
纪越峰
北京邮电大学
齐越
北京航空航天大学
宋士吉
清华大学
张焕国
武汉大学
李学龙
中国科学院西安光学精密机械研究所
周电
The University of Texas at Dallas
林宗利
University of Virginia
胡伟武
中国科学院计算技术研究所
徐宗本
西安交通大学
郭雷
中国科学院数学与系统科学研究院
彭练矛
北京大学
韩文报
解放军信息工程大学

责任编辑：宋扉 冯景 蒋恺



第 44 卷 第 11 期 2014 年 11 月

目 次

图形算法研究专题

递推式视频前景分割方法	1361
陈亚当, 郝川艳, 吴雯, 吴恩华	
L_0 梯度极小化耦合梯度保真的保结构图像平滑	1370
丁志鹏, 张少雄, 陈佳舟, 彭群生, 王章野	
GPU 加速的表意式体模型线绘制算法	1385
张龙, 王毅刚, 吴向阳	
虚拟场景漫游中用户关注度的内隐测量方法	1398
韩红雷, 徐婵婵, 费广正, 崔响, 王文成	
快速 Hermite 径向基函数曲面重构	1409
刘圣军, 刘新儒	
面向装配的复杂模型几何及结构轻量化技术研究	1422
柳伟, 牛强, 张小兵, 周雄辉	
基于云平台的医学影像可视交互平台	1432
吴福理, 张彤, 梁荣华	

论文

程序数值误差的扰动检测与优化	1445
汤恩义, BARR Earl, 苏振东, 李宣东	
凝聚度——描述与测度社会生态系统抗干扰能力的一种新特性	1467
胡小兵, 史培军, 汪明, 叶涛, LEESON Mark S	
基于多节点分组协作干扰的无线物理层安全传输	1482
邓浩, 王慧明, 王文杰	

虚拟场景漫游中用户关注度的内隐测量方法

韩红雷^{①②③*}, 徐婵婵^③, 费广正^③, 崔响^③, 王文成^①

① 中国科学院软件研究所计算机科学国家重点实验室, 北京 100190

② 中国科学院大学, 北京 100049

③ 中国传媒大学动画与数字艺术学院, 北京 100024

* 通信作者. E-mail: hanhonglei@sina.com

收稿日期: 2014-07-09; 接受日期: 2014-09-24

国家科技支撑计划课题 (批准号: 2012BAH62F00)、国家自然科学基金 (批准号: 61070110, 61379087)、中国传媒大学工科规划项目 (批准号: 3132014XNG1418) 和中国科学院知识创新工程领域前沿项目资助

摘要 目前测量用户关注度的主要方法是使用眼动仪, 但其可靠性差、复杂度高且价格昂贵, 难以有效应用于 3D 漫游场景的处理. 本文提出一种易于嵌入到虚拟场景中的用户关注度软件测量方法, 将用户操作虚拟摄像机漫游场景看作关注度内隐表达过程, 通过物体相对摄像机中心的距离、遮挡情况和投影面积, 并结合观察时间, 就可以进行有效测量. 通过用户学习分析, 表明我们的方法具有很好的测量准确性、可靠性, 并方便使用. 将其应用于游戏场景物体关注度的评估中, 获得了很好的效果.

关键词 视觉关注度 虚拟漫游 三维场景设计 摄像机控制 显著度

1 引言

在三维场景的交互式应用中 (包括虚拟现实和电子游戏等), 准确获知用户对不同物体的关注度信息十分重要, 可用于场景的加速绘制及辅助设计等诸多方面, 是目前计算机图形学研究的热点之一. 获取关注度最直接的方法是使用眼动仪记录用户眼球运动的数据, 由此分析眼动信息和屏幕元素的对应关系, 获知用户对不同物体的关注度. 然而, 心理学研究表明, 人脑认知会受用户所处环境、执行的观察任务等因素的影响, 导致眼球的关注区域和实际上对人脑产生刺激的区域不一定完全对应. 另外, 使用眼动仪会降低用户的沉浸感, 影响测量数据的真实性和有效性, 并且眼动仪的配置比较繁琐, 特别是在基于物体的关注度测量中, 需花费大量的工作将记录的眼动数据映射到物体上. 因此, 很多研究者开始基于视觉心理学来计算物体关注度. 他们将场景内容的颜色、位置、运动以及虚拟摄像机的移动等客观底层属性看成外界对人眼的刺激, 再结合场景任务等高层属性进行处理. 然而, 这些方法仅是利用客观数据预测而非测量人眼的主观关注信息, 其结果仍需要通过眼动仪等设备进行验证, 普适性不高, 难以产生令人满意的结果.

通过观察, 我们发现用户在 3D 虚拟场景漫游过程中, 会将自身投射到虚拟世界中, 通过操作虚拟世界中的化身主动对场景进行探索, 其过程就是用户自己对场景认知的自然表达过程. 由于漫游行为可通过虚拟摄像机的记录来获取, 我们可据此进行观察行为的度量, 由此测量物体的关注度. 相比于

使用眼动仪, 这种内隐的观察行为记录方式更能反映用户在漫游过程中的真实意图, 因而能得到更准确的物体关注度. 另一方面, 本文采用测量而非预测的方式获取用户主观关注度, 所得到的关注度信息可以真实反映不同个体的关注行为, 避免了客观预测方法中预测结果难以符合不同个体关注习惯的问题. 通过大量的用户学习分析, 验证了该方法的有效性和易用性. 我们将其应用于实际的游戏设计案例中, 取得了很好的效果. 据我们所知, 以往还没有不依赖于硬件的用户关注度测量方法.

2 相关工作

近十几年来, 由于互联网广告、电子游戏、虚拟现实等应用的发展, 针对人眼关注度的研究获得了极高的重视. 获取到的人眼关注度信息可以帮助设计人员优化画面配置, 将重要信息放置于用户关注度高的区域^[1], 或者在 3D 环境中将用户不关注的物体进行简化, 以提高场景渲染速度^[2].

