

## 人类空间记忆和空间巡航\*

牟炜民<sup>1</sup> 赵民涛<sup>1, 2</sup> 李晓鸥<sup>1, 2</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院心理研究所, 脑与认知科学国家重点实验室, 北京 100101) (<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 人类如何表征周围环境的空间结构信息, 如何利用记忆中的空间表征来指导个体在环境中的空间活动, 已成为认知心理学、神经科学、地理学以及人工智能研究的重要课题。文章综述了作者负责的实验室及其合作者近年来在视觉空间信息表征、基于运动的空间表征更新, 以及认知系统中的不同空间信息处理模块等方面的研究工作, 对以上问题及其内在的认知机制问题进行了初步的探讨。

**关键词** 空间记忆, 空间参照系, 空间表征, 空间更新。

**分类号** B842

### 1 引言

所有的动物和人都是在空间中生存和进化的, 一个生物体能否成功地存活和繁衍, 空间信息加工能力至关重要。自从 Tolman<sup>[1]</sup>提出认知地图 (Cognitive map) 概念以来, 动物和人的空间记忆便成为心理学研究的一个基本问题。20 世纪 80 年代之后, 空间记忆研究更是吸引着认知心理学、神经科学、地理学以及人工智能等多种学科的研究兴趣。在人类空间信息加工机制研究方面, 不同研究者对空间表征的朝向特异性与组织结构<sup>[2]</sup>, 空间记忆的发生发展<sup>[3]</sup>, 不同感觉通道下的空间信息获取与空间记忆<sup>[4,5]</sup>, 以及通过语言描述所形成空间记忆<sup>[6,7]</sup>等方面进行了系统深入的探讨。

与此同时, 空间记忆的脑神经机制研究也一直是认知神经科学和神经生物学关注的热点问题。比如 O'keefe 和 Nadel 采用电生理方法最早发现老鼠海马中存在着对空间位置信息具有特异性反应的位置神经元 (place cell)<sup>[8]</sup>, Taube 在老鼠丘脑发现了对个体朝向有特异性反应的朝向神经元 (head direction cell)<sup>[9]</sup>, Epstein 和 Kanwisher 运用 fMRI

发现了人对空间场景有特定激活的海马旁回 (parahippocampal place area, PPA)<sup>[10]</sup>等。近来 Ekstrom 等人结合电生理与虚拟现实技术, 在人的大脑中同时记录到了位置和朝向两种神经元的特异性活动<sup>[11]</sup>。Halfting 等人最近的研究则在老鼠大脑的内嗅皮层 (entorhinal cortex) 发现了支持空间地图表征的微观神经生理基础<sup>[12]</sup>。这些研究发现极大的推进了人们对空间认知神经机制的理解和把握。

虽然人们可以自如的进行各种空间活动, 但人们并未意识到协调和控制空间活动的认知系统是多么复杂和有效。其实, 人的感知系统在空间活动中不断地收集着周围环境的空间信息, 并从这些信息流中引导我们的动作和空间巡航, 从而让人们发现道路, 避免障碍物, 再认先前经历过的地点, 完成重新定向等等。人究竟如何表征周围环境的结构信息, 如何结合身体运动信息来更新记忆中已经形成的空间表征, 如何在空间巡航过程中保持与周围物体的空间关系, 空间表征的形成是由环境中何种因素决定的, 在运动过程中使用单一机制还是多种空间信息处理来跟踪周围物体的位置信息。人的大脑如何实现这些看似简单的行为, 迄今仍然没有得到彻底的回答。

以下我们将结合本实验室和合作者的具体研究工作, 从视觉空间信息的内在参照系表征、基于运动的空间表征更新, 以及人类认知系统中的不同空间信息处理模块三个方面, 介绍认知实验心理学对以上问题进行的行为学考察, 在此基础上, 对人

收稿日期: 2006-06-01

\* 本文所述研究部分得到国家自然科学基金项目 (30470576), 中科院“百人计划”项目, 和中科院心理所创新 (重点) 项目 (0302037) 资助, 在此表示感谢。同时, 我们也对 T. P. McNamara 教授, C. B. Owen 教授, W. G. Hayward 教授在实验研究和理论建构中的贡献表示衷心的感谢。

