

视觉工作记忆存储的表征单位

刘茹邑¹, 郭利静¹, 程钰欣¹, 李倩¹, 叶超雄^{1,2*}

¹四川师范大学脑与心理科学研究院, 四川 成都

²于韦斯屈莱大学心理学系, 芬兰 于韦斯屈莱

收稿日期: 2022年2月18日; 录用日期: 2022年3月17日; 发布日期: 2022年3月23日

摘要

视觉工作记忆被视为容量有限的储存系统, 人们可以灵活处理其中表征以完成任务。有关视觉工作记忆容量的讨论首先要明确其表征单位, 前人利用延迟匹配范式和回忆范式, 研究不同维度特征和同一维度不同水平特征在视觉工作记忆中的储存形式, 支持整体表征和特征表征的学者各执一词——基于客体的表征假设认为不同特征绑定在同一客体上, 且相比记忆单特征对象, 记忆相同数量的多特征对象并无额外代价; 而基于特征的表征假设认为不同维度的特征独立储存, 有各自的容量限制。此外, 作为目标驱动的记忆系统, 视觉工作记忆所受到的实验设计和任务要求的影响同样不可忽视。本文通过梳理前人对表征单位的争论, 试图得到统一两种假设的理论解释。这有助于我们加深对视觉工作记忆容量的理解, 并在探索相关问题时考虑到任务要求的影响, 完善实验设计。

关键词

视觉工作记忆, 表征单位, 任务要求

The Representation Unit of Visual Working Memory

Ruyi Liu¹, Lijing Guo¹, Yuxin Cheng¹, Qian Li¹, Chaoxiong Ye^{1,2*}

¹Institute of Brain and Psychological Sciences, Sichuan Normal University, Chengdu Sichuan

²Department of Psychology, University of Jyväskylä, Jyväskylä Finland

Received: Feb. 18th, 2022; accepted: Mar. 17th, 2022; published: Mar. 23rd, 2022

Abstract

The visual working memory is a limited storage system in which people could flexibly process the

*通讯作者。

representations to complete the task. Among studies on the capacity of visual working memory, the representation unit is a prior subject. Previous research employs the change-detection paradigm and the recall paradigm to explore the nature of representations when features of diverse dimensions and different-level features of the same dimension are stored in the visual working memory. These studies elicit two binary hypotheses: the object-based representation hypothesis backs that those diverse features are bound on the object and form a whole, while the feature-based representation hypothesis supports that independent feature representations have a specific capacity limitation on each dimension. Besides, as a target-drive memory system, the visual working memory receives an undeniable impact from the experiment process and the task demand. By comparing and concluding previous debates on the representation unit, we attempt to reach a united explanation of two hypotheses. This benefits our comprehension of the capacity of visual working memory. The exploration of relevant problems might consider the impact of task demand to improve the experimental design.

Keywords

Visual Working Memory, Representation Unit, Task Demand

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

视觉工作记忆(visual working memory, VWM), 作为一个灵活的线上缓冲系统, 可以在短时间内主动编码、保持和提取视觉信息, 并可以对已经储存的信息进行目标驱动的操作(Baddeley, 2012; Luck & Vogel, 1997)。视觉工作记忆服务于其他认知任务, 影响着个体的整体认知表现(Fukuda et al., 2010)。然而视觉工作记忆容量十分有限(Cowan, 2001), 以往研究发现个体的视觉工作记忆容量局限于 3~4 个单位(Luck & Vogel, 1997), 但是容量的精准数额尚未明确。

要探究这一问题, 无法绕开关于视觉工作记忆表征单位的讨论——其最小表征单位是对象整体还是独立特征仍存在两种观点。一是基于客体的表征(object-based representation)假设: 认为不同的特征信息在视觉工作记忆中强制绑定在相应客体上, 形成若干独立整体(如红色长方形、蓝色五角星), 视觉工作记忆的容量为有限数量的客体(Luck & Vogel, 1997)。二是基于特征的表征(feature-based representation)假设: 认为不同的特征信息可以各自分离储存(如红色、蓝色, 长方形、五角星), 不同维度特征(如颜色、形状)有各自的容量限制(Alvarez & Cavanagh, 2004)。

