

空间距离对视觉工作记忆巩固的影响^{*}

李腾飞 马楠 胡中华 刘强

(辽宁师范大学脑与认知神经科学研究中心, 大连 116029)

摘要 以往研究发现, 个体对不同类型的视觉信息进行视觉工作记忆巩固的模式存在差异, 如对于方向信息, 一次只能有一个项目被巩固进入视觉工作记忆系统, 而对于颜色信息, 个体则可以一次巩固两个项目进入视觉工作记忆系统。但对于视觉信息的巩固模式是否会受其他因素的影响, 目前仍然没有明确的定论。本研究将探讨视觉信息的巩固模式是否可能受到记忆项目空间距离因素的影响。研究采用变化觉察范式、序列-同时呈现操作及控制记忆项目呈现间距的方法, 通过 3 个实验考察记忆项目之间的空间距离是否能够影响个体对颜色信息和方向信息的巩固模式。在三种空间距离水平上序列呈现或同时呈现两个记忆项目, 实验结果一致发现记忆项目之间的空间距离会对视觉工作记忆巩固模式产生明显影响, 个体在同时呈现条件下的正确率会随着空间距离的增大而降低。这些结果表明对同一类视觉信息进行巩固的过程中所存在的项目数量限制并不是固定的, 个体可以采用序列模式或有限容量的并行模式对同一类信息进行巩固, 巩固的模式可能与视觉空间注意的分配以及视觉信息所能获得的注意资源有关。

关键词 视觉工作记忆; 巩固; 带宽

分类号 B842

1 前言

视觉工作记忆是一个可以对视觉信息进行暂时加工和储存并且具有容量限制的内存系统 (Baddeley, 2012; Hollingworth & Luck, 2008; Ma, Husain, & Bays, 2014; Cowan, 2001; Zimmer, 2008), 它为个体提供了一个动态的加工存储平台, 帮助个体将外界不稳定的感知觉信息转化为内部稳定的视觉工作记忆表征, 使个体面对瞬息万变的外界环境仍然可以流畅地加工和保存各类视觉信息, 因此视觉工作记忆是人类高级认知加工活动的重要基础。当前研究普遍发现个体的视觉工作记忆容量上限约为 3 到 4 个项目 (Balaban & Luria, 2015; Fukuda, Awh, & Vogel, 2010; Hardman & Cowan, 2015; Luck & Vogel, 2013; Vogel, Woodman, & Luck, 2001), 由于视觉工作记忆存在容量限制, 所以个体在面对大量感知觉输入信息时必须选择与当前任务相关程

度最高的视觉信息并将其编码进入视觉工作记忆系统之中 (Droll, Hayhoe, Triesch, & Sullivan, 2005)。虽然对相关信息的注意和选择机制为感知觉信息进入视觉工作记忆系统提供了前提和可能, 但是被注意和选择的感知觉信息只有被进一步地加工和编码并存储进视觉工作记忆系统之中才能成为稳定的视觉工作记忆表征, 这一过程就被称为视觉工作记忆巩固 (visual working memory consolidation), 因此巩固机制在视觉工作记忆系统之中具有非常重要的作用, 对视觉工作记忆巩固的研究也逐渐成为视觉工作记忆研究的热门领域之一。

自从 Potter (1976) 发现个体的感觉表征在向视觉工作记忆表征转化的过程中会受到后续信息的干扰之后, 研究者针对视觉工作记忆巩固进行了大量研究工作, 后续研究普遍发现个体对视觉信息进行巩固的时间会随着记忆项目数量的增加而增加 (Joliceur & Dell'Acqua, 1998; Stevanovski & Joliceur,

收稿日期: 2016-06-03

^{*} 国家自然科学基金项目 (31571123) 资助。

李腾飞和马楠为共同第一作者。

通讯作者: 刘强, E-mail: lq780614@163.com

2011; Vogel, Luck, & Shapiro, 1998; Vogel, Woodman, & Luck, 2006; West, Pun, Pratt, & Ferber, 2010), 这说明视觉工作记忆巩固过程存在着加工数量限制。为此研究者分别提出了严格的序列巩固(serial consolidation)模式和有限容量的并行巩固(limited-capacity parallel consolidation)模式试图对巩固过程所存在的加工数量限制进行解释。序列巩固模式认为个体每次只能巩固一个视觉信息, 如果有多个信息需要巩固, 个体只能按照序列方式逐个进行巩固; 有限容量的并行巩固模式则认为个体可以同时巩固多个视觉信息, 但该过程存在一定的数量上限, 如果需要巩固的信息数量超过了单次巩固上限, 那么个体必须分多次进行巩固。由于序列巩固模式和有限容量的并行巩固模式均认为个体巩固的视觉信息越多, 巩固过程所花费的时间就会越长, 因此两种观点均可以对以往的研究结果做出相对合理的解释。为了进一步对两种巩固模式的正确性进行辨析, 研究者开展了一系列的验证工作。

Huang 和 Pashler (2007)采用序列-同时呈现操作分别向被试序列呈现或同时呈现多个记忆色块, 并在探测阶段要求被试判断探测色块的颜色是否曾出现在之前的记忆色块中, 他们发现被试在序列呈现条件下的记忆正确率显著高于同时呈现条件下的正确率, 该实验结果支持了视觉工作记忆巩固是一个严格的序列加工过程。但是 Mance, Becker 和 Liu (2012)认为 Huang 和 Pashler (2007)的实验中可能存在无关变量的干扰, 如颜色呈现位置相对固定和颜色出现顺序相对固定等特殊条件会造成被试在同时呈现条件下的记忆正确率偏低, 进而低估了被试的巩固数量上限。他们将实验中的特殊条件排除后, 发现序列呈现和同时呈现两项色块的正确率之间并不存在显著差异, 因此证明了个体可以对颜色信息进行上限为 2 项的并行巩固。之后研究者又进一步对方向信息的视觉工作记忆巩固模式进行了研究, 他们发现在各种实验条件下被试在序列呈现条件下的记忆正确率均显著高于同时呈现条件下的记忆正确率(Liu & Becker, 2013; Becker, Miller, & Liu, 2013), 因此他们认为个体只能对方向信息进行严格的序列巩固。

以上研究显示颜色信息和方向信息之间存在截然不同的两种巩固模式, 研究者推测这可能表明个体对不同维度的视觉信息所进行的巩固过程分别对应着不同的巩固通道。然而 Miller, Becker 和 Liu (2014)发现个体无法同时对 1 项颜色信息和

