

合成纹理图像的视觉相似性眼动分析

郭小英¹ 李 亮² 耿海军¹

(山西大学软件学院 太原 030006)¹ (立命馆大学 京都 6038577)²

摘 要 探索了当人眼视觉感知纹理图像相似性时纹理特征(整体特征和局部特征)对视觉注意过程及相似性结果选择的影响。采用 PGPC 纹理合成方法,分别控制纹理的整体特征和局部特征,合成具有相同整体特征和局部特征的纹理。实验分为 3 组纹理场景,每一组有 3 幅纹理图像(A,B 和 S),S 为对比纹理图像;实验者带着“纹理 A 和纹理 B,哪个与纹理 S 更相似”的视觉感知任务观察纹理场景;利用 Tobii T60 眼动仪记录实验过程中观察者的眼动,跟踪获取 89 位实验者的眼动数据(眼动数据度量指标包含感兴趣区域内注视点散度和不同感兴趣区域间的眼跳次数);通过 Tobii studio 导出眼动数据,并基于 R 软件进行了方差分析和配对 T 检验等统计分析。通过对 3 组纹理图像的注视轨迹图及热点图的分析,验证了纹理整体特征和局部特征对视觉感知过程中的注视模式和相似性结果的选择有影响。实验结果表明:1)对于全局特征与对比纹理图像一致的纹理,其眼动注视点分散,而对于局部特征与对比纹理图像一致的纹理,其眼动注视点集中。2)纹理组相似性的最终选择结果与纹理组内不同纹理图像间的视觉搜索行为有关。

关键词 相似性感知,纹理图像,眼动仪,纹理合成,眼动数据

中图分类号 TP391 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.08.040

Eye-movement Analysis of Visual Similarity Perception on Synthesized Texture Images

GUO Xiao-ying¹ LI Liang² GENG Hai-jun¹

(School of Software Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)¹

(Ritsumeikan University, Kyoto 6038577, Japan)²

Abstract Global features and local features are very important for texture visual perception. This paper investigated the influence of the global features and local features of texture on the eye movement pattern and the relationship between the eye movement pattern and visual similarity selection. Firstly, the texture images were synthesized by separately controlling global textural features and local textural features with primitive, grain, and point configuration (PGPC) texture model, which is a mathematical morphology based texture model. In the experiment, three scenes were utilized. For each scene, three textures (A, B, and S) were included. Secondly, an experiment was conducted on visual similarity selection to acquire eye movement data while the subjects were viewing the visual similarities of texture scenes under the task of “Which texture is more similar to texture S, texture A or texture B?”. Experimental data were obtained with an eye tracker Tobii T60 by conducting two tests on 89 subjects. The collected eye-tracking data were analyzed in terms of fixation point variance in each ROI and fixation transfer count between different ROIs. Analysis results indicate that the global features and local features of texture influence the eye-movement pattern, namely, the texture image that is globally similar to the compared texture contains dispersed fixation points, and the texture image that is locally similar to the compared texture contains concentrated fixation points. Besides, the final visual similarity selection is related to the visual search between different ROIs.

Keywords Similarity perception, Texture image, Eye-tracker, Texture synthesis, Eye-movement data

1 引言

图形图像的视觉感知是计算机视觉和认知心理学一个非常重要的交叉领域。在视觉处理过程中,整体感知和局部感

知是视觉信息处理过程中常用的感知策略。然而,视觉信息的检测是一个从整体到局部的过程,还是一个反过来先注视局部后观察整体的过程,不少研究对此存在争议。Navon^[1]于 1977 年提出了先见森林后见树木的理论,强调了整体感知

到稿日期:2017-11-10 返修日期:2018-02-03 本文受国家自然科学基金项目(61603228)资助。

郭小英(1985—),女,博士,讲师,硕士生导师,主要研究方向为图像视觉感知、图像分析、眼动数据分析和计算机视觉等, E-mail: guoxiaoying@sxu.edu.cn(通信作者);李 亮(1982—),男,博士,副教授,主要研究方向为纹理合成与视觉感知等;耿海军(1983—),男,博士,讲师,主要研究方向为网络体系结构和路由算法、计算机视觉等。

的优先效应。随后,Grice等^[2]于1983年指出先看到森林还是先看到树木取决于用户的注视点,反驳了整体感知的先导作用。近年来,研究者指出全局感知和局部感知受到多种因素的影响,如用户的经验知识、是否受过训练、观察距离等。Dulaney^[3]于2007年指出训练使得用户更加重视局部特征而忽视全局特征。李亮等^[4]于2013年研究了在纹理视觉相似性感知过程中观察距离对全局感知和局部感知的影响,并指出随着观察距离的增大,实验者越来越关注纹理图像的全局特征。Mills等^[5]于2014年研究了全局和局部特征在附带感知过程中的作用,并通过4个符号提示(箭头、长方形等符号)实验,验证了全局和局部处理在视觉感知过程中的机制,结果表明,在附带处理目标时全局特征在处理过程中具有优先效应。