目前对于两种观点仍存在很大的争议(Drew & Vogel, 2009; Luck & Vogel, 2013; Brady et al., 2011), 例如: 缺乏对支持两种假设的实验结果之间所存分歧的统一解释; 关注不同记忆对象的差异和不同实验范式能测量出的表征所含细节多寡的差异, 而不够重视实验设计和任务要求本身对表征形式的影响。因此本文拟通过对前人支持基于客体的表征假设与基于特征的表征假设的研究进行梳理, 并最终提出对于这两种看似相互矛盾可能的解释。

2. 基于客体的表征单位

在编码多特征记忆对象时, 基于客体的整体表征假设认为同一客体的多个特征强制绑定在一起, 相比记忆一个长方形, 记忆一个红色长方形不会消耗额外的资源。Luck 和 Vogel (1997)利用改良的延迟匹

配任务(change-detection task)首次提出多特征对象在视觉工作记忆中以整体而非独立特征为单位储存。实验过程中,先给被试呈现一定数量的单特征和多特征刺激作为记忆对象,一段时间后刺激消失,再呈现固定时间的空屏,呈现测试阵列。被试需要判断测试阵列对象相较记忆中的是否发生变化,并进行按键反应。记忆相同数量的单特征对象(如色块,仅包含颜色特征)和多特征对象(如彩色长条,包含一个颜色特征和一个方向特征;或大色块嵌套小色块,包含两个颜色特征)时,反应准确率没有差异。然而在记忆多特征对象时,视觉工作记忆中维持的特征数是记忆单特征对象时的两倍,若表征单位为独立特征,反应准确率应该更低,也就是说,当多个特征属于同一对象,被试无须额外代价即可记忆更多特征,故而表征单位应为对象整体。此外,若不同维度的特征分别储存在独立的子系统中而非以客体为单位形成表征,虽然在记忆异维度多特征对象时任务表现与记忆相同数量的单特征对象时一样好,但在记忆同维度多特征对象时任务表现会变差;而实验表明,使用这两类刺激结果无显著差异,异维度特征和同维度不同水平特征均可以绑定在同一对象上形成储存在视觉工作记忆中的一个整体(Lee & Chun, 2001; Gao et al., 2011)。基于客体的整体表征假设也适用于其他特征维度(形状: Luria & Vogel, 2011; 运动关系: Shen et al., 2021)。

这种同一客体的多特征绑定非常牢固,以至于仅有部分维度的特征发生改变时,在视觉工作记忆中整个客体都会随之变化(Hollingworth & Rasmussen, 2010)。同样利用延迟匹配范式, Hollingworth 和 Rasmussen (2010)给被试呈现四个不同颜色、位置的色块作为记忆对象,记忆阵列结束后,颜色特征消失,屏幕上仅留下四个方框,随后方框开始移动,一段时间后停止,颜色重新出现进入探测阵列,判断是否有与记忆阵列不同的新颜色出现。结果表明当颜色出现在变化后位置时,记忆表现好于出现在无关位置的情况。由于视觉感知中仅客体位置(无色方框)发生变化,但在视觉工作记忆中另一个维度的特征(方框内原本的颜色)也随之移动了,说明颜色和位置牢牢绑定在同一对象上,表征的单位是整体对象而非独立的空间位置特征。

除行为实验外,一些电生理研究更客观地证明了这个观点。例如 Luria 和 Vogel (2011)发现脑电成分 CDA (contralateral delay activity, 对侧延迟活动,其振幅直接反映视觉工作记忆中维持表征数的振幅与对象数量相对应,与对象内特征数无关。借助 CDA, 薛成波等人(2015)发现位置和颜色特征自动绑定在同一客体上, Chen 等人(2018)发现被部分遮挡的图形在视觉工作记忆中以完整图形而非马赛克的形式储存。这些 ERPs 的实验结果都为整体表征假设提供了神经生理证据。