1 项方向信息进行视觉工作记忆巩固, 这表明个体是通过一种共同的认知加工机制对两类视觉信息进行巩固的, 因此他们提出了视觉工作记忆巩固的带宽理论(consolidation bandwidth), 该理论认为个体对不同维度视觉信息的巩固共用一个巩固通道, 巩固通道的带宽是一定的, 然而由于各类视觉信息具有不同的认知加工特征因此具有不同的巩固负载, 如颜色信息的加工难度较低, 所对应的巩固负载较小, 因此个体对颜色信息进行巩固时每次可以有两个项目同时进入巩固通道; 而方向信息的加工难度较大, 所对应的巩固负载也相对较大, 因此巩固通道的带宽每次只能满足个体对一个方向信息进行巩固的需求。

巩固带宽理论强调视觉工作记忆的巩固模式只与信息类型有关, 但近期的一项研究发现该理论假设可能并不完全正确。Rideaux, Apthorp 和 Edwards (2015)发现, 相对于位置不固定的呈现条件, 当两个方向信息在固定的位置呈现时被试也可以对方向信息进行有限容量的并行巩固。这表明信息呈现的空间位置因素可能会对个体的记忆巩固模式产生一定的影响, 因此巩固带宽理论可能需要被进一步修正, 并加入一些可以影响巩固带宽的其他因素。然而该实验中可能存在两点问题导致研究者过高估计了被试的巩固上限: 首先, 存在记忆组合关系的可能。在实验中, 研究者选取 0° 、 45° 、 90° 和 135° 四种方向作为记忆材料, 并且两个记忆项目只以水平对齐的方式呈现在注视点上方的固定位置, 它们之间的相对位置及相对距离始终都是固定的。在这种设置条件下, 被试可以较容易地对两个记忆项目进行组合记忆, 例如当靠左的记忆项目是 45° 方向而靠右的记忆项目是 135° 方向时, 被试可以将两者组合记忆为“八”字, 而当这两个角度的呈现位置互换后则可以将其记忆为倒“八”字; 而对于 0° 和 90° 的水平排列则是一垂直关系组合更容易记忆; 其次, 阈限时间的测算可能存在问题。研究者采用阶梯法(staircase method)选取被试在预实验中序列呈现条件下 79% 正确率所对应的记忆项目呈现时间作为个体巩固一个方向信息的最小时间(阈限时间), 但是正式实验中被试在序列呈现条件下的记忆正确率却达到了 95% 左右。因此, 研究者所计算的阈限时间极有可能严重高于实际的阈限时间, 使被试在同时呈现条件下可以有较充足的时间对两个方向信息进行序列巩固。产生这一问题的原因可能是由于测量阈限时间的实验中初始呈

现时间是 8 ms, 每步变化为 8 ms, 而通常被试的平均阈限时间只有几十毫秒, 根据阶梯法响应错误一次呈现时间就延长一步的规则, 通过较少的实验试次就可以达到阈限时间。而在较少的试次下, 被试对于实验的熟悉度较低, 这可能导致测量的阈限时间偏大。在正式实验中当被试熟悉实验以后, 应用该阈限时间将导致较高的正确率。因此, Rideaux 等(2015)的研究结果还不能完全证实视觉工作记忆的巩固模式可能受到其他因素的影响。值得注意的是, 即使排除上述对巩固过程的高估因素, Rideaux 等(2015)的研究结果极有可能是由空间距离因素对记忆巩固模式产生的影响而造成的。在 Rideaux 等(2015)实验的位置固定条件下, 两个光栅之间的平均距离要比位置不固定条件下更近, 而有大量研究显示视觉信息的分布范围越小, 个体就可以更加有效地对记忆项目进行加工(Malcolm & Shomstein, 2015; Hüttermann, Memmert, & Simons, 2014; Ruzzoli et al., 2011), 所以在位置固定条件下被试可能会更加有效地对记忆项目进行视觉工作记忆巩固。因此, 研究者有必要进一步探究空间距离因素是否会影响个体的记忆巩固过程。

在本研究中, 我们将修正 Rideaux 等(2015)的实验可能存在的问题, 并进一步探究记忆项目的空间距离是否能够影响视觉工作记忆的巩固模式。首先, 为了防止被试采取组合记忆策略, 我们将两个记忆项目随机呈现在虚拟圆周的 8 个不同位置上, 两个项目之间会有 12 种相对位置关系以及 3 种相对距离关系, 所以任意两个项目之间都具有极其复杂的相对关系, 而且被试无法对项目的呈现位置、项目之间的相对位置以及项目之间的相对距离做出有效预测, 因此可以最大程度上防止被试通过组合记忆的策略完成实验任务; 其次, 针对记忆项目的呈现时间问题, 我们将阈限时间的测量方法改为 Mance 等(2012)和 Becker 等(2013)所使用的测量范式。从研究结果来看, 他们使用阈限时间在正式实验的序列呈现条件下所获得的正确率和阈限时间下的理论正确率之间没有显著差异, 这可以充分说明此方法对巩固阈限时间的测量和选取是有效的; 最后, 我们将控制两个记忆项目之间的空间距离, 观察其对颜色信息和方向信息的巩固模式的影响。我们假设如果 Rideaux 等(2015)的研究结果是由空间距离因素所导致的, 那么两个记忆项目之间的距离越远, 其被并行巩固的概率将越低, 巩固成绩也将越差。

2 实验 1

实验 1 采用 Mance 等(2012)的研究范式, 以序列或同时呈现的方式向被试呈现两个记忆色块, 同时也将控制两个色块的呈现间距, 使它们在序列和同时呈现条件下都存在 3 种不同的空间距离水平。为了排除同时呈现条件下双侧优势(bilateral advantage)可能会对本实验带来的影响(Alvarez & Cavanagh, 2005; Holt & Delvenne, 2014; Railo, 2014), 在本实验中, 两个色块只被随机呈现在屏幕的左半侧或右半侧, 而不会同时出现在屏幕的两侧。

我们预测如果空间距离能够影响视觉工作记忆的巩固过程, 那么在同时呈现条件下被试可以对两个空间距离较近的色块进行并行巩固, 而对两个空间距离较远的色块只能进行序列巩固, 此时被试在距离较近时的正确率应当高于距离较远时的正确率; 如果空间距离不能对视觉工作记忆巩固过程产生影响, 那么在同时呈现条件下被试对距离较近和较远的两个色块都可以进行并行巩固, 因此被试在空间距离较近和较远水平上的正确率应当不存在显著差异。