眼动仪^[3]可以较准确地记录人的眼动轨迹, 这为人眼关注度计算带来极大帮助. 但是大多数眼动设备都需要穿戴到用户身上^[4], 造成用户沉浸感变差, 影响获取数据的准确性. 此外, 眼动设备只能捕捉眼球在时域空间中的注视位置, 而将这些位置信息映射回动态场景中仍然需要大量的处理工作^[5]. 特别是, 已有研究表明, 当观察者集中注意于某个物体或事件时, 经常不能觉察到其他出现于视野内的意外物体或事件, 这种现象被称为不注意视盲 (inattentional blindness)^[6~8]. 因此, 即便利用眼动仪设备获知用户看到了某些物体, 也无法保证这些物体受到了用户的关注^[9]. 综上, 眼动仪这种主观测量方式很难直接获取用户在虚拟漫游场景中对不同物体的准确关注度.

很多研究者试图通过分析画面内容所具备的分布特点, 结合人眼关注规律, 推测人们对不同区域的关注度情况. 这种在没有眼动仪参与条件下获取人眼关注度的技术称为关注度预测, 是一种客观预测方法. 在此, 眼动仪只用于在用户学习阶段训练预测函数, 或者最后评估预测算法的性能^[5,10,11]. 文献^[12]认为, 关注度预测技术可以大致分为自底向上^[10,13~17]和自顶向下^[2,5,11,18~21]两种. 前者认为人们在无意识情况下对一些底层特征表现得敏感; 而后者指有导向的自我关注控制, 涉及到了高层次的过程如思考、推理和记忆. 然而, 无论采用自底向上的方法, 还是自顶向下的方法, 计算得到的显著度都是在一定置信区间内对用户实际关注度的预测. 其预测的效果及应用场合受限于所使用的计算策略, 需要使用眼动仪记录大量用户数据进一步检验. 很多数据驱动的方法还依赖于前期的用户学习结果^[5], 从而导致预测结果对学习样本的规模和多样性敏感.

虚拟漫游场景和其他视觉关注的研究对象 (比如图像、视频等) 最大的不同是: 在虚拟漫游场景中, 用户可以通过控制化身来主动寻找自己感兴趣的物体, 并通过虚拟摄像机渲染画面对物体进行观察^[22,23]. 因此, 用户自由控制摄影机在虚拟场景中的位置、朝向和视野等参数的行为, 就隐含了用户对场景中物体的观测意图. 以此为依据, 本文可以在没有硬件辅助的条件下, 通过记录不同物体在虚拟摄像机中的观测参数, 方便地获取用户对不同物体的内隐关注度信息.

3 基本思路

内隐是一个心理学术语, 常用于注意捕获研究中, 内隐的注意捕获指的是非期望刺激已经影响了个体的行为, 但是却并没有进入意识^[7]. 与之相对的是外显的注意捕获, 指的是一个非期望刺激引起了人的注意, 并进入了人的意识当中. 内隐的注意捕获通过研究被测试者的客观反应来获知当前的刺激如何影响用户的关注行为, 无论这个刺激是否被测试者所意识到. 而外显的注意捕获需要通过被测

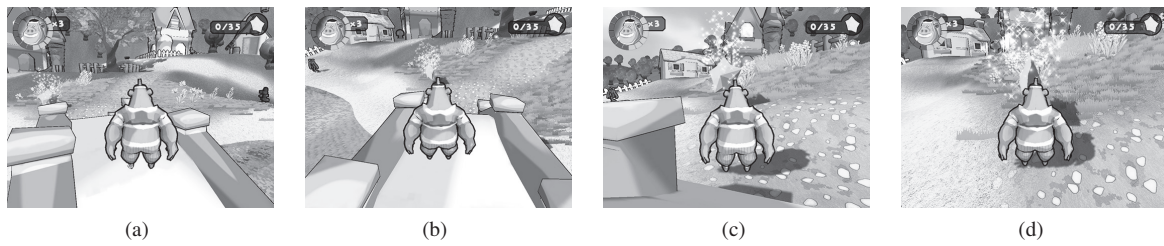


图 1 游戏中用户操作化身进行探索过程

Figure 1 The exploring process of the user by controlling the avatar. (a) Detect the star; (b) control avatar approaching it; (c) keep moving; (d) stop and observe it

试者报告其主观意识的变化来实现注意捕获, 这会造成某些内隐刺激的缺失. 因此, 利用内隐的测量方式, 能更有效地获取被测试者的真实意图. 文献 [7,24] 通过对比研究, 证实了相关结论.

在虚拟场景漫游过程中, 用户的主观意识直接受到屏幕渲染图像的刺激, 人脑会在任务等因素影响下对受到的刺激进行深层次加工, 并做出相应反馈行为, 控制化身向着自己感兴趣的区域移动, 最终形成完整的交互循环, 推动用户以自己所期望的方式进行虚拟场景的漫游 (如图 1 所示). 用户对化身的控制行为是其对外在刺激的反馈结果, 所以通过记录用户控制化身的行为就可以测量出用户漫游的真实意图, 从而得到用户对不同场景物体的关注度.

虚拟漫游中, 用户控制化身进行的观测最终要通过虚拟摄像机来完成. 因此, 用户关注度内隐测量的关键是如何定量表示摄像机对物体的关注程度. 为此, 我们根据已有的研究工作选择度量下面的 3 个参数来测量人对物体的关注度: 离屏幕中心的距离 (C)、遮挡率 (O) 和投影面积 (R).