通讯作者: 牟炜民, E-mail: mouw@psych.ac.cn

类空间表征和空间更新的认知机制进行初步的探讨。

### 2 人类空间记忆的内在参照系表征理论

人类空间记忆是以环境参照系 (allocentric frames of reference) 还是以自我参照系 (egocentric frames of reference) 来表征, 是当前空间认知领域争论的热点问题<sup>[13, 14]</sup>。前者认为物体位置是相对于环境中其他物体 (如标志性建筑、主要道路等) 来表征的, 人的运动并不会更新空间表征本身; 后者则认为物体位置是相对于观察者自己 (如眼睛、头和躯体等) 来表征的, 空间表征会随着观察者的运动而不断更新。Mou 和 McNamara 首次提出人类空间记忆是以环境内在参照系 (intrinsic frames of reference) 来表征的观点<sup>[13]</sup>, 并通过多项实验研究, 系统论证了熟悉场景的空间关系记忆, 自我朝向感丧失条件下所维持的空间关系表征, 都是基于场景内在参照系来表征的。并同时从整体和个体水平提供实验证据表明, 决定我们如何表征环境空间信息的, 是场景本身具有的内在结构而不是以自我为中心的观察视线 (egocentric viewpoint)。

#### 2.1 熟悉场景的空间记忆基于内在参照系表征的证据

Mou 和 McNamara 首次用实验分离了观察者视线和场景内在轴 (intrinsic axis) 对空间表征的作用, 提供了熟悉场景的空间记忆中, 物体位置是以场景内在参照系来表征的实验证据<sup>[13]</sup>。

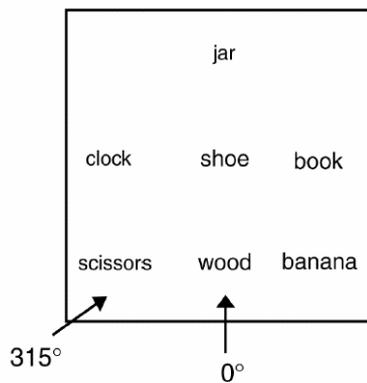


图 1 学习时的物体场景, 引自文献<sup>[13]</sup>

实验要求被试学习图 1 所示的场景。被试从

315° 看场景并被要求沿着 315° 的方向或沿着 0° 的方向学习场景。然后根据记忆作相对方向判断 (如, “想象你站在物体甲, 面对物体乙, 请指向物体丙”)。被试共有 8 个想象朝向 (imagined heading), 从 0° 到 315°, 间隔为 45°。一个重要的结果是, 想象朝向与学习条件存在着交互作用: 要求按 315° 方向学习的被试更容易从想象朝向 315° 做出相对方向判断, 而要求按照 0° 方向学习的被试更容易从想象朝向 0° 做出相对方向判断 (图 2), 即使 315° 方向是他们的观察方向。这个结果直接表明: 空间关系表征并不是观察视线所决定的, 而是由被试所选择的内在参照系决定的。

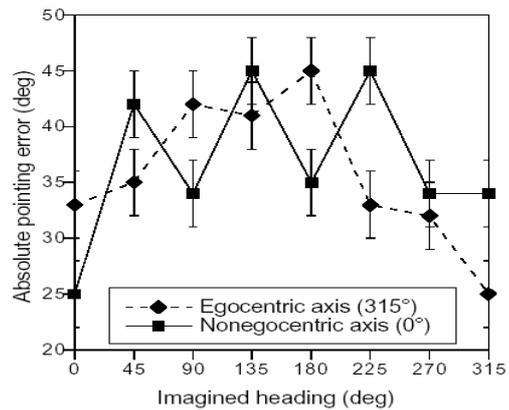


图 2 被试的平均错误角度, 引自文献<sup>[13]</sup>

#### 2.2 自我朝向感丧失后的空间记忆基于内在参照系表征的证据

个体如何使用已经形成的空间表征来完成空间定位任务, 不同的研究者持有不同的观点。持自我参照系表征观点的研究者认为<sup>[14, 15]</sup>, 当个体与环境中的物体位置关系因为丧失自我朝向感 (比如迷向) 而被破坏后, 环境中不同物体之间的空间关系, 就不能再通过被破坏的自我中心表征得以维持, 从而造成物体空间关系知识的破坏或者消失。与之相对, 坚持环境参照系表征观点的研究者则认为<sup>[13, 16]</sup>, 个体自我朝向感的丧失并不必然破坏空间表征中物体与物体空间关系的知识。因此, 在丧失自我朝向感的条件下, 观察者能否维持记忆中物体之间的空间关系知识, 是区分自我参照系表征和环境参照系表征的关键因素。

