

# 视场角与观察角度对三维地图视觉信息加工的影响研究

刘 兵,董卫华\*,王彦文,张宁旭

(1. 北京师范大学地理学与遥感科学学院,北京 100875;  
2. 北京师范大学遥感科学国家重点实验室,北京 100875)

**摘要** 传统地图符号视觉参量研究,主要是对地图颜色、形状、尺寸、方向等进行分析。本文通过眼动跟踪三维地图认知实验与眼动参数解析,建构了视场角和观察角度对于三维地图有效性和效率影响的评价指标体系,定量分析了2个参量对三维地图视觉信息加工的影响。实验结果表明:视场角对三维地图中垂直方向信息提取的有效性和实体形状信息提取的有效性影响显著;对实体间角度信息提取的效率影响边缘显著,而对垂直方向信息提取的效率、水平方向信息提取的有效性和效率、实体间角度信息提取的有效性、形状信息提取的效率影响不显著;观察角度对垂直方向信息、水平方向信息,以及实体间角度信息感知的效率和有效性的影响都不显著,但对实体形状信息感知的效率和有效性均有显著影响。该研究适用于三维地图适人化设计、表达与自动理解。

**关键词** 三维地图;视场角;观察角度;眼动跟踪

**DOI**:10.3724/SP.J.1047.2015.01490

## 1 引言

随着互联网信息技术的快速发展,以 Google Map、高德地图、百度地图为代表推出的三维地图得到了广泛的应用。目前从地图设计的角度来提高地图的视觉信息提取效率与有效性是三维地图可用性研究的关键。

地图符号视觉参量是地图设计的基本要素。法国地图学家 Bertin<sup>[1]</sup>最早提出地图视觉变量(亮度、纹理、颜色、方向、形状、大小和密度),此后在地图学、符号学、计算机图形学得到广泛的关注与应用,但 Bertin 并没有进行地图视觉参量的用户感知研究。Wolfe 和 Horowitz<sup>[2]</sup>提出颜色、运动、方向和大小是引导视觉注意的变量。大部分研究主要针对二维地图符号的基本视觉参量<sup>[3-5]</sup>。与二维地图不同,三维地图的可变视觉参量更多,如场景的光照、阴影<sup>[6]</sup>、视场角<sup>[7]</sup>和观察角度<sup>[8]</sup>等,其中,视场角和观察角度的变化被认为是三维地图不同于二维地

图的最大特点<sup>[9]</sup>。研究发现,视场角的改变会造成地图符号的形变,从而影响用户对地图的认知<sup>[10]</sup>。观察角度,即视线与水平线的夹角,一些研究也称为“倾斜角度”<sup>[11]</sup>,对地图信息有直接的影响<sup>[7]</sup>。观察角度过大,三维地图趋向于二维地图,地物关系清晰,但三维特点不明显;观察角度过小,实体可通过精确数据表达<sup>[12]</sup>,但会有遮挡。另外,观察角度的改变还会对距离和大小的判断产生较大的影响<sup>[11]</sup>。Matatko<sup>[13]</sup>、Carvalho<sup>[14]</sup>等研究了不同地图形式中观察角度对三维地图立体感的影响,但视场角和观察角度2个环境视觉参量对于三维地图视觉信息加工的影响研究还较少。

眼动跟踪作为地图学认知实验方法的一种,可实时采集被试眼动数据,真实反映被试眼动行为,是视觉信息加工研究中最有效的研究手段<sup>[15]</sup>,广泛应用于地图设计与认知研究。Popelka 等通过注视路径比较,发现用户对 2D 和 3D 地图的认知方式没有明显不同,但制图者与非制图者的认知方式有较

收稿日期 2015-01-22;修回日期:2015-04-09.