纹理无处不在,关于纹理图像的视觉感知研究也有很多。Tamura等^[6]于1978年研究了纹理图像的粗糙度、对比度、方向性、线性和规律性等视觉感知,并提出了与视觉感知相适应的计算方法。Amandasun等^[7]于1989年提出了5个视觉感知特征,即粗糙度、复杂度、对比度、繁忙度和纹理强度。李亮等^[8]于2010年通过数学形态学方法合成纹理图像,并研究了纹理的全局特征和局部特征在不同观察距离下对相似性感知的的影响。然而,在纹理图像视觉相似性感知的过程中,对于全局特征和局部特征是如何影响视觉相似性的,仍然缺乏一些量化的分析和直观的描述(如眼动数据)。

眼动仪是追踪眼睛视线的设备,在心理学、认知学及计算机学科均具有很重要的使用价值。本文基于眼动仪探索当人眼视觉感知纹理图像相似性时,纹理特征(整体特征和局部特征)对视觉注意过程及相似性结果选择的影响。本文首先采用PGPC纹理合成方法,分别控制纹理的整体特征和局部特征,合成具有相同整体特征的纹理组和具有相同局部特征的纹理组,然后基于Tobii T60眼动仪对合成纹理图像的相似性进行观察和选择,跟踪获取89位实验者的眼动数据(包含感兴趣区域内注视点散度和不同感兴趣区域间的眼跳次数),并进行了方差分析和配对T检验等统计分析。结果显示,纹理的整体特征和局部特征对视觉感知过程中的注视模式有影响,且不同纹理间的注视次数会影响纹理相似性的选择结果。

与传统的采用自然纹理图像的方法不同,本文利用基于数学形态的纹理合成方法合成纹理图像,首次将数学形态学方法应用于视觉感知研究中;另外,本文通过眼动仪跟踪技术,量化分析全局特征和局部特征对视觉相似性感知中眼动模式的影响。

2 图像感知与眼动跟踪

2.1 国外相关研究

眼动跟踪技术在图像的视觉感知研究上应用得非常早,1936年,美国芝加哥大学的Dearborn教授撰写了《人们如何看图片》^[9]一书,首次系统地探讨了被试者观察复杂图片时的眼动情况。该著作记录了超过200名被试者眼动的情况,主要针对油画、雕塑、毛毯、图案、建筑等复杂图案。Dearborn

研究发现,被试者的注视点会集中在一个特殊的“兴趣区”内。在某种意义上,他的研究突破了仅限于文本阅读的眼动研究,成为眼动研究的重要里程碑。Nelson等^[10]于1980年基于眼动仪研究了眼动与图画观看之间的关系。该研究中设立了4组实验,通过实验分析得出如下结论:注视次数对于记忆图画内容有重要作用。Chua等^[11]于2005年研究了不同文化下注视场景行为的差异,该研究设置了36个不同的场景,包括非生物场景和动物场景,分别请25名欧洲裔的美国人 and 27名在美的中国留学生参加实验。实验结果表明,文化差异会造成不同的视觉注视差异:中国人更多地关注场景中的背景,美国人则更多地关注场景中的客体。Godwin等^[12]于2014年研究了在视觉搜索过程中视觉相似性和语义相似性对视觉搜索的影响。通过眼动仪记录实验者在视觉搜索过程中的眼动数据,实验分析得出,视觉相似性对视觉搜索的影响更大。Hwang等^[13]于2017年特别针对在线购物网站,使用眼动技术分析对比了男性和女性在视觉感知过程中的视觉感知差异。

2.2 国内相关研究

眼动仪在我国的使用时间相对较晚,1997年,我国心理学工作者韩玉昌^[14]研究了在不同形状和不同颜色的视觉刺激下,眼睛运动的顺序性问题。实验形状包括4种(三角形、菱形、圆形和梯形);实验颜色包括红、绿、蓝、黄4种。实验结果表明,菱形的注视点最多且注视时间最长;三角形的首次注视点最多;分布在第二象限的图形和颜色获得的注视最多。陶云^[15]于2001年介绍了阅读和图画知觉方面的研究进展,对图画知觉过程中眼动的重要性、知觉的广度、眼跳的综合信息等方面进行了分析与探讨,特别指出了阅读和图画感知过程中眼动的差异、图画感知过程中的眼动规律。曹晓华等^[16]于2005年针对不同显示条件、不同显示方式下的图形识别眼动数据进行研究。结果表明,在不良的视觉条件下,图像识别中的信息取样点数量减少,眼动扫视路径变短;在识别旋转图形时,有效取样的时间下降,取样点适量增加,眼动扫视路径增长。杨文等^[17]于2008年通过眼动仪考察了专业摄影师和新手在观看黑白摄影图片时的眼动差异。实验结果表明,二者在欣赏摄影图片时存在明显的差异。郭昕^[18]于2015年将眼动数据与图像质量评价相结合,提出了图像质量主观评价过程中眼动信号的可视化方法。蒋文明等^[19]于2015年通过眼动仪对智能手机的应用程序图标的可用性进行了研究,并设计了3种形状、3种颜色对比度和3种内部特征,采用眼动仪记录实验者在浏览手机界面不同图标时的眼动数据,并通过方差分析得出:颜色对比度和内部特征对实验者的眼动注视有显著影响。