3. 基于特征的表征单位

根据基于特征的表征假设,出现在同一客体上的不同维度特征可以独立储存,它反驳了整体表征的两个重要推论——相比记忆单特征对象,记忆多特征对象并无额外代价(Olson & Jiang, 2002; Wheeler & Treisman, 2002; Xu, 2002b; Fournie et al., 2010; 王静等, 2018); 绑定于同一客体的各个特征高度相关,这些特征的精细程度是一致的(Davis & Holmes, 2005; Bays et al., 2011; Wang et al., 2017; Markov et al., 2019)。也就是说,一方面随着记忆对象的特征数增加,记忆相同数量的对象时所能记住的细节会减少;另一方面,若在记忆多特征客体时,有的特征记得更清晰,有的特征记得更模糊,说明这个客体的表征是可分的(可以被分为清晰和模糊的两部分),那么表征的最小单位就应该是能被分割出来的部分,即特征,而非客体,故而储存同一客体上的不同特征时,误差(即表征与实际刺激的差值)彼此独立,可以支持基于特征的表征假设。

Xu (2002b)利用形状类似蘑菇的刺激和延迟匹配范式检验基于客体的表征假设,其中蘑菇伞与蘑菇杆的颜色不同,故同一客体包含两个特征。在双特征条件下,被试需要记忆整个蘑菇;而单特征条件下,只需要单独记忆蘑菇伞或蘑菇杆。结果记忆五个双色蘑菇的准确率低于记忆五个单色蘑菇伞或蘑菇杆的,

说明利用有限的记忆资源可以储存的单特征客体数多于双特征客体数, 或者在储存单特征客体时颜色表征更精确。实验结果与主张无额外代价记忆多特征对象的整体表征假设不符, 引出了对特征表征假设的进一步研究。

Markov 等人(2019)采用回忆任务(recall task)进行实验, 与延迟匹配任务不同的是, 探测阶段被试需要自行调整探测对象的颜色或方向, 使其与记忆阵列呈现的相应对象(带颜色的等腰三角形)一致, 故任务可以对表征精确程度进行探测。实验中包含三种情况, 同样记忆三个对象, 区别在于颜色、方向两个维度的特征数不同, 若视觉工作记忆以整体表征为单位, 探测颜色或方向时, 三种情况下任务表现应无显著差异。然而要求被试记忆三个颜色、方向均不相同的对象时, 探测颜色的表现不如记忆三个颜色相同但方向不同或相同的对象; 而只要颜色特征数相同, 无论对象方向是否相同, 探测颜色的表现均没有显著差异。这一结果表明某一维度特征的记忆表现仅取决于这一维度特征的数量, 与其他维度特征无关。因为出现了感觉层面绑定在同一客体上的不同维度特征的记忆表现分离, 颜色特征可以比方向特征记得更清楚, 故他们认为不同维度特征独立储存, 支持基于特征的表征假设。

被试完成视觉工作记忆任务时, 反应错误不仅源于没能成功记住探测对象和没能记住足够细节, 还可能源于错误地报告了非探测对象的特征水平, 后者反映了特征与客体的绑定并不稳固, 这种交换错误也是表征以特征为单位的证据之一(Wood, 2011a; Wood, 2011b; Markov et al., 2021)。Markov 等(2021)以真实对象作为刺激, 给被试呈现两组同类型共四个对象(如红色、绿色指甲油和红色、绿色冷却器), 同时这些对象包含不同或相同的状态特征(如打开、盖上), 在探测环节要求被试识别一类原型两个对象的状态。结果发现呈现不同状态的同类对象比相同状态时任务表现更差。两种情况下记忆对象数相同, 基于对象的表征假设无法解释这种差异。只有当呈现两个不同状态的原型时, 交换错误才会在行为结果中体现出来, 故这种差异可能源于状态特征和原型的对应发生错误, 意味着这些对象以特征表征在视觉工作记忆中维持。

面对分别支持两种表征假设的不同实验结果, 学者们基于一方立场互有攻防, 主要从记忆对象能否组块, 实验范式能测量出的表征细节多寡, 以及任务要求对表征单位的影响等方面展开讨论。但是支持两种假设的实验结果看似矛盾, 也有交融之处。越来越多的研究者发现视觉工作记忆中的表征单位不是非此即彼的, 而是同时存在基于客体和基于特征的两种表征。