Mou 和 McNamara 等人<sup>[17]</sup>采用了 Wang 和 Spelke<sup>[15]</sup>所使用的实验范式,用 4 个实验考察了不同条件下空间关系表征在自我朝向感丧失前后的变化。被试先学习一组物体的空间位置,然后分别在基线条件(闭上眼睛但维持学习朝向)、更新条件(闭上眼睛然后转动较小角度)和迷向条件(闭上眼睛转动自己直至失去朝向感)三种情况下指示周围物体的空间位置。同时,实验也操纵了场景本身是否具有明显的内在结构,场景中物体数目的多少等因素。实验结果发现,被试在迷向条件下所维持的空间结构关系知识并没有被破坏,而是与基线和更新条件相当。这个结果与自我中心表征理论冲突,而与内在参照系理论相符合,表明在丧失自我朝向感的条件下,个体所维持的空间记忆是基于环境内在参照系来表征的。

### 2.3 多视点学习条件下的空间记忆基于内在参照系表征的证据

Mou 和 Zhao 等人关于“场景内在结构在空间表征中的作用”的系列研究<sup>[18]</sup>,则通过直接检验内在参照系理论的两个理论预测来验证该理论的有效性。根据内在参照系表征理论,观察者在表征空间信息时所建立的空间参照系是内在于环境之中的,如果该理论是有效的,那么它将直接推论出两个结果:(1)场景内在结构而非观察者观察视线决定空间信息如何表征,(2)场景是否具有明显的内在结构决定了空间参照系选择的一致性程度。相反,如果该理论是无效的,那么在多视点学习条件下,我们将观测到初始视点效应<sup>[19]</sup>或者空间表征依赖于多个观察视点的结果。

实验采用了基于个体(individual-based)和基于整组(group-based)的实验范式,通过 4 个实验考察上述两个理论预测。实验中,被试在没有任何外界线索的环境中,从多个观察视点学习物体场景,其中一个观察视点与场景的明显内在结构(左右对称)相一致,然后被试根据记忆完成相对位置判断任务。

实验结果表明,不论在整体水平还是在个体水平,被试都选择了与内在场景结构一致的空间参照系来表征物体的空间位置信息。而且当场景具有明显内在结构时,被试在空间参照系的选择上非常一致。而当场景内在结构因为添加两个无关物体而被破坏时,被试不论在整体水平还是在个体水平,都不再稳定地选择与其一致的朝向作为内在参照系

的优势方向。该发现首次同时从整体与个体水平揭示了场景内在结构如何影响人对环境中空间信息的表征,验证了内在参照系理论的两个直接推论,为该理论的有效性提供了强有力的支持性证据。

### 3 空间巡航过程中基于运动的空间表征更新

Rieser 的研究发现,与想象条件相比,个体运动可以克服从新颖朝向上提取空间信息时引起的误差<sup>[4]</sup>。Simons 和 Wang 也认为,运动辅助作用可以消除场景识别中的视点依赖性(viewpoint dependency)<sup>[20]</sup>。但 Mou 和合作者关于空间推理和物体识别的两项研究,则发现基于运动的空间表征更新(spatial updating)并不能消除空间表征和物体识别中的视点依赖性<sup>[16,21]</sup>。Mou 等人据此提出了人类空间巡航过程中空间更新的双系统模型<sup>[16]</sup>。该模型认为,观察者的运动过程所更新的仅仅是自己相对于环境参照系的位置和朝向,而不是更新空间表征或者物体表征本身。