尽管国内外研究者对图像、网站等进行了眼动分析研究,但是目前对于纹理图像的视觉感知的研究较少,特别是在相似性感知情况下,在人眼视觉感知的过程中,全局特征和局部特征对视觉感知的影响目前还未有研究。因此,本文探索在人眼视觉感知纹理图像相似性时,纹理特征(整体特征和局部特征)对视觉注意过程及相似性结果选择的影响。

3 基于眼动仪的纹理相似性感知实验

3.1 实验材料与设备

3.1.1 实验材料

本实验所用的纹理图像为合成纹理图像,纹理合成方法来自文献[4,8]。该方法被称为 PGPC(Primitive, Grain, and Point Configuration)纹理合成模型,最初由日本的 Asano 教授^[20]的实验室提出,后经过了李亮^[21]以及杨磊^[22]的改进。该模型基于数学形态学的方法,将纹理表述为由几个方面构成:1)纹理基元(Primitive),一种简单的形状,用来表述纹理的局部特征;2)纹理粒子(Grain),从纹理基元派生出来的排列在纹理中的粒子;3)粒子布局(Point Configuration),定义了纹理粒子的排列规则,体现了纹理的整体特征。该模型可以实现两方面的功能:1)将已有的纹理图像提取分解成全局特征(粒子布局)和局部特征(纹理基元);2)通过已经定义好的全局特征和局部特征,合成新的纹理图像,用户可以随意改变全局特征或者纹理特征来合成新的纹理。

PGPC 模型的优势就是能分别控制纹理的粒子和粒子的布局,从而合成所期望的纹理图像。在合成过程中,纹理基元由结构元素 (Structure Element, SE) B 来表示;纹理粒子由 nB 来表示, nB 是将纹理基元 B 经过 n 次的闵可夫斯基和 (Minkowski Addition) 运算进行扩展得到的,通常 n 的取值大于或等于 0, nB 的定义如下:

$$nB = \begin{cases} B \oplus M_2 \oplus \dots \oplus M_n ((n-1) \text{ times of } \oplus), & n > 1 \\ B, & n = 1 \\ \varphi, & n = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, \oplus 表示闵可夫斯基和运算, M_n 为四元素的结构元素 B 经过 n 次变换得到的粒子。也就是说,在合成纹理的过程中,该模型可以使用不同的粒子进行合成,因此 PGPC 合成过程可以表述为:

$$X = \bigcup_{n=0}^N nB \oplus \Phi_n \quad (2)$$

其中, Φ_n 为粒子布局,即纹理粒子在合成过程中所在的位置, N 为最大变换的次数。纹理布局可由两种方式定义:1)获取已知纹理的纹理布局,并将之作为新合成图像的粒子布局;2)通过控制随机点的分布(随机点的密度和分布方向),自定义粒子布局。

通过 PGPC 纹理合成模型,我们可以分别控制合成过程中的纹理粒子和纹理布局。纹理粒子体现了纹理图像中的细节特征,而粒子布局反映了图像的全局特征,因此,PGPC 模型是一个可以分别控制纹理局部特征和整体特征的纹理合成算法。

本文所使用的纹理图像是利用 PGPC 模型合成的,合成后的实验用图如图 1 所示。图 1 中有 3 幅纹理图像场景,即 Scene 1, Scene 2 和 Scene 3,每幅场景包含 3 个纹理图像 A, B, 和 S,这些图像都是通过 PGPC 模型合成的。每个纹理图像的合成过程采用的纹理基元和粒子布局如表 1 所列。在合成过程中,纹理 A 和纹理 S 具有相同的粒子布局(全局特征),纹理 S 和纹理 B 具有相同的纹理粒子(局部特征),纹理 S 被称作基准图像。在实验过程中,将纹理 A 和纹理 B 与基准图像进行相似性比较,最终选出最相似的一个纹理图像(A 或者 B)。