4. 基于任务的双表征单位

部分实验同样以双同维特征的对象为刺激, 却无法重复 Luck 和 Vogel (1997)结果, 坚持整体表征假设的 Vogel 等人(2001)认为这是由于不同实验中记忆对象的差异, 认为单纯地将两个颜色并列放置时被试无法进行组块(chunk 或 grouping)。不同维度的特征或同一维度不同水平的特征被视作属于同一客体的过程称为组块, 它意味着组块内客体间有明显的某种关联, 如自动化的格式塔线索(Luria & Vogel, 2014)或经验线索(Kaiser et al., 2015), 而组块间关联对所完成的任务无用(Cowan, 2001)。然而, 组块说无法解释所有记忆多特征对象时, 表现不如记忆相同数量的单特征对象的研究(Olson & Jiang, 2002; Fougne et al., 2010)——Vogel 等人(2001)的实验没能发现这种“代价”或许是实验设计造成的, 被试不需要记得很清楚就能做出正确判断——以及不同维度特征间误差独立的研究(Fougne et al., 2013)。此外, 基于特征的表征假设强调特征是视觉工作记忆表征的最小单位, 它并未否认这些特征在感知层面可以属于同一整体, 也不否认人们可以通过组块降低记忆难度, 利用特征间自动化的或符合经验规律的关系辅助记忆不等于这些特征牢牢绑定、密不可分, 而 Vogel 等人(2001)利用反应准确率来判断表征结构的设计是间接的, 在视觉工作记忆资源有限的前提下, 无法区分增加客体上的特征数时反应准确率无明显变化是源于表征单位的增大, 还是源于组块带来的记忆载荷下降。类似地, 支持整体表征的 CDA 证据(Luria & Vogel, 2011; 薛

成波等, 2015; Chen et al., 2018)与支持特征表征的大量行为实验证据之间的矛盾, 部分基于认为 CDA 振幅反映表征数量的初始观点。前人研究表明, CDA 的振幅, 更准确地说, 反映的是储存载荷即储存信息量, 相同数量的复杂刺激会比简单刺激引起更明显的 CDA (Luria et al., 2010)。或许由于组块降低了对对象记忆载荷, 增加的特征并未在 CDA 上得到体现。

尽管如此, Marshall 和 Bays (2013)发现要求被试只记忆任务相关维度的特征时, 任务无关维度的特征会自动进入视觉工作记忆, 说明即便人们可以很好地过滤整个无关客体(Vogel et al., 2005), 某一维度的特征无法被完全忽视, 同一客体上特征间的绑定是自动的。同时无法否认的是, 记忆绑定在同一客体上的不同特征时, 表现好于记忆相同数量的分离特征(Xu, 2002a; Olson & Jiang, 2002; Quinlan & Cohen, 2011; Kim & Kim, 2011), 说明视觉工作记忆中, 同一客体的不同特征间可以存在某种关联使它们以一个整体的形式参与后续处理, 从而改善任务表现。

视觉工作记忆是任务指向的缓冲系统, 任务要求会影响视觉信息在工作记忆中的储存形式(Droll et al., 2005)。越来越多的实验表明, 视觉工作记忆中的表征单位不是非此即彼的, 同时存在基于客体和基于特征两种表征(Hardman & Cowan, 2015; Vergauwe & Cowan, 2015; Geigerman et al., 2016; McCants et al., 2020; Chen et al., 2021; Sone et al., 2021)。Geigerman 等人(2016)采用延迟匹配任务, 让被试记住带有不同颜色、形状双特征的对象, 随后探测颜色、形状或对象整体。当探测对象整体时: 在任务分离条件下, 发生变化的探测对象颜色、形状均不同于记忆阵列中的特征水平, 被试只需要记忆特征水平是否出现过即可, 那么若表征以特征为单位, 反应时为提取颜色或提取形状单特征反应时中更短的那个, 若表征以客体为单位, 反应时会更长; 而在任务联结条件下, 发生变化的探测对象由记忆阵列中特征水平重组获得, 被试就需要记住颜色和形状绑定的关系, 若表征以特征为单位, 直到所有特征均被提取才可能做出判断, 故反应时不小于提取单特征反应时中更长的那个, 若表征以客体为单位, 反应时则稍短。结果显示任务分离条件下为特征表征, 任务联结条件下为整体表征。由于在编码阶段并不知道探测对象是重组的还是全新的, 无法在此时灵活选择其中一种表征单位, 所以视觉工作记忆中可同时存在两种表征。而具体使用哪种表征, 以及绑定特征间的依赖程度, 均取决于任务需要。

