

# 序列本体感觉学习获得稳定的自我中心空间表征\*

肖承丽

(南京大学社会学院心理学系, 南京 210023)

**摘要** 通过同步视觉或者序列本体感觉, 被试学习不规则场景。学习完毕之后, 在面对学习方向、自主旋转 240°、和持续旋转直至迷向 3 种运动条件下, 被试随机指出各个物体的位置。迷向导致同步视觉学习组指向的内部一致性显著变差, 而序列本体感觉学习组不受迷向影响。离线的相对位置判断任务表明两组被试的环境中心空间表征没有差异。这证明通过序列本体感觉学习被试也可以形成稳定的自我中心空间表征, 支持了空间快照理论的扩展和空间认知的功能等价假说。

**关键词** 自我中心; 本体感觉; 迷向; 空间快照; 功能等价

**分类号** B842

## 1 引言

对生活在三维空间中的个体而言, 表征周围环境物体相对于自己的空间关系至关重要。顺利地到达目的地, 绕过障碍物, 从办公桌上拿到文件……种种行为都需要自我中心(egocentric)空间关系的表征与及时更新。传统观点认为, 自我中心的表征是为行为服务, 受感知觉支持, 一旦失去感知觉支持, 自我中心空间表征便无法维持(Avraamides & Kelly, 2008; Burgess, 2006; Easton & Sholl, 1995)。存储在我们记忆之中的更为稳定的表征是环境中心的(alloentric), 在这个表征框架中, 物体的位置相对于环境中的其他物体或环境中的方向(东南西北、房间结构等)表征, 这一观点得到了大量研究结果的支持(如, McNamara, Rump, & Werner, 2003; Mou, McNamara, Valiquette, & Rump, 2004; Roskos-Ewoldsen, McNamara, Shelton, & Carr, 1998; Shelton & McNamara, 2001)。

但是, 在记忆中保持某些自我中心的表征是非常有必要的, 比如, 一位熟练的驾驶员需要不用低头看, 便能顺利摸到档杆、踩到刹车踏板。新近的理论也认为, 存储在记忆中的表征并非只是环境中心的, 也可能是自我中心的(Waller & Hodgson,

2006; Wang, 2012)。Wang (2012)明确假设, 存在一种自我中心的空间快照(snapshot), 它可以表征在某一特定时刻从观察者角度知觉到的周围环境, 在之后的空间活动中, 观察者可以随时提取该表征, 通过将当前位置朝向与存储时的位置朝向进行匹配(alignment)来获得当前的自我中心空间关系。因此, 这个新表征的获得与有无感觉支持无关。反之, 如果自我中心空间表征仅存在于感知觉层面, 那么, 要维持该表征, 必须有不间断的感知觉输入信号支持。在获得初始表征之后, 被试需要随时根据感知觉输入信号不断更新该表征, 一旦感知觉输入被中断(如观察者迷向), 那么该表征被破坏。Wang 认为, 这种持续的和短暂的表征, 可以通过结构误差范式(the configuration error paradigm)来进行检验(Wang & Spelke, 2000)。

在一个典型的结构误差范式中, 被试首先学习环境中的若干物体, 然后戴上眼罩, 转动一个较小的角度(更新条件), 或者持续转动直至迷向(迷向条件)。在两种条件下, 被试分别指出各个物体的位置。在每种条件下, 计算指向各个物体的角度误差在物体间的标准差。如果被试能够准确表征各物体的位置, 那么指向各物体的角度误差为 0°, 这些角度误差的标准差也为 0°。如果被试不清楚自己当前

收稿日期: 2012-12-21

\* 国家自然科学基金委员会青年科学基金项目资助(31000457)。

通讯作者: 肖承丽, E-mail: xiaocli@nju.edu.cn

的位置朝向(比如主观朝向与真实朝向相差 $-80^\circ$ ),但是表征保证了物体间相对关系的稳定,那么指向各物体的角度误差会系统偏移(比如指向各物体的角度误差均为 $-80^\circ$ ),但结构误差仍然为 $0^\circ$ 。如果物体间相对关系的表征不清晰,那么被试指向各物体的角度误差不是系统偏移而是独立变化,那么结构误差就会大于 $0^\circ$ 。物体间相对关系表征越不清晰,结构误差越大。对于需要感知觉支持的短暂自我中心表征来说,每一个物体的位置都相对于自我来表征,一旦被试运动,需要实时独立计算每一个新的物体-自我关系,由于计算是一个误差不断累积的过程,因此,物体间的相对关系会随着空间更新越来越差,如果一旦迷向,物体-自我空间关系受到破坏,物体间的相对关系会进一步变差,反映在结构误差上,就是迷向后的结构误差比迷向前显著增大(即出现迷向效应)。这一假设得到了大量研究数据的支持(Mou, McNamara, Rump, & Xiao, 2006; Sargent, Dopkins, Philbeck, & Chichka, 2010; Sargent, Dopkins, Philbeck, & Modarres, 2008; Waller & Hodgson, 2006; Wang & Spelke, 2000; Xiao, Mou, & McNamara, 2009)。反观稳定的自我中心空间快照表征,因为新的表征可以从初始表征直接计算所得,因此,空间更新不会导致误差累积,迷向也不会影响表征的提取和计算,反映在结构误差上,就是迷向前后的结构误差不变(即没有迷向效应)。

