



多目标视觉追踪中的分组效应及其可加性*

王春地^{1)**} 李姝婷¹⁾ 邓 虎^{2)**}

(¹⁾北京航空航天大学人文社会科学学院心理系, 北京 100191; ²⁾北京大学回龙观临床医学院, 北京回龙观医院, 北京 100096)

摘要 如何减少注意资源的消耗、提升人类在动态视觉持续性注意任务中的表现, 是持续性注意研究关注的重点问题, 具有理论和实践的重要意义。多目标追踪任务是研究个体持续性注意的常用实验室方法。多目标追踪任务中, 观察者可以利用基于物体特征的分组效应将多个运动目标知觉为一个更大的运动单元, 从而减少注意资源的消耗、提高追踪任务表现。为了进一步节省注意资源、提升注意追踪的表现, 研究者提出了注意追踪中分组效应的可加性问题。分组效应的可加性表现为基于两个及以上特征的分组对追踪表现的提高优于基于一个特征的分组。可加性的研究对理解不同分组效应的认知机制, 个体动态视觉追踪中的注意机制和注意资源分配等具有重要意义。本文对以往的行为以及神经影像学研究进行了汇总, 讨论了不同类型分组效应的知觉加工机制及其可加性, 系统阐述了基于不同表面特征的不可加性, 和基于表面特征与特定时空特征可加性的认知及其神经基础。未来可以从行为学实验角度探究更多基于不同特征分组效应的可加性, 或者从注意追踪中基于不同分组效应的神经机制入手, 探讨分组效应的可加性问题, 为分组效应的分类及可加性研究提供更多认知和神经层面的依据。

关键词 多目标追踪, 分组效应, 可加性, 特征分组

中图分类号 B842

DOI: 10.16476/j.pibb.2022.0571

持续性注意对现实世界的活动是至关重要的, 日常生活中人们常常需要将注意维持在多个特定目标上, 如驾驶汽车时需要持续注意车辆周围其他运动中的车辆和行人的情况。对动态环境持续性注意的研究, 有助于理解人类在每日的动态视觉环境中的注意加工和注意资源分配机制及其影响因素。Pylyshyn 和 Storm^[1] 提出多目标追踪 (multiple object tracking, MOT) 任务范式, 让观察者为多个运动物体中的特定对象 (目标) 进行追踪, 在实验室条件下对个体的持续性注意进行了研究。如何提高注意追踪中的表现, 哪些因素影响注意资源的消耗是持续性注意研究关注的重点问题。以往有关多目标追踪任务的研究发现, 追踪对象的特征会影响观察者的追踪表现, 并产生基于不同特征的自下而上的分组效应。基于目标的分组效应可以有效节省注意资源, 提高注意加工效率。研究者根据追踪对象的特征属性, 将分组效应分为3大类: 基于物体的分组、基于表面特征的分组和基于时空特征的分组^[2]。在之后的研究中有研究者提出了分组效

应可加性的概念, 即基于两个及以上特征的分组效应相加会产生比单个特征更大的分组效应^[3]。分组效应可加性的研究表明, 不同的知觉组织原则也许能够根据知觉对象及任务要求的不同相互合作, 进一步提升认知效率。后续研究对不同情况下分组效应的可加性进行了验证, 并探讨了特定分组效应可加性和不可加性的神经基础。本文系统总结了有关多目标追踪任务中的分组效应及其可加性的相关行为与神经研究, 对理解基于表面特征、时空特征, 以及基于物体的特征的知觉加工认知规律与神经机制具有一定的参考与启示。

1 多目标追踪任务研究范式

多目标追踪任务范式最早由 Pylyshyn 和

* 国家自然科学基金 (31900751) 和北京市属医院科研培育计划 (PX2023071) 资助。

** 通讯联系人。

王春地 Tel: 15810350361, E-mail: wangchundi@buaa.edu.cn

邓虎 Tel: 18515970501, E-mail: denghu501@163.com

收稿日期: 2022-12-20, 接受日期: 2023-03-26

Storm^[1]提出, 研究中使用8个完全相同的物体作为刺激材料, 所有刺激对象在限定的区域内按随机轨迹进行运动, 观察者需要追踪其中的4个对象, 即目标, 并在运动结束后报告目标所在位置(图1)。经典多目标追踪范式使用的目标和分心物多为特征相同的物体, 但后续研究表明, 目标和分心物的特征会显著影响观察者的追踪表现, 且这种影响是一种自下而上的加工过程^[4]。一方面具有非常突出特征的分心物会自动吸引注意资源, 从而使得原本用于追踪目标的注意资源减少, 另一方面目标和非目标具有相同的特征时, 会导致目标和分心物的混淆从而降低追踪表现^[3]。因此, 后续研究者对经典多目标追踪任务范式进行改进, 改变目标和

分心物的特征, 在更生态化的基础上探讨影响追踪任务表现的各种特征因素。以往研究已经证实, 物体颜色^[2, 5-8]、形状^[3, 9]等物体表面特征(feature properties)、运动速度(speed)^[10-11]、运动轨迹(motion trajectories)^[2, 12-15]、运动特性(kinematic properties)^[16]、群体刚性(group rigidity)^[17]、目标和分心物的空间距离^[18]及其动态变化^[19]等时空连续性特征(spatiotemporal continuity)、虚拟多边形(virtual polygon)^[11]、插补轮廓(contour interpolation)^[20]等基于物体(object-based)的特征, 以及语义范畴(semantic category)^[21-23]等对象身份的独特性, 物体表面特征和背景的相似性^[24]均会影响观察者的追踪任务表现。

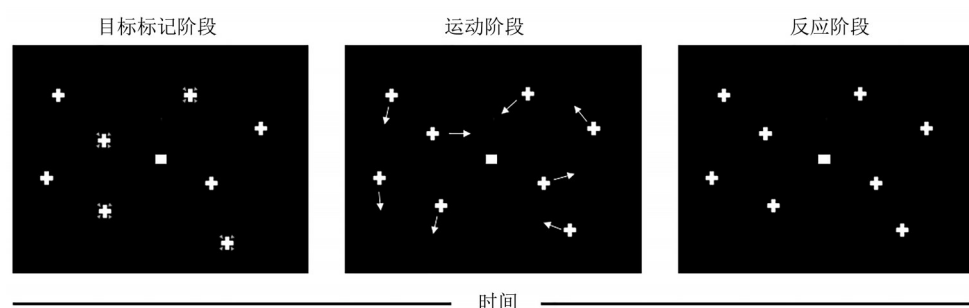


Fig. 1 Typical MOT task^[1]

图1 经典多目标追踪研究示意图^[1]

实验中电脑屏幕中央会呈现一个注意方块, 方块周围随机位置会出现8个完全相同的“+”号, 其中4个为追踪的目标。在目标标记阶段, 4个目标会进行闪烁以提示被试目标位置。在运动阶段, 目标停止闪烁, 然后所有物体按照随机轨迹进行运动。运动结束后进入反应阶段, 被试需要通过鼠标点击找出所有的目标。