(1) 离屏幕中心的距离 (C). 这个参数主要是用来确定该物体是否为当前的观测主体. 图像认知领域中的很多研究已经证实: 人眼趋向于首先关注图像的中心区域 [25]. 在互动场景中, 人们会控制摄像机将关注的物体调整到屏幕中心 [26]. 如图 2(a), 火车处于屏幕中心, 所以当前摄像机的观察主体是火车, 而非远离屏幕中心的汽车和树木. 这一结论也用在交互场景的关注度预测方面 [5,27]. 我们使用以下的公式计算这一参数:

$$C = \begin{cases} 1 - |x|/S_x, & x/S_x > y/S_y, \\ 1 - |y|/S_y, & x/S_x \leq y/S_y. \end{cases} \quad (1)$$

其中 x 和 y 表示以屏幕中心点为原点的物体投影中心坐标, S_x 和 S_y 分别表示屏幕中心到屏幕右边界和上边界的像素数. 这种计算方式将每个物体作为一个整体来看待, 以物体投影中心到屏幕中心远近来测量物体当前的关注度. 然而, 只使用这个参数会忽略物体投影的大小和形状对关注度计算的影响. 这个问题可以通过后面介绍的遮挡率和投影面积参数来处理.

(2) 遮挡率 (O). 这个参数主要考察当前物体是否被前面物体所遮挡, 以及被遮挡的程度. 在自由控制视角的交互场景中, 用户通常会绕过遮挡物对感兴趣的物体进行观测. 因此若屏幕中一个物体被严重遮挡, 则它不是用户主要的观测对象. 这也符合视觉认知领域方面的显著度理论, 即前景物体比其遮挡的背景物体受到更多关注 [28]. 如图 2(b), 房屋和汽车虽然都处于接近屏幕中心的观察位置, 然而, 汽车是前景, 而房屋多处被遮挡, 说明用户的观察主体是汽车. 这个参数可以使用下面的公式来定义: $O = R_s/R_o$, 其中 R_s 表示模型实际投影面积, R_o 表示模型不遮挡情况下的投影面积.

(3) 投影面积 (R). 文献 [2] 指出: 用户习惯于近距离观察他所感兴趣的物体. 由于直接使用观察距离会导致小物体的关注度测量值过高, 因此我们将物体的投影面积参数用于评估物体与观察者的距离. 如图 2(c) 所示, 两辆大小近似的车辆, 离屏幕中心距离相同, 并且都没有被遮挡, 但由于左下角车

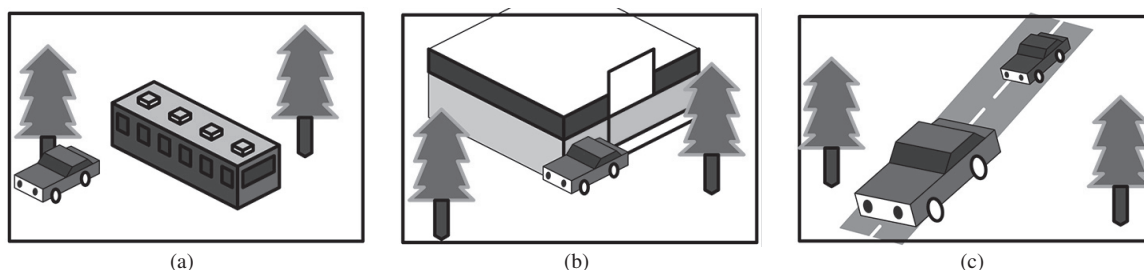


图 2 物体被关注参数示意图

Figure 2 Illustration of the attention parameters for the objects. (a) Distance to screen center; (b) occlusion percentage; (c) projected area

辆更接近观察者, 导致投影面积较大, 故而相对于右上角车辆来说, 这辆车受到的关注度更高. 该参数计算公式为: $R = R_o/S_r$, 其中 S_r 表示屏幕面积.

我们对以上 3 个参数都进行了归一化并统一到屏幕空间中, 以便于后续计算.

用户在虚拟场景中漫游是一个持续的过程. 其结果是, 用户会将重要物体逐步调整到舒适的观察状态, 并增加其观察时间^[1]. 为此我们将上述 3 个参数在时域空间累积, 以找到被观测物体在整个漫游过程而非某个时间点的被关注度, 计算公式如下:

$$G = \int [\lambda_C C(t) + \lambda_O O(t) + \lambda_R R(t)] dt. \quad (2)$$

其中 $C(t)$, $O(t)$ 和 $R(t)$ 分别表示 3 个测量参数对时间 t 的函数, 而 λ_C , λ_O 和 λ_R 分别表示这 3 个测量参数的权重. 由于虚拟漫游场景是以帧为单位进行离散更新, 所以, 我们可以将上面的积分形式利用下面的逐帧叠加公式近似表示:

$$G_C = \sum_{f \in F} C_f \Delta t, G_O = \sum_{f \in F} O_f \Delta t, G_R = \sum_{f \in F} R_f \Delta t, \quad (3)$$

$$G = \lambda_C G_C + \lambda_O G_O + \lambda_R G_R. \quad (4)$$

其中, G_C , G_O 和 G_R 分别记录漫游过程中的关注度参数 C , O 和 R , F 表示物体处于可见状态的所有帧, C_f , O_f 和 R_f 分别表示处于帧 f 时 3 个关注度测量参数的数值, Δt 表示上一帧到当前帧的时间间隔.

4 有效性验证

为了验证上节提出的物体关注度内隐测量公式是否符合真实情况, 我们进行了大量的用户体验调查, 所采取的实验策略是: 在漫游场景中随机放置若干区别度足够大的不同重要度物体, 采集大量用户的浏览数据, 以验证本文提出的物体关注度内隐测量公式 (公式 4) 的计算结果是否和物体的重要度相符.

4.1 建立元型场景

本文使用了 Unity3D 游戏引擎¹⁾进行元型场景搭建, 场景地图为 500×500 米, 其中包含了平原、

1) <http://unity3d.com/>.