尽管 Wang 关于稳定自我中心空间快照的假设在理论上非常完备,但是支持的实验数据很少。研究的难点在于存在两种稳定的空间表征。除了稳定的自我中心空间表征之外,环境中心空间表征同样预测迷向前后结构误差不变(Wang, 2012; Wang & Spelke, 2000, 2002)。环境中心表征通常被比喻成一张地图,在这张地图上表征了物体间的相对位置关系,这些关系不受表征持有者自身位置的影响,因此,迷向同样不会影响结构误差。通过一次向被试呈现一个物体,限制被试只能看到自我中心而非环境中心表征, Xiao 和 Chen (2012)证明了稳定的自我中心空间快照的存在。在该研究中,被试站在一个不规则场景中间,场景中的各物体全部或依次随机呈现给被试,学习结束后,两组被试均完成结构误

差范式的测试。在完成基线测试之后,两组中各有一半被试被要求在更新时使用环境中心表征(如,“请一边转一边保持物体相对于其他物体的空间关系”)。之后,两组被试均到另外一个房间完成相对位置判断测试(Judgment of Relevant Direction, JRD)。JRD 测试要求被试“想象你站在 A, 面对 B, 请指向 C”, 它测查的是被试的环境中心知识(如, Roskos-Ewoldsen et al., 1998; Shelton & McNamara, 2001; Waller & Hodgson, 2006)。结果发现,两组被试的 JRD 任务成绩没有区别,但是序列视觉组没有迷向效应,而同步视觉组有迷向效应,并且结果不受环境中心指导语的影响。这说明两组被试的环境中心知识没有差异,但序列视觉组获得了稳定的自我中心表征,而同步视觉组获得的是不稳定的自我中心表征。

自我中心空间快照概念的提出起源于视觉研究(Diwadkar & McNamara, 1997; Shelton & McNamara, 1997), Wang 和 Spelke (2000, 2002)早期的理论认为自我中心空间快照就像人们拍照片一样在长时记忆中存储下了周围环境的图片,在随后的场景识别过程中,人们提取出这张快照,将测试场景与快照进行匹配。反映在行为数据上就是从快照视点方向来识别场景比从其他方向识别更快更准确。但是 Wang (2012)在新近的理论中对此进行了拓展,她认为这种稳定的自我中心空间表征应该不仅仅局限于视觉,通过其他任何一种感觉通道都可以获得。这种想法与功能等价假说(the functional equivalence hypothesis, e.g., Loomis, Klatzky, Avraamides, Lippa, & Golledge, 2007)一致。功能等价假说认为,通过不同感觉通道获得的空间表征在功能上是相同的。尽管视觉是我们获得空间表征的最主要途径,但是通过听觉、触觉、本体感觉(proprioception)<sup>1</sup>等通道,同样能够得到在功能上与通过视觉获得的空间表征相似的表征。比如,通过触觉(Giudice, Betty, & Loomis, 2011; Newell, Woods, Mernagh, & Bühlhoff, 2005)、听觉定位(Yamamoto & Shelton, 2009)、本体感觉(Yamamoto & Shelton, 2005, 2007)获得的表征与通过视觉(Greenauer & Waller, 2008; Mou & McNamara, 2002; Shelton & McNamara, 2001)获得的表征在空间参考

<sup>1</sup> 本体感觉学习指的是戴上眼罩的被试通过在环境中运动来获得空间表征。在这种学习条件下,被试的空间知识来源于本体感觉(如,躯体运动引起的肌肉、肌腱、关节和皮肤的感觉信号)和前庭觉(加减速、旋转),以及传出指令的副本(efference copy, 由中枢神经系统向躯体发出的运动指令)(Waller & Greenauer, 2007; Waller, Loomis, & Haun, 2004; Yamamoto & Shelton, 2007)。

框架上性质相同, 均为朝向依赖 (orientation dependent)。通过本体感觉 (Wang, 2004) 或触觉 (Giudice et al., 2011) 获得的表征也可以像视觉表征 (Waller, Montello, Richardson, & Hegarty, 2002) 那样随着观察者的运动被自动更新。但是, 在检验自我中心表征的稳定性方面, 目前的研究均局限于视觉 (Holmes & Sholl, 2005; Mou et al., 2006; Sargent et al., 2010; Sargent et al., 2008; Waller & Hodgson, 2006; Wang & Spelke, 2000; Xiao et al., 2009), 通过其他感觉通道是否能够建立稳定的自我中心空间表征还有待研究。

从本质上来说, 无论视觉、听觉还是本体感觉, 最初获得的空间表征都是自我中心的, 由于受到传统理论的限制, 以往的空间表征研究主要集中在考察不同通道学习的被试是否能够建立稳定的环境中心空间表征, 研究范式均为让被试完成离线的 JRD 测试。已有的研究表明, 听觉、本体感觉学习后的被试均可以完成 JRD 测试, 但听觉组的成绩差于视觉组 (Yamamoto & Shelton, 2009)。本体感觉组的成绩则受被试空间运动的路径影响, 如果学习路径是从一个物体走到下一个物体, 本体感觉组的 JRD 成绩与视觉组相当 (Yamamoto & Shelton, 2005), 但是如果学习不存在联通物体间的路径, 被从一个固定学习位置随机走到各个物体位置, 本体感觉组的 JRD 成绩明显差于视觉组 (Yamamoto & Shelton, 2007)。由于 JRD 测试考察的是被试的环境中心知识, 因此, 很有可能被试可以通过听觉或本体感觉学习建立稳定的自我中心空间表征, 由于测量方法的问题, 以往的研究无法发现。但另一方面, 也有可能由于通过听觉和本体感觉获得的表征在精确度上差于视觉, 被试无法根据不精确的空间表征来建立稳定的自我中心空间表征, Wang (2012) 提出的自我中心空间快照或许仅能通过视觉通道获得。