5. 小结与展望

本文回顾关于工作记忆表征单位的相关研究结论, 分别对支持基于客体的表征假设与基于特征的表征假设进行了总结, 并从记忆对象、实验范式、任务需要这几个角度尝试对以往研究所存在的争议进行解释。我们发现任务需要对表征状态有很大影响, 整体表征和特征表征可以同时保持在视觉工作记忆中, 在考察客体某一维度的特征时, 采用特征表征能利用细节更准确地完成任务, 而在考察对整个客体的记忆情况时, 采用整体表征可以缩短提取时间, 从而成为完成任务的优先选择。

虽然前人研究在视觉工作记忆储存的表征单位上存在分歧, 但所有学者均有一个共同的前提——视觉工作记忆容量是有限的, 区别在于整体表征假设认为储存的对象数量有限, 而特征假设认为储存的每个维度的特征数量各有上限。这种容量限制与参与视觉工作记忆系统的神经元数量有限和突触权重(synaptic weight)的变化有时间限制相对应(Vogel et al., 2001; Miller et al., 2018)。用于编码记忆对象的神经元群放电频率同步提高, 且负责编码的神经元数量有限, 视觉工作记忆中同时维持的对象越多, 编码不同对象的神经元群碰巧同步放电的可能性越大, 造成表征间干扰, 从而降低表征质量。依据任务所需, 被试维持一定质量的表征, 意味着可储存在视觉工作记忆中的对象数量有限。此外, 工作记忆表征的维持时间与突触的维持时间相关, 突触形成后在一段时间内突触权重不断降低直至突触解除, 而神经元不规则的间隔放电会刷新突触权重, 使表征的维持时间超过这一时间限制。由于多个储存对象会竞争有限的刷新时间, 工作记忆的容量也是有限的。

然而,对于本主题的研究仍存在部分局限性,比如较少采用有意义的真实刺激,任务要求对表征单位的影响仍不够清楚,等。因此,下文我们将对该主题研究的局限性提出建议,未来解决这些问题将有助于我们更科学地对工作记忆表征单位进行理解。

前人研究更多支持基于特征的表征假设,即便两种表征可以同时存在,也存在一种可能,人们在大多数情况下使用的是特征表征。然而实验设计中往往探测某一维度特征是否改变,这种对提取的要求本身倾向于采用基于特征的表征单位。此外,实验室材料的特征是随机选取的,颜色、形状之间和不同颜色之间的关系毫无意义,被试本来就没有将它们绑定在同一客体上的动力,即便采用真实物体作为刺激,要记忆的特征间也不存在有意义的关联(Markov et al., 2021)。所以只有当被试为完成任务不得不把特征绑定起来时,例如 Luck 和 Vogel (1997)的实验中要记忆的特征数超过视觉工作记忆容量上限,才能通过复杂的计算方式(Geigerman et al., 2016)得到支持以客体为表征单位的结果。与此相对,真实世界中物体的现实意义赋予它们所含特征间自然的绑定关系。记忆随机双色对象,需要同一客体的两个颜色特征在位置上重叠(例如一个大的红色块上有一个小的紫色块)才能实现绑定,但换成有意义的颜色组合,比如蓝、白、红三色对象,只要人们意识到这是法国国旗的配色,即便三种颜色不共享位置,也能自动地形成一个整体表征。未来可以考察对有意义真实物体的记忆,可能找到更多支持基于客体的表征假设的证据。