2 多目标追踪中的分组效应

知觉分组(perceptual grouping)是将元素重新排列组合以形成更大、更有意义的单元的过程^[25-26]。知觉分组最早来源于格式塔心理学的知觉组织规律, Wertheimer等^[27]提出了静态知觉中的分组问题并总结了不同的知觉分组组织原则, 包括接近性原则、相似性原则、共同命运(在其他条件相同的情况下, 由于相同的运动方式而被知觉为一组)、对称性原则、连续性原则、平行原则、闭合性原则。通过知觉分组, 不同的对象被知觉为一个整体, 这有助于在观察复杂的现实环境中节省有限的注意资源, 提高视觉工作记忆容量。多目标追踪任务中的分组效应是指在任务过程中, 由于自身的不同特征、属性, 多个运动对象被观察者知觉为一

个更大的运动单元, 即不同的分组。Yantis^[11]发现观察者在追踪多个随机运动的视觉元素时, 会自发性使用分组的策略以提高任务表现。总体来说, 分组普遍存在于知觉经验中, 对分组效应, 尤其是动态知觉分组的研究有助于深入了解个体知觉、表征物理世界过程中的规律以及个体持续性注意的能力。

2.1 分组效应的分类

2.1.1 基于时空特征的分组

基于时空特征的分组效应主要是通过运动物体的运动方向、速度、物体间的空间关系(如对称性、随机分布或其他格式塔的空间关系规则)和距离变化等时空连续性有关的信息对目标和非目标进行知觉分组。时空连续性信息是个体形成运动知觉的关键, 通过时空连续性特征, 随时间、运动变化

着的客体被表征为持续存在的一个物体, 而非离散的不同物体^[28-29]。而当物体时空连续性被破坏时, 如发生拓扑性质的变化 (topological change), 原本的刺激则会被知觉为一个新的物体^[30]。在多目标追踪任务中, 观察者会利用物体的有关运动、方向、轨迹等信息, 并且可以在追踪多个对象的同时, 保持有关目标位置和运动的信息^[2, 11-12, 15, 31-32]。当目标和非目标运动轨迹或方向相同时, 观察者将目标和非目标知觉为同一组, 一部分注意资源由目标转移到非目标, 追踪成绩出现显著降低^[31]。目标和非目标的不同移动速度则会提高观察者的追踪表现, 即便这种速度差异无法被有意识地感知^[11]。Ericson 和 Beck^[12] 则将目标和非目标配对进行规律的运动 (图 2a), 然后随机改变其中一组的运动轨迹, 发现运动轨迹的随机变化会损害多目标追踪任务的表现。Wang 等^[2] 将目标之间或目标与非目标之间两两配对, 沿屏幕中的一条虚拟中心线进行对称运动 (图 2b), 发现目标与目标配对进行对称运动时, 观察者追踪表现有所提高, 而目标与非目标配对运动时, 追踪表现降低。总体来说, 基于物体运动轨迹、方向、空间关系等时空线索形成目标和非目标的分组时, 会导致目标和干扰物时空连续性线索的中断, 导致更多注意资源的消耗, 从而降低被试追踪表现, 当物体时空线索有利于被试形成目标间分组时, 则会提高追踪表现。

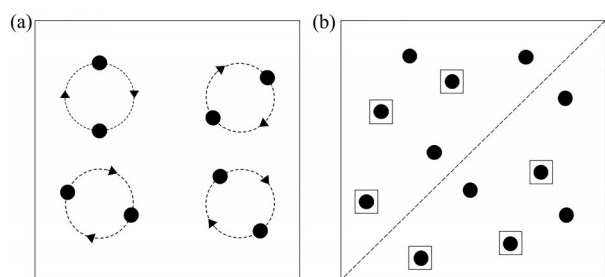


Fig. 2 Spatiotemporal-based grouping

图2 基于时空特征分组示意图

(a) Ericson 和 Beck^[12] 的运动分组示意图。运动过程中每个目标都与一个非目标配对进行规律运动。(b) Wang 等^[2] 的对称目标分组示意图。黑色方框内的为目标, 每个目标都与另一个目标沿屏幕中心的一条虚拟轴对称, 且运动过程中也保持对称。

2.1.2 基于物体的分组

基于物体 (object-based) 的分组效应主要是根据知觉的格式塔原则, 将组成视觉的不完整对象

或离散对象知觉为一个整体或知觉为新的物体的知觉分组, 如虚拟多边形^[11]、连接^[33]、插补轮廓^[20]等。不同于时空特征分组中对象间存在着时空关系, 基于物体的分组中对象是离散的, 但是由于个体的知觉经验, 这些离散的对象能够被直接、同时注意到, 并被知觉为一个更大的整体^[33-34]。如观察者在追踪多个具有不同身份的物体时, 会将运动中构成一个虚拟多边形的目标整合到一个空间结构中组合为一个更高阶的对象, 进而影响追踪, 即产生整体构型 (spatial configuration)^[35]。Scholl 等^[33] 采用目标和非目标融合的模式用一条线或凸包将目标和非目标相连接 (图 3a), 随着时间推移, 当目标和非目标不断融合时, 选择和追踪目标变得愈发困难, 即目标和非目标的分组损害了追踪表现。Keane 等^[20] 对多目标追踪任务进行改进, 创造了多点追踪任务范式 (multiple vertex tracking, MVT)。他们将经典多目标追踪任务中使用的黑色圆盘改为具有不同开口角度的扇形, 让一个目标与一个非目标进行配对, 围绕一个圆心进行运动。当目标的开口朝向固定, 在运动过程中相互插补组成一个虚拟的多边形轮廓时, 观察者追踪表现能够得到显著提升 (图 3b)。已有研究结果表明, 基于物体的分组效应会影响观察者多目标追踪任务中的表现。

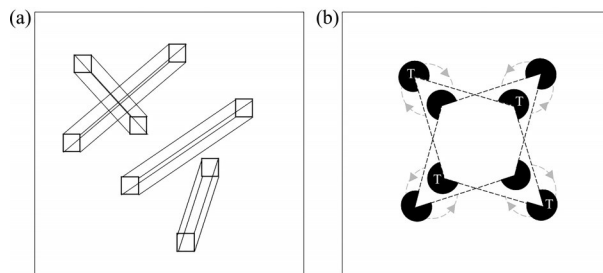


Fig. 3 Object-based grouping

图3 基于物体分组示意图

(a) Scholl 等^[33] 的连接分组示意图。目标与非目标均为完全相同的黑色方框, 每个目标都与一个非目标连接在一起形成一个近似立方体的形状, 运动过程中也一直保持连接。(b) Keane 等^[20] 的目标插补轮廓分组示意图。T 为追踪的目标, 每个目标与一个非目标配对进行位置交换运动, 目标的开口朝向固定且始终能形成一个虚拟多边形轮廓。