#### 3.1 空间更新并不能改变空间表征的朝向依赖性

我们在运动过程中究竟更新了什么?是直接改变了记忆中已经形成的空间表征本身,还是仅仅利用身体运动的动觉信息调整了我们自己在空间表征中相对于环境参照系的位置和朝向?针对这个问题,Mou 和 McNamara 等人通过对学习朝向、想象朝向和测试朝向等因素的联合操纵(如图 3 所示),首次提供了观察者身体转动条件下,自我朝向相应更新但表征环境结构的内在参照系保持不变的实验证据<sup>[16]</sup>。

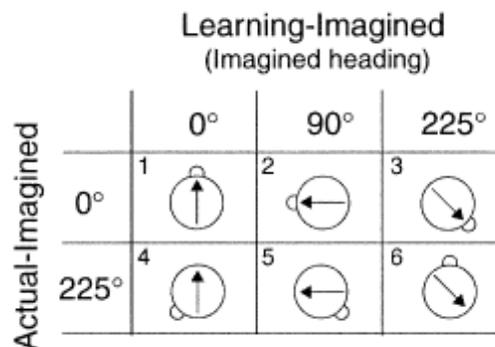


图 3 Mou 等人的实验设计,引自文献[16]

在其中一个实验中,被试首先记忆场景中物体

的位置，然后分别从三个想象朝向完成相对位置判断任务。三个想象朝向分别是 0°（和学习朝向一致），90°（学习朝向向左转 90°）和 225°（学习朝向向左转 225°）。同时，被试的真实朝向和想象朝向也有两种关系：一种条件下被试的真实朝向和想象朝向总是一致；另一种条件则总不一致（相差 225 度）。结果发现，不论真实朝向和想象朝向是否一致，被试在想象朝向 0° 的判断成绩总好于想象朝向 225° 的成绩（即表现出朝向依赖性），说明被试表征物体位置的内在参照系并没有随身体转动而改变。同时，被试在真实朝向和想象朝向一致时的位置判断要好于当两者不一致时的位置判断（图 4， $A-I=0^\circ$  表示真实和想象朝向一致， $A-I=225^\circ$  表示两者相差 225°），这表明被试在转动过程中更新了自己相对于内在参照系的朝向，否则真实朝向和想象朝向一致与否就不会影响被试位置判断的成绩。

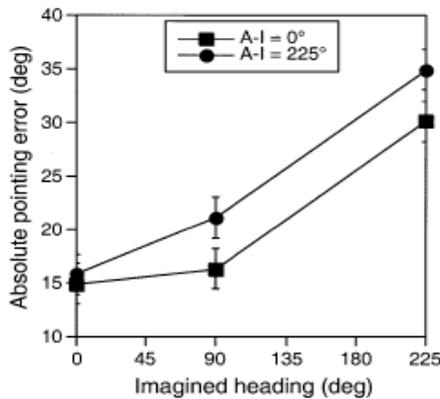


图 4 被试的平均错误角度，引自文献[16]

Mou 和 McNamara 等人认为，存在着以自我为中心的更新 (egocentric updating) 和以环境为中心的更新 (allocentric updating) 两个过程<sup>[16]</sup>。以自我为中心的系统控制个体运动时瞬间的自我-物体空间关系，保证个体有效避开障碍物，但不能保证不迷失方向。为保持方向，个体必须知道环境中物体之间的稳定空间关系，及自己相对于熟悉物体的位置和朝向，这由以环境为中心的系统负责。个体利用自己相对于内在参照系的位置和朝向以及内在参照系所表征的物体关系，就能计算出运动过程中任何物体相对于自己的空间关系。观察者的运动过程所更新的仅仅是自己相对于环境参照系的位置和朝向，而不是更新空间表征或者物体表征本身。

3.2 空间更新并不能消除物体识别中的视点依赖

性

Mou 和合作者关于“三维虚拟环境下的视觉物体识别”的研究<sup>[21]</sup>，进一步验证了空间更新的双系统模型在视觉物体识别中的理论预测，发现运动参与下的物体识别与空间推理任务一样，也同时表现出空间更新与视点依赖性两个独立效应。并提供证据表明，基于运动的空间更新并不能消除视觉物体识别过程中的视点依赖性，而且空间更新只在较小的运动角度范围内才体现出运动辅助作用。