视觉工作记忆是一个灵活的速写板,其中表征在储存时不断刷新,这种刷新是被动的,维持表征所必须的,也可以是主动的——人们根据任务要求对表征进行线上整合、更新、移除(Luria & Vogel, 2014)。相比前人总结得比较充分的延迟匹配范式和回忆范式,回溯线索任务更能体现任务驱动的动态表征更新(叶超雄等, 2020),而这种主动更新过程中表征变化的单位尚不明确。在回溯线索任务中,记忆阵列消失后的维持时间里,会出现线索提示即将探测的对象,被试可以根据线索对视觉工作记忆中的表征进行取舍。当设置维度回溯线索时,记忆阵列中呈现的异维度双特征对象(如不同颜色、方向的长条)只有提示维度的特征会被探测(如提示方向,探测阵列出现无方向的正方形色块;提示颜色,探测阵列出现无颜色的长条)或很大概率被探测。前人研究表明,线索指向的特征在探测中的表现好于未指向的特征的表现和无线索条件下的表现,即存在维度回溯线索效应(Ye et al., 2016; Park et al., 2017; Ye et al., 2021; Arnican & Souza, 2021)。如果是整体表征,无法单独消除或加强绑定在同一客体上的某个维度的特征,那么就不会出现维度回溯线索效应。故而表征的主动更新可以是以特征为单位的,同一客体中,一个维度特征的增强不会导致另一维度特征同步增强。

致 谢

本研究由国家自然科学基金(31700948)资助。

参考文献

- 王静, 薛成波, 刘强(2018). 客体同维度特征的视觉工作记忆存储机制. *心理学报*, 50(2), 176-185.
- 薛成波, 叶超雄, 张引, 刘强(2015). 视觉工作记忆中特征绑定关系的记忆机制. *心理学报*, 47(7), 851-858.
- 叶超雄, 胡中华, 梁腾飞, 张加峰, 许茜如, 刘强(2020). 视觉工作记忆回溯线索效应的产生机制: 认知阶段分离. *心理学报*, 52(4), 399-413.
- Alvarez, G. A., & Cavanagh, P. (2004). The Capacity of Visual Short-Term Memory Is Set Both by Visual Information Load and by Number of Objects. *Psychological Science*, 15, 106-111. <https://doi.org/10.1111/j.0963-7214.2004.01502006.x>
- Arnican, A., & Souza, A. S. (2021). Assessing the Robustness of Feature-Based Selection in Visual Working Memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 47, 731-758. <https://doi.org/10.1037/xhp0000911>
- Baddeley, A. (2012). Working Memory: Theories, Models, and Controversies. *Annual Review of Psychology*, 63, 1-29. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-120710-100422>