2.1.3 基于表面特征的分组

基于表面特征的分组效应主要是通过目标和分心物表面特征的相似或不同进行知觉分组。由于多

目标追踪任务要求观察者随着时间推移建立有关追踪目标的信息,因此以往研究多认为观察者主要利用物体时空连续性的信息进行追踪任务,进而忽略有关物体表面特征信息的影响,但后续研究表明物体表面特征也会影响追踪表现^[36]。观察者会利用诸如颜色^[2, 5, 7, 9, 37]、形状^[3, 9]、大小^[9, 37]等物体表面特征有关的信息进行追踪任务。Makovski和Jiang^[38]的研究结果表明,颜色和数字的不同会提高多目标追踪任务表现,但目标和非目标特征的配对(图4a)会导致任务表现下降。Erlikhman等^[9]对物体的颜色、反差极性、方向、大小、形状、立体深度和不同特征间的组合等特征进行操纵,结果发现颜色、形状、立体深度、大小、组合特征对观察者追踪表现有显著影响。Wang等^[7]对目标和分心物的颜色复杂程度和相似程度进行控制,结果显示,只有目标的颜色复杂性会影响追踪表现(图4b),且目标和分心物之间越相似,需要的注意资源就越多。这表明观察者主要利用目标的独特性信息辅助追踪过程,缺乏独特性的目标会使得观察者耗费更多注意资源来保持追踪,从而降低追踪成绩,拥有独特特征的目标则可以减少注意资源消耗,提高追踪表现。

总体来说,当基于物体特征的分组效应(表面特征、时空特征等)与基于追踪任务的分组相一致时,特征分组可以让观察者耗费更少的注意资源来维持对目标的追踪,从而提高追踪表现,当上述两种分组不一致时,即基于物体特征的分组效应将目

标和干扰物分为一组时,需要耗费更多的注意资源

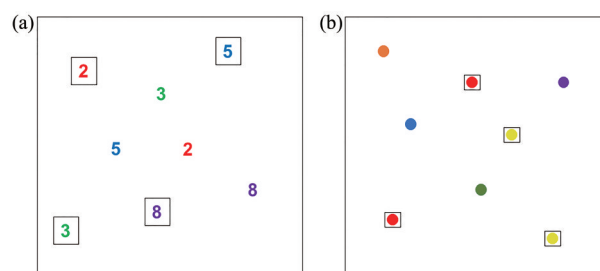


Fig. 4 Feature-based grouping

图4 基于表面特征分组示意图

(a) Makovski和Jiang^[38]的目标非目标分组示意图。黑色方框内的数字为目标,每个目标都有一个颜色和数字完全相同的非目标进行配对。(b) Wang等^[7]的颜色复杂程度分组示意图。黑色方框内的圆点为追踪目标,目标组只包含两种不同的颜色,而非目标组包含四种不同的颜色。

来抑制干扰物,以维持自上而下追踪任务,从而降低追踪表现。而除了上述3种类型的分组效应之外,近年来还有研究者发现存在基于语义范畴的分组效应(表1),观察者会将不同语义类别的图片知觉为同一组,并影响追踪表现,如将兔子、小猫等动物图片知觉为一组,书桌、沙发等家具图片知觉为一组^[21-22]。尽管语义范畴分组与表面特征、时空特征,以及基于物体的分组都来自于个体的知觉组织经验,但基于语义范畴的分组不仅涉及到对追踪物体的知觉层面的加工,还涉及到对物体知识表征层面的加工,这为了解个体如何知觉组织客观世界表征提供了更广泛的视角。

Table 1 Related studies of grouping effect

表1 分组效应相关文献总结

分组分类	分组依据	相关神经网络	相关文献
基于时空特征的分组	运动轨迹	外侧枕叶复合体、后颞下回、右侧舌回、右侧楔叶	[2, 12, 15, 31-32, 39]
	运动速度		[11]
基于物体的分组	连接	虚拟多边形	[33]
	插补轮廓		[20]
	虚拟多边形		[11]
基于表面特征的分组	颜色	双侧颞顶联区、壳核、额叶眼动区、额下回	[2, 5, 7, 9, 37, 39-40]
	形状		[3, 9]
	大小		[9, 37]
	立体深度		[9]
其他	语义范畴		[21-23]

2.2 分组效应中的注意资源

注意分配一直是知觉研究领域的重要问题,对于分组是否需要注意资源的参与,研究者们的看法

产生了分歧。在静态知觉组织加工中,可以对不同维度的特征进行提取整合形成不同层次的整体知觉,如物体的颜色、朝向、大小等,这种整体性知

觉有助于使用有限的视觉容量处理复杂的视觉场景^[41]。一些研究者认为分组是发生在前注意阶段的一种自动化的认知加工过程, 无需注意资源的参与^[42]。另一些研究者则认为, 分组过程需要注意资源的参与, 注意对分组中的对象特征绑定有着重要作用^[43-46]。尽管有后续研究表明, 即便被试在非注意条件下没有报告分组, 其视觉感知确实受到了分组的影响^[47-48]。而在动态视觉任务中, 不仅需要复杂视觉场景中识别目标物体, 还需要对目标物体进行持续注意以完成追踪任务, 这可能导致了多目标追踪任务中存在与静态知觉任务不同的注意资源参与过程。不同于静态知觉任务, 多目标追踪任务中的分组过程涉及到两个阶段: 第一个阶段发生在目标标记过程中, 观察者受知觉组织的格式塔原则影响自发地对运动对象进行知觉分组, 是“刺激驱动”的“分组形成阶段”; 第二个阶段发生在目标追踪过程中, 观察者受到对追踪目标组合内部表征的动态更新能力的影响, 将注意集中在追踪目标上, 为目标导向的“分组保持阶段”^[11]。追踪过程中对追踪目标的注意分配是强制性的^[49]。

在追踪过程中, 一方面观察者为了完成任务要求而有意识地将注意集中在追踪目标上, 这属于自上而下的加工过程, 另一方面来自感觉通道的刺激对象本身的特征无意识地影响了观察者的知觉组织过程, 即产生自下而上的加工过程。因此, 当任务要求的目标与非目标分组与基于特征的分组相一致时, 分组效应会提高多目标追踪任务表现, 反之则会引起加工冲突, 从而需要观察者在意识控制下忽略来自基于特征分组的干扰, 耗费更多注意资源来维持对目标的追踪, 导致追踪任务表现的降低。

2.3 分组效应的自动化机制

多目标追踪中分组效应的自动化是指在追踪任务中, 基于特征的分组效应不受观察者主观策略控制而自发性的对追踪表现产生影响, 无论该影响是有益还是无益。实验中进行分组效应的自动化研究时, 需要根据追踪对象的某一特征设置不同的分组条件和无分组的基线, 当观察者在目标-非目标分组的表现显著低于基线, 同时目标-目标分组表现好于基线时, 即证明了基于该特征分组效应的自动化^[9]。不同类别的分组效应中, 由于不同的任务要求以及自下而上知觉组织过程, 可能产生不同的自动化水平。

在基于表面特征的分组效应研究中, Makovski 和 Jiang^[5] 使用不同颜色和数字进行研究, 证明了

目标和目标的配对会提高追踪表现, 而目标和非目标的配对会损害追踪表现。之后 Erlikhman 等^[9] 使用不同形状的黑色物体进行研究, 结果也表明目标-目标分组会提高多目标追踪任务表现, 而目标非目标分组会降低追踪表现, 进一步证实了基于表面特征的分组效应对多目标追踪任务的自动化影响。