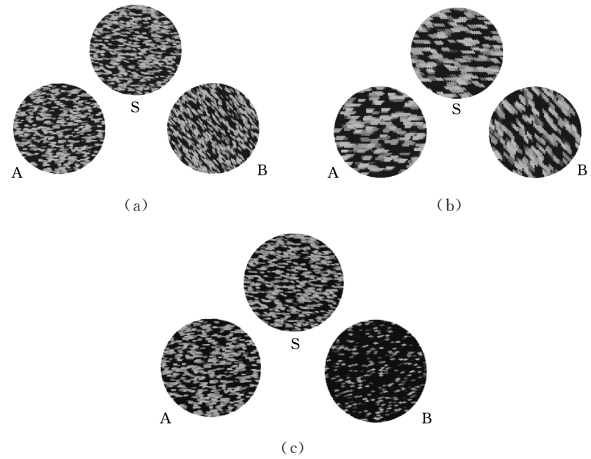


图 1 实验纹理图像

Fig. 1 Experimental texture images

表 1 3 组合成纹理图像的纹理基元和粒子布局

Table 1 Primitive and point configuration of three synthesized texture images

| | 纹理 A | 纹理 B | 纹理 S |
|---------------|--------------------------------------------------------|------|------|
| 纹理基元 | | | |
| Scene 1 的粒子布局 | 3 个纹理图像的粒子密度一致;纹理 A 与纹理 S 为水平方向,而纹理 S 的粒子方向为 45° 对角线方向 | | |
| Scene 2 的粒子布局 | 同 Scene 1 的粒子布局一致,但将 Scene 1 放大两倍 | | |
| Scene 3 的粒子布局 | 方向均为水平方向;纹理 A 与纹理 S 的粒子密度一致,纹理 B 的粒子密度为纹理 A 的一半 | | |

为了进行对比实验,将原始合成的图像(见图 1(a))放大两倍,形成 Scene 2,如图 1(b)所示。原始合成的图像均为正方形,为避免图像轮廓对图像内纹理布局产生视觉影响,在实验过程中,将实验图像剪裁成相同直径的圆形。两组纹理分别作为测试图像显示在 17 英寸的显示器上,显示直径为 10.5 cm。

3.1.2 实验设备

本实验采用 Tobii T60 眼动仪来记录被试者观看两组纹理图像时的眼动数据。眼动仪采样率为 60 Hz,屏幕为 17 寸显示屏且分辨率为 1280 × 1024。被试者全程自然地坐在柔软的椅子上,为了避免外界影响,实验全程无噪声和人为干扰。实验者的头部自然地架在头托架上,确保在实验过程中不会晃动。实验完成后,采用 Tobii Studio 软件完成眼动数据的导出。

3.2 观察距离

观察距离对纹理相似性的选择有影响。在我们的前期研究中^[4],通过对不同实验图像的观察距离和最终选择(纹理 A 还是纹理 B)进行逻辑回归分析,得出了观察距离和选择纹理 A 为 50% 的概率关系,如式(3)所示:

$$\begin{aligned} D_{1,3,\rho=0.5} &= 2.2824 \times 2 \times d_{1,3} \\ D_{2,\rho=0.5} &= 3.3473 \times 2 \times d_2 \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $d_{1,3}$ 表示 Scene 1 和 Scene 3 中纹理 A 的直径, d_2 表示 Scene 2 中纹理 A 的直径, $D_{1,3,\rho=0.5}$ 表示计算出的在观察 Scene 1 和 Scene 3 的情况下保证选择纹理 A 的概率为 50% 的观察距离, $D_{2,\rho=0.5}$ 表示计算出的在观察 Scene 2 的情况下

保证选择纹理 A 的概率为 50% 的观察距离。在本实验中,3 组纹理的直径都为 10.5 cm,因此,根据式(3),实验者观察出 3 组纹理的距离分别为 48 cm,70 cm 和 48 cm。

3.3 被试者

实验开始前,被试者被安排测试视力,裸视或者矫正视力均在 1.0 以上且无色盲者方可参与实验。视力合格后,进行定标预测。定标测试为 5 点定标,5 个点分别分布在屏幕的左上、左下、右上、右下和中间部位,此时使用一个红色球在屏幕上的 5 点间移动,眼睛跟随红色球移动捕捉球的位置。定标结束后,根据定标结果确定是否定标成功。部分测试者由于眼动速度及视力问题(通常为佩戴眼镜)无法捕捉或者定标多次失败,因此不可参加实验。

经过视力测试及定标测试,确定实验合格的受试者 89 人,均为山西大学在校本科生,其中男生 49 人,女生 40 人,年龄在 19~23 岁之间(平均年龄为 20.34,年龄标准差为 1.96)。

3.4 实验过程

本实验分为 3 个测试,针对实验场景 Scene 1,Scene 2 和 Scene 3,进行对应的测试 Test 1,Test 2 和 Test 3;每个测试分两个步骤,即眼动实验和主观评价。