基金项目 国家自然科学基金项目(41471382);国家级大学生创新创业计划项目(201310027039)。

作者简介 刘 兵(1993-),女,本科生,研究方向为地图认知计算与方法。E-mail:liubing\_731@163.com

\*通讯作者 董卫华(1976-),男,博士,副教授,研究方向为地图认知计算,地理信息空间认知机理。

E-mail:dongweihua@bnu.edu.cn

大差异<sup>[16]</sup>。邓毅博等采用眼动实验,发现地图图例位置影响了用户对图例的关注情况,图例的最佳位置在地图左上角<sup>[17]</sup>。Dong 等利用眼动数据分析发现经过增强的遥感影像可用性高于原始影像<sup>[18]</sup>;在动态交通地图中,尺寸对交通流量的表现效果优于颜色,且尺寸、颜色和频率的表现效果均与显示器分辨率有关<sup>[19]</sup>。本文利用眼动跟踪的地图认知实验,通过高精度眼动参数采集与分析,定量评价视场角和观察角度,对用户的三维地图视觉信息加工情况的影响。

2 视场角与观察角度参量取值实验

本研究根据成像装置的参数,确定了三维地图视场角与观察角度的取值范围。视场角受成像装置焦距的影响,最新一代标准变焦镜头的焦距范围是 24~70 mm<sup>[20~21]</sup>,通过 Google Sketchup Pro 8.0 将焦距转换为视场角,得到视场角取值为 28~76.3°,变化范围为 48.3°。成像装置只能放置在水平面上,所以成像装置的观察角度的取值范围为 0~90°,变化范围为 90°。在 2 个参量常用角度的基础上加上变化范围的 20%,作为参数的另一取值。三维地图的常用视场角为 46°<sup>[10]</sup>,最佳观察角度为 45°<sup>[11]</sup>,因此,视场角的另一取值为 55.66°,观察角度的另一取值为 63°。即各组的变量取值为:

$V = \{FOV, VA | FOV = 46^\circ, 55.66^\circ; VA = 45^\circ, 63^\circ\}$  (1)

式中, $FOV$ 为视场角(Field of View); $VA$ (Viewing Angle)为观察角度。

2.1 参量取值对三维地图几何信息提取的影响实验

来自北京师范大学的 40 名学生参加了本实验,实验共 4 组,在保证每组 10 人(男性 5 人,女性 5 人)的前提下,对被试随机分配一组任务。所有被试均不存在对实验中所涉及的各种变量的识别问题。同时,配戴眼镜的被试镜片均符合实验要求。

围绕视觉参量取值对三维地图基本几何信息

(包括垂直方向、水平方向、角度及形状信息)感知的影响,本文共设计了 G1-G4 4 组实验,实验环境分别为  $V_{G1} = \{46^\circ, 45^\circ\}$ ,  $V_{G2} = \{46^\circ, 63^\circ\}$ ,  $V_{G3} = \{55.66^\circ, 45^\circ\}$ ,  $V_{G4} = \{55.66^\circ, 63^\circ\}$ ,每组包括 T1-T4 4 个不同任务,任务要求详见表 1,每个被试仅完成一组实验。实验场景如图 1 所示。所有场景中指定建筑物(即 T4 中标蓝色的建筑物)在屏幕上的位置固定,且视点距该建筑物底部的距离固定,均为 55 m。每个任务前有一与其要求相同、场景不同的练习,保证被试熟悉实验环境、理解任务要求。

由于视场角和观察角度的不同取值可能会对认知产生交互作用<sup>[22]</sup>,故本实验采用双变量实验设计方法,使视场角与观察角度的取值两两组合,避免视场角与观察角度的组合影响。

(1)实验材料

地图实验材料由 OSM(Open Street Map)提供的美国纽约三维城市模型数据,该场景细节度较高、数据完整、城市建筑尺寸与密度适中,且被试均不熟悉,符合实验要求。