2.1 方法

2.1.1 被试

选取 14 名大学生被试(女性 10 名, 平均年龄 24 岁)。被试均知情并同意参加本实验且均未参加过类似实验, 身体健康, 无神经系统疾病, 无色盲、色弱或其它视觉疾患, 视力或矫正视力正常, 实验后均给予报酬。

2.1.2 实验材料

实验在微暗的单间隔音实验室里进行, 实验材料呈现在 17 英寸 CRT 显示器上(分辨率 1024×768, 刷新频率 120 Hz), 屏幕背景为灰色(128, 128, 128), 亮度与对比度适当, 以不使被试感觉不适为度。被试距离显示器 60 cm, 正面相对。程序采用 E-prime 1.1 编程与运行。

记忆色块、掩蔽色块和探测色块均为水平及垂直视角均为 1°的正方形色块, 记忆色块的颜色有红(233, 0, 0)、黄(231, 228, 66)、蓝(26, 49, 178)和绿(30, 138, 18)。记忆色块随机呈现在一虚拟圆周(以中央注视点为圆心, 半径 6°视角)上的 8 个位置上(如图 1), 8 个位置分别位于圆周的 22.5°、67.5°、112.5°、157.5°、202.5°、247.5°、292.5°、337.5°方向(以垂直向上方向为 0°)。掩蔽色块按 4×4 棋盘样式由 4 种颜色随机排列组成。

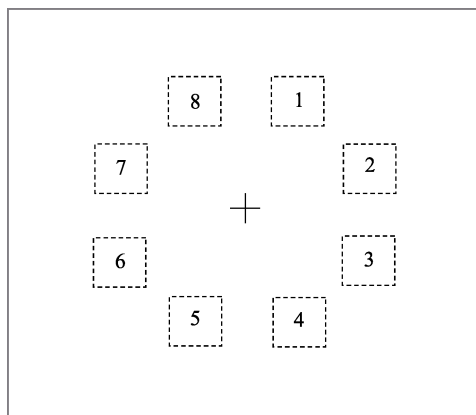


图 1 记忆项呈现位置示意图

2.1.3 实验程序

图 2 为两种呈现条件下的实验流程图。序列呈现条件下,首先在屏幕中央呈现一个时长为 400 ms 的十字注视点,注视点之后呈现第一个记忆色块(呈现时间 mt 由下文中的测量阈限实验确定),记忆色块之后是时长为 200 ms 的掩蔽色块,掩蔽色块的位置与第一个记忆色块位置一致,接着是时长 500 ms 的中央注视点,之后呈现第二个记忆色块(呈现时间与第一个记忆色块相同),紧接着是第二个掩蔽色块,掩蔽色块位置与第二个记忆色块位置相同,随后呈现一个时长为 500 ms 的注视点,最后在屏幕中央呈现探测色块,被试的任务是判断探测色块的颜色是否与之前呈现的某个记忆色块的颜色相同。如果探测色块的颜色与某个记忆色块的颜色相同,被试按 F 键,如果不同,被试按 J 键。探测色块一直呈现至被试做出反应,如果被试在 2000 ms

内没有做出反应,探测色块将会消失。两次实验之间有 600 ms 的空屏期。同时呈现条件下的实验流程与序列呈现基本相同,但两个记忆色块将会同时呈现。在整个实验过程中被试均需要紧盯中央注视点,同时要求在保证正确率的前提下进行反应,对被试的反应速度则不做任何要求。

被试在两种呈现条件下需要各完成 3 组实验,每组包含 72 个试次。前 2 组为练习实验不计入最后统计分析,后 4 组实验按照 ABBA 实验设计进行,被试在做完前两组实验后会有至少 5 min 的休息时间,直至被试报告休息足够。

在两种呈现条件下,两个记忆色块的位置随机呈现在屏幕左侧或屏幕右侧 4 个位置(如图 1 和表 1 所示,图 1 中虚线方框的 8 个位置代表记忆色块可能出现的位置,表 1 为记忆色块所有可能出现位置的情况),即两个记忆色块只会出现在屏幕的左侧或右侧,而不会同时出现在屏幕的两侧。因此,两个记忆色块间的视角距离有 3 种情况: 4.6° (如位置 1 与位置 2), 8.5° (如位置 1 与位置 3)和 11.1° (如位置 1 与位置 4)。在序列呈现条件与同时呈现条件下 3 种视角距离均以相同概率随机呈现。

表 1 记忆项呈现位置情况

视角距离	色块位置	
	屏幕左侧	屏幕右侧
4.6°	56, 67, 78	12, 23, 34
8.5°	57, 68	13, 24
11.1°	58	14

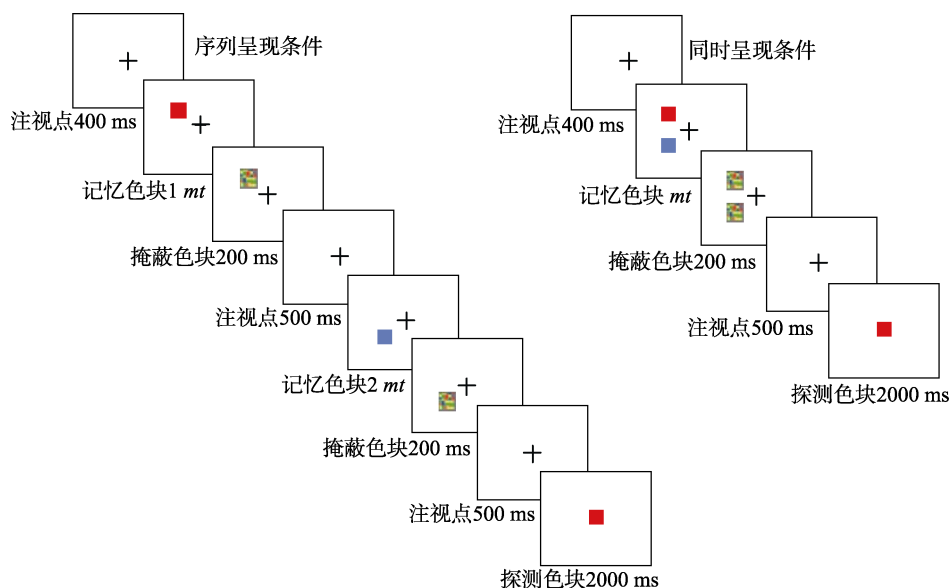


图 2 实验 1 流程示意图

2.1.4 阈限时间(Thresholding exposure duration) 测量实验

通过测量阈限时间确定每名被试巩固一项记忆色块的最小时间。先于上文中的主实验, 每名被试均需要进行3组序列呈现条件实验, 每组包含72个试次, 其中第一组为练习实验不计入最后统计分析。记忆色块间的3种视角距离各呈现48次($48 \times 3 = 144$), 以等概率完全随机方式呈现。记忆色块的呈现时间共有8种可能(8 ms、16 ms、33 ms、66 ms、133 ms、266 ms、533 ms 和 800 ms)等概率随机呈现, 每种呈现时间各18次。分别计算被试在8种呈现时间条件下的反应正确率, 并将其代入以下函数中:

$$pc = \delta + \gamma(1 - e^{-\beta t})$$

其中 pc 为反应正确率, t 为呈现时间, δ , γ 和 β 均为自由参数。通过参数拟合并选取能够使被试达到80%正确率所对应的时间(t)作为正式实验中的记忆色块呈现时间。为防止被试在本实验阶段的练习效应影响主实验, 同时要求被试进行3组同时呈现条件实验, 每组72个试次, 其他条件与序列呈现条件完全相同, 但不进行统计分析。

2.1.5 数据统计与处理

记忆项目平均呈现时间 62.1 ms。被试在各个条件下的反应正确率如图3所示。重复测量的方差分析显示呈现方式主效应显著, $F(1, 13) = 9.75, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.43$ 。空间距离主效应显著, $F(2, 26) = 4.25, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.41$ 。呈现方式和空间距离的交互作用显著, $F(2, 26) = 11.58, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.66$ 。在3种距离水平上对序列呈现与同时呈现的反应正确率进行均值比较, 发现在4.6°距离上序列呈现与同时呈现的正确率之间没有显著差异, $t(13) = 0.05, p > 0.05$; 在8.5°距离上序列呈现与同时呈现的正确率之间没有显著差异, $t(13) = 0.56, p > 0.05$; 在11.1°距离上序列呈现的正确率显著高于同时呈现的正确率, $t(13) = 4.57, p < 0.01, d = 1.68$ 。

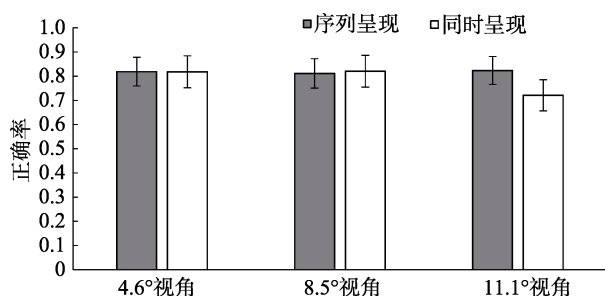


图3 实验1三种距离条件下序列呈现和同时呈现的正确率

以上结果说明被试在4.6°和8.5°距离上完全可以对两个颜色信息进行并行巩固, 而在11.1°距离上被试似乎每次只能巩固一个项目。然而还存在另一种可能, 在11.1°距离上被试在部分试次中也是按照并行模式对两个颜色信息进行巩固的, 只是在另一部分试次中是以序列模式进行巩固的, 两部分试次综合起来得到了该条件下正确率下降的结果。为了验证这一猜想, 需要在3种距离水平上对被试的巩固模式做出进一步的分析。

序列巩固理论正确率($accuracy'$)对比 如果被试在11.1°距离水平上只能按照序列模式对同时呈现的两个颜色信息进行巩固, 那么在阈限时间内, 被试每次只能巩固记住一个颜色信息, 当探测色块为新异颜色(占整个实验50%), 被试只能判断出已被巩固的记忆色块与探测色块的颜色不相同, 对于另一个没有记住的记忆色块则只能猜测是否与探测色块相同, 因此此时被试的反应正确率应为50%; 当探测色块的颜色是两个需记忆色块中的一个时(占整个实验50%), 这一颜色有50%的可能性是被试记住的颜色(占整个实验25%), 此时的反应正确率应当与被试在序列呈现条件下的实际正确率相一致(序列巩固实际正确率), 另有50%的可能性是被试没有巩固记住的颜色(占整个实验25%), 因此被试只能进行猜测, 此时的反应正确率为50%。

因此 $accuracy' = 50\% \times 50\% + 25\% \times \text{序列巩固实际正确率} + 25\% \times 50\%$ 。如果在11.1°距离上同时呈现条件下的正确率与 $accuracy'$ 之间不存在差异则说明被试在该条件下采取了序列巩固模式; 如果同时呈现条件下的正确率高于 $accuracy'$, 则说明在11.1°距离上被试在部分试次中并行巩固记忆了两个颜色信息。通过分析发现在11.1°距离上被试记忆同时呈现项目的正确率显著高于 $accuracy'$, $t(13) = 8, p < 0.01, d = 2.99$ 。

中线距离 虽然本实验中所有记忆项目的呈现位置与注视点之间的距离是固定不变的, 但是每个位置与视野中线的距离却是变化的, 在11.1°距离水平上被试只会对靠近中线的4个位置(1、4、5和8号)上的项目进行巩固, 而在4.6°和8.5°距离水平上则会对远离中线的4个位置(2、3、6和7号)上的项目进行巩固。因此是否存在另一种解释, 被试可以对远离视野中线的记忆项目做出更加有效的加工和编码, 由此造成被试在同时呈现-11.1°条件下的正确率偏低? 为验证该假设, 我们按照探测记忆项目出现的情况进行分类, 将探测刺激与1、

4、5 和 8 号位置上的颜色相同时的试次正确率归类为 $r_{近}$, 将探测刺激与 2、3、6 和 7 号位置上的颜色相同时的试次正确率归类为 $r_{远}$, 然后对 $r_{近}$ 和 $r_{远}$ 进行分类统计。如果由于记忆项目呈现的位置与中线之间距离的不同会造成感知觉加工差异, 那么将观察到 $r_{近}$ 和 $r_{远}$ 之间存在显著差异。然而, 结果发现在同时呈现条件下: $r_{近}$ 和 $r_{远}$ 之间在 4.6° 水平上不存在显著性差异, $t(13) = 0.55, p > 0.05$; $r_{近}$ 和 $r_{远}$ 之间在 8.5° 水平上不存在显著性差异, $t(13) = 0.51, p > 0.05$; 在不考虑项目呈现间距的条件下, $r_{近}$ 和 $r_{远}$ 之间也不存在显著性差异, $t(13) = 0.93, p > 0.05$, 这说明项目呈现位置与视野中线间的距离并不会对被试的巩固过程产生影响。