眼动实验包含以下几个过程:1)被试者首先被要求测试视力,若视力符合要求(裸视或者矫正视力达到 1.0 或以上),则签署实验知情同意书;2)进一步指导被试者坐在座椅上,并根据被试者的身高调节座椅和头托架的高度,使得眼动仪能够捕捉到被试者的双眼且保持实验观察距离;3)指导被试者进行定标,眼睛注视屏幕上的红色圆点,视线跟随红色圆点移动,完成 5 点定标;4)实验人员向被试者讲述实验目的和任务,在掌握了实验过程后,正式开始实验;5)被试者被要求带着任务“实验图像中纹理 A 和纹理 B 哪个与纹理 S 更相似”来观察实验图像,观察时间没有限制,当被试者给出答案便停止观察。

主观评价部分:被试者在给出具体的回答“A”或“B”后,须给出选择“A”或“B”的原因。

3.5 数据处理

本实验数据通过 Tobii Studio 软件导出,数据的处理和分析采用 R 3.3.0 统计软件统计。

4 实验结果与分析

4.1 性别与纹理相似性选择结果

根据上述实验,统计不同测试下的纹理相似性选择结果,如表 2 所列。从表中可以看出:Test 1 中,17 个被试者(9 个男性和 8 个女性)认为纹理 A 与纹理 S 更相似,11 个被试者(8 个男性和 3 个女性)认为纹理 B 和纹理 S 更相似;在 Test 2 中,13 个被试者(5 个男性和 8 个女性)认为纹理 A 与纹理 S 更相似,18 个被试者(11 个男性和 7 个女性)认为纹理 B 与纹理 S 更相似;在 Test 3 中,24 个被试者(14 个男性和 10 个女性)认为纹理 A 与纹理 S 更相似,6 个被试者(2 个男性和 4 个女性)认为纹理 B 与纹理 S 更相似。为了分析性别对全局特征和局部特征感知是否有显著影响,我们进行了方差分析,结果表明,性别对于相似性选择结果的差异不显著($F=2.590, p=0.432$)。

表 2 3 组测试的纹理相似性选择结果

Table 2 Similarity selection results of 3 tests

| | Test 1 | | Test 2 | | Test 3 | |
|------|--------|----|--------|----|--------|----|
| | 男 | 女 | 男 | 女 | 男 | 女 |
| 被试者 | 17 | 11 | 16 | 15 | 16 | 14 |
| 纹理 A | 9 | 8 | 5 | 8 | 14 | 10 |
| 纹理 B | 8 | 3 | 11 | 7 | 2 | 4 |

4.2 眼动数据结果与分析

测试结束后,将被试者的眼动数据记录在 Tobii Studio 中。为了直接获取不同纹理组别中纹理 A、纹理 B 和纹理 S 内的眼动数据,首先对纹理图像组进行感兴趣区域标注。本实验中,将纹理 A、纹理 B 和纹理 S 分别作为不同的感兴趣区域进行标注,标注过程中采用圆形对不同纹理场景(Scene 1, Scene 2 和 Scene 3)中的纹理 A、纹理 B 与纹理 S 分别进行圈定和标记,标注后的感兴趣区域如图 2 所示,每一个纹理图像为一个感兴趣区域。之后,基于不同的感兴趣区域进行眼动数据度量指标的统计:1)感兴趣区域内的注视点散度;2)不同感兴趣区域间的眼跳次数。眼动数据度量指标与评价标准如表 3 所列。

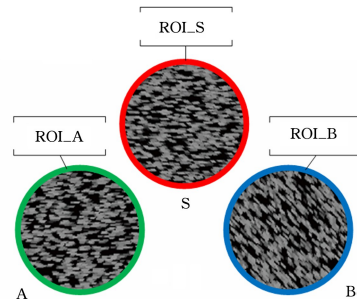


图 2 不同纹理场景的感兴趣区域标注

Fig. 2 ROIs tagging of different texture scenes

表 3 眼动数据度量指标与评价标准

Table 3 Eye-movement data metrics and evaluation criteria

| 眼动数据度量指标 | 评价标准 |
|---------------|------------------------|
| 感兴趣区域内的注视点散度 | 注视点散度范围大说明注视搜索更广(全局性强) |
| 不同感兴趣区域间的眼跳次数 | 眼跳次数多说明比较次数多(相对) |

在实验中,被试者带着“纹理 A 和纹理 B 哪个与纹理 S 更相似”的实验任务来观察实验场景,相似性的选择在纹理 A 和纹理 B 中产生。因此,在分析数据时,我们更多地关心纹理 A 和纹理 B 这两个主要的感兴趣区域。