本研究将采用本体感觉学习, 研究被试是否可以形成稳定的自我中心空间表征, 以检验 Wang (2012) 对自我中心空间快照的扩展是否正确, 以及功能等价假说在稳定的自我中心空间表征上是否成立。研究方法与 Xiao 和 Chen (2012) 类似, 被试站在不规则场景内学习物体位置。一半被试通过本体感觉序列学习物体位置, 另一半被试视觉同步学习物体位置。在本体感觉学习组中, 主试引领戴眼罩的被试从学习位置出发, 直线走到物体所在位置, 返回学习位置后再次前往下一个物体的位置。在这种学习方法下, 被试只能直接获得物体-自我空间

关系, 无法直接获得物体间的空间关系, 这样的学习方法保证了被试能够建立自我中心空间表征, 无法形成环境中心空间表征 (Foo, Warren, Duchon, & Tarr, 2005)。学习之后, 被试完成结构误差范式测试和离线的 JRD 任务。根据功能等价假说和 Wang (2012) 的理论, 序列本体感觉学习将获得与序列视觉学习类似的稳定的自我中心空间表征, 不会出现迷向效应。而同步视觉学习组将出现迷向效应 (Xiao & Chen, 2012; Xiao et al., 2009)。考虑到序列本体感觉学习组无法直接知觉到环境中的任何其他物体, 而同步视觉组可以看到相邻物体间的空间关系, 我们预测同步视觉组在 JRD 任务上表现更好。

## 2 方法

### 2.1 被试

自愿参加实验的 32 名在校大学本科生和研究生 (16 男 16 女), 年龄 19~26 岁, 视力或矫正视力正常。实验后获得一定的报酬。

### 2.2 实验材料

学习场景为 Xiao 和 Chen (2012) 和 Xiao 等 (2009) 研究中使用的不规则场景, 如图 1 所示。在一个直径 3 m 的圆形黑色围帘内, 9 个常见物体摆放在灰色的地毯上。围帘从天花板一直垂到地面, 地毯没有明显花纹朝向。选择的物体外形差异显著, 大小相当 (边长约 0.3 m), 没有明显的语义联系。剪刀-学习位置-蜡烛和剪刀-学习位置-小球的角度均为  $120^\circ$ 。

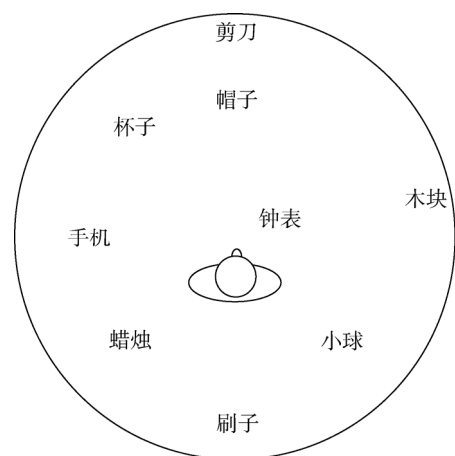


图 1 实验场景示意图

结构误差范式的测试为直接指向任务, 每一个试次 (trial) 包含语音提示“开始”和指令 (如, “请指向蜡烛”)。JRD 任务的每一个试次由两部分组成: 想

象朝向指令(如,“想象你站在杯子,面对小球”)和物体指向指令(如,“请指向剪刀”)。实验指令通过电脑发送至无线耳机,被试的反应数据通过游戏杆收集。

### 2.3 实验设计

一半的被试同步视觉学习场景,一半的被试序列本体感觉学习场景。学习完毕之后,所有的被试首先完成结构误差范式测试,然后到另外一个房间完成 JRD 任务。

结构误差范式包括 3 种运动条件后的测试:在基线条件,被试戴上眼罩,保持学习朝向不变;在更新后条件,被试向左/右原地转动 240°,正对小球/蜡烛;在迷向后条件,被试向左/右原地转动直到迷向,然后自己转动到认为自己正对着蜡烛/小球。在完成基线测试后,转动到新朝向之前,两组各有一半被试接受更新环境中心表征的指导语。更新后和迷向后的朝向,以及是否接受更新环境中心表征的指导语,在男女被试间进行平衡。在每种运动条件下,被试随机指所有的 9 个物体 4 遍。同 Xiao 和 Chen (2012)和 Xiao 等(2009)一致,实验的因变量为(公式见表 1):(1)指向误差(signed pointing error),定义为被试指向物体的角度与物体实际角度之差;(2)指向反应时(pointing latency),定义为物体指向指令结束后到扳动游戏杆指向物体之间的时间延迟;(3)朝向误差(heading error),定义为指向每个物体的平均误差在各物体间的平均值,由于在各个运动条件下被试均有明确的想象朝向,因此各条件的朝向误差均较小(Mou et al., 2006);(4)结构误差(configuration error),定义为指向每个物体的平均误差在各物体间的标准差,这是检验表征是稳定还是短暂的关键变量,如果被试使用的是短暂的自我中心表征,那么结构误差将在迷向后显著增大,如果使用的是稳定的表征,那么结构误差在迷向前后保持不变;(5)指向变异(pointing variability),定义为指向每个物体的方差的平均值的平方根,反映的是被试指向动作的准确性。由于指向误差是以 360°为周期的,循环统计方法(circular statistics)被用来计算朝向误差、结构误差和指向变异(Jammalamadaka & SenGupta, 2001)。

JRD 测试包含 8 个想象朝向,每个想象朝向 6 个试次,总共 48 个试次。学习方向定义为 0°,其余朝向以逆时针顺序排列。通过改变想象站立的物体位置和面对的物体位置,形成 0°到 315°以 45°为间隔的 8 个想象朝向。由于场景不规则,物体间连线