图 3 本文使用的 3D 场景

Figure 3 The 3D scene used for the user study

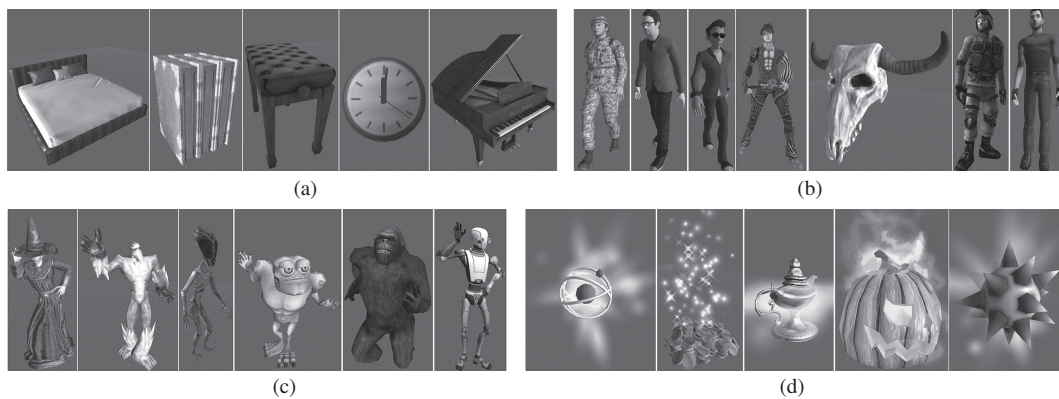


图 4 元型场景中的不同显著度级别物体

Figure 4 Objects with different levels of saliency in the scene. (a) Saliency=0.25; (b) saliency=0.5; (c) saliency=0.75; (d) saliency=1.0

丘陵等地貌, 并且具有河流、树木等自然元素(图 3). 通过添加雾和真实感光照效果, 力图营造一种清晨野外的自然场景效果, 以便让测试者以一种自然的交互习惯进行场景漫游. 用户操作采用第一人称视角, ASWD 键控制角色的 4 个方向移动, 空格键跳跃, 鼠标控制视角旋转. 主角行走速度为 0.6 米/秒, 摄像机视野角度 (FOV) 为 60 度, 远近裁剪面距离分别是 1000 和 0.3, 采用透视投影方式. 限定浏览时间最长是 10 分钟, 大部分用户都能够在这段时间内完全浏览整个场景.

我们引入物体显著度的概念来表示虚拟场景中物体的视觉重要度^[4], 将其从 0 到 1 分为 5 个级别, 显著度为 0 的物体是背景物体, 而显著度为 1 的物体具备最高的显著度. 由于背景物体会对用户关注度的统计分析准确性产生影响^[5], 所以, 我们在实验统计中将背景物体排除, 只考虑其他 4 个显著度级别的物体(如图 4 所示), 通过在物体上挂接脚本的方式来记录上一小节介绍的关注度测量值. 我们邀请了 10 名志愿者在场景中漫游, 并给出问卷, 让他们为每种物体的显著度进行打分. 对统计结果进行分析后, 我们发现大部分志愿者的打分结果和我们的预期十分接近.

为保证用户在交互浏览场景时其观察行为只受到物体显著度影响, 我们采取了以下措施:

- (1) 场景中不出现明显的路径, 弱化路线对于观察行为的影响.
- (2) 将每个物体复制 5 份, 随机分布于场景中的不同区域, 并合并计算结果, 弱化位置对观察行为的影响.
- (3) 合并计算每个显著度级别的所有物体关注度, 进一步保证采集数据的稳定性, 减轻志愿者个体

表 1 志愿者关注度统计信息
Table 1 Volunteers attention statistics

		ID	G_C	G_O	G_R	G
Saliency	0.25	1	47802.5	54320.4	9366.1	111489.0
		2	44042.9	66920.0	4803.2	115766.1
		3	33854.4	44857.4	1610.3	80322.1
		4	50777.2	74535.7	6711.6	132024.5
		5	42378.5	66884.9	7155.3	116418.7
Average			43771.1	61503.7	5929.3	111204.1
Saliency	0.5	6	46896.0	67491.2	5014.7	119401.9
		7	50087.7	78842.9	5279.1	134209.7
		8	43632.6	59140.4	3927.1	106700.1
		9	39884.8	62373.6	7797.2	110055.6
		10	68765.0	94376.6	9320.3	172461.9
		11	41304.8	58126.1	6902.6	106333.6
		12	32325.7	50719.7	4297.9	87343.2
Average			46128.1	67295.8	6077.0	119500.9
Saliency	0.75	13	53990.4	76299.3	9732.6	140022.4
		14	62862.6	94254.6	13940.3	171057.4
		15	44840.3	63065.6	6117.6	114023.5
		16	53339.0	80645.8	8713.3	142698.1
		17	49399.3	72173.6	11721.9	133294.8
		18	41971.4	55255.7	6727.0	103954.0
Average			51067.2	73615.7	9492.1	134175.0
Saliency	1.0	19	76749.9	107515.0	9629.3	193894.2
		20	53904.5	71957.7	12141.5	138003.7
		21	61453.7	85076.1	16827.9	163357.7
		22	56775.0	86214.6	9681.2	152670.8
		23	61583.3	90392.1	8104.0	160079.4
Average			62093.3	88231.1	11276.8	161601.1

对结果的影响.

4.2 用户学习及分析

我们邀请了 70 名志愿者参与此次用户学习, 他们都是游戏设计相关专业的本科生, 年龄在 22 岁左右, 有多年 3D 虚拟场景操作经验. 为了避免他们的浏览行为受到特定任务影响^[5], 他们被提前告知这次的实验目的是为了进行一个 3D 虚拟场景稳定性研究的课题, 要求他们在场景中随意浏览.