针对不同的纹理场景,分别统计感兴趣区域内的眼动度量指标,并对每一项眼动度量指标进行分析。

1)感兴趣区域内的注视点散度(Fixation Variance):指注视点在感兴趣区域内分布的集中程度。该指标反映被试者在视觉搜索时是全局扫视还是局部注视。若注视点很分散,则认为在视觉搜索时应对纹理图像的全局特征进行捕捉;若注视点相对集中,则在视觉搜索时对局部特征的关注较多。在合成实验图像时,纹理 A 和纹理 S 具有相同的整体特征,纹理 B 和纹理 S 具有相同的局部特征。因此,我们假设在相似性选择视觉注视的过程中,纹理 A 中的注视点比纹理 B 中的注视点分布得更松散。为了验证二者散度差异的显著性,

本文采用配对 T 检验方法来验证差异的显著性。具体步骤如下:

①获取落在纹理场景中感兴趣区域纹理 A 和纹理 B 中的注视点坐标。

②按下述步骤及公式计算注视点散度。

计算感兴趣区域内注视点的中心点:

$$(a, b) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i, y_i) \quad (4)$$

其中,中心点坐标为 (a, b) , (x_i, y_i) 为某一坐标点。

计算每个注视点和中心点之间的距离 d_i :

$$d_i = \sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2} \quad (5)$$

计算所有注视点与中心点距离的方差,方差越小,则注视点的散度越小,分布越集中。

$$Var = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2 \quad (6)$$

其中, Var 为注视点散度, d_i 为每个注视点与中心点的距离。

③利用配对 T 检验方法验证纹理 A 中的注视点散度与纹理 B 中的注视点散度的差异显著性。

通过计算,在 3 组纹理场景中,纹理 A 和纹理 B 的注视点散度差异显著 ($p < 0.05$) (Scene 1: $t = 2.376, p = 0.024$; Scene 2: $t = 2.284, p = 0.030$; Scene 3: $t = 2.178, p = 0.038$)。实验结果证实了本文的假设:纹理 A 中的注视点比纹理 B 中的注视点分布得更松散。根据纹理合成过程中全局特征和局部特征的不同,可以得出结论:全局特征和局部特征会影响纹理视觉注意模式,若图像与被比较图像有一致的全局特征,被试者全局扫视信息,则落在其图像内的注视点分布较分散;反之,若有一致的局部特征,被试者观察局部信息,则落在图像内的注视点分布较集中。图 3 显示了在 Scene 1, Scene 2 和 Scene 3 中纹理 A 中的注视点散度都大于纹理 B 中的注视点散度。

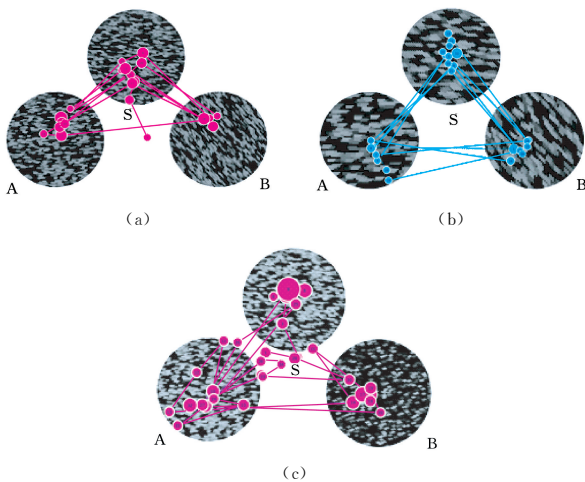


图 3 3 种场景下的注视轨迹图

Fig. 3 Fixation trajectories of these scenes

2)不同感兴趣区域间的注视转移次数(Fixation transfer Count between Different ROIs):注视点之间的转移反映了视觉搜索行为。本研究中,被试者主要观测纹理 A 和纹理 B 哪个与纹理 S 更相似,因此本文主要考虑纹理 A 和纹理 S、纹理 B 和纹理 S 之间的注视转移次数 $Count_{S,A}$ 和 $Count_{S,B}$ 。

实验前,假设在相似性选择的视觉搜索过程中,最终选择

(纹理 A 或者纹理 B)与比较纹理图像(纹理 A 和纹理 B)和被比较纹理图像(纹理 S)之间的注视次数有关,即若纹理 A 与纹理 S 之间的注视转移次数大于纹理 B 与纹理 S 之间的注视转移次数,则选择纹理 A 与纹理 S 更相似的几率较大;反之,则选择纹理 B 与纹理 S 更相似的几率较大。总结为以下两种情况。