2.2 讨论

实验 1 的目的是为了探究个体在不同空间距离水平上对颜色信息进行巩固的模式是否存在差异。通过分析被试在 3 种距离水平上的巩固正确率, 结果发现在 4.6° 和 8.5° 距离上两种呈现条件下的正确率之间不存在显著差异, 而 11.1° 距离上序列呈现时的正确率要显著高于同时呈现条件下的正确率。从上述结果可以看出个体在同时呈现- 11.1° 距离条件下对两个颜色信息进行巩固的过程受到了一定影响。进而, 通过比较同时呈现条件下的正确率和 *accuracy* 之间的差异, 结果发现在 3 种距离水平上同时呈现的正确率均显著高于 *accuracy*, 该结果可以说明在同时呈现- 11.1° 距离条件下个体仍可以按照并行模式对 2 个色块进行巩固, 但被试只能在部分试次中进行并行巩固, 也就是空间距离的增加降低了并行巩固的概率。以上结果说明随着项目之间距离的变化, 个体的巩固过程也存在一种连续而灵活的变化机制, 并非只有序列模式或并行模式的区分。

3 实验 2

实验 1 的结果除了可能来自于空间距离对巩固阶段的影响外, 还有可能来自于空间距离对感知觉编码阶段的影响。如果要得出项目间距影响巩固过程的结论, 还必须排除在阈限时间内项目间距可以影响个体对两个记忆项目的感知觉编码的可能。因此实验 2 将在 3 种距离水平上对被试的感知觉编码水平进行测量。研究采用与 Vogel 等(2006)以及 Fuller 等(2009)相似的实验任务, 要求被试先记住一个记忆色块的颜色, 之后在阈限时间(mt)内向被试同时呈现两个目标色块, 被试的任务是判断记忆

色块的颜色是否出现在目标色块中。由于任务要求的变化, 在本实验中被试并不需要在阈限时间内将两个目标色块巩固进入视觉工作记忆当中, 只需要成功对其进行感知觉编码加工即可顺利完成实验任务。我们推测如果实验 1 中所得出的结果是由被试在 11.1° 距离水平上无法同时对两个颜色信息进行感知觉编码而造成的, 那么被试在本实验中的反应正确率应当会随着目标色块间距的增大而降低; 反之, 被试在本实验中的反应正确率应当不会随着目标色块间距的变化而变化。

3.1 方法和实验材料

选取 14 名大学被试(女性 10 名, 平均年龄 25 岁)。被试均知情并同意参加本实验且均未参加过类似实验, 身体健康, 无神经系统疾病, 无色盲、色弱或其它视觉疾患, 视力或矫正视力正常。实验后均给予报酬。

记忆色块、目标色块和掩蔽色块均为水平及垂直视角均为 1° 的正方形色块, 记忆色块和目标色块的颜色有红(233, 0, 0)、黄(231, 228, 66)、蓝(26, 49, 178)和绿(30, 138, 18)。两个目标色块的位置随机呈现在屏幕左侧或屏幕右侧四个位置, 呈现位置的可能性与实验 1 完全相同, 掩蔽色按 4×4 棋盘样式由 4 种颜色随机排列组成。

3.2 实验流程和阈限时间测量

实验流程如图 4 所示, 首先在屏幕中央呈现一个时长为 400 ms 的注视点, 注视点消失之后在屏幕中央呈现一个时长为 500 ms 的记忆色块, 随后同时呈现两个目标色块(呈现时间 mt 由测量阈限实验决定), 目标色块后是时长为 200 ms 的掩蔽色块, 在掩蔽色块与反应界面之间是一个时长为 500 ms 的注视点, 最后在屏幕中央呈现反应界面, 被试的任务是判断目标色块的颜色是否出现在两个目标色块中, 如果出现在目标色块中被试按 F 键, 如果没有出现被试按 J 键。反应界面直至被试做出反应而结束, 如果被试在 2000 ms 内没有做出反应, 反应界面将会自动消失。在整个实验过程中被试需要紧盯中央注视点, 同时要求在保证正确率的前提下进行反应, 对被试的反应速度则不做任何要求。

被试共完成 2 组实验, 每组 144 个试次。第 1 组为练习实验不计入最后统计分析, 第 2 组为正式实验, 被试在做完第 1 组练习实验后会有至少 5 min 的休息时间, 正式实验中被试在 3 种距离条件下各完成 48 个试次。两个目标色块间的 3 种距离均以相同概率随机呈现, 目标色块的颜色互不相同, 同时

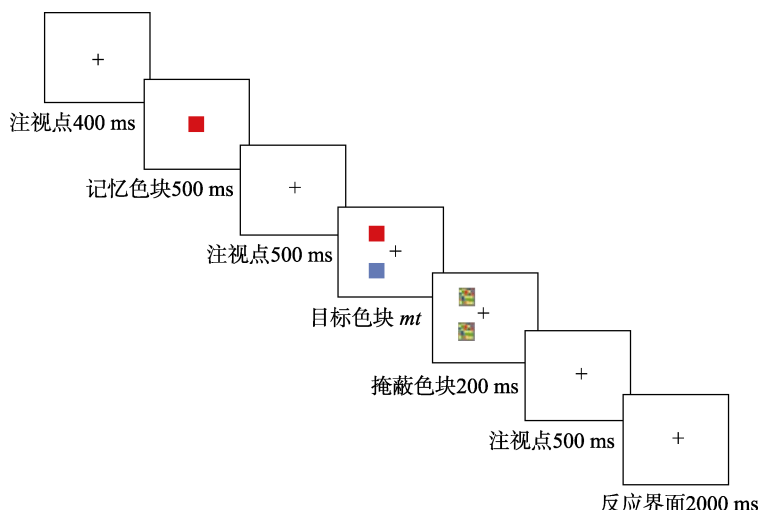


图4 实验2 流程示意图

记忆色块的颜色可能出现在目标色块中(50%),也可能不出现在目标色块中(50%)。

测量阈限时间与实验1完全相同。

3.3 数据统计与处理

平均呈现时间为56.6 ms。被试在4.6°、8.5°和11.1°空间水平上的正确率分别为0.93、0.94和0.92。重复测量的方差分析显示出空间距离主效应不显著, $F(2, 26) = 0.68, p > 0.05$ 。