方向完全与想象朝向平行的情况很少,因此,两个物体的连线方向与想象朝向相差 $\pm 15^\circ$ 以内,即可被归类为该想象朝向(如,站在蜡烛面对杯子的实际想象朝向是 1.56°,在本研究中被归类为 0°的想象朝向)。将指向方向(目标物体同想象朝向的夹角)分成 3 类:前方( $45^\circ \sim 0^\circ$ 和  $0^\circ \sim 315^\circ$ ),侧方( $315^\circ \sim 225^\circ$ 和  $135^\circ \sim 45^\circ$ ,不包含端点),后方( $135^\circ \sim 225^\circ$ )。试次的选择规则如下:(1)每个想象朝向有 4 对站立物体和面对物体;(2)每个物体作为站立物体、面对物体和指向物体的次数大致相等;(3)在每个想象朝向内,被试指向前方、侧方和后方的次数大致相等。因变量为指向的绝对角度误差和反应时。绝对角度误差为被试指向方向与目标物体实际所在方向之差的绝对值。指向反应时为目标物体指向指令结束后到扳动游戏杆指向物体之间的时间延迟。

表 1 结构误差范式中的因变量及其计算公式

变量	公式
第 $i$ 个物体第 $j$ 次指向的指向误差	$e_{ij} = \text{判断方向} - \text{实际方向}$
第 $i$ 个物体的平均指向误差	$\bar{e}_i = \frac{\sum_j e_{ij}}{T}$
朝向误差	$\bar{e}_i = \frac{\sum_i \bar{e}_i}{N}$
结构误差	$\sqrt{\frac{\sum_i (\bar{e}_i - \bar{e}_i)^2}{N-1}}$
指向变异	$\sqrt{\frac{\sum_i \left( \frac{\sum_j (e_{ij} - \bar{e}_i)^2}{T-1} \right)}{N}}$

注: T = 指每个物体的次数; N = 目标物体的个数。

### 2.4 实验程序

在进入实验室之前,主试首先向被试讲解使用游戏杆的要点,然后被试练习使用游戏杆完成 JRD 测试和直接指向测试。之后,主试将测试场景中包含的各个物体依次随机呈现给被试,并告知正确的物体名称。然后,被试戴上眼罩,由主试带领进入实验室。站在学习位置面对剪刀方向(如图 1 所示)。

同步视觉学习组的被试摘下眼罩,学习物体的位置。学习过程中被试保持身体朝向不变,通过转动头部观察身体后面的物体位置。被试学习场景 30 秒,然后闭上眼睛说出物体的名字同时用手指物体的位置。

序列本体感觉学习组的被试不摘下眼罩,双手

平握一根棍子,在主试的引领下从学习位置出发,直线走到各个物体所在的位置。走动过程中主试会给出一些简单的行动指令(如,向前,后退,停),当到达物体所在位置后,主试喊停,并告诉被试现在站在哪个物体位置上,停留 3 秒钟之后直线返回学习位置,然后再走到下一个物体位置。走动过程保持身体朝向不变,物体学习顺序随机。所有物体学习一遍之后,被试站在学习位置说出各物体的名字同时用手指指出相应的位置。

在两种学习条件下,被试重复学习-指向过程直至他们能够连续两次准确流畅地指出所有的物体位置(主试通过观察被试的指向方向来判断准确性和流畅性)。每个被试达到标准所需要的学习次数被记录。

完成学习之后,所有的被试首先进行结构误差范式测试。所有的被试戴上眼罩和无线耳机,拿好游戏杆,保持正对学习方向,完成基线条件的测试。之后一半的被试接受更新环境中心表征的指导语(如“下面会让你转到新的方向再测一遍这些物体的位置,请你在转动时一边转一边想着物体相对于其他物体的位置”),另一半的被试没有这个指导语。然后被试向左/右原地转到正对着小球/蜡烛(如“请向左转到正对着小球”),完成更新后的物体指向测试。最后被试向左/右原地转动 1 分钟,停止转动后用手指指出蜡烛/小球的位置(如“请指出蜡烛的位置”),如果被试指向的方向与蜡烛/小球的实际方向的绝对角度误差小于  $90^\circ$ ,被试继续向左/右原地转动 1 分钟,停止后再次指出蜡烛/小球的位置,如此直到绝对角度误差大于  $90^\circ$ 。然后被试自己转动到正对着自己认为的蜡烛/小球方向(如“请向左转动到正对着蜡烛的方向”),完成迷向后的物体指向测试。

最后所有的被试被带到另外一个房间,休息片刻之后完成 JRD 测试。

### 3 结果与分析

#### 3.1 学习次数

由于主试错误,序列本体感觉学习组的一个被试的学习次数遗失。相对于同步视觉学习组( $M = 4.88, SD = 1.26$ ),序列本体感觉学习组( $M = 6.40, SD = 1.45$ )需要更多的学习次数,  $t(29) = 3.13, p < 0.01$ 。

#### 3.2 结构误差范式测试

用 SPSS 19 对因变量进行 2 (学习通道)  $\times$  2 (环境中心指导语)  $\times$  3 (运动条件)的重复测量 ANOVA,其中学习通道和环境中心指导语为被试间变量,结果发现环境中心指导语的主效应和交互作用均不显著。因此,后继的分析将该变量的两个水平合并。

由于结构误差是反映是否存在迷向效应的主要指标,与前人研究一致(Holmes & Sholl, 2005; Mou et al., 2006; Waller & Hodgson, 2006; Wang & Spelke, 2000; Xiao et al., 2009),本研究将详细报告对结构误差的分析。反应时、朝向误差和指向变异的均值和标准差详见表 2。其中,无论是同步视觉学习组还是序列本体感觉学习组,反应时和指向变异在更新后和迷向后均没有差异,说明被试在这两种运动条件下提取表征的时间和指向物体的动作的准确性没有发生变化。序列本体感觉学习组的朝向误差在迷向后和更新后没有显著差异,而同步视觉学习组的朝向误差迷向后显著增大,但是仍然未超过  $30^\circ$ ,说明被试是按照指导语要求想象自己面对蜡烛或者小球的。否则,被试更有可能想象自己面对学习朝向(Mou et al., 2006),这样的朝向误差将为  $120^\circ$ 左右。