实验采用了虚拟环境中的物体再认范式，被试通过头盔显示器记忆虚拟三维物体，然后走到新的位置或者走到中间再返回原处。同时，虚拟物体也同时转动相应角度或者保持不动（见图 5）。被试的任务是判断再次看到的物体是否与先前记忆的物体相同，而不管该物体是否旋转。结果表明，不论被试在原地还是走到新的位置做判断，从学习视点识别物体都要比从新颖视点识别物体准确（视点依赖性效应）。同时，当从新颖视点识别物体时，物体保持不动的条件（人运动，物体不动）要比物体转动的条件下（人不动，物体转动）识别成绩更好（空间更新效应）。两个效应同时存在表明，基于运动的空间更新并不能消除物体识别中的视点依赖性，进而从物体识别角度为空间更新的双系统模型提供了支持性证据。而且，当个体的运动角度增至 90 度时，视点依赖性依然存在，而运动期望效应却消失了。这些结果表明，人的运动引起的空间更新并不如 Simons 和 Wang<sup>[20]</sup>所假设的那么强，一方面，空间更新并不能改变空间表征或者物体表征本身，另一方面，至少在视觉物体信息处理中，运动产生的辅助作用可能只在小角度的运动范围内才有效。人在运动过程所更新的，只是自己相对于环境参照系的位置和朝向。

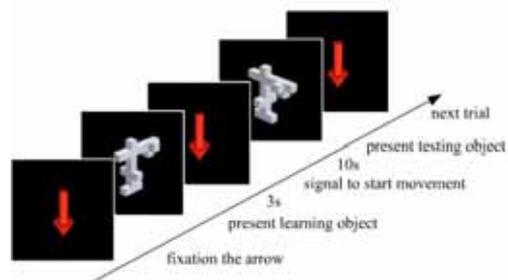


图 5 物体识别中的刺激呈现序列，引自文献[21]

#### 4 绑定于环境和绑定于身体的空间信息处理模块

在日常生活中,我们具有很强的在运动过程中跟踪周围物体位置信息的能力。Farrell 和 Roberson 认为这是一种自动化的空间更新过程<sup>[22]</sup>。比如当向后转身时,我们非常清楚的知道原来在前面的东西现在已经位于我们后面。那么我们究竟是如何在空间巡航过程中保持与周围物体的空间关系,我们在运动过程中是仅仅使用单一认知机制,还是依靠多种信息处理模块来实现这种跟踪呢? Mou 和同事进行的一系列研究表明,人的认知加工系统存在着两种完全不同的空间信息处理模块,即绑定于环境的(environment-stabilized)空间信息模块和绑定于身体的(body-stabilized)空间信息处理模块,两者分别负责我们对不同类别空间信息的追踪<sup>[23]</sup>。进一步的研究发现,两者同样具有自动加工的属性,某种模块一旦被激活,便很难被主观的认知努力所忽略和抑制。这种自动加工属性,也许是人们根本感受不到自身空间跟踪能力如此复杂和有效的原因。

##### 4.1 虚拟环境中存在两种空间信息处理模块的实验证据

Mou 和 Biocca 等人将增强现实技术(Augmented Reality)应用到空间认知研究中,首次提供证据表明人的空间认知系统中存在着绑定于身体的信息处理模块<sup>[23]</sup>。该模块的工作机制假定在人的运动过程中,物体与观察者的空间位置关系将保持不变。实验还发现,从绑定于环境的空间信息转换到绑定于身体的空间信息十分灵活,甚至只需要指导语便可以实现。这为将来移动式空间化人机系统的界面设计提供了认知理论依据。



图6 增强现实环境中的学习场景,引自文献[23]