基于时空特征的分组效应中, Wang 等^[2] 根据空间对称性, 使两两目标或两两非目标以显示屏中的一条隐形对称轴为中心进行对称运动, 证实了基于空间对称性分组的自动化。胡路明等^[15] 将目标与目标或目标与非目标匹配进行追赶运动, 结果显示与基线条件相比, 目标与目标匹配时观察者追踪成绩提高, 目标与非目标匹配时追踪成绩则降低, 证实了运动轨迹分组的自动化。Wang 等^[2] 和胡路明等^[15] 的研究共同证明了基于时空特征分组效应的自动化。

分组效应的自动化机制进一步证实了多目标追踪过程中, 追踪对象自身特征对分组自下而上的影响, 也解释了当目标与非目标被知觉为同一组时, 特征分组与任务要求分组之间加工冲突导致的追踪表现下降的现象。来自物体特征的自动化分组将不同物体组合为一个整体, 形成了无法忽视的视觉感知背景, 在此基础之上, 观察者受到自上而下的注意调控而对物体进行“再分组”, 即多目标追踪中任务要求的分组维持^[50-51]。因此, 当来自物体表面特征所形成的知觉背景或来自时空属性所形成的时空连续特征与与任务要求的目标分组相冲突, 形成目标与非目标的错误分组时, 观察者的追踪表现便会降低。

3 多目标追踪中分组效应的可加性

多目标追踪中分组效应的可加性是指, 当两个或多个不同的分组效应共同支持同一个目标分组时, 产生的分组效应对追踪表现的提高显著高于仅有单个分组效应存在时^[2]。基于两个及以上特征分组效应的可加性的研究, 对于提升人类的认知和注意功能以及知觉组织加工具有重要意义。在基于一个特征的分组效应基础上, 叠加一个新的特征, 可以进一步提高个体认知加工客观物体的效率, 并提升在不同任务中的表现。以往研究表明, 多目标追踪任务中, 不同的表面特征之间不存在可加性^[2, 3, 9, 39], 表面特征和对称特征之间存在可加性^[2, 39]。

3.1 不同特征分组效应的可加性

以往研究使用颜色、形状和大小特征作为变量,结果均表明不同表面特征的分组效应不存在可加性。Feria^[3]使用不同形状和颜色特征的物体进行研究,发现目标与非目标的不同特征数量追踪结果产生的影响是相同的,只有当追踪负荷非常低时,不同特征数量的影响才出现了显著差异。Erlikhman等^[9]对物体的形状、颜色和大小特征进行组合,发现基于三者的分组效应与基于单一特征的分组效应相比没有显著区别,即两个及以上的表面特征的分组效应是不具有可加性的。

以往研究已经证实,多个表面特征的分组效应不具有可加性,但Wang等^[2]的研究则表明,基于表面特征的分组效应和基于空间对称性的分组效应之间存在可加性。研究以时空特征中的运动轨迹(是否空间对称)和表面特征中的颜色、形状为变量,发现无论是颜色还是形状特征,与运动轨迹结合产生的分组效应均大于单个特征的分组效应。这证明了基于空间对称性的分组效应和基于表面特征相似性的分组效应之间可加性的存在。

多个特征相加产生更大的分组效应,表明了个体在前意识阶段并非只能对注意特征进行简单的直接加工,还选择性地注意资源分配到不同的注意对象上,并对不同注意对象进行加工组合,以减少注意资源地消耗,提升认知功能。在“分组形成阶段”,观察者利用物体表面特征进行目标标记,形成与任务要求相一致的分组,然后在“分组保持阶段”通过物体的时空特征维持对追踪目标的注意,这两种自下而上的知觉组织过程在不同的加工阶段相互合作,以提高追踪表现。

3.2 分组效应可加性的影响机制

对于不同表面特征分组效应不可加性的出现,Feria^[3]提出了两个可能的原因。一个可能原因是视觉短时记忆(visual short-term-memory, VSTM)容量限制。当观察者需要追踪多个目标时,较高的追踪负荷耗尽了视觉短时记忆资源,进而缺乏足够的资源来维持每个目标的多个表面特征。另一个可能原因是,多目标追踪过程中目标与分心物只进行了粗略编码,目标的所有特征被当作一个整体来知觉,即整体特征不同。此外,Erlikhman等^[9]提出,视觉系统在追踪过程中只使用其中最显著的表面特征进行分组也可能导致了这一现象。

对于空间对称性和表面特征具有可加性的结果,Wang等^[2]也提出两个可能原因。一个可能原

因是空间对称特征和表面特征分别基于规则性和相似性这两个不同的格式塔知觉组织原则。相似性原则主要用于区分目标和分心物,单个特征差异已经足以达到这个目的,因此不同表面特征的分组效应不具有可加性。另一个可能原因是对称性属于空间运动信息,主要与负责处理物体位置和空间关系的背侧视觉网络(“where”通路)相关,而表面特征信息主要与负责处理物体形状和身份信息的腹侧视觉网络(“what”通路)相关,二者具有独立的加工处理通道,彼此之间不存在竞争性,因此两者相加可以产生更大的分组效应。

除了物体自身特征引起的知觉分组外,不同分组效应是否存在可加性或许还受到个体自上而下的选择性注意与注意抑制的调节。在基于表面特征的分组效应中,个体在追踪过程中只能选择性注意其中最显著的表面特征,而抑制其他无关的表面特征,因此不同表面特征不存在可加性;基于时空特征的分组效应也同样,个体只选择性注意其中最显著的时空特征而抑制无关的时空特征。但不同的时空特征和表面特征之间不会产生相互干扰,个体可以同时选择性注意不同的表面特征和时空特征,产生表面特征分组和时空特征分组的可加性。

4 分组效应的神经机制

经典多目标追踪研究发现,个体在追踪过程中大脑主要激活了包括顶内沟(intraparietal sulcus, IPS)、顶上(superior parietal lobule, SPL)和顶下小叶(inferior parietal lobule, IPL)、额叶眼动区(frontal eye fields, FEF)、额上沟(superior frontal sulcus, SFS),以及额中回(middle frontal gyrus, MFG)在内的背侧注意网络^[52-56]。

4.1 表面特征分组效应相关脑区

以往研究表明,在基于表面特征的分组效应主要激活脑区有双侧颞顶联合区(temporal parietal junction, TPJ)、壳核(putamen)和额叶眼动区(FEF)^[39, 57]。双侧颞顶联合区主要与静态特征区分任务有关^[58]。右侧颞顶联合区(R aTPJ)主要与注意分配有关,属于腹侧视觉网络^[40]。在颜色特征的多目标分组任务中,目标与分心物颜色相同时分心物会吸引注意资源,导致双侧颞顶联合区的显著激活^[39, 57]。此外,当分心物与目标具有相同的表面特征时,视觉系统也会消耗原本用于追踪目标的资源以对其进行抑制^[59-60]。因此,目标和分心物特征的相似性会导致消耗更多的注意资源和空间

工作记忆以建立追踪目标的时空连续性, 出现与注意控制和工作记忆相关的腹侧和背侧前额皮层以及额下回 (inferior frontal gyrus, IFG) 的正激活^[57]。