14 个志愿者由于没有认真进行实验或者没有完整浏览整个场景, 他们的结果被剔除. 剩余的 56 个有效结果中, 男性 37 名, 女性 19 名. 我们利用公式 4 测量得到的不同物体关注度如表 1 所示. 在

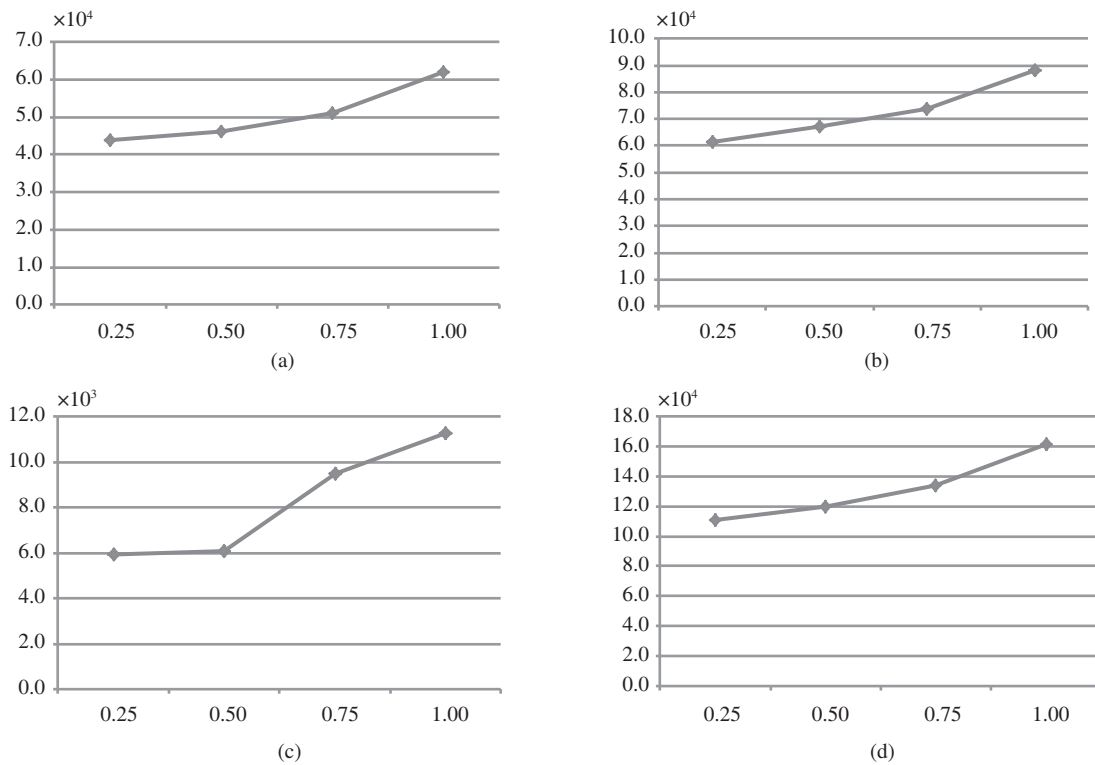


图 5 物体显著度和关注度测量值之间关系

Figure 5 The relationship between object saliency and attention value. (a) G_C ; (b) G_O ; (c) G_R ; (d) G

计算物体关注度 G 时, 权重 λ_C , λ_O 和 λ_R 取相同数值.

我们将表 1 中物体显著度和关注度测量参数关系表示在图 5 中, 横坐标表示不同显著度级别, 纵坐标表示关注度测量值. 从图中可以明显看出, 物体显著度和关注度测量参数之间具有极强的相关性. 这表明, 本文提出的关注度内隐测量方法可以有效地测量用户对物体的真实关注程度.

5 游戏场景辅助设计

在游戏设计过程当中, 需要谨慎地设定物体的外观及各种属性, 以便引导玩家以策划所预期的方式进行游戏. 比如, 将金币等奖励物品设计为闪闪发光属性, 目的是吸引玩家进行拾取. 然而, 游戏场景设计完成以后, 玩家漫游行为是否符合设计人员的预期 (比如某个任务相关的重要物体是否受到了玩家的重点关注) 仍然难以验证. 利用本文提出的关注度内隐测量方法, 就可以较容易地得到玩家在游戏过程中对不同物体的关注度, 从而帮助游戏设计人员评估设计方案效果, 定位设计失败的物体. 本文提出的这种内隐测量方法只需要在场景更新程序的每帧添加公式 4 即可实现, 所以能够方便地嵌入到既有场景中.

我们实验室的游戏创作团队制作了一款名为“Dream Land”的动作冒险类游戏²⁾(如图 6 所示). 在场景中有一些比较重要的场景元素: NPC、敌人、健康之星, 同时也有一些背景元素: 路标、蘑菇、石块、木桶. 游戏设计人员希望玩家在游戏过程中主动和重要场景元素进行交互, 以推动游戏剧情发展,

2) 易恺铭, 徐凯. 游戏视频网址: <http://www.iqiyi.com/dongman/20110407/74b397d4092d6aff.html>.

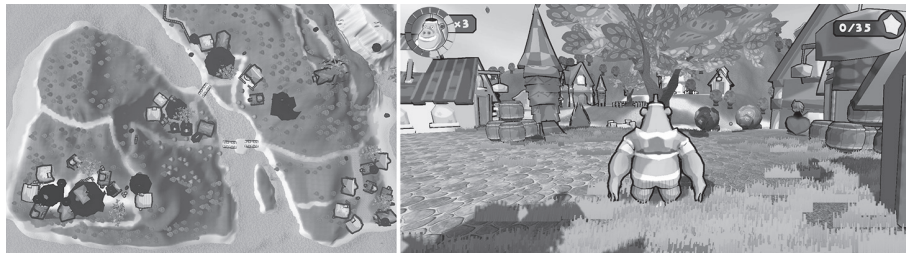


图 6 游戏的概览图

Figure 6 The overview of the game






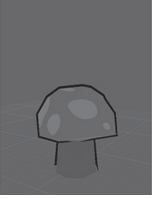
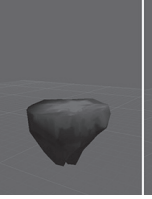



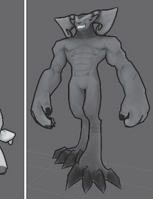


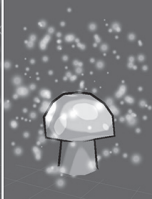
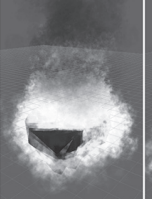
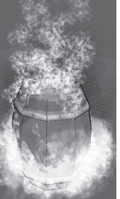
Scheme	Important objects				Background objects			
1								
2								

图 7 Dream Land 游戏两套场景物体设计方案

Figure 7 Two schemes of game objects designing in Dream Land

而背景物体不需要得到玩家太多关注. 在游戏的初始设计方案中 (方案 1), 有经验的游戏设计人员通过为重要物体使用鲜艳的材质、设定动画、添加特效等方式, 吸引玩家对其进行交互. 而他们为背景物体则设置了暗色材质, 颜色接近于其所处环境, 并且没有动画及特效, 使得他们不容易被玩家察觉 (图 7). 我们要求设计人员对设定方案进行修改, 在修改后的方案 2 中, 有意将重要物体的材质亮度降低, 并取消动画和特效, 而对背景物体则增亮材质, 并添加旋转动画和粒子系统特效.