在 Google Sketchup Pro 8.0 中进行编辑,改变参量取值,并增加了 3 个与原模型中某建筑物(即 T4

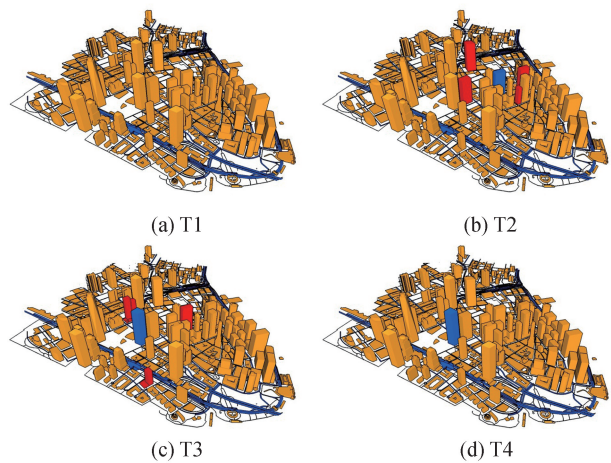


图 1 三维地图实验场景

Fig. 1 Experiment materials in 3D scenarios

表 1 实验任务

Tab. 1 Tasks

| 任务编号 | 任务要求   | 测试内容     |
|------|--|----------|
| T1   | 在红色建筑物中找出与蓝色建筑物高差最大的一个,并用鼠标点击                  | 垂直方向信息感知 |
| T2   | 在红色建筑物中找出与蓝色建筑物距离最远的一个,并用鼠标点击                  | 水平方向信息感知 |
| T3   | 在红色建筑物中找出与蓝色建筑物仰角(两建筑最高点连线与水平面的夹角)最大的一个,并用鼠标点击 | 角度信息感知   |
| T4   | 在所有橙色建筑物中找到 3 个与蓝色建筑物完全相同的建筑物,并依次点击            | 形状信息感知   |

中标蓝色的建筑物)完全相同的建筑物,以满足T4任务要求。

(2)实验设备

采用 Tobii 眼动跟踪仪(屏幕分辨率为 1280×1024,17 英寸 TFT 显示器,采样频率为 120 HZ)来记录被试的眼动信息,相应的软件 Tobii Studio 3.2 安装在联想一体机中。所有被试均在北京师范大学同一实验室同一设备中独立进行。

2.2 三维地图视觉信息提取结果分析

本研究在注视点个数、注视时长、首注视点时长等基本眼动参量基础上,构建三维地图有效性(频数、准确率、正确数)和效率(完成时间、首注视前时间)2个指标,评价视场角与观察角度2个环境视觉参量对三维地图视觉信息提取效果的影响,详见表2。

进行 Kolmogorov-Smirnov 检验以确定各指标是否符合正态分布,并比较不同实验水平下方差是否相等,若符合以上条件,则进行双尾 t 检验(统计量以  $t$  表示),若不符合,则进行 Mann-Whitney U 检验(统计量以  $u$  表示),以确定各组间均值差异是否显著(以下分析省略“均值”,简称“显著/不显著”)。若差异边缘显著( $p<0.10$ ),则该视觉参量对认知过程有一定影响,若差异显著( $p<0.05$ ),则该视觉参量对认知过程影响显著。为了避免极端情况的影响,在进行检验时,采用箱型图剔除极端值。各任务中各变量的均值和方差详见图2-5。

(1)T1 分析

针对 T1 中,视场角与观察角度对垂直方向信息提取的影响问题,本文通过3个指标来衡量有效

性,包括频数、准确率和正确数。实验结果表明(图2),该任务中不同视场角下的频数没有显著差异( $u=-0.449, p=0.659$ );准确率差异显著( $u=-2.303, p=0.049$ ), $FOV=46^\circ$ 时(0.138)明显高于 $FOV=55.66^\circ$ (0.023);正确数差异不显著( $u=-1.820, p=0.258$ )。与 $FOV=55.66^\circ$ 相比, $FOV=46^\circ$ 时,频数和正确数的差异不显著,但准确率明显较高,差异显著。总体来说, $FOV=46^\circ$ 时,地图有效性较高。效率通过2个指标来衡量:完成时间和首注视前时间。视场角不同,完成时间和首注视前时间的差异均不显著( $u=-0.027, p=0.989; u=-0.722, p=0.583$ )。改变视场角,效率差异不显著。视场角的变化对感知垂直方向信息的有效性有影响,当 $FOV=46^\circ$ 时,地图垂直方向信息提取的有效性更好;但对其效率无显著影响。