在其中一个实验中,被试首先学习呈现在真实地板上8个虚拟物体的位置(如图6)。在做相对位置判断之前(如“想象你面对手机,请指向小球”),被试戴上眼罩并转动身体到规定方向(手机或本子)。实验同时操纵了学习朝向与想象朝向(L-I)以及身体真实朝向与想象朝向(A-I)的角度差别( $0^\circ$ 和 $90^\circ$ )。结果发现,对增强现实系统没有任何经验的被试,A-I对相对位置判断有显著影响(图7a),但当让被试短暂体验到虚拟物体相对于自己不变,或被直接告知虚拟物体将会相对于自己不变时,A-I对相对位置判断便不再产生影响(图7b)。这表明,没有经验的被试激活了绑定于环境的模块,认为虚拟物体是相对于真实地板位置不变的;但该模块会在短时经验或指导语影响下,迅速灵活的被绑定于身体的模块所取代,即认为虚拟物体跟随自己转动而转动,是相对于自己位置不变的。

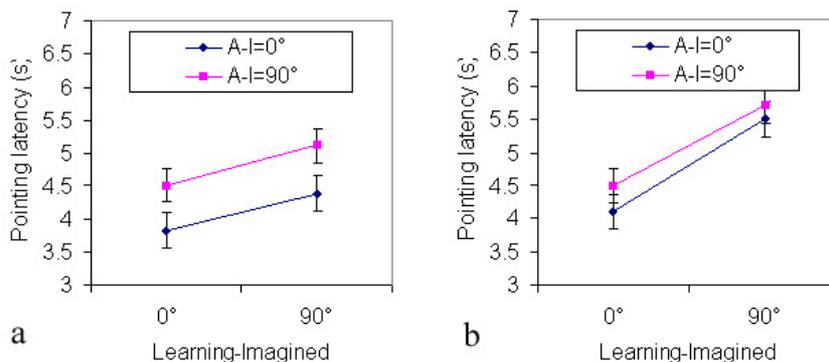


图7 给予指导语之前(a)和之后(b)被试的平均反应时,根据文献[23]绘制

### 4.2 真实环境中的空间信息处理模块及其自动加工属性

Mou 和同事\*关于“真实物理环境中的空间信息处理模块及其自动加工属性”的研究，将两种空间信息处理模块的适用范围，从增强现实环境进一步推广到真实的物理环境。并首次提供实验证据证明，绑定于身体的空间信息处理模块同样具有自动加工的属性，一旦激活便并不能被高级认知活动所抑制。

实验采用了 Mou 和 Biocca 等人使用的范式，通过一系列实验考察了激活特定空间信息处理模块的影响因素及其自动化加工属性<sup>[23]</sup>。被试首先学习其周围 9 个物体的位置，然后闭上眼睛自主转动一定角度，接着完成相对位置判断任务（如图 8 所示）。结果表明，当物体放置在地面上，或者放置在圆桌面上时（但被试并不知道桌面可以转动），被试并不能按照指导语的要求想象所有物体跟着自己一起转动，即采用了默认的绑定于环境的空间信息处理模块。表现在结果上，被试的反应明显的收到想象朝向和身体实际朝向角度差别的影响(A-I 效应)。但当被试观察到圆桌面可以转动的时候，被试就很容易的采用了绑定于身体的空间信息处理模块，即被试反应不再受 A-I 因素的影响。



图 8 真实环境中的学习场景（桌面外周可以转动）

相应的控制实验则进一步表明，提供直接的视觉信息（即被试可以看到桌面是可转动的）是激活绑定于身体的空间信息处理模块的必要条件。因为，当不提供视觉信息，而仅仅是告诉被试，在其身体转动的同时主试也会同时相应的转动桌面，并

不能促使被试采用绑定于身体的空间信息处理模块，而单纯的视觉信息却可以激活该模块（即使桌面实际并没有转动）。最后，当被试激活了绑定于身体的空间信息处理模块后（即被试看到桌面可转动），被试就不能按照指导语的要求去想象所有的物体都停留在原来的位置。这说明，绑定于身体的模块一旦激活，与绑定于环境中的空间信息处理模块一样，并不能被高级认知努力所抑制，即具有一定的自动加工属性。

两种空间信息处理模块及其自动加工属性的发现，对于移动式空间化人机计算系统的设计具有着重要的理论指导意义和应用价值。即只要有视觉支持的情况下，短时间视觉经验与指导语就能促使移动计算系统的使用者激活绑定于身体的空间信息处理模块。一旦该模块被激活，个体在运动过程中定位各种相对于身体的空间化信息将更为容易和准确，从而使计算系统的移动化和空间化成为可能。