我们共邀请了 6 名志愿者, 每个方案均有 3 个不同志愿者参与测试. 利用本文方法测量志愿者在不同场景方案中对物体的关注度结果如表 2 所示. 从表中可以看出, 方案 1 中, 重要物体的关注度明显高于背景物体. 而方案 2 中重要物体和背景物体的关注度数值差异并不明显. 从平均关注度来看, 重要物体关注度还小于背景物体. 使用本文提出的关注度测量方法, 可以较容易地得出方案 1 更符合游戏设计要求的正确结论.

6 结论及未来工作

本文提出了一种虚拟漫游场景中用户关注度的内隐测量方法, 可以在没有硬件辅助的情况下, 方

表 2 志愿者对不同场景设计方案关注度统计信息

Table 2 Volunteers attention statistics

		Scheme 1				
		ID	G_C	G_O	G_R	G
Saliency	Important	1	610.2	809.1	147.9	1567.2
		2	615.4	836.5	140.8	1592.6
		3	692.0	922.7	118.6	1733.3
		4	600.1	918.3	80.3	1598.8
Average			629.4	871.7	121.9	1623.0
Saliency	Background	5	395.2	647.9	68.5	1111.5
		6	612.5	868.0	75.7	1556.1
		7	435.2	660.8	60.6	1156.6
		8	410.2	577.5	75.7	1063.4
Average			463.3	688.5	70.1	1221.9
		Scheme 2				
		ID	G_C	G_O	G_R	G
Saliency	Important	1	371.7	591.9	76.8	1040.4
		2	264.0	334.3	27.8	626.1
		3	252.8	432.6	37.6	723.0
		4	242.4	372.4	22.6	637.3
Average			282.7	432.8	41.2	756.7
Saliency	Background	5	233.1	308.8	29.9	571.8
		6	460.8	582.8	88.0	1131.6
		7	419.0	509.4	79.1	1007.4
		8	214.6	303.3	49.5	567.4
Average			331.9	426.1	61.6	819.6

便地嵌入到虚拟场景中, 较准确地测量用户漫游过程中对不同物体的关注度. 这得益于在虚拟漫游场景中, 我们可以较容易地获取用户操作虚拟摄像机这种用户认知场景的内隐行为, 以内隐方式测量用户关注度. 从文章最后的应用效果来看, 这种关注度内隐测量方法极易和虚拟现实场景结合, 能够帮助场景设计人员定量分析用户交互中的关注结果, 从而提高场景设计质量. 将来, 我们拟从以下角度入手继续本文工作:

(1) 关注度参数权重优化. 本文在公式 (4) 的计算中, 为 3 个关注度参数设定了相同的权重. 尽管实验效果较好, 但我们仍然无法从理论上证明 3 个参数对关注度测量是否具有相同的影响, 这需要在后续工作中进行更进一步分析.

(2) 应用于更多领域中. 本文将提出的关注度测量方法应用于游戏场景辅助设计当中, 取得了较好的效果. 其实, 物体关注度的量化分析还可以应用于其他更多领域中, 比如利用关注度信息进行场景自适应优化、进行用户认知心理学分析等.