使用同样的指标判断观察角度,对垂直方向信息感知的影响,2组之间所有指标都不显著,观察角度的不同(至少在 $45^\circ$ 、 $63^\circ$ 时)对垂直方向信息的感知没有显著影响。

表2 分析指标及含义

Tab 2 Analysis indices and their interpretations

| 指标  | 含义                    |
|-----|-----------------------|
| 有效性 | 频数(个)                 |
|     | 任务中的注视点总数             |
|     | 准确率                   |
| 效率  | 正确数(个)                |
|     | 所有被试个体找到目标建筑物个数的平均值   |
|     | 完成时间(s)               |
|     | 首注视前时间(s)             |
|     | 从任务开始到首次注视目标建筑物所需要的时间 |

注:AOI即兴趣区,在本实验中指目标建筑物

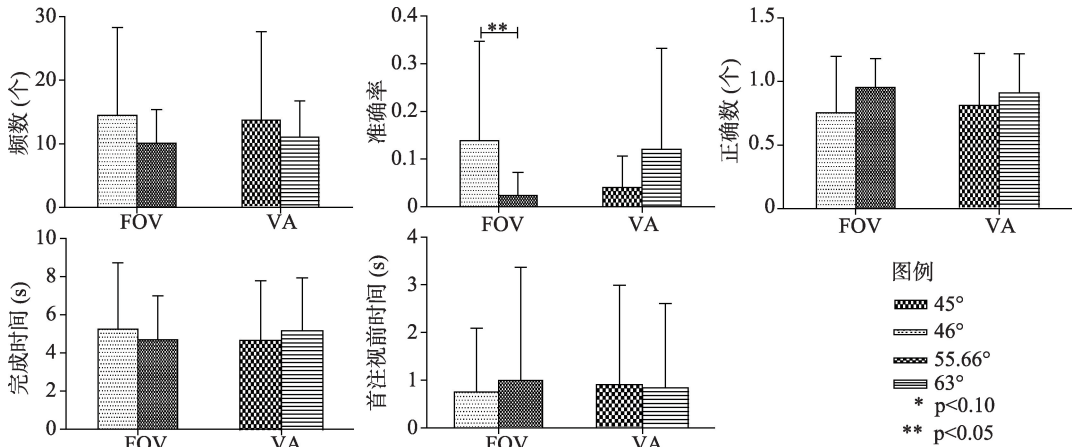


图2 T1分析指标均值、方差、显著性图