对结构误差的 2 (学习通道)  $\times$  3 (运动条件)的重复测量 ANOVA 显示:运动条件的主效应显著,

表 2 被试在 3 种运动条件下的反应时、朝向误差和指向变异的平均值(标准差)

因变量	学习通道	运动条件			比较
		基线	更新后	迷向后	
反应时	同步视觉	1.38 (0.42)	2.28 (1.20)	2.63 (1.64)	B < U; B < D; U = D
	序列本体	1.36 (0.38)	3.01 (2.14)	2.66 (1.54)	B < U; B < D; U = D
朝向误差	同步视觉	4.93 (4.29)	16.32 (7.05)	29.90 (22.09)	B < U; B < D; U < D
	序列本体	6.01 (5.71)	16.44 (13.90)	24.52 (10.90)	B < U; B < D; U = D
指向变异	同步视觉	12.13 (3.30)	18.54 (6.89)	18.21 (5.71)	B < U; B < D; U = D
	序列本体	9.65 (3.82)	17.52 (6.84)	16.41 (6.73)	B < U; B < D; U = D

注:在比较一栏,“<”表示在.05 水平显著,“=”表示在.05 水平不显著。B = 基线; U = 更新后; D = 迷向后。反应时单位为秒,朝向误差和指向变异单位为度。

$F(2, 60) = 4.77, p < 0.05, MSE = 60.76$ ; 学习通道的主效应边缘显著,  $F(1, 30) = 3.99, p = 0.055, MSE = 26.97$ ; 二者的交互作用显著,  $F(2, 60) = 4.58, p < 0.05, MSE = 60.76$ 。如图 2 所示, 有 3 个主要的结果。首先, 同 Xiao 和 Chen (2012) 等一致, 同步视觉学习组出现了迷向效应, 计划的比较发现迷向后的结构误差显著大于更新后,  $F(1, 30) = 10.33, p < 0.005, MSE = 146.58$ , 说明被试使用的是短暂的自我中心空间表征。其次, 序列本体组没有出现迷向效应, 计划的比较发现迷向后与更新后的结构误差没有显著差异,  $F(1, 30) < 1$ , 这与 Xiao 和 Chen (2012) 的序列视觉学习结果一致, 证明了序列本体感觉同样能够建立稳定的自我中心空间表征。第三, 计划的比较发现, 同步视觉和序列本体组在基线和更新后的结构误差没有差异,  $F_s(1, 30) < 1$ , 但在迷向后, 同步视觉的结构误差显著大于序列本体组,  $F(1, 30) = 7.62, p < 0.01, MSE = 114.67$ 。

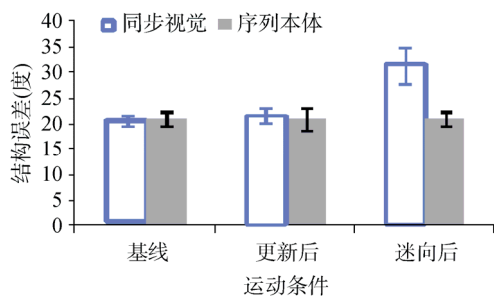


图 2 被试在基线、更新后、迷向后条件下的结构误差, 误差线为标准误

### 3.3 离线的 JRD 任务

用 SPSS 19 对因变量进行  $2$  (学习通道)  $\times 2$  (环境中心指导语)  $\times 8$  (想象朝向) 的重复测量 ANOVA, 其中学习通道和环境中心指导语为被试间变量, 结果发现环境中心指导语的主效应和交互作用均不显著。因此, 后继的分析将该变量的两个水平合并。

如图 3 所示, 对指向的绝对角度误差的 ANOVA 表明: 首先, 同步视觉学习组和序列本体感觉学习组的 JRD 成绩没有差异, 学习通道的主效应, 以及学习通道和想象朝向的交互作用均不显著,  $F_s = 1.41, p_s = 0.20$ , 说明两组被试建立的物体-物体空间表征相当。其次, 想象朝向的主效应显著,  $F(7, 210) = 3.98, p < 0.001, MSE = 181.23$ , 说明 JRD 成绩在各个想象朝向上有差别。无论是同步视觉学习组还是序列本体感觉学习组, 角度误差在各想象朝向上没有形成明显的锯齿模式 (the sawtooth

pattern, 即  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  的角度误差小于  $45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$ , e.g., Mou & McNamara, 2002),  $F_s(1, 30) < 1$ 。这很有可能是因为被试学习的是不规则场景, 所以无法建立正交的参考框架。同步视觉学习组在  $0^\circ$  和  $180^\circ$  的想象朝向表现优于其他想象朝向, 说明被试根据学习朝向建立了  $0^\circ-180^\circ$  的参考框架,  $F(1, 30) = 9.58, p < 0.005, MSE = 168.73$ 。但是, 序列本体感觉学习组并没有出现类似的学习方向的优势,  $0^\circ$  想象朝向的成绩与其他朝向没有显著差异,  $F(1, 30) < 1$ 。反应时的 ANOVA 分析结果与绝对角度误差的结果类似, 学习通道的主效应, 以及学习通道和想象朝向的交互作用均不显著,  $F_s = 1.19, p_s = 0.31$ , 想象朝向的主效应显著,  $F(7, 210) = 2.63, p < 0.05, MSE = 5.54$ 。