① $Count_{S,A} > Count_{S,B}$, 且最终选择为 A。

② $Count_{S,A} < Count_{S,B}$, 且最终选择为 B。

统计不同测试中被试者满足情况①和情况②的比例,如表 4 所列,在测试 1,测试 2 和测试 3 中,满足情况①的被试者比例分别为 88.2%,46.1%和 87.5%;满足情况②的被试者比例分别为 63.6%,55.6%和 83.3%。此外,本文采用了配对 T 检验方法来验证假设,实验结果表明,在测试 1 中,当最终选择为纹理 A 时, $Count_{S,A}$ 明显大于 $Count_{S,B}$ ($t = 4.883, p = 0.000$);当最终选择为纹理 B 时, $Count_{S,B}$ 明显大于 $Count_{S,A}$ ($t = -3.32, p = 0.006$)。在测试 2 中,当最终选择为纹理 A 时, $Count_{S,A}$ 明显大于 $Count_{S,B}$ ($t = 2.966, p = 0.013$);当最终选择为纹理 B 时, $Count_{S,B}$ 在 0.05 的显著性水平下大于 $Count_{S,A}$ ($t = -2.247, p = 0.038$)。在测试 3 中,当最终选择为纹理 A 时, $Count_{S,A}$ 明显大于 $Count_{S,B}$ ($t = 6.075, p = 0.000$);当最终选择为纹理 B 时, $Count_{S,B}$ 明显大于 $Count_{S,A}$ ($t = -3.69, p = 0.0008$)。注视点的转移反映了视觉搜索行为,因此,通过以上分析,本文认为最终的相似性选择结果与不同感兴趣区域之间的视觉搜索行为相关,搜索行为越频繁,被试者选择的几率越大。

表 4 纹理之间注视转移次数的统计

Table 4 Statistics of fixation transfer counts between textures

| 两种情况 | Scene1 | Scene 2 | Scene 3 |
|------|---------------|---------------|---------------|
| 情况① | 88.2% (15/17) | 46.1% (6/13) | 87.5% (21/24) |
| 情况② | 63.6% (7/11) | 55.6% (10/18) | 83.3% (5/6) |

4.3 热点图

热点图使用不同颜色来呈现被试者对一张图像的关注区域,或用来展示被试者在某个区域的视觉停留时间。深灰色表示注视点最多或注视时间最长的区域;浅灰色次之,其间有很多过渡层次。通过眼动实验,可以获取到两组纹理图像的热点图,如图 4 所示。

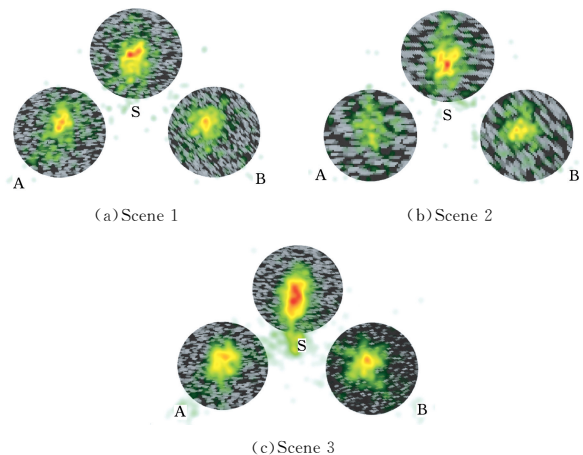


图 4 3 种场景下的热点图

Fig. 4 Heat maps of 3 scenes

在3幅纹理场景中,被比较的纹理S的注视点最多且注视时间最长;在Scene 1和Scene 3中,纹理的局部特征是原始大小,局部特征体现得不够明显,因此,实验者更多地关注图像的全局特征,纹理A中产生的热点图的红色区域大于纹理B;而在Scene 2中,纹理的局部特征被放大了两倍,导致局部特征造成的视觉感知刺激增强,由于实验者会更多地关注纹理图像B,因此,在Scene 2的热点图中,纹理B的热点图深灰色区域大于纹理A。由此可以看出,纹理图像的全局纹理特征和局部纹理特征会影响眼动注视模式。

结束语 本文通过眼动仪探索合成纹理图像视觉相似性的感知过程,研究了纹理图像相似性感知过程中的眼动模式。文中首先基于PGPC纹理合成方法,分别控制全局特征和局部特征合成两组纹理图像,通过实验者眼动观察纹理图像获取眼动数据(感兴趣区域内的注视点散度和不同感兴趣区域间的眼跳次数),进而对眼动数据进行方差分析和配对T检验分析,最终得出以下结论:全局特征和局部特征对相似性视觉感知眼动注视模式有影响,全局特征使得眼动注视点分散,而局部特征使得眼动注视点集中;纹理组相似性最终的选择结果与不同纹理图像间的视觉搜索行为有关。