Fig. 2 Means, SD, and Sigs of indices for T1



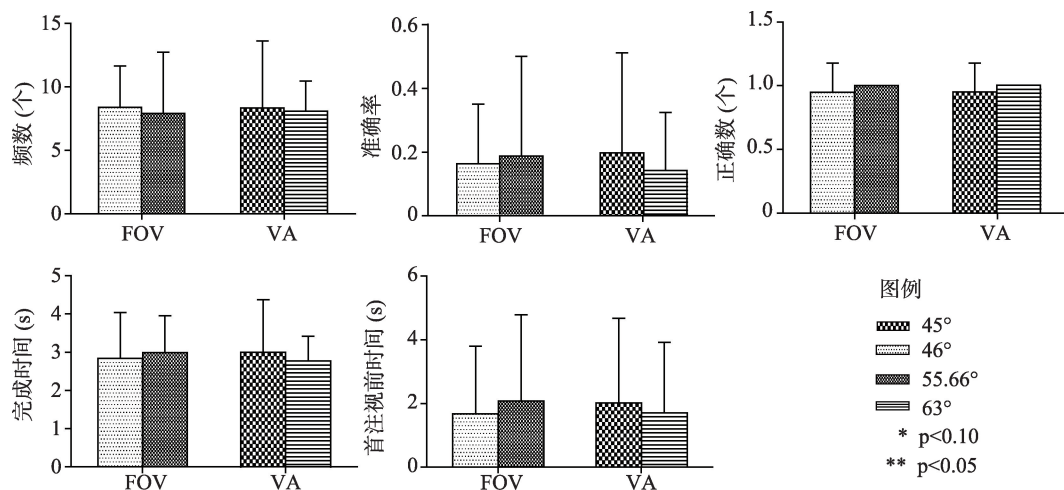


图3 T2分析指标均值、方差、显著性图

Fig. 3 Means, SD, and Sigs of indices for T2

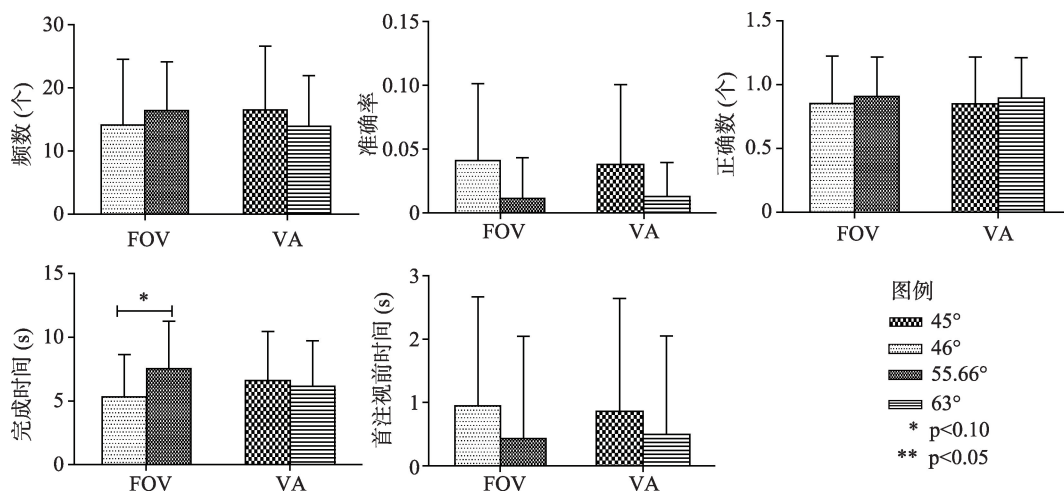


图4 T3分析指标均值、方差、显著性图

Fig. 4 Means, SD, and Sigs of indices for T3

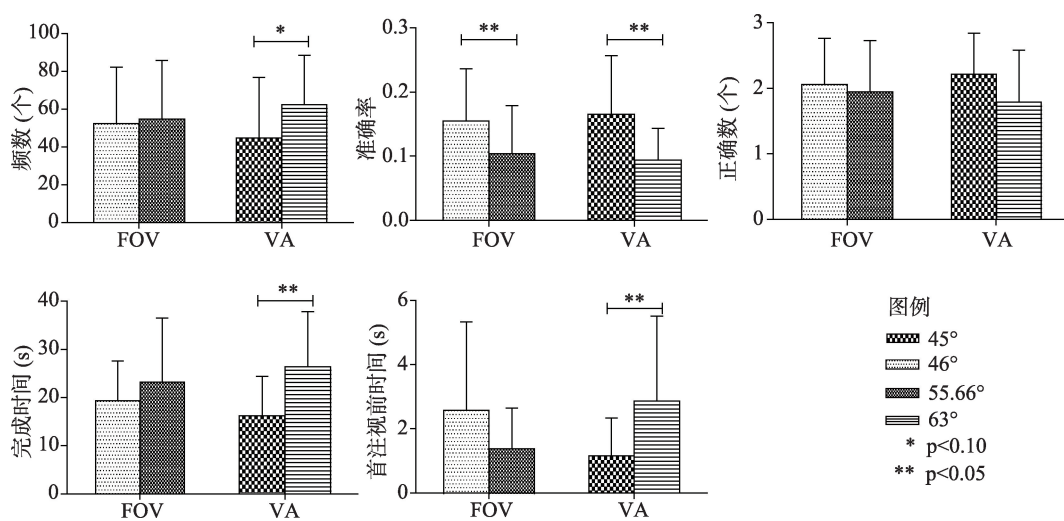


图5 T4分析指标均值、方差、显著性图

Fig. 5 Means, SD, and Sigs of indices for T4



## (2) T2 分析

针对 T2 中视场角和观察角度的取值变化对地图水平方向信息提取影响的问题,实验结果(图 3)表明,改变视场角或观察角度,  $t$  检验或 M-W 检验的  $p$  均大于 0.10, 所有分析指标的差异都不显著, 视场角和观察角度的取值变化, 对地图水平方向信息提取的有效性或效率均没有显著影响。