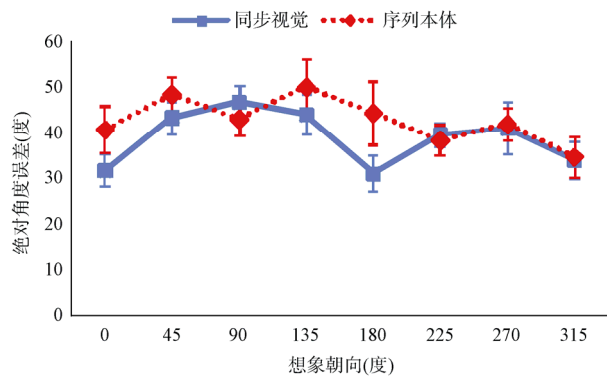


图 3 被试完成 JRD 任务的绝对角度误差, 误差线为标准误

## 4 讨论

通过序列本体感觉学习, 被试获得了稳定的自我中心空间表征。研究结果与序列视觉学习 (Xiao & Chen, 2012) 的结果一致, 没有出现迷向效应, 并且 JRD 任务的成绩与同步视觉学习组相同。从数据上来看, 无论是结构误差还是 JRD 的角度误差, 本研究序列本体感觉学习组与 Xiao 和 Chen (2012) 序列视觉学习组的结果大致相等, 说明了是序列学习而非学习通道决定了人们是否可以建立稳定的自我中心空间表征。这证明了 Wang (2012) 的假设, 稳定的自我中心空间表征不仅仅局限于视觉, 也可以通过本体感觉获得。研究结果也支持了功能等价假说 (Loomis et al., 2007)。

尽管通过同步视觉和序列本体感觉学习, 被试分别形成了不稳定的和稳定的自我中心空间表征, 但是两组被试在基线和更新后条件下的结构误差

没有差异,说明:1、从不同通道获得的自我中心表征的精确度没有差异;2、稳定和不稳定的自我中心空间表征的差异不在于表征的初始精确度,而在于是否受到迷向的影响。由于自我中心空间表征的知觉编码是非常精确的(Waller & Hodgson, 2006),因此无论是稳定还是不稳定的自我中心空间表征,在有知觉支持的条件下(基线和更新后),精确度没有差异。对于稳定的自我中心空间表征而言,初始编码的精确性保证了空间记忆的精确性,因此迷向后的结构误差仍然很小。对于同步视觉学习组,虽然迷向导致结构误差增大,但是结构误差仅为  $31^\circ$ ,远远小于随机指向的结构误差(约  $104^\circ$ ) (Mou et al., 2006; Waller & Hodgson, 2006),这意味着被试在迷向后使用了某种表征来定位物体。但是这个表征不太可能是环境中心表征,否则同步视觉学习组的一半被试应该能够根据更新前的环境中心指导语,选择使用环境中心表征来避免迷向效应。因此,更有可能的解释是尽管同步视觉学习组形成了不稳定的自我中心空间表征,但这个表征并没有被迷向完全破坏,而是有所残余(Wang, 2012),被试在迷向后使用这个残余的自我中心空间表征来定位物体。因此,很有可能不稳定与稳定的自我中心空间表征的区别不是泾渭分明,而是连续变化的。随着对自我中心空间表征编码的逐渐增强,表征受迷向的影响逐渐减小,直至完全稳定。

与预测不同,尽管同步视觉学习组可以看到相邻物体的空间关系,但是他们的JRD成绩与本体感觉学习组没有差别,这也许是因为JRD任务不仅考察相邻物体的空间关系,更考察远距离物体间的空间关系。由于同步视觉学习组站在场景内,无法一次看到所有的物体-物体空间关系,因此,他们在完成JRD任务时的优势不显著。不过,这也证明了人们可以通过本体感觉和视觉获得相当的环境中心空间知识,支持了功能等价假说。但是,两组被试在不同想象朝向上的成绩存在差异,反映出两组被试建立的空间参考框架不同。同步视觉学习组在 $0^\circ$ 和 $180^\circ$ 误差最小,说明被试根据学习朝向建立了 $0^\circ$ - $180^\circ$ 的参考框架。但是序列本体感觉学习组并没有出现类似的 $0^\circ$ 学习方向的优势,这与Yamamoto和Shelton(2007)序列本体感觉学习JRD成绩在 $0^\circ$ 想象朝向比其他想象朝向更好的结果不一致。不过,Yamamoto和Shelton的研究采用的是6个物体组成的规则场景,被试的学习位置在场景外,而本研究采用的是9个物体组成的不规则场景,且被试的学

习位置在场景内。这些因素都有可能影响被试建立环境中心空间表征(Xiao et al., 2009),因此,进一步考察不同通道学习形成的环境中心空间表征性质时,需要将上述因素作为变量进行系统考察。

本研究证明了稳定的自我中心空间表征也可以通过序列本体感觉学习获得,说明从本体感觉和视觉获得的表征是功能等价的。关于功能等价的潜在机制,至少有3种可能的解释(Giudice et al., 2011):视觉和本体感觉学习形成的是两个功能等价同型表征(isomorphic representations);无论是视觉还是本体感觉学习,最终形成的表征是视觉属性的;无论从哪个通道学习,最终形成了一个通道无关的表征(amodal representation)。目前学界支持较多的是最后一个假设(Giudice et al., 2011; Kelly, Avraamides, & Giudice, 2011),但这种支持更多是推论性的而非实证性的。推论依据基于认知的经济性原则,基于盲人同正常人的空间行为比较,或者基于神经科学发现大脑中存在整合来自各个感觉通道信息的区域。尽管本研究发现本体感觉和视觉在建立稳定的自我中心空间表征方面是功能等价的,但同样无法区分上述3种假设。后继的研究,采用特殊被试(先天盲人),或者跨通道学习的表征整合与干扰,或者测量通过不同通道学习空间表征后的被试在完成空间任务时的神经机制,将有可能对上述3种假设进行检验。