壳核主要与识别和存储相关信息, 忽略和抑制无关信息相关^[61-64], Jiang等^[62]的研究表明, 壳核主要负责存储特征关系信息, 特征分类和注意控制。在多目标追踪任务中, 目标与分心物颜色表面特征信息不一致时, 观察者可以通过颜色表面特征进行分类, 出现壳核区域的显著激活^[39, 57], 这表明壳核在区分目标和非目标上起着重要作用。Pylyshyn等^[65]指出, 与目标特征不同的分心物会被预先过滤掉, 而无需消耗注意资源进行抑制。额叶眼动区与基于特征的注意有关^[66]。当目标和分心物的表面特征不一致, 观察者消耗较少的刺激驱动和目标导向的注意资源就能建立有关目标的时空连续性的动态信息, 出现额叶眼动区的显著负激活^[39, 57]。

4.2 对称分组效应的相关脑区

基于空间对称特征的分组效应主要涉及的脑区为外侧枕叶复合体 (lateral occipital complex, LOC)。以往研究表明, LOC 主要与将元素组合成物体有关, 包括虚拟轮廓等实际上不存在的形式^[67-69]。Ferber^[70]的研究表明, 基于运动的分组信息会引起区域 LOC 的激活, 并且激活在运动结束后仍然持续, 使得观察者能够维持对运动物体的视觉感知。在基于空间对称的分组效应中, 对称运动的目标基于其运动信息组合为单个注意单元, 被知觉为一个整体, 引起后颞下回 (posterior inferior temporal gyrus, pIT) 的显著激活^[39]。后颞下回为 LOC 的一部分, 主要与物体识别和形式表征相关联^[71-72], 属于高级腹侧视觉通路, 在模式识别中扮演者重要角色^[73]。同时, 由于对称运动的目标组成的视觉动态场景相比于随机目标组成的场景更加简单和规则, 其编码和存储消耗的认知资源也更少, 对称分组还出现了与复杂视觉图像编码有关的右侧舌回 (right lingual gyrus)^[74] 和与视觉空间工作记忆有关的右侧楔叶 (right cuneus)^[75] 的显著负激活^[39]。

4.3 分组效应可加性的神经机制

基于特征和空间运动信息的分组效应可以进一步提升追踪任务表现, 提高知觉加工和注意的功能, 早期研究者猜测可能会与腹侧通路和背侧通路处理不同信息相关。认知神经科学领域的经典“两种视觉通路”理论认为, 从枕叶的初级视觉皮层

(V1) 延伸到顶叶的背侧视觉通路主要负责处理有关物体位置和空间关系的信息, 而从初级视觉皮层经枕颞叶一直延伸到颞叶前端的腹侧通路则主要负责处理有关物体形状和身份的信息^[76]。但多目标追踪任务本身就是包含运动信息的加工, 所以关于多目标追踪中分组效应可加性的神经机制仍然需要进一步实证的研究。

Wang等^[39]的研究从神经机制层面进一步揭示了表面特征分组效应和时空对称特征分组效应之间可加性的机制, 发现分组效应之间是否存在可加性与其各自激活脑有关。Wang等的研究中发现, 基于颜色特征的分组出现了双侧壳核区域的显著正激活, 腹侧视觉网络中颞顶联合和背侧视觉网络中的额叶眼动区的显著负激活, 基于形状特征的分组出现的激活与颜色特征分组的激活类似, 基于空间对称特征的分组主要激活了右外侧枕叶皮层 (lateral occipital cortex, LO)。在对称-颜色分组中, 既出现了与原本颜色特征分组相关的双侧壳核区域和颞顶联合区的激活, 又出现了与原本对称分组相关的外侧枕叶皮层的激活。而在颜色-形状分组则与单独的颜色或形状特征分组中出现的激活脑区没有显著差异。上述研究表明, 不同分组效应涉及的脑区激活机制可能是是否存在分组效应可加性的关键, 当多个特征分别激活不同的脑区时, 可以通过不同脑区之间的相互合作进一步提高追踪表现, 产生可加性。

5 总 结

近年除了从有关物体自身特征引起的分组效应角度进行研究外, 还从观察者角度进行了研究, 如个体自身运动^[77]、观察视角^[78]对多目标追踪任务的影响、不同认知发展阶段观察者^[79]或自闭症谱系障碍儿童^[80]受分组效应的影响等。尤其不同发展阶段的相关研究, 研究发现年龄显著影响个体的追踪能力, 但并不影响个体的分组敏感性, 揭示了个体知觉分组的发展成熟轨迹^[79]。这些研究为了解多目标追踪任务中分组效应的作用机制提供了更为丰富的视角。

本文从目标追踪任务中的分组效应出发, 围绕动态视觉追踪任务的知觉组织原则与规律问题, 分别分析了不同类型的分组效应, 分组效应的自动化, 以及分组效应中的可加性问题。尤其是有关分组效应是否存在可加性的研究, 揭示了个体如何根据不同的视觉线索组织知觉表征, 对深入了解不同

知觉组织原则之间的竞争与合作具有重要意义。在分组效应可加性的相关研究中,证实了不同表面特征的分组效应不具有可加性,表面特征分组效应和对称分组效应存在可加性^[2-3, 9]。对于不同表面特征分组效应不可加的原因, Feria^[3] 和 Wang 等^[2] 各自提出了两个可能原因,之后的脑成像研究则从神经机制层面进一步揭示了分组效应可加性的机制。不具有可加性的多个表面特征属于相同的知觉组织原则(相似性原则),各自激活的神经网络区域也相互重叠;而具有可加性的表面特征和时空特征分别属于不同的知觉组织原则(相似性原则和时空关系原则),且各自激活了不同的神经网络。这些研究有助于进一步探索腹侧、背侧视觉网络各自的功能及其相互协作关系。除此之外,对多目标追踪任务中的个体持续性注意处理与控制能力的研究,有助于了解现实世界中各项需要持续性注意能力的专业技能活动的心理过程,如体育运动、汽车驾驶、空中交通管制等,并针对性地提出训练和提高建议。

6 展 望

以往研究在行为研究的基础上,采用神经影像学对不同分组效应及分组效应可加性的神经基础进行了探索,发现了基于表面特征分组与时空特征分组的不同脑区和脑网络,这为不同类型分组效应的划分提供了神经层面的支持证据,也进一步揭示了不同分组效应产生的神经机制。但有关多目标追踪任务中的分组效应可加性的研究仍然存在有待进一步解决的问题,如不同分组效应各自独特的神经网络是否是产生可加性的决定因素,具有不同神经网络的知觉分组是否一定具有独特的降低注意资源消耗的方式才会具有可加性,能否通过神经机制来区分不同类型的分组效应,等等。因此,未来研究可以从以下几个方面入手,通过对具体分组效应及其组合的神经机制研究为上述推测提供实证支持。

第一,注意追踪中是否能进一步增加基于不同特征的分组效应,来降低注意资源的消耗,提高追踪绩效。以往研究中有关分组效应可加性的研究主要从表面特征和时空特征入手,而很少涉及基于物体的分组效应可加性的研究,有关基于物体的分组效应与表面特征和时空特征分组效应三者的可加性研究也仍然缺乏。因此今后研究可以从基于物体的分组效应入手,探讨诸如插补轮廓、连接等基于物

体的分组效应与颜色、形状等表面特征分组效应,或与空间对称、运动轨迹等时空特征分组效应之间的可加性及其机制。对多种分组效应组合叠加的尝试,是了解不同分组效应可加性与不可加性的认知机制的必要基础。