参考文献

- 1 Alt F, Shirazi A S, Schmidt A, et al. Increasing the user's attention on the web: using implicit interaction based on gaze behavior to tailor content. In: Proceedings of the 7th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Making Sense Through Design, Copenhagen, 2012. 544–553
- 2 Lee S, Jounghyun Kim G, Choi S. Real-time tracking of visually attended objects in virtual environments and its application to lod. *IEEE Trans Vis Comput Graph*, 2009, 15: 6–19
- 3 Morgante J D, Zolfaghari R, Johnson S P. A critical test of temporal and spatial accuracy of the Tobii T60XL eye tracker. *Infancy*, 2012, 17: 9–32
- 4 Hillaire S, Breton G, Ouarti N, et al. Using a visual attention model to improve gaze tracking systems in interactive 3D applications. *Comput Graph Forum*, 2010, 29: 1830–1841
- 5 Bernhard M, Stavrakis E, Wimmer M. An empirical pipeline to derive gaze prediction heuristics for 3D action games. *ACM Trans Appl Percept*, 2010, 8: 1–30
- 6 Kim C Y, Blake R. Psychophysical magic: rendering the visible 'invisible'. *Trends Cogn Sci*, 2005, 9: 381–388
- 7 Most S B, Scholl B J, Clifford E R, et al. What you see is what you set: sustained inattentive blindness and the capture of awareness. *Psychol Rev*, 2005, 112: 217–242
- 8 Geng H Y, Cai W J. A review of experimental studies on inattentive blindness. *Acta Sci Nat Univ Pek*, 2007, 43: 282–287 [耿海燕, 蔡文菁. 不注意视盲的实验研究综述. *北京大学学报 (自然科学版)*, 2007, 43: 282–287]
- 9 Koivisto M, Hyönä J, Revonsuo A. The effects of eye movements, spatial attention, and stimulus features on inattentive blindness. *Vision Res*, 2004, 44: 3211–3221
- 10 Peters R, Itti L. Applying computational tools to predict gaze direction in interactive visual environments. *ACM Trans Appl Percept*, 2008, 5: 1–19
- 11 Hillaire S, Lécuyer A, Regia-Corte T, et al. Design and application of real-time visual attention model for the exploration of 3D virtual environments. *IEEE Trans Vis Comput Graph*, 2012, 18: 356–368
- 12 Itti L. Quantifying the contribution of low-level saliency to human eye movements in dynamic scenes. *Vis Cogn*, 2005, 12: 1093–1123
- 13 Koch C, Ullman S. Shifts in Selective Visual Attention: Towards the Underlying Neural Circuitry. *Matters of Intelligence*. Netherlands: Springer, 1987. 115–141
- 14 Itti L, Koch C, Niebur E. A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis. *IEEE Trans Pattern Anal*, 1998, 20: 1254–1259
- 15 Itti L, Koch C. Computational modelling of visual attention. *Nat Rev Neurosci*, 2001, 2: 194–203
- 16 Parkhurst D, Law K, Niebur E. Modeling the role of salience in the allocation of overt visual attention. *Vision Res*, 2002, 42: 107–123
- 17 Itti L, Baldi P. Bayesian surprise attracts human attention. *Vision Res*, 2009, 49: 1295–1306
- 18 Sundstedt V, Stavrakis E, Wimmer M, et al. A psychophysical study of fixation behavior in a computer game. In: Proceedings of the 5th Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization, Los Angeles, 2008. 43–50
- 19 Rothkopf C A, Ballard D H, Hayhoe M M. Task and context determine where you look. *J Vision*, 2007, 7: 16
- 20 Pelz J B, Canosa R. Oculomotor behavior and perceptual strategies in complex tasks. *Vision Res*, 2001, 41: 3587–3596
- 21 Sundstedt V, Bernhard M, Stavrakis E, et al. Visual Attention and Gaze Behavior in Games: An Object-Based Approach. *Game Analytics*. London: Springer, 2013. 543–583
- 22 Christie M, Olivier P, Normand J M. Camera control in computer graphics. *Comput Graph Forum*, 2008, 27: 2197–2218
- 23 Burelli P. Virtual cinematography in games: investigating the impact on player experience. In: Proceedings of International Conference on the Foundations of Digital Games, 2013
- 24 Moore C M, Egeth H. Perception without attention: evidence of grouping under conditions of inattention. *J Exp Psychol*, 1997, 23: 339–352
- 25 Renninger L W, Verghese P, Coughlan J. Where to look next? Eye movements reduce local uncertainty. *J Vision*, 2007, 7: 6
- 26 Tseng P H, Carmi R, Cameron I G M, et al. Quantifying center bias of observers in free viewing of dynamic natural scenes. *J Vision*, 2009, 9: 4
- 27 Hillaire S, Lécuyer A, Cozot R, et al. Depth-of-field blur effects for first-person navigation in virtual environments. *IEEE Comput Graph Appl*, 2008, 28: 47–55

28 Neider M B, Zelinsky G J. Searching for camouflaged targets: effects of target-background similarity on visual search. *Vision Res*, 2006, 46: 2217–2235

Implicit measures of user attention in virtual environment navigation

HAN HongLei^{1,2,3*}, XU ChanChan³, FEI GuangZheng³, CUI Xiang³ & WANG WenCheng¹

1 *State Key Laboratory of Computer Science, Institute of Software, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3 *School of Animation and Digital Arts, Communication University of China, Beijing 100024, China*

*E-mail: hanhonglei@sina.com

Abstract The eye-tracker device is the main tool to obtain visual attention. However, it is hard to be applied in the 3D virtual scene navigation because of its poor reliability, great complexity and high price. We propose a new attention measure metric which can be easily embedded in the virtual environment. Behaviors of virtual camera controlled by the user are regarded as implicit expression of visual attention. The implicit expression is parameterized by the observed object's distance to the center of the camera, occlusion, projected area, and observation time. A sophisticated user study experiment is designed to verify the reliability of this kind of measurement. The proposed implicit measurement of user attention can be effectively applied to an application of user attention aided game design.

Keywords visual attention, virtual navigation, 3D scene design, camera control, saliency



HAN HongLei was born in 1980. He joined the Communication University of China (CUC) after receiving his M.S. degree in computer science from this school in 2006. He was teaching various courses in computer graphics, programming, and computer games at CUC. He is currently a Ph.D. candidate in the University of Chinese Academy of Sciences, under the supervision of Prof. WANG Wencheng. His research interests include computer games, virtual reality and computer graphics.



XU ChanChan obtained her M.S. degree in Computer Application Technology from Beijing Forestry University in 2013. Now she is studying in Communication University of China for a Ph.D. degree. Her research interests are computer graphics and virtual reality such as texture synthesis, non-photorealistic synthesis and camera control.



FEI GuangZheng is a Professor in the Animation School of Communication University of China. He received his Ph.D. degree from Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, China. His research interests include computer graphics, computer animation, virtual reality and computer game. He has published over 50 peer reviewed conference and journal papers.



WANG WenCheng was born in 1967. He received the Ph.D. degree in software from Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, and the Excellent Ph.D. Dissertation Award from the Degree Committee of State Council of China and Ministry of Education of China in 2001. Currently, he is a professor of the State Key Laboratory of Computer Science, Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, where he leads a research group on Computer Graphics and Image Processing. His research interests include computational geometry, visualization, virtual reality and image editing. He is a member of the IEEE and the ACM.

征 稿 简 则

简介:《中国科学: 信息科学》(英文名称: SCIENTIA SINICA Informationis) 是中国科学院和国家自然科学基金委员会共同主办、《中国科学》杂志社出版的学术刊物. 本刊力求刊载信息科学领域最高学术水平的中文文章, 及时报道计算机科学与技术、控制科学与控制工程、通信与信息系统、电子科学与技术等领域基础与应用研究方面的原创性成果, 推动信息科学技术发展, 搭建理论与技术应用的桥梁, 促进与各学科、各行业的交叉融合. 月刊, 每月 20 日出版.