### 5 小结与展望

以上我们分别从空间记忆的内在参照系表征理论，运动参与下的空间表征更新，以及在运动过程中追踪物体位置信息的空间信息处理模块三个方面，系统的回顾了当前空间认知研究中的热点问题及所涉及的一些实验研究。这些结论和研究发现，为我们从认知机制上理解和回答引言中所述的问题提供了一个理论解释上的参考框架。

空间记忆的内在参照系理论认为，正如人们对形状和物体如何解释取决于把物体哪个部分定义为它的“上方”一样<sup>[24, 25]</sup>，当人们要记忆环境中的空间位置信息时，也需要选择一个参照方向来把环境解释为一个空间信息参照系统。而这个参照系或者参照方向的选择则是由环境的内在结构决定的，也就是说，场景的内在参照结构决定了我们会形成什么样的空间表征，以及会在多大程度上形成这种表征。由内在参照系界定的空间表征一旦形成之后，除非遇到更强的内在参照系线索，便不会随着人的运动过程而相应改变。人的运动与空间巡航过程，仅仅更新了自己相对于内在参照系的位置和朝向。这种基于运动的空间更新，可以在一定程度和范围内易化对空间记忆中的信息提取，但由于空间表征的朝向依赖性，空间更新并不能消除从新颖朝向提取空间信息时的误差。

\* Mou W, Li X, McNamara T P. Body and environment stabilized processing spatial knowledge during locomotion. 论文撰写中。

另一方面,作为长期的适应性进化的结果,人类认知系统分化出了两种(或者更多)空间信息处理模块,来分别负责不同类别空间信息的跟踪任务。绑定于环境的空间信息模块,认为物体是相对于环境保持不变的,因而个体的运动信息会激活该模块不断更新自己与空间参照系的关系,进而实时计算出物体相对于自己的关系,从而保持与周围物体的空间关系信息。绑定于身体的空间信息处理模块,认为物体是相对于自己保持不变的,因而个体的运动信息就不再更新自己与空间参照系的关系,从而维持物体随观察者运动而运动的稳定空间关系。两种空间信息处理模块最直接的例子莫过于汽车驾驶,对于驾驶者来说,车内的东西,如方向盘,刹车等,需要绑定于身体的空间信息处理模块负责;而车外的东西,如路标、建筑等,则需要绑定于环境的空间信息处理模块负责。

最后,尽管来自不同学科的研究者,对人与动物的空间行为进行了长达数十年的不懈探索,但目前对大脑这种基本认知功能的认识,未知的和待解决的问题丝毫不少于已经获得的研究结论。比如,如何整合不同来源的空间信息以形成稳定有效的空间表征,基于运动的空间更新的认知本质是什么,以环境参照系表征的空间知识如何转化到自我参照系以引导各种肢体行为,内在参照系表征的神经生理基础是什么,是否存在与不同空间信息处理模块相对应的大脑神经机制,如何实现人类空间智能的机器模拟,等等。欧洲与北美的科研机构,已经开始集成研究力量并提供大力资助,力争在人类空间认知研究上取得突破性进展。如德国科学基金会(DFG)自1996年开始投入大量基金持续资助“空间认知研究”优先项目(DFG Spatial Cognition Priority Program),整个项目涉及计算机科学与人工智能,心理学,语言学,地理学等德国大学与科研机构的科学家,涵盖了空间表征与心理模型,空间参照系与动作执行,机器人巡航与空间行为分析,空间化界面设计等17个重点研究课题。自2003年起,其后续项目投入更是高达3.53亿欧元。相信人类对自己如何得知现在何处,如何到达下个地点的理解将不断加深。