3.4 讨论

实验2的目的是为了验证在阈限时间内,当前实验中设置的项目间距不会影响被试对两个记忆项目的感知觉加工,以排除实验1中在同时呈现条件下被试在3种距离水平上正确率的差异是源自感知觉编码水平的差异的可能。实验结果显示,被试在3种距离水平上均可以对两个颜色信息做出准确地感知觉编码,不同距离条件下的正确率不存在显著差异。这一结果也与近期Chen和Wyble(2016)的研究相一致,该研究发现个体的感知觉编码过程与视觉工作记忆巩固过程是两个互相独立的信息加工机制,即使个体可以对目标刺激做出有效的感知觉编码,但目标刺激仍可能无法被巩固进入视觉工作记忆当中。因此我们认为实验1的结果并不是由被试对目标刺激所进行的感知觉编码水平的不一致造成的。

实验1和实验2所得出的结果基本符合之前所提出的假设,增大记忆项目的间距并不会对被试的感知觉编码过程造成损害,但会对视觉工作记忆巩固过程造成一定的影响,这可以说明注意资源会影响视觉工作记忆的巩固过程。然而有研究认为颜色信息可能是一种比较特殊的视觉特征,如Franklin,

Pilling和Davies(2005)发现个体对颜色信息具有较强的感知和类别区分能力, Wilkinson, Ko, Milberg和McGlinchey(2008)则发现个体对颜色信息与方向信息的加工机制存在不同,因此可能是颜色信息自身具有较特殊的知觉加工属性,因此导致颜色信息巩固过程对空间距离更加敏感。实验3会将实验材料变换为方向信息,以期得出更具普遍性的结论。

4 实验3

Becker等(2013)发现个体对两个方向信息只能进行严格的序列巩固,因此实验3将在Becker等(2013)的研究基础上结合实验1的实验设置,对空间距离与巩固之间的关系作出进一步探究。实验3的流程与实验1基本相同,实验3将在阈限时间内向被试序列或同时呈现两个方向信息,被试在探测阶段需要对目标刺激的方向做出判断。由于在Becker等(2013)的研究中已经证实无论采用回忆报告范式或是变化觉察范式都不会影响个体对方向信息的巩固模式,同时有研究指出个体在记忆目标项目的同时也会将目标项目的位置信息自动存储进入视觉工作记忆当中(Chen & Wyble, 2015),因此无论采用哪种实验范式,被试都会自动将记忆项目的位置信息存储进工作记忆当中,两种实验范式之间并不会存在记忆负载的变化。所以在实验3的探测阶段将采用Becker等(2013)所使用的回忆报告范式进行探究。如果两个记忆项目之间的空间距离可以对视觉工作记忆巩固方式产生影响,那么在同时呈现条件下个体可能会对两个距离较近的方向信息进行并行巩固,而对两个距离较远的方向信息进行序列巩固,因此距离较近时的正确率应当高于

距离较远时的正确率;如果空间距离不能对巩固方式产生影响,那么在同时呈现条件下距离较近和较远的正确率之间应当不存在显著差异。

4.1 方法

4.1.1 被试

选取 14 名大学生被试(女性 8 名,平均年龄 20 岁)。被试均知情并同意参加本实验且均未参加过类似实验,身体健康,无神经系统疾病,无色盲、色弱或其它视觉疾患,视力或矫正视力正常。实验后均给予报酬。

4.1.2 实验材料

实验在微暗的单间隔音实验室里进行,实验材料呈现在 17 英寸 CRT 显示器上(分辨率 1024×768,刷新频率 120 Hz),屏幕背景为灰色(128, 128, 128),亮度与对比度适当,以不使被试感觉不适为度。被试距离显示器 60 cm,正面相对。程序采用 E-prime 1.1 编程与运行。

如图 5 所示,记忆项目为水平及垂直视角均为 1°的圆形光栅,光栅的方向有 0°(垂直)、45°、90°(水平)和 135°四种方向。光栅可能呈现在一虚拟圆周(以中央注视点为圆心,半径 6°视角)上的 8 个位置上(与实验 1 完全相同),掩蔽刺激为水平及垂直视角均为 1°的圆形干扰刺激。

4.1.3 实验流程与阈限时间测量实验

实验 3 与实验 1 相比,除有一处差别外其他完全相同。实验 3 为了能与以往研究方向巩固信息的研究结果进行对比,将探测方式上修改为 Becker 等(2013)所使用的探测方法。具体表现为:在探测

界面当中两个记忆项目的呈现位置中随机选择一个位置呈现一个方形线索提示,并要求被试判断原来该位置上光栅的方向是垂直或水平还是倾斜 45°。如果原来位置上光栅的方向是垂直或水平,被试按 F 键;如果光栅的方向是倾斜 45°,被试按 J 键。

4.1.4 数据统计与处理

记忆项目平均呈现时间 86.8 ms。被试在各个条件下的反应正确率如图 6 所示。重复测量的方差分析显示呈现方式主效应显著, $F(1, 13) = 98.66, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.88$ 。空间距离主效应不显著, $F(2, 26) = 2.69, p > 0.05$ 。呈现方式和空间距离的交互作用显著, $F(2, 26) = 4.24, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.41$ 。在 3 种距离水平上对序列呈现与同时呈现的反应正确率进行均值比较,发现在 4.6°距离上序列呈现的正确率显著高于同时呈现的正确率, $t(13) = 5.63, p < 0.001, d = 2.27$;在 8.5°距离上序列呈现的正确率显著高于同时呈现的正确率, $t(13) = 6.83, p < 0.001, d = 3.13$;在 11.1°距离上序列呈现的正确率显著高于同时呈现的正确率, $t(13) = 10.39, p < 0.001, d = 3.45$ 。

序列巩固理论正确率(*accuracy'*)对比 本实验中如果被试按照序列模式对两个记忆项目中的一个进行巩固,那么当线索提示指向未巩固的方向信息时(占实验 50%),被试只能通过猜测进行判断,此时被试的反应正确率应为 50%;当线索提示指向已巩固的方向信息时(占整个实验 50%),此时的反应正确率应当为被试在序列呈现条件下的实际正确率(序列巩固实际正确率)。