- Bays, P. M., Wu, E. Y., & Husain, M. (2011). Storage and Binding of Object Features in Visual Working Memory. *Neuropsychologia*, *49*, 1622-1631. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.12.023>
- Brady, T. F., Konkle, T., & Alvarez, G. A. (2011). A Review of Visual Memory Capacity: Beyond Individual Items and toward Structured Representations. *Journal of Vision*, *11*, 4. <https://doi.org/10.1167/11.5.4>
- Chen, S., Kocsis, A., Liesefeld, H. R., Müller, H. J., & Conci, M. (2021). Object-Based Grouping Benefits without Integrated Feature Representations in Visual Working Memory. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *83*, 1357-1374. <https://doi.org/10.3758/s13414-020-02153-5>
- Chen, S., Töllner, T., Müller, H. J., & Conci, M. (2018). Object Maintenance beyond Their Visible Parts in Working Memory. *Journal of Neurophysiology*, *119*, 347-355. <https://doi.org/10.1152/jn.00469.2017>
- Cowan, N. (2001). The Magical Number 4 in Short-Term Memory: A Reconsideration of Mental Storage Capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, *24*, 87-114. <https://doi.org/10.1017/S0140525X01003922>
- Davis, G., & Holmes, A. (2005). The Capacity of Visual Short-Term Memory Is Not a Fixed Number of Objects. *Memory & Cognition*, *33*, 185-195. <https://doi.org/10.3758/BF03195307>
- Drew, T., & Vogel, E. K. (2009). Working Memory: Capacity Limitations. In L. R. Squire (Ed.), *Encyclopedia of Neuroscience* (Vol. 10, pp. 523-531). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-008045046-9.00428-9>
- Droll, J. A., Hayhoe, M. M., Triesch, J., & Sullivan, B. T. (2005). Task Demands Control Acquisition and Storage of Visual Information. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *31*, 1416-1438. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.31.6.1416>
- Fougnie, D., Asplund, C. L., & Marois, R. (2010). What Are the Units of Storage in Visual Working Memory. *Journal of Vision*, *10*, 27-27. <https://doi.org/10.1167/10.12.27>
- Fougnie, D., Cormiea, S. M., & Alvarez, G. A. (2013). Object-Based Benefits without Object-Based Representations. *Journal of Experimental Psychology: General*, *142*, 621-626. <https://doi.org/10.1037/a0030300>
- Fukuda, K., Vogel, E., Mayr, U., & Awh, E. (2010). Quantity, Not Quality: The Relationship between Fluid Intelligence and Working Memory Capacity. *Psychonomic Bulletin & Review*, *17*, 673-679. <https://doi.org/10.3758/17.5.673>
- Gao, T., Gao, Z., Li, J., Sun, Z., & Shen, M. (2011). The Perceptual Root of Object-Based Storage: An Interactive Model of Perception and Visual Working Memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *37*, 1803-1823. <https://doi.org/10.1037/a0025637>
- Geigerman, S., Verhaeghen, P., & Cerella, J. (2016). To Bind or Not to Bind, That's the Wrong Question: Features and Objects Coexist in Visual Short-Term Memory. *Acta Psychologica*, *167*, 45-51. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2016.04.004>
- Hardman, K. O., & Cowan, N. (2015). Remembering Complex Objects in Visual Working Memory: Do Capacity Limits Restrict Objects or Features? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *41*, 325-347. <https://doi.org/10.1037/xlm0000031>
- Hollingworth, A., & Rasmussen, I. P. (2010). Binding Objects to Locations: The Relationship between Object Files and Visual Working Memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *36*, 543-564. <https://doi.org/10.1037/a0017836>
- Kaiser, D., Stein, T., & Peelen, M. V. (2015). Real-World Spatial Regularities Affect Visual Working Memory for Objects. *Psychonomic Bulletin & Review*, *22*, 1784-1790. <https://doi.org/10.3758/s13423-015-0833-4>
- Kim, S.-H., & Kim, J.-O. (2011). The Benefit of Surface Uniformity for Encoding Boundary Features in Visual Working Memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *37*, 1767-1783. <https://doi.org/10.1037/a0025639>
- Lee, D., & Chun, M. M. (2001). What Are the Units of Visual Short-Term Memory, Objects or Spatial Locations? *Perception & Psychophysics*, *63*, 253-257. <https://doi.org/10.3758/BF03194466>
- Luck, S. J., & Vogel, E. K. (1997). The Capacity of Visual Working Memory for Features and Conjunctions. *Nature*, *390*, 279-281. <https://doi.org/10.1038/36846>
- Luck, S. J., & Vogel, E. K. (2013). Visual Working Memory Capacity: From Psychophysics and Neurobiology to Individual Differences. *Trends in Cognitive Sciences*, *17*, 391-400. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.06.006>
- Luria, R., & Vogel, E. K. (2011). Shape and Color Conjunction Stimuli Are Represented as Bound Objects in Visual Working Memory. *Neuropsychologia*, *49*, 1632-1639. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.11.031>
- Luria, R., & Vogel, E. K. (2014). Come Together, Right Now: Dynamic Overwriting of an Object's History through Common Fate. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *26*, 1819-1828. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00584
- Luria, R., Sessa, P., Gotler, A., Jolicœur, P., & Dell'Acqua, R. (2010). Visual Short-Term Memory Capacity for Simple and Complex Objects. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *22*, 496-512. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21214>
- Markov, Y. A., Tiurina, N. A., & Utochkin, I. S. (2019). Different Features Are Stored Independently in Visual Working