## (3) T3 分析

T3 研究了视场角或观察角度取值, 对三维地图角度信息提取的影响, 实验表明(图 4), 视场角改变时, 任务的完成时间差异边缘显著 ( $u=-1.798, p=0.074$ ), 在  $FOV=46^\circ$  时, 完成时间 (5.238 s) 较  $FOV=55.66^\circ$  (7.484 s) 短, 其他指标差异不显著。改变视场角对角度信息提取的效率有一定影响, 但对其有效性没有影响。

观察角度变化时,  $t$  检验或 M-W 检验结果均大于 0.10, 即置信度均小于 0.90。地图角度信息提取的有效性或效率均没有明显变化。

## (4) T4 分析

T4 研究了视场角或观察角度取值, 对三维地图中形状信息提取的影响, 实验表明(图 5), 改变视场角时, 准确率 ( $u=-2.307, p=0.020$ ) 差异显著,  $FOV=46^\circ$  时准确率 (0.155) 高于  $FOV=55.66^\circ$  时 (0.104)。在效率指标中,  $t$  检验或 M-W 检验的结果均大于 0.10。故视场角对形状认知的有效性有显著影响, 对其效率无影响。

当改变观察角度时, 2 组频数有差异, 差异边缘显著 ( $t=-1.868, p=0.070$ ),  $VA=45^\circ$  时频数 (44.737) 小于  $VA=63^\circ$  (62.421); 准确率的差异显著, 当  $VA=45^\circ$  时, 建筑物注视比率 (0.165) 显著高于  $VA=63^\circ$  (0.094,  $u=-2.409, p=0.015$ ), 准确率明显较高。正确数差异不显著。与  $VA=63^\circ$  相比,  $VA=45^\circ$  时, 频数较少, 差异边缘显著, 正确数没有显著差异, 而准确率明显较高, 在形状的认知中,  $VA=45^\circ$  较  $VA=63^\circ$  更能吸引被试将注意力集中在目标建筑物, 对地图信息呈现更有效, 因此, 该角度更为合适, 有效性更好, 观察角度的改变对形状信息提取的有效性有影响。就效率来说, 完成时间的差异显著 ( $u=-2.788, p=0.005$ ),  $VA=45^\circ$  时完成时间 (16.102 s) 明显小于  $VA=63^\circ$  时 (26.313 s)。  $VA=45^\circ$  时, 首注视前时间 (1.146 s) 明显小于  $VA=63^\circ$  时 (2.867 s,  $u=-2.191, p=0.027$ )。与  $VA=63^\circ$  时相比,  $VA=45^\circ$  时, 完成时间和首注视前时间均较短, 此时目标建筑物对被试的吸引较快, 且一旦找到建筑物, 任务完成时间很短, 说

明信息识别速度较快。实验表明, 观察角度的改变对形状信息认知效率有明显的影响, 且  $VA=45^\circ$  时用户对目标三维信息的认知速度更快、准确度更高。

综上所述, 改变视场角对垂直方向信息和实体形状信息提取影响显著, 对角度信息提取的影响边缘显著, 而对水平方向信息的提取影响不显著。视场角的改变影响了视野范围, 对实体在屏幕上的位置, 以及实体的形变程度有较大影响。一定的视场角下, 不同位置、不同形状的实体形变程度相差较大, 不同视场角下形变程度不同。由于水平方向信息的提取是传统二维地图的常见任务, 用户练习较多, 因此受视场角改变的影响较小。而垂直方向信息依赖于垂直信息的提取, 受视场角改变的影响较大。在判断角度或实体形状时, 用户需利用多种信息, 这时高程和水平信息间可能会产生交互影响, 因此, 视场角对实体形状信息提取的影响显著, 对角度信息提取的影响边缘显著。