因此 $accuracy' = 50\% \times 50\% + 50\% \times \text{序列巩固实}$

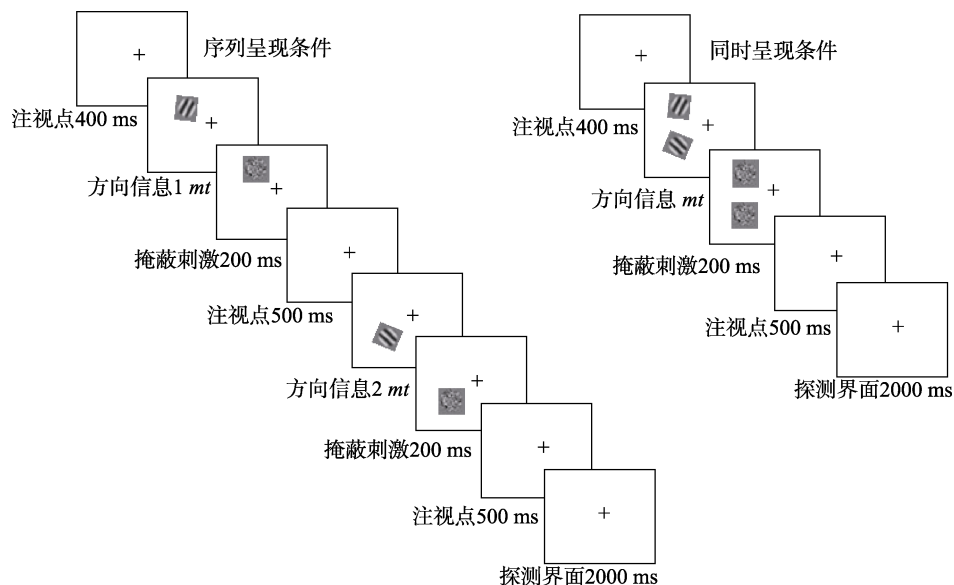


图 5 实验 3 流程示意图

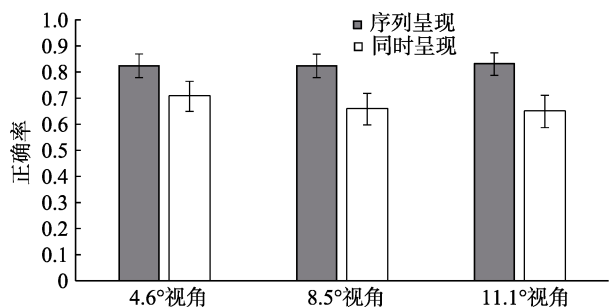


图6 实验3 三种距离条件下序列呈现和同时呈现的正确率

际正确率。在3种距离水平上对同时呈现条件下的正确率与 *accuracy'* 进行对比, 结果显示只有在4.6°距离上同时呈现的正确率显著高于 *accuracy'*, $t(13) = 2.59, p < 0.05, d = 1.03$ 。

中线距离 为了验证记忆项目呈现位置与视野中线的间距是否会对巩固过程产生影响, 进一步计算了当探测刺激指向1、4、5和8号位置时的正确率($r_{近}$)以及探测刺激指向2、3、6和7号位置时的正确率($r_{远}$), 统计结果显示出在同时呈现条件下, $r_{近}$ 和 $r_{远}$ 之间在4.6°水平上不存在显著性差异, $t(13) = 0.45, p > 0.05$; $r_{近}$ 和 $r_{远}$ 之间在8.5°水平上不存在显著性差异, $t(13) = 0.97, p > 0.05$; 在不考虑呈现间距的条件下, $r_{近}$ 和 $r_{远}$ 之间不存在显著性差异, $t(13) = 1.1, p > 0.05$ 。这再次说明记忆项目呈现位置与视野中线间的距离并不会对被试的巩固过程产生影响。

4.2 讨论

实验3发现被试在3种距离水平上都无法对两个方向信息进行并行巩固, 如果只看以上结果能够得出被试是按照序列模式对两个方向信息进行巩固的结论。然而, 在对 *accuracy'* 和同时呈现条件下的正确率进行比较后发现在4.6°距离上同时呈现的正确率显著高于 *accuracy'*。该结果表明被试可以在部分试次中并行巩固两个间距较近的方向信息进入视觉工作记忆系统。这进一步说明记忆项目的空间距离会对视觉工作记忆巩固产生影响, 缩小空间距离会促进被试的视觉工作记忆巩固过程, 并可以改变被试对方向信息的巩固方式, 这也与实验1中所得出的结果基本吻合。

5 总讨论

通过3个实验, 本研究发现被试在同时呈现条件下的记忆正确率会随着记忆项目之间的空间距离的增加而下降, 并在实验3中发现在同时呈现条件下被试可以对两个间距较小的方向信息进行并

行巩固, 以上结果充分说明记忆项目的空间距离会对视觉工作记忆的巩固过程产生明显影响。

与 Rideaux 等(2015)的研究相比, 在本实验中: (1)较好地控制了正式实验中记忆项目的呈现时间, 被试在实验1和实验3中序列呈现条件下的记忆正确率均保持在80%左右, 因此同时呈现条件和序列呈现条件下记忆正确率没有差异的原因只能是由并行巩固两个记忆项目造成的; (2)所有记忆项目均随机呈现在8个位置上, 它们之间的距离与相对位置均不固定, 因此被试无法猜测出记忆项目的呈现位置与记忆项目间的相对位置, 同时两个项目间的相对距离也较大, 限制了被试采用组合记忆的策略对两个记忆项目进行记忆; (3)通过实验2排除了感知觉编码可能会对本研究所带来的潜在影响, 这是以往类似研究中所没有关注的重要额外因素, 进一步证实了记忆项目之间的空间距离可以对视觉工作记忆巩固过程产生显著影响; (4)引入了一个序列巩固理论正确率(*accuracy'*)的概念。在前人研究中通过对比序列呈现和同时呈现条件下的正确率仅能大体推断出个体的巩固模式, 而本研究通过对同时呈现条件下的实际正确率与 *accuracy'* 进行比较, 可以更加细致地分析和推断出个体的巩固过程是否同时存在两种巩固模式。如 Becker 等(2013)的实验1中使用的实验材料为直径1.1°视角的圆形光栅, 两个光栅之间可能出现的最小距离为3°视角, 此时他们发现序列呈现条件下的正确率显著高于同时呈现条件下的正确率, 并由此认为个体只能对方向信息进行序列巩固。而在本研究实验3中使用的实验材料为直径1°视角的圆形光栅, 两个光栅之间可能出现的最小距离为4.6°视角, 我们直接比较4.6°距离上两种呈现方式所对应的正确率后, 同样也发现了序列呈现条件下的正确率显著高于同时呈现条件下的正确率, 然而通过进一步分析 *accuracy'* 则发现同时呈现条件下被试的巩固过程中含有并行巩固成分, 因此本研究的实验结果不仅与前人的研究互不矛盾, 而且较前人的研究具有更高的敏感度。