- Memory but Mediated by Object-Based Representations. *Acta Psychologica*, 197, 52-63. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2019.05.003>
- Markov, Y. A., Utochkin, I. S., & Brady, T. F. (2021). Real-World Objects Are Not Stored in Holistic Representations in Visual Working Memory. *Journal of Vision*, 21, 18. <https://doi.org/10.1167/jov.21.3.18>
- Marshall, L., & Bays, P. M. (2013). Obligatory Encoding of Task-Irrelevant Features Depletes Working Memory Resources. *Journal of Vision*, 13, 21-21. <https://doi.org/10.1167/13.2.21>
- McCants, C. W., Katus, T., & Eimer, M. (2020). Task Goals Modulate the Activation of Part-Based versus Object-Based Representations in Visual Working Memory. *Cognitive Neuroscience*, 11, 92-100. <https://doi.org/10.1080/17588928.2019.1642864>
- Miller, E. K., Lundqvist, M., & Bastos, A. M. (2018). Working Memory 2.0. *Neuron*, 100, 463-475. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2018.09.023>
- Olson, I. R., & Jiang, Y. (2002). Is Visual Short-Term Memory Object Based? Rejection of the “Strong-Object” Hypothesis. *Perception & Psychophysics*, 64, 1055-1067. <https://doi.org/10.3758/BF03194756>
- Park, Y. E., Sy, J. L., Hong, S. W., & Tong, F. (2017). Reprioritization of Features of Multidimensional Objects Stored in Visual Working Memory. *Psychological Science*, 28, 1773-1785. <https://doi.org/10.1177/0956797617719949>
- Quinlan, P. T., & Cohen, D. J. (2011). Object-Based Representations Govern Both the Storage of Information in Visual Short-Term Memory and the Retrieval of Information from It. *Psychonomic Bulletin & Review*, 18, 316-323. <https://doi.org/10.3758/s13423-011-0064-2>
- Shen, M., Chen, J., Yang, X., Dong, H., Chen, H., & Zhou, J. (2021). The Storage Mechanism of Dynamic Relations in Visual Working Memory. *Cognition*, 209, Article ID: 104571. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2020.104571>
- Sone, H., Kang, M.-S., Li, A. Y., Tsubomi, H., & Fukuda, K. (2021). Simultaneous Estimation Procedure Reveals the Object-Based, but Not Space-Based, Dependence of Visual Working Memory Representations. *Cognition*, 209, Article ID: 104579. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2020.104579>
- Vergauwe, E., & Cowan, N. (2015). Working Memory Units Are All in Your Head: Factors That Influence Whether Features or Objects Are the Favored Units. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 41, 1404-1416. <https://doi.org/10.1037/xlm0000108>
- Vogel, E. K., McCollough, A. W., & Machizawa, M. G. (2005). Neural Measures Reveal Individual Differences in Controlling Access to Working Memory. *Nature*, 438, 500-503. <https://doi.org/10.1038/nature04171>
- Vogel, E. K., Woodman, G. F., & Luck, S. J. (2001). Storage of Features, Conjunctions and Objects in Visual Working Memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27, 92-114. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.27.1.92>
- Wang, B., Cao, X., Theeuwes, J., Olivers, C. N. L., & Wang, Z. (2017). Separate Capacities for Storing Different Features in Visual Working Memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 43, 226-236. <https://doi.org/10.1037/xlm0000295>
- Wheeler, M. E., & Treisman, A. M. (2002). Binding in Short-Term Visual Memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, 131, 48-64. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.131.1.48>
- Wood, J. N. (2011a). When Do Spatial and Visual Working Memory Interact? *Attention, Perception, & Psychophysics*, 73, 420-439. <https://doi.org/10.3758/s13414-010-0048-8>
- Wood, J. N. (2011b). A Core Knowledge Architecture of Visual Working Memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 37, 357-381. <https://doi.org/10.1037/a0021935>
- Xu, Y. (2002a). Encoding Color and Shape from Different Parts of an Object in Visual Short-Term Memory. *Perception & Psychophysics*, 64, 1260-1280. <https://doi.org/10.3758/BF03194770>
- Xu, Y. (2002b). Limitations of Object-Based Feature Encoding in Visual Short-Term Memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28, 458-468. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.28.2.458>
- Ye, C., Hu, Z., Ristaniemi, T., Gendron, M., & Liu, Q. (2016). Retro-Dimension-Cue Benefit in Visual Working Memory. *Scientific Reports*, 6, Article No. 35573. <https://doi.org/10.1038/srep35573>
- Ye, C., Xu, Q., Liu, X., Astikainen, P., Zhu, Y., Hu, Z., & Liu, Q. (2021). Individual Differences in Working Memory Capacity Are Unrelated to the Magnitudes of Retrocue Benefits. *Scientific Reports*, 11, Article No. 7258. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86515-5>