改变观察角度时, 用户对三维场景中垂直方向信息、水平方向信息, 以及角度信息的认知没有明显变化, 但明显影响实体形状信息的提取。在实验中, 由于建筑物已指定, 不存在对其位置的认知问题, 并且由于改变观察角度不会引起三维场景的明显形变, 因此, 对空间距离 (水平、垂直距离) 判断的影响较小, 对角度判断的影响也较小。但观察角度的改变影响了实体之间的相互遮挡情况, 对实体呈现的形状影响较大, 所以, 在综合水平与垂直信息判断相同形状建筑物时, 不同的观察角度之间结果有显著差异。观察角度较大时, 三维场景与用户日常的行人观察角度差异较大, 用户感知较陌生, 效率较低; 并且较大的观察角度使单个实体所呈现的面积减小, 更接近二维地图, 有效性也较低, 观察角度适中 ( $45^\circ$  左右) 时地图的信息提取效果更好, 这与 Haerbing 利用专家咨询法得出的结论一致<sup>[8]</sup>。

## 3 结论与讨论

本研究讨论了环境视觉参量对三维地图视觉信息提取的影响, 所得到的视觉参量的认知规律可用于三维地图的设计, 有助于三维地图设计理论的建立, 使三维地图的设计更加人性化, 并提高其可用性。同时, 能缩短用户的认知时间, 增加单位时间内有效信息的获取量, 便于用户在三维地图中获得所需信息, 提高地图的有效性与效率, 这在定位、

导航等过程中,尤其是紧急情况下的救援导航中具有重要意义。该研究可用于三维地图适人化设计,提高人机间信息交换效率,或为三维地图符号系统的建立提供理论依据,促进三维GIS设计的标准化。另外,通过研究三维地图符号视觉参量对用户基本几何信息认知的影响,进而研究各参量对三维地图有效性与效率的影响,其结果不再局限于简单的参量组合。