稳定的自我中心空间表征最大的特点就是不会被迷向破坏,且人们可以直接提取自我中心的空间知识来完成任务。尽管环境中心空间表征也不会被迷向破坏,但是人们需要通过计算才能从中获得自我中心的空间信息,这个计算过程会导致时间的耗费和错误率的提高(Klatzky, 1998),因此,在某些需要快速准确空间反应的任务中,通过序列学习的方式建立稳定的自我中心空间表征无疑可以提高效率。尽管视觉是人们获得空间表征的最主要来源,但本研究发现,通过序列本体感觉人们同样可以获得稳定的自我中心空间表征,且在精确度上与序列视觉学习差异不大。因此,完全可以通过序列本体感觉学习来帮助人们建立稳定的自我中心空间表征,以便于人们在不具备视觉学习和判断的环境中(比如夜间、大雾)顺利完成空间活动。

## 5 结论

通过序列本体感觉学习,被试获得了稳定的自我中心空间表征,这个表征不会被迷向破坏。这与

序列视觉学习(Xiao & Chen, 2012)的结果一致, 支持了 Wang (2012)对自我中心空间快照理论的扩展, 也支持了空间认知的功能等价假说(Loomis et al., 2007)。

### 参 考 文 献

- Avraamides, M. N., & Kelly, J. W. (2008). Multiple systems of spatial memory and action. *Cognitive Processing*, 9, 93–106.
- Burgess, N. (2006). Spatial memory: How egocentric and allocentric combine. *Trends in Cognitive Sciences*, 10, 551–557.
- Diwadkar, V. A., & McNamara, T. P. (1997). Viewpoint dependence in scene recognition. *Psychological Science*, 8, 302–307.
- Easton, R. D., & Sholl, M. J. (1995). Object-array structure, frames of reference, and retrieval of spatial knowledge. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 21, 483–500.
- Foo, P., Warren, W. H., Duchon, A., & Tarr, M. J. (2005). Do humans integrate routes into a cognitive map? Map- versus landmark-based navigation of novel shortcuts. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 31, 195–215.
- Giudice, N. A., Betty, M. R., & Loomis, J. M. (2011). Functional equivalence of spatial images from touch and vision: Evidence from spatial updating in blind and sighted individuals. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 37, 621–634.
- Greenauer, N., & Waller, D. (2008). Intrinsic array structure is neither necessary nor sufficient for nonegocentric coding of spatial layouts. *Psychonomic Bulletin & Review*, 15, 1015–1021.
- Holmes, M. C., & Sholl, M. J. (2005). Allocentric coding of object-to-object relations in overlearned and novel environments. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 31, 1069–1087.
- Jammalamadaka, S. R., & SenGupta, A. (2001). *Topics in circular statistics*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Kelly, J. W., Avraamides, M. N., & Giudice, N. A. (2011). Haptic experiences influence visually acquired memories: Reference frames during multimodal spatial learning. *Psychonomic Bulletin & Review*, 18, 1119–1125.
- Klatzky, R. L. (1998). Allocentric and egocentric spatial representations: Definitions, distinctions, and interconnections. In C. Freksa, C. Habel, & K. F. Wender (Eds.), *Spatial cognition: An interdisciplinary approach to representing and processing spatial knowledge LNAI 1404* (pp. 1–17). Berlin: Springer-Verlag.
- Loomis, J. M., Klatzky, R. L., Avraamides, M., Lippa, Y., & Golledge, R. G. (2007). Functional equivalence of spatial images produced by perception and spatial language. In F. Mast & L. Jäncke (Eds.), *Spatial processing in navigation, imagery, and perception* (pp. 29–48). New York, NY: Springer.
- McNamara, T. P., Rump, B., & Werner, S. (2003). Egocentric and geocentric frames of reference in memory of large-scale space. *Psychonomic Bulletin & Review*, 10, 589–595.
- Mou, W., & McNamara, T. P. (2002). Intrinsic frames of reference in spatial memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 28, 162–170.
- Mou, W., McNamara, T. P., Rump, B., & Xiao, C. (2006). Roles of egocentric and allocentric spatial representations in locomotion and reorientation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 32, 1274–1290.
- Mou, W., McNamara, T. P., Valiquette, C. M., & Rump, B. (2004). Allocentric and egocentric updating of spatial memories. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 30, 142–157.
- Newell, F. N., Woods, A. T., Mernagh, M., & Bühlhoff, H. H. (2005). Visual, haptic and crossmodal recognition of scenes. *Experimental Brain Research*, 161, 233–242.
- Roskos-Ewoldsen, B., McNamara, T. P., Shelton, A., & Carr, W. (1998). Mental representations of large and small spatial layouts are orientation dependent. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 24, 215–226.
- Sargent, J., Dopkins, S., Philbeck, J., & Chichka, D. (2010). Chunking in spatial memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 36, 576–589.
- Sargent, J., Dopkins, S., Philbeck, J., & Modarres, R. (2008). Spatial memory during progressive disorientation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 34, 602–615.
- Shelton, A. L., & McNamara, T. P. (1997). Multiple views of spatial memory. *Psychonomic Bulletin & Review*, 4, 102–106.
- Shelton, A. L., & McNamara, T. P. (2001). Systems of spatial reference in human memory. *Cognitive Psychology*, 43, 274–310.
- Waller, D., & Greenauer, N. (2007). The role of body-based sensory information in the acquisition of enduring spatial representations. *Psychological Research*, 71, 322–332.
- Waller, D., & Hodgson, E. (2006). Transient and enduring spatial representations under disorientation and self-rotation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 32, 867–882.
- Waller, D., Loomis, J. M., & Haun, D. B. M. (2004). Body-based senses enhance knowledge of directions in large-scale environments. *Psychonomic Bulletin & Review*, 11, 157–163.
- Waller, D., Montello, D. R., Richardson, A. E., & Hegarty, M. (2002). Orientation specificity and spatial updating of memories for layouts. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 28, 1051–1063.
- Wang, R. F. (2004). Between reality and imagination: When is spatial updating automatic? *Perception & Psychophysics*, 66, 68–76.
- Wang, R. F. (2012). Theories of spatial representations and reference frames: What can configuration errors tell us? *Psychonomic Bulletin & Review*, 19, 575–587.
- Wang, R. F., & Spelke, E. S. (2000). Updating egocentric representations in human navigation. *Cognition*, 77, 215–250.
- Wang, R. F., & Spelke, E. S. (2002). Human spatial representation: Insights from animals. *Trends in Cognitive Sciences*, 6, 376–382.
- Xiao, C., & Chen, F. (2012). *Stable self-to-object spatial relations acquired from sequential spatial learning*. Paper presented at the annual meeting of the Cognitive Science