本文尝试将数学形态学的方法应用到图像视觉感知方面,在今后的研究中,我们将利用PGPC纹理合成方法合成更多的纹理图像,研究不同纹理图像的视觉复杂度以及美学感知。

参 考 文 献

- [1] NAVON D. Forest before trees: The precedence of global features in visual perception[J]. *Cognitive Psychology*, 1977, 9(3): 353-383.
- [2] GRICE G R, CANHAM L, BOROUGHS J M, et al. Forest before trees? It depends where you look[J]. *Attention Perception & Psychophysics*, 1983, 33(2): 121-128.
- [3] DULANEY C L, MARKS W. The effects of training and transfer on global/local processing [J]. *Acta Psychologica*, 2007, 125(2): 203-220.
- [4] LI L, ASANO A, ASANO C M, et al. Statistical quantification of the effects of viewing distance on texture perception[J]. *Journal of The Optical Society of America Optics Image Science and Vision*, 2013, 30(7): 1394-1403.
- [5] MILLS M, DODD M D. Which way is which? Examining global/local processing with symbolic cues[J]. *Journal of Experimental Psychology General*, 2014, 143(4): 1429-1436.
- [6] TAMURA H, MORI S, YAMAWAKI T, et al. Textural Features Corresponding to Visual Perception[J]. *Systems Man and Cybernetics*, 1978, 8(6): 460-473.
- [7] AMADASUN M, KING R A. Textural features corresponding to textural properties[J]. *Systems Man and Cybernetics*, 1989, 19(5): 1264-1274.
- [8] LI L, ASANO A, ASANO C M, et al. Statistical analysis of human visual impressions on morphological image manipulation of gray scale textures[J]. *Optical Review*, 2010, 17(2): 90-96.
- [9] DEARBORN W F. Book Review: How People Look at Pictures: A Study of the Psychology of Perception in Art Guy Thomas Buswell[J]. *The Elementary School Journal*, 1936, 37(1): 1, 66-67.
- [10] NELSON W W, LOFTUS G R. The functional visual field during picture viewing. [J]. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning & Memory*, 1980, 6(4): 391-399.
- [11] CHUA H F, BOLAND J E, NISBETT R E, et al. Cultural variation in eye movements during scene perception[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102(35): 12629-12633.
- [12] GODWIN H J, HOUT M C, MENNEER T, et al. Visual Similarity Is Stronger Than Semantic Similarity in Guiding Visual Search for Numbers[J]. *Psychonomic Bulletin & Review*, 2014, 21(3): 689-695.
- [13] HWANG Y M, LEE K C. Using an Eye-Tracking Approach to Explore Gender Differences in Visual Attention and Shopping Attitudes in an Online Shopping Environment[J/OL]. <http://dx.doi.org/10.1080/10447318.2017.1314611>.
- [14] HAN Y C. The Sequential Quality of Eye Movement in Observing Different Shapes and Colors[J]. *Psychological Science*, 1997, 20(1): 40-43. (in Chinese)
韩玉昌. 观察不同形状和颜色时眼运动的顺序性[J]. *心理科学*, 1997, 20(1): 40-43.
- [15] TAO Y. Research on eye movement perception to the pictures [J]. *Psychological Science*, 2001, 24(2): 194-196. (in Chinese)
陶云. 图画知觉过程的眼动研究进展[J]. *心理科学*, 2001, 24(2): 194-196.
- [16] CAO X H, CAO L R. A Eye Movements Study on Sampling Traits for Irregular Geometric Figure Recognition [J]. *Acta Psychologica Sinica*, 2005, 37(6): 748-752. (in Chinese)
曹晓华, 曹立人. 不规则几何图形识别取样特征的眼动研究[J]. *心理学报*, 2005, 37(6): 748-752.
- [17] YANG W. Research on the difference between experts and novice When appreciating photograph works[D]. Tianjin: Tianjin Normal University, 2008. (in Chinese)
杨文. 专家与新手观看明星黑白头像图片的眼动研究[D]. 天津: 天津师范大学, 2008.
- [18] GUO X. Visual analysis method of eye tracking signal in subjective image quality assessment [J]. *Modern Electronics Technique*, 2015(12): 70-73. (in Chinese)
郭昕. 图像质量主观评价中眼动信号的可视化分析方法[J]. *现代电子技术*, 2015(12): 70-73.
- [19] JIANG W M, YANG Z X, JIANG M, et al. A Study on Usability of Application Icon Design in Smart Phones[J]. *Chinese Journal of Ergonomics*, 2015, 21(3): 21-24. (in Chinese)
蒋文明, 杨志新, 蒋敏, 等. 智能手机应用程序图标设计的可用性研究[J]. *人类工效学*, 2015, 21(3): 21-24.
- [20] ASANO A, OHKUBO T, MUNAYASU M, et al. Primitive and point configuration texture model and primitive estimation using mathematical morphology[C]// *Scandinavian Conference on Image Analysis*. 2003: 178-185.
- [21] LI L, ASANO A, ASANO C M, et al. Dual Primitive Estimation of Textures[J]. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 2011, 94(4): 1165-1169.
- [22] YANG L, LI L, ASANO C M, et al. Primitive and grain estimation using flexible magnification for a morphological texture model[C]// *International Symposium on Memory Management*. 2011: 190-199.