第二,注意追踪中的各类分组效应是否都具有独特的认知和神经机制。以往研究已经发现了基于表面特征和时空对称特征分组效应的各自相关脑区^[39],但基于物体的分组效应多为行为研究,影像学研究仍旧缺乏,至今仍不清楚哪些脑区与基于物体的分组效应有关。今后研究可以进一步深入探究基于物体分组效应的神经机制,这有助于更好地了解基于物体的分组效应,拓宽对分组效应分类的认知。

第三,基于不同特征的分组效应的分类仍然有诸多不清晰的问题待解决,未来研究应该提供更多实证研究证据,从而为分组效应可加性研究提供基础。以往研究中表面特征和时空特征的分组效应的定义较为清晰,但基于物体的分组效应则存在一定争议。静态选择性注意任务研究结果显示,存在基于物体,而非空间信息或表面特征的选择性注意^[81-82]。但在动态视觉追踪任务中,如 Scholl 等^[33]的研究中,目标与非目标的分组方式不仅是基于知觉格式塔原则的融合与遮挡,在目标与非目标不断融合的过程中,其时空连续性也受到损害,因此该研究是否完全属于基于物体的分组效应也有待商榷。此外,影像学研究表明,不同表面特征分组效应(颜色、形状等)的激活脑区重叠,证实了其分类的存在。但基于时空特征和基于物体的分组效应却缺乏同样的证据证明同一分类下不同特征是否激活相同的脑区。因此,今后可以尝试进行更多基于物体以及基于时空特征的分组效应的神经层面研究,这是探究能否通过神经机制区分不同分组效应的关键所在。

参 考 文 献

- [1] Pylyshyn Z W, Storm R W. Tracking multiple independent targets: evidence for a parallel tracking mechanism. *Spat Vis*, 1988, 3(3): 179-197
- [2] Wang C, Zhang X, Li Y, *et al.* Additivity of feature-based and symmetry-based grouping effects in multiple object tracking. *Front Psychol*, 2016, 7: 657
- [3] Feria C S. The effects of distractors in multiple object tracking are modulated by the similarity of distractor and target features. *Perception*, 2012, 41(3): 287-304
- [4] Franconeri S L, Hollingworth A, Simons D J. Do new objects

- capture attention?. *Psychol Sci*, 2005, **16**(4): 275-281
- [5] Makovski T, Jiang Y V. The role of visual working memory in attentive tracking of unique objects. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 2009, **35**(6): 1687-1697
- [6] Sun M, Zhang X, Fan L, *et al.* Hue distinctiveness overrides category in determining performance in multiple object tracking. *Atten Percept Psychophys*, 2018, **80**(2): 374-386
- [7] Wang C, Hu L, Talhelm T, *et al.* The effects of colour complexity and similarity on multiple object tracking performance. *Q J Exp Psychol (Hove)*, 2019, **72**(8): 1903-1912
- [8] Zhao C, Hu L, Wei L, *et al.* How do humans perform in multiple object tracking with unstable features. *Front Psychol*, 2020, **11**: 1940
- [9] Erlikhman G, Keane B P, Mettler E, *et al.* Automatic feature-based grouping during multiple object tracking. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 2013, **39**(6): 1625-1637
- [10] Tombu M, Seiffert A E. Tracking planets and moons: mechanisms of object tracking revealed with a new paradigm. *Atten Percept Psychophys*, 2011, **73**(3): 738-750
- [11] Yantis S. Multielement visual tracking: attention and perceptual organization. *Cogn Psychol*, 1992, **24**(3): 295-340
- [12] Ericson J M, Beck M R. Changing target trajectories influences tracking performance. *Psychon Bull Rev*, 2013, **20**(5): 951-956
- [13] Lau J S, Brady T F. Noisy perceptual expectations: multiple object tracking benefits when objects obey features of realistic physics. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 2020, **46**(11): 1280-1300
- [14] Makovski T, Vázquez G A, Jiang Y V. Visual learning in multiple-object tracking. *PLoS One*, 2008, **3**(5): e2228
- [15] 胡路明, 苏晶, 魏柳青, 等. 多目标追踪中基于运动信息的分组效应. *心理学报*, 2018, **50**(11): 1235-1248
- Hu L M, Su J, Wei L Q, *et al.* *Acta Psychologica Sinica*, 2018, **50**(11): 1235-1248
- [16] Wang Y, Vul E. The role of kinematic properties in multiple object tracking. *J Vis*, 2021, **21**(3): 22
- [17] Alzahabi R, Cain M S. Ensemble perception during multiple-object tracking. *Atten Percept Psychophys*, 2021, **83**(3): 1263-1274
- [18] Maki-Marttunen V, Hagen T, Laeng B, *et al.* Distinct neural mechanisms meet challenges in dynamic visual attention due to either load or object spacing. *J Cogn Neurosci*, 2020, **32**(1): 65-84
- [19] Meyerhoff H S, Papanmeier F, Jahn G, *et al.* Not flexible enough: exploring the temporal dynamics of attentional reallocations with the multiple object tracking paradigm. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 2016, **42**(6): 776-787
- [20] Keane B P, Mettler E, Tsoi V, *et al.* Attentional signatures of perception: multiple object tracking reveals the automaticity of contour interpolation. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 2011, **37**(3): 685-698
- [21] Wei L, Zhang X, Li Z, *et al.* The semantic category-based grouping in the multiple identity tracking task. *Atten Percept Psychophys*, 2018, **80**(1): 118-133
- [22] Wei L, Zhang X, Lyu C, *et al.* The categorical distinction between targets and distractors facilitates tracking in multiple identity tracking task. *Front Psychol*, 2016, **7**: 589
- [23] Wei L, Zhang X, Lyu C, *et al.* Brain activation of semantic category-based grouping in multiple identity tracking task. *PLoS One*, 2017, **12**(5): e0177709
- [24] Hu L, Wang C, Zhang X. Spatial resolution and object segmentation efficiency constrain grouping effects in attentive tracking. *Curr Psychol*, 2021, **41**: 7574-7587
- [25] Feldman J. The role of objects in perceptual grouping. *Acta Psychol*, 1999, **102**(2-3): 137-163
- [26] Zupan Z, Watson D G. Perceptual grouping constrains inhibition in time-based visual selection. *Atten Percept Psychophys*, 2020, **82**(2): 500-517
- [27] Wagemans J, Elder J H, Kubovy M, *et al.* A century of gestalt psychology in visual perception: I. perceptual grouping and figure - ground organization. *Psychol Bull*, 2012, **138**(6): 1172-1217
- [28] Yi D-J, Turk-Browne N B, Flombaum J I, *et al.* Spatiotemporal object continuity in human ventral visual cortex. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, **105**(26): 8840-8845
- [29] Henderson J M. Two representational systems in dynamic visual identification. *J Exp Psychol Gen*, 1994, **123**(4): 410-426
- [30] Zhou K, Luo H, Zhou T, *et al.* Topological change disturbs object continuity in attentive tracking. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, **107**(50): 21920-21924
- [31] Suganuma M, Yokosawa K. Grouping and trajectory storage in multiple object tracking: impairments due to common item motions. *Perception*, 2006, **35**(4): 483-495
- [32] Fencsik D E, Klieger S B, Horowitz T S. The role of location and motion information in the tracking and recovery of moving objects. *Percept Psychophys*, 2007, **69**(4): 567-577
- [33] Scholl B J, Pylyshyn Z W, Feldman J. What is a visual object? Evidence from target merging in multiple object tracking. *Cognition*, 2001, **80**(1-2): 159-177
- [34] Scholl B J. Objects and attention: the state of the art. *Cognition*, 2001, **80**(1-2): 1-46
- [35] Zhao L, Gao Q, Ye Y, *et al.* The role of spatial configuration in multiple identity tracking. *PLoS One*, 2014, **9**(4): e93835
- [36] Papanmeier F, Meyerhoff H S, Jahn G, *et al.* Tracking by location and features: object correspondence across spatiotemporal discontinuities during multiple object tracking. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 2014, **40**(1): 159-171
- [37] Howe P D L, Holcombe A O. The effect of visual distinctiveness on multiple object tracking performance. *Front Psychol*, 2012, **3**: 307
- [38] Makovski T, Jiang Y V. Feature binding in attentive tracking of distinct objects. *Vis cogn*, 2009, **17**(1-2): 180-194
- [39] Wang C, Hu L, Hu S, *et al.* Functional specialization for feature-based and symmetry-based groupings in multiple object tracking. *Cortex*, 2018, **108**: 265-275
- [40] Chang C-F, Hsu T-Y, Tseng P, *et al.* Right temporoparietal junction and attentional reorienting. *Hum Brain Mapp*, 2013, **34**(4): 869-877
- [41] Whitney D, Yamanashi Leib A. Ensemble perception. *Annu Rev Psychol*, 2018, **69**(1): 105-129
- [42] Duncan J. Selective attention and the organization of visual information. *J Exp Psychol Gen*, 1984, **113**(4): 501-517
- [43] Treisman A, Schmidt H. Illusory conjunctions in the perception of objects. *Cogn Psychol*, 1982, **14**(1): 107-141
- [44] Pomè A, Caponi C, Burr D C. The grouping-induced numerosity illusion is attention-dependent. *Front Hum Neurosci*, 2021, **15**: 745188
- [45] Shurygina O, Pooremaeil A, Rolfs M. Pre-saccadic attention spreads to stimuli forming a perceptual group with the saccade target. *Cortex*, 2021, **140**: 179-198
- [46] Rashal E, Kimchi R. The competition between grouping cues can