#### 参考文献

- [1] Tolman E C. Cognitive maps in rats and men. *Psychological Review*, 1948, 55, 189~208
- [2] McNamara T P. Mental representations of spatial relations. *Cognitive Psychology*, 1986, 18, 87~121
- [3] Huttenlocher J, Newcombe N, Sandberg E. The coding of spatial location in young children. *Cognitive Psychology*, 1994, 27, 115~147
- [4] Rieser J J. Access to knowledge of spatial structure at novel points of observation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 1989, 15: 1157~1165
- [5] Loomis J M, Klatzky R L, Golledge R G. Auditory distance perception in real, virtual, and mixed environments. In: Y Ohta, H Tamura (Eds.), *Mixed reality: Merging real and virtual worlds*. Tokyo: Ohmsha, 1999. 201~214
- [6] Mou W, Zhang K, McNamara T P. Frames of reference in spatial memories acquired from language. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*, 2004, 30, 171~180
- [7] Franklin N, Tversky B. Searching imagined environments. *Journal of Experimental Psychology: General*, 1990, 119: 63~76
- [8] O'Keefe J, Nadel L. *The hippocampus as a cognitive map*. Oxford: Oxford University Press. 1978
- [9] Taube J S. Head direction cells and the neurophysiological basis for a sense of direction. *Progress in Neurobiology*, 1998, 55: 225~256
- [10] Epstein R, Kanwisher N. A cortical representation of the local visual environment. *Nature*, 1998, 392: 598~601
- [11] Ekstrom A D, Kahana M J, Caplan J B, Fields T A, Isham E A, Newman E L, Fried I. Cellular networks underlying human spatial navigation. *Nature*, 2003, 425: 184~187
- [12] Hafting T, Fyhn M, Molden S, Moser M-B, Moser E I. Microstructure of a spatial map in the entorhinal cortex. *Nature*, 2005, 436: 801~806
- [13] Mou W, McNamara T P. Intrinsic frames of reference in spatial memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*, 2002, 28: 162~170
- [14] Wang R F, Spelke E S. Human spatial representation: insights from animals. *Trends in Cognitive Sciences*, 2002, 6: 376~382
- [15] Wang R F, Spelke E S. Updating egocentric representations in human navigation. *Cognition*, 2000, 77: 215~250
- [16] Mou W, McNamara T P, Valiquette C M, Rump B. Allocentric and egocentric updating of spatial memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*, 2004, 30: 142~157
- [17] Mou W, McNamara T P, Rump B, Xiao C. Roles of egocentric and allocentric spatial representations in navigation and reorientation. *Journal of Experimental*

- Psychology: Learning Memory and Cognition, in press
- [18] Mou W, Zhao M, McNamara T P. Layout geometry and viewing perspectives in the selection of intrinsic frames of reference. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*, accepted pending revision
- [19] Shelton A L, McNamara T P. Systems of spatial reference in human memory. *Cognitive Psychology*, 2001, 43: 274-310
- [20] Simons D J, Wang R F. Perceiving real-world viewpoint changes. *Psychological Science*, 1998, 9: 315-320
- [21] Zhao M, Zhou G, Mou W, Hayward W G, Owen C B. Spatial updating during locomotion does not change viewpoint dependent visual object processing. *Visual Cognition*, in press
- [22] Farrell M J, Robertson I H. Mental rotation and the automatic updating of body-centered spatial relationships. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 1998, 24:227-233
- [23] Mou W, Biocca F, Owen C B, Tang A, Xiao F, Lim L. Frames of reference in mobile Augmented Reality displays. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 2004, 10: 238-244
- [24] Rock I. Orientation and form. New York: Academic Press. 1973
- [25] Palmer S E. Vision science: Photons to phenomenology. Cambridge, MA: MIT Press, 1999

## Human Spatial Memory and Spatial Navigation

Mou Weimin<sup>1</sup> Zhao Mintao<sup>1,2</sup> Li Xiaou<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Brain and Cognitive Science, Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

(<sup>2</sup> Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039, China)

**Abstract:** How is the configuration of the surrounding environment represented in human memory, and how does this spatial representation guide human navigation? These questions are being tackled by an endeavor of multiple disciplines including Psychology, Neuroscience, Geography, and Artificial Intelligence. This paper reviewed the research of our lab and collaborators addressing the above questions in three series of studies including intrinsic model of spatial memory, the allocentric and egocentric spatial updating, and body and environmental stabilized processing of spatial knowledge during locomotion.

**Key words** spatial memory, spatial frames of reference, spatial updating, body stabilized spatial process, environment stabilized spatial process.