- Society, Sapporo, Japan.
- Xiao, C., Mou, W., & McNamara, T. P. (2009). Use of self-to-object and object-to-object spatial relations in locomotion. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 35, 1137–1147.
- Yamamoto, N., & Shelton, A. L. (2005). Visual and proprioceptive representations in spatial memory. *Memory & Cognition*, 33, 140–150.
- Yamamoto, N., & Shelton, A. L. (2007). Path information effects in visual and proprioceptive spatial learning. *Acta Psychologica*, 125, 346–360.
- Yamamoto, N., & Shelton, A. L. (2009). Orientation dependence of spatial memory acquired from auditory experience. *Psychonomic Bulletin & Review*, 16, 301–305.

## Stable Egocentric Representation Acquired from Sequential Proprioceptive Learning

XIAO Chengli

(Department of Psychology, School of Social and Behavioral Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

### Abstract

It is generally believed that the egocentric representation is transient and primarily supported by perception. However, recent theories suggest that the egocentric representation can be an enduring component and preserved in memory. Wang (2012) proposed that the enduring egocentric representation, also referred as the egocentric snapshot, was stable and would not be disrupted by disorientation. She further suggested that the egocentric snapshot was not restricted to retinal images and could be acquired from other modalities. Her statement is consistent with the functional equivalence hypothesis (Loomis et al., 2007). These hypotheses were examined in the present study.

Thirty two university students (16 men and 16 women) participated in this experiment in return for monetary compensation. Participants stood at a learning position amidst a geometrically irregular 9-object array. Half of them viewed the layout with objects being simultaneously presented, and the other half were blindfolded and led to sequentially walk to each object's location from the learning position (proprioceptive learning). After learning the layout, all the participants were blindfolded and tested in the baseline, updating, and disorientation conditions in sequence. In the baseline condition, participants maintained their heading to scissors. In the updating condition, participants rotated 240° by themselves. Within each group, right before rotation, half the participants were explicitly instructed to use allocentric spatial relations during locomotion. The other half were not given such instruction. In the disorientation condition, participants rotated in situ until got disoriented. In each locomotion condition, it included four blocks of trials, each block involving pointing to all nine objects once in a random order. The major dependent measure was the configuration error, defined as the standard deviation of the means per target object of the signed pointing errors, which indicated the internal consistency of the pointing response among different targets. An increased configuration error after disorientation provides evidence of a disorientation effect, indicating the use of the transient egocentric representation, whereas an equivalent configuration error between these two conditions indicates the use of stable spatial relations. Finally, all participants were taken to another room to perform judgments of relative direction (JRDs) among the remembered object locations. The JRDs test included 48 trials, six trials at each of eight imagined headings (0° to 315° at 45° intervals). The dependent measures were the absolute angular error and the latency of the pointing response.

Configuration errors on egocentric pointing were subjected to mixed-model analyses of variance

(ANOVAs), with locomotion condition (baseline, updating, and disorientation) as the within subject variable, learning modality (vision, proprioception) and allocentric instruction (yes, no) as the between subjects variables. The results revealed no main effects or interactions of allocentric instruction. The configuration errors increased after the rotation of the participants who visually learned the layout, but were equivalent before and after the rotation of the participants who proprioceptively learned the layout. The configuration errors were indistinguishable for visual and proprioceptive learning in the baseline and the updating conditions, but significantly larger for visual learning than for proprioceptive learning in the disorientation condition. Performance data on JRDs were subjected to mixed-model analyses of variance (ANOVAs), with imagined heading ( $0^\circ$  to  $315^\circ$  at  $45^\circ$  intervals) as the within subject variance, learning modality (vision, proprioception) and allocentric instruction (yes, no) as the between subjects variables. The results revealed no main effects or interactions of allocentric instruction. The participants' performance on JRDs was indistinguishable for visual learning and proprioceptive learning, which indicated that participants constructed an allocentric spatial representation of equivalent fidelity through visual and proprioceptive learning.

In conclusion, the results in the present study provided evidence that participants constructed a stable egocentric representation when they proprioceptively learned the irregular object array. These results are parallel to Xiao & Chen's (2012) finding, and support Wang's (2012) generalization of the egocentric snapshot and functional equivalence hypothesis.

**Key words** egocentric; proprioception; disorientation; snapshot; functional equivalence