- be resolved under inattention. *Atten Percept Psychophys*, 2023, **85**(1): 64-75
- [47] Lamy D, Segal H, Ruderman L. Grouping does not require attention. *Percept Psychophys*, 2006, **68**(1): 17-31
- [48] Wood K, Simons D J. Processing without noticing in inattention blindness: a replication of moore and egeth (1997) and mack and rock (1998). *Atten Percept Psychophys*, 2019, **81**(1): 1-11
- [49] Tran A, Hoffman J E. Visual attention is required for multiple object tracking. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 2016, **42**(12): 2103-2114
- [50] Palmer S, Rock I. Rethinking perceptual organization: the role of uniform connectedness. *Psychon Bull Rev*, 1994, **1**(1): 29-55
- [51] Van Assche M, Gos P, Giersch A. Does flexibility in perceptual organization compete with automatic grouping?. *J Vis*, 2012, **12**(2): 6
- [52] Howe P D, Horowitz T S, Akos Morocz I, *et al.* Using fMRI to distinguish components of the multiple object tracking task. *J Vis*, 2009, **9**(4): 10
- [53] Alnæs D, Sneve M H, Richard G, *et al.* Functional connectivity indicates differential roles for the intraparietal sulcus and the superior parietal lobule in multiple object tracking. *Neuroimage*, 2015, **123**: 129-137
- [54] Alnaes D, Sneve M H, Espeseth T, *et al.* Pupil size signals mental effort deployed during multiple object tracking and predicts brain activity in the dorsal attention network and the locus coeruleus. *J Vis*, 2014, **14**(4): 1
- [55] Tomasi D, Wang R, Wang G J, *et al.* Functional connectivity and brain activation: a synergistic approach. *Cereb Cortex*, 2014, **24**(10): 2619-2629
- [56] Nummenmaa L, Oksama L, Glerean E, *et al.* Cortical circuit for binding object identity and location during multiple-object tracking. *Cereb Cortex*, 2017, **27**(1): 162-172
- [57] Hu L, Wang C, Talhelm T, *et al.* Distinguishing the neural mechanism of attentional control and working memory in feature-based attentive tracking. *Psychophysiology*, 2021, **58**(2): e13726
- [58] Tyler S C, Dasgupta S, Agosta S, *et al.* Functional connectivity of parietal cortex during temporal selective attention. *Cortex*, 2015, **65**: 195-207
- [59] Franconeri S L, Jonathan S V, Scimeca J M. Tracking multiple objects is limited only by object spacing, not by speed, time, or capacity. *Psychol Sci*, 2010, **21**(7): 920-925
- [60] Shim W M, Alvarez G A, Jiang Y V. Spatial separation between targets constrains maintenance of attention on multiple objects. *Psychon Bull Rev*, 2008, **15**(2): 390-397
- [61] Gao H, Cai X, Li F, *et al.* How the brain detects invariance and inhibits variance during category induction. *Neurosci Lett*, 2016, **626**: 174-181
- [62] Jiang J, Brashier N M, Egnér T. Memory meets control in hippocampal and striatal binding of stimuli, responses, and attentional control states. *J Neurosci*, 2015, **35**(44): 14885-14895
- [63] Li F, Cao B, Luo Y, *et al.* Functional imaging of brain responses to different outcomes of hypothesis testing: revealed in a category induction task. *Neuroimage*, 2013, **66**: 368-375
- [64] Samrani G, Marklund P, Engström L, *et al.* Behavioral facilitation and increased brain responses from a high interference working memory context. *Sci Rep*, 2018, **8**(1): 15308
- [65] Pylyshyn Z W, Haladjian H H, King C E, *et al.* Selective nontarget inhibition in multiple object tracking. *Vis Cogn*, 2008, **16**(8): 1011-1021
- [66] Zhang X, Mlynaryk N, Ahmed S, *et al.* The role of inferior frontal junction in controlling the spatially global effect of feature-based attention in human visual areas. *PLoS Biol*, 2018, **16**(6): e2005399
- [67] Chen S, Weidner R, Zeng H, *et al.* Tracking the completion of parts into whole objects: retinotopic activation in response to illusory figures in the lateral occipital complex. *Neuroimage*, 2020, **207**: 116426
- [68] Mendola J D, Dale A M, Fischl B, *et al.* The representation of illusory and real contours in human cortical visual areas revealed by functional magnetic resonance imaging. *J Neurosci*, 1999, **19**(19): 8560-8572
- [69] Orlov T, Zohary E. Object representations in human visual cortex formed through temporal integration of dynamic partial shape views. *J Neurosci*, 2018, **38**(3): 659-678
- [70] Ferber S. The lateral occipital complex subserves the perceptual persistence of motion-defined groupings. *Cereb Cortex*, 2003, **13**(7): 716-721
- [71] Dicarlo James j, Zoccolan D, Rust Nicole C. How does the brain solve visual object recognition?. *Neuron*, 2012, **73**(3): 415-434
- [72] Iwaki S, Bonmassar G, Belliveau J W. Dynamic cortical activity during the perception of three-dimensional object shape from two-dimensional random-dot motion. *J Integr Neurosci*, 2013, **12**(03): 355-367
- [73] Creem S H, Proffitt D R. Defining the cortical visual systems: "What", "where", and "how". *Acta Psychol*, 2001, **107**(1-3): 43-68
- [74] Machielsen W C, Rombouts S, Barkhof F, *et al.* fMRI of visual encoding: reproducibility of activation. *Hum Brain Mapp*, 2000, **9**(3): 156-164
- [75] Muthukrishnan S P, Soni S, Sharma R. Brain networks communicate through theta oscillations to encode high load in a visuospatial working memory task: an eeg connectivity study. *Brain Topogr*, 2020, **33**(1): 75-85
- [76] Haxby J, Horwitz B, Ungerleider L, *et al.* The functional organization of human extrastriate cortex: a pet-rcbf study of selective attention to faces and locations. *J Neurosci*, 1994, **14**(11): 6336-6353
- [77] Hu L, Zhao C, Wei L, *et al.* How do humans group non-rigid objects in multiple object tracking?: evidence from grouping by self-rotation. *Br J Psychol*, 2022, **113**(3): 653-676
- [78] Brockhoff A, Papenmeier F, Wolf K, *et al.* Viewpoint matters: exploring the involvement of reference frames in multiple object tracking from a developmental perspective. *Cogn Dev*, 2016, **37**: 1-8
- [79] Van Der Hallen R, Reusens J, Evers K, *et al.* Connection-based and object-based grouping in multiple-object tracking: a developmental study. *Br J Dev Psychol*, 2018, **36**(4): 606-619
- [80] Van Der Hallen R, Evers K, De-Wit L, *et al.* Multiple object tracking reveals object-based grouping interference in children with ASD. *J Autism Dev Disord*, 2018, **48**(4): 1341-1349
- [81] Chen Z. Object-based attention: a tutorial review. *Atten Percept Psychophys*, 2012, **74**(5): 784-802
- [82] Zhang X, Qiu J, Zhang Y, *et al.* Misbinding of color and motion in human visual cortex. *Curr Biol*, 2014, **24**(12): 1354-1360