但是,三维地图中其他环境视觉参量(如视距<sup>[12]</sup>、光照、背景色、模糊度<sup>[11]</sup>等),也影响信息提取的效果。本研究为确保所有建筑物的细节清晰可识别,而未考虑其影响,保证了不同场景中固定点的视距恒定,光照方向、背景色等均为系统默认值。为全面了解环境视觉参量对信息提取的影响,今后的工作中需对上述参量做进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] Bertin J. Graphics and graphic information processing [M]. Berlin: Walter de Gruyter, 1981.
- [2] Wolfe J M, Horowitz T S. What attributes guide the deployment of visual attention and how do they do it?[J]. Nature Reviews Neuroscience, 2004,5(6):495-501.
- [3] Quinlan P T, Humphreys G W. Visual search for targets defined by combinations of color, shape, and size: An examination of the task constraints on feature and conjunction searches[J]. Perception & psychophysics, 1987,41(5): 455-472.
- [4] 许伟.地理空间数据图形符号标准研究[D].上海:华东师范大学,2008.
- [5] 王均,王红,陈向东.数字制图中地图符号的标准化研究[J].地球信息科学,2003,5(2):16-19.
- [6] 杨乃,孔凡秋,杨鸿海,等.基于空间认知的三维地图光影模型[J].测绘学报,2012,41(2):302-308.
- [7] Häberling C. 3D Map Presentation – A Systematic Evaluation of Important Graphic Aspects[C]. Proceedings of ICA Mountain Cartography Workshop" Mount Hood, 2002.
- [8] Häberling C. Cartographic design principles for 3D maps——A contribution to cartographic theory[C]. 22<sup>nd</sup> International Cartographic Conference, Caruña, Spain, 2005.
- [9] 齐清文,姜莉莉,张岸.数字地图的研究进展和应用新方向[J].地球信息科学学报,2011,13(6):727-734.
- [10] Schmidt M A R, Delazari L S. Gestalt aspects for differentiating the representation of landmarks in virtual navigation[J]. Cartography and Geographic Information Science, 2013,40(3):159-164.
- [11] Häberling C, Bär H, Hurni L. Proposed cartographic design principles for 3D maps: a contribution to an extended cartographic theory[J]. Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization, 2008,43(3):175-188.
- [12] 徐智勇,艾廷华,危拥军,等.三维地图符号视觉参量研究[J].武汉大学学报:信息科学版,2006,31(6):557-560.
- [13] Matatko A, Bollmann J, Müller A. Depth Perception in Virtual Reality[A]. In: Advances in 3D Geo-Information Sciences[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2011: 115-129.
- [14] Carvalho L. Evaluation of 2D and 3D map presentations for geo-visualization[D]. Sweden: University of Gävle, 2011.
- [15] 韩玉昌.眼动仪和眼动实验法的发展历程[J].心理科学, 2000,23(4):454-457.
- [16] Popelka S, Brychtova A. Eye-tracking study on different perception of 2D and 3D terrain visualisation[J]. The Cartographic Journal, 2013,50(3):240-246.
- [17] 邓毅博,王雨生,王俊超,等.地图图例位置的眼动实验研究[J].测绘与空间地理信息,2012,(10):201-204.
- [18] Dong W, Liao H, Roth R E, *et al.* Eye tracking to explore the potential of enhanced imagery basemaps in web mapping[J]. The Cartographic Journal, 2014,51(4):313-329.
- [19] Dong W, Liao H, Xu F, *et al.* Using eye tracking to evaluate the usability of animated maps[J]. Science China: Earth Sciences, 2014,57(3):512-522.
- [20] 朱甲点.广角镜头的发展,特征,应用面面观[J].照相机, 1999(2):4-5.
- [21] 程德喜,老吴,穆云泊.F2.8的恒定光圈与出色的成像质量充满魅力的EF“大三元”镜头[J].人像摄影,2013(3): 196-203.
- [22] 杨治良.实验心理学[M].杭州:浙江教育出版社,1998.

## The Influence of FOV and Viewing Angle on the Visual Information Processing of 3D Maps

LIU Bing, DONG Weihua\*, WANG Yanwen and ZHANG Ningxu

(1. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, BNU, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Current studies of map symbols mainly concentrate on the basic visual variables such as color, shape and size, which are commonly used in two dimensional maps. Recent technical advances and the ubiquitous use of smart devices have made three-dimensional (3D) maps (e.g., Google Maps and AutoNavi) increasingly popular. However, 3D visual variables, such as field of view (FOV) and viewing angle (VA) which play fundamental roles in visual information processing of 3D maps and spatial scenes, have been rarely investigated. This paper leverages eye tracking technology to explore the influence of such 3D visual variables on the interpretation of vertical, horizontal, angle and shape information in 3D maps. Specifically, we have recorded forty participants' eye movements in four tasks by varying the FOV and VA values. Participants' performances were analyzed by the quantitative metrics of effectiveness and efficiency. Statistical tests (two-tailed t-tests or Mann-Whitney U tests) were applied to each metric to test the significance of differences between two groups. Results show that FOV can significantly affect not only the effectiveness of interpreting the vertical and shape information perception, but also the efficiency of interpreting the angular information. Meanwhile, FOV has no significant influence on the efficiency of interpreting the vertical and shape information, the effectiveness and the efficiency of interpreting the horizontal information, and the effectiveness of interpreting the angular information of 3D maps. VA has no significant influence on the perception of horizontal, vertical or angular information. But it affects the perception of shape significantly. Furthermore, FOV and VA have interactive effects resulting in the difference of interpreting the angular and shape information giving the marginal significance. The results can provide implications to design 3D maps with higher usability and can be applied to improve the user interaction in 3D environments.

**Key words:** 3D map; FOV; viewing angle; eye-tracking

\*Corresponding author: DONG Weihua, E-mail: dongweihua@bnu.edu.cn