收录情况:《中国科学: 信息科学》被《中文核心期刊要目总览》、《中国科学引文数据库》、《中国期刊全文数据库》、《中国科技论文与引文数据库》等收录.

栏目:《中国科学: 信息科学》设有以下 4 个栏目.

评述: 综述信息科学领域的代表性研究成果和最新进展, 提出作者的独到见解和未来的研究方向. 长度在 20 页左右. 一般由编委邀请, 有意撰写评述的专家也可向有关编委提议.

论文: 重点发表报道最新研究成果及其科学思想、意义、创新点、实验和理论依据及应用前景的概述性论文, 长度不超过 15 页.

快报: 简要介绍信息科学领域最新研究成果的核心内容. 长度不超过 4 页. 优先发表.

学术介绍: 主要介绍从事信息科学研究的院校、实验室和一些重大的研究课题、研究成果及其核心产品.

投稿: 请使用在线投稿系统投稿. 访问本刊网站 www.scichina.com 或 info.scichina.com, 注册一个“作者账户”, 按照提示填写投稿信息并将稿件全文(PDF 格式文件)上传到数据库服务器. 如果不能在线投稿, 请与编辑部联系. 本刊受理的稿件要求用 LaTeX 排版, 模板可从本刊网站下载. 作者在投稿时只能选择一个语种投稿, 且在评审录用后, 不能再翻译成另一语种发表. 请您在投稿时注意, 认真阅读本刊投稿指南, 选择好刊物.

审稿: 稿件由主编负责组织编委和审稿专家进行评审, 并根据评审意见确定录用与否. 评审结束后, 编辑部将及时向作者转达评审意见和结果, 作者若在 90 天内没有收到编辑部有关稿件的具体意见, 在通知编辑部后, 可改投他刊. 本刊不受理“一稿多投”之稿件.

文章署名: 通讯作者应保证稿件内容经全体作者认可并同意署名. 投稿后, 任何署名的改变要有全体原作者签名同意的书面材料.

录用: 稿件录用后, 全体作者应当签署“著作权转让声明书”, 将该论文(各种语言版本)的复制权、发行权、信息网络传播权、翻译权、汇编权在全世界范围内转让给《中国科学: 信息科学》的出版单位《中国科学》杂志社.

出版: 本刊对录用的稿件收取版面费, 出版后向作者免费提供一本样刊. 作者可以购买抽印本和更多的期刊. 作者可以在本刊网站上免费注册下载本刊论文.

地 址: 北京东黄城根北街 16 号
电 话: (010) 64015683 (编辑部)
(010) 64019709 (发行部)
(010) 64008316 (广告部)
传 真: (010) 64016350

邮政编码: 100717
电子信箱: informatics@scichina.org (编辑部)
sales@scichina.org (发行部)
ads@scichina.org (广告部)

中国科学 信息科学

SCIENTIA SINICA Informationis

第 44 卷 第 11 期 2014 年 11 月出版

版权所有, 未经许可, 不得转载

主 管	中 国 科 学 院	出 版	《中国科学》杂志社
编 辑	中 国 科 学 院 《中国科学》编辑委员会	印刷装订	北京中科印刷有限公司
主 编	李 未	总发行处	北京报刊发行局
		订 购 处	全国各邮电局. 《中国科学》杂志社发行部

刊号: ISSN 1674-7267 代号: 国 外 M568
CN 11-5846/TP 国内邮发 80-948

每期定价: 138.00 元 全年定价: 1656.00 元

广告经营许可证: 京东工商广字第 0429 号

国内用户可登录

免费下载

Free Download

主管：中国科学院 | 主办：中国科学院 国家自然科学基金委员会 | 主编：李未 | 出版：  《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS



ISSN 1674-7267
CN 11-5846/TP

中国科学：信息科学 (月刊) SCIENTIA SINICA Informationis

定位：发表信息领域最高学术水平的中文文章，包括计算机科学与技术、控制科学与控制工程、通信与信息系统、电子科学与技术、生物信息学等领域的理论、工程技术和应用研究方面的原创性成果。推动信息科学技术发展，搭建理论与技术应用的桥梁，促进与各学科、各行业的交叉融合。月刊，每月20日出版。

栏目：评述、论文、快报、学术介绍。

检索：被《中文核心期刊要目总览》、《中国科学引文数据库》、《中国期刊全文数据库》、《中国科技论文与引文数据库》、《中国数字化期刊群》等收录。

[曾用名] 中国科学 F辑：信息科学 SCIENCE CHINA Series F: Information Sciences



ISSN 1674-733X
CN 11-5847/TP

SCIENCE CHINA Information Sciences (Monthly)

SCIENCE CHINA Information Sciences is a peer-reviewed monthly academic journal supervised by the Chinese Academy of Sciences, and co-sponsored by the Chinese Academy of Sciences and the National Natural Science Foundation of China. Its primary mission is to encourage communication of basic and innovative research results of high quality in the fields of information sciences. The subject areas featured include computer science and technology, control science and technology, communication and information system, electronic science and technology, and bioinformation, etc. All papers should be intelligible for a broad scientific audience. Contributions are invited from researchers all over the world.

Papers published in *SCIENCE CHINA Information Sciences* include: Review, Research Paper, Brief Report.

It is indexed by Academic OneFile, Astrophysics Data System (ADS), CSA, Cabells, Current Contents/Engineering, Computing and Technology, DBLP, Digital Mathematics Registry, Earthquake Engineering Abstracts, Engineering Index, Engineered Materials Abstracts, Gale, Google, INSPEC, Journal Citation Reports/Science Edition, Mathematical Reviews, OCLC, ProQuest, SCOPUS, Science Citation Index Expanded, Summon by Serial Solutions, VINITI, Zentralblatt MATH.

《中国科学：信息科学》编辑部
地址：北京东黄城根北街16号 (100717)
电话：010-64015683 传真：010-64016350
E-mail: informatics@scichina.org

ISSN 1674-7267