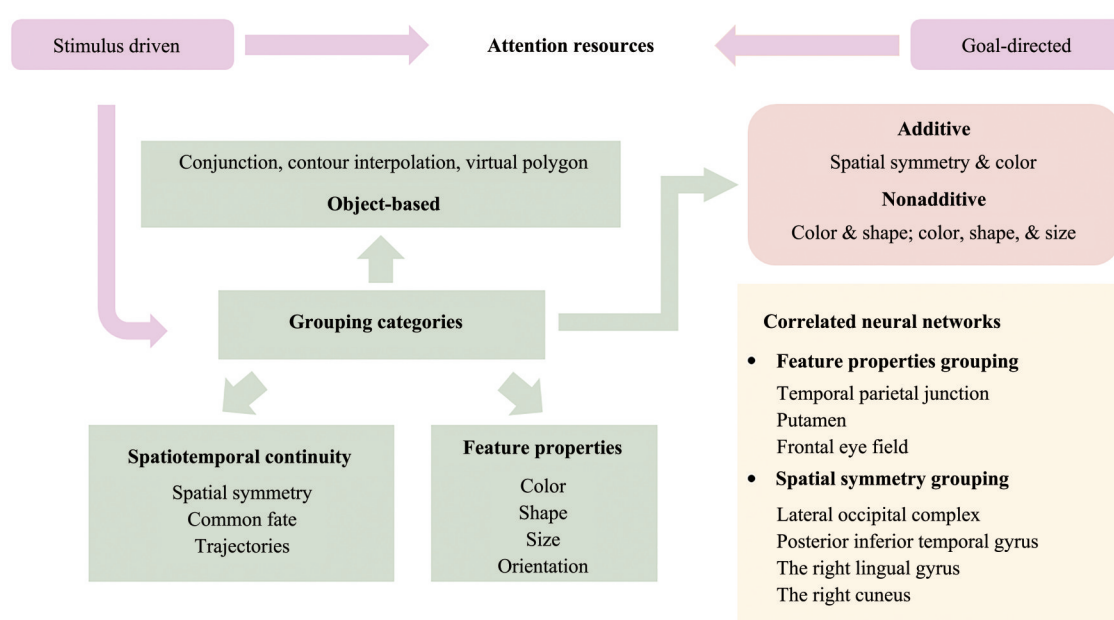
Grouping Effects and Its Additivity in Multiple Object Tracking*

WANG Chun-Di^{1)**}, LI Shu-Ting¹⁾, DENG Hu^{2)**}

⁽¹⁾Department of Psychology, School of Humanities and Social Science, Beihang University, Beijing 100191, China;

⁽²⁾Peking University Huilongguan Clinical Medical School, Beijing Huilongguan Hospital, Beijing 100096, China)

Graphical abstract



Abstract Reducing the consumption of attentional resources and improving human performance in dynamic visual sustained attention tasks is a key issue in sustained attention research. The multiple object tracking (MOT) task is a widely used paradigm for studying individual sustained attention. In a classic MOT paradigm, observers need to maintain their attention on specific targets among a set of distractors and track their movement. To further utilize attentional resources and improve tracking performance, researchers have proposed studying the additivity problem of grouping effects in attention tracking. Grouping effects during MOT is the phenomenon that moving items can be perceived into larger moving units based on featural cues of themselves or task requirements. This article reviewed previous studies about attention resources, classification, additivity, and neural mechanisms of grouping effects in MOT. Based on previous research, we concluded that grouping effects in MOT can be classified into three categories, *i. e.*, spatiotemporal-based grouping, object-based grouping, and feature-based

* This work was supported by grants from The National Natural Science Foundation of China (31900751) and Beijing Municipal Administration of Hospitals Incubating Program (PX2023071).

** Corresponding author.

WANG Chun-Di. Tel: 86-15810350361, E-mail: wangchundi@buaa.edu.cn

DENG Hu. Tel: 86-18515970501, E-mail: denghu501@163.com

Received: December 20, 2022 Accepted: March 26, 2023

grouping, according to different grouping cues (spatiotemporal continuity, global perception and organization of objects, and surface featural similarity). Grouping based on multiple cues will produce greater effects compared with one cue, this is the additive effect. The study of additivity is important for understanding the cognitive mechanisms of different grouping effects, the attentional mechanisms, and resource allocation in individual dynamic visual tracking. This study summarized previous behavioral and neuroimaging research and systematically explored the non-additivity based on different surface features and the additivity based on surface features and specific spatiotemporal features. Exploring the mechanism of additivity effects provides us with new insight into understanding grouping effects. For future studies, researchers need to thoroughly investigate the neural mechanisms of different kinds of groupings. This can not only provide explanations for the additivity of groupings but also provide substantial evidence for the classification of groupings.

Key words multiple object tracking, grouping effects, additivity, feature-based grouping

DOI: 10.16476/j.pibb.2022.0571