我们认为距离因素对视觉工作记忆巩固进程所产生的影响可能与注意资源的分配有关, 同时呈现条件下正确率随距离的增加而下降的现象可能是由记忆项目在巩固阶段所获得的注意资源不足所造成的。目前“基于空间”的选择性注意空间分布理论主要有3种模型假设: 探照灯模型(spotlight model)、聚焦模型(zoom-lens model)和空间梯度模型(spatial-gradient model)。探照灯模型认为视觉空

间注意就像光束一样均匀地投射到视野范围内的某个区域并可以在没有眼动的情况下像光束一样移动,进入注意投射范围内的记忆项目则可以获得更好的加工(Remington & Pierce, 1984);聚焦模型则在探照灯模型的基础上进一步认为个体可以在视野范围内较为灵活地分配注意资源,如个体可以将有限的注意资源分配到一个较大的区域,此时注意资源的分布密度较小,因此个体只能对注意范围内的视觉信息进行粗略加工,同时个体也可以把注意资源集中到一个较小的区域,此时注意资源的分布密度较大,因此个体就可以对视觉信息进行较为精密的加工(Eriksen & St. James, 1986);空间梯度模型则认为注意资源是按照从分布范围的中心向四周逐渐递减的形式分布的,靠近注意焦点的记忆项目可以获得更多的注意资源,而处于注意分布范围边缘的记忆项目则只能获得较少的注意资源(LaBerge & Brown, 1988);有研究进一步发现虽然注意资源的分布范围有限,但个体可以以 1° 视角/ 8 ms 的速度对注意资源进行快速转移(Tsal, 1983; Shulman, Remington, & Mclean, 1979)。尽管 3 种模型之间在注意资源的分配假设上存在差异,但均认为个体只能将有限的注意资源集中于特定的某个区域,因此均可以对本研究的结果做出合理的解释。如在实验 1 中,在同时呈现条件下两个记忆项目呈现时,被试在快速觉察和感觉编码后会将注意资源转移至记忆项目的呈现区域(注意焦点可能位于两个记忆项目中的一个或位于两个它们的中间区域),然而由于注意资源的分布范围是有限的,较近的距离可以使两个记忆项目同时处于注意资源的最佳分布范围内,因此在巩固阶段可以获得较多的注意加工资源,从而能够达到对两个记忆项目进行巩固的最低注意资源要求,因此被试可以对 4.6° 和 8.5° 距离上的两个色块进行并行巩固,而 11.1° 的距离则无法使两个记忆项目同时处于注意资源的最佳分布范围内,因此在巩固阶段两个记忆项目无法同时获得足够的注意加工资源,然而由于颜色信息的巩固负载较小,因此只对并行巩固过程造成了部分影响,被试仍可以对两个颜色信息进行并行巩固或部分并行巩固。而在实验 3 中,由于方向信息的巩固负载较大,虽然 4.6° 的距离可以使两个方向信息同时获得相对较多的注意资源,但仍无法完全满足个体对两个方向信息进行并行巩固,导致该条件下被试的并行巩固水平偏低,而 8.5° 和 11.1° 的距离则完全无法保证两个方向信息同时能

够获得充足的注意资源,因此被试在该条件下只能对两个方向信息进行严格的序列巩固。

先前关于视觉工作记忆巩固的研究更多地关注于不同类别的信息所对应的巩固方式是否存在差异,并未对巩固的加工机制及影响因素做出更加深入的探究,因此 Miller 等(2014)所提出的巩固带宽理论主要强调不同类别的信息与巩固方式之间所对应的关系,他们认为巩固通道的带宽是恒定不变的,而不同类别的信息由于具有不同的感知觉加工特征,因此具有不同的巩固负载进而造成了巩固模式的差异,这应当属于在一个较为宽泛的层次对视觉工作记忆的巩固模式进行描述。基于本实验的研究结果,我们认为视觉工作记忆巩固模式应当是一个灵活变化的概念,虽然视觉信息本身所具有的巩固负载对巩固的方式具有决定性作用,但视觉信息在巩固过程中所能获得的注意资源同样也会影响巩固过程,因此 Miller 等(2014)提出的“巩固带宽”实质上应当属于一种认知加工资源的范畴,而注意资源应当是其中重要的组成成分之一,如果记忆项目获得了较多的注意资源,那么就意味着巩固通道的带宽相应变宽,此时个体就可以对两个巩固负载较大的记忆项目进行并行巩固,如果记忆项目无法获得足够的注意资源,那么巩固通道的带宽就会相应变窄,此时个体面对两个巩固负载较小的记忆项目时也无法顺利对其进行并行巩固。

6 结论

本研究发现记忆项目的空间距离会对视觉工作记忆巩固过程产生显著的影响。这一影响可能源自项目间距对单个项目所获得的注意加工资源的调配。基于当前的发现,本研究对原有的巩固带宽理论进行了补充修正,即视觉信息的巩固模式并不是一个固定不变的概念,巩固带宽与注意资源的分配具有密切联系,记忆项目所能获得注意资源的多少直接决定了巩固通道的带宽大小,因此个体对同一类信息进行巩固的模式也并不唯一,巩固带宽和巩固负载共同决定了个体对记忆项目的巩固方式,因此个体的巩固模式会随着记忆项目之间距离的改变而变化。

参 考 文 献

- Alvarez, G. A., & Cavanagh, P. (2005). Independent resources for attentional tracking in the left and right visual hemifields. *Psychological Science*, 16(8), 637–643.
- Baddeley, A. (2012). Working memory: Theories, models, and

- controversies. *Annual Review of Psychology*, 63, 1–29.
- Balaban, H., & Luria, R. (2015). The number of objects determines visual working memory capacity allocation for complex items. *NeuroImage*, 119, 54–62.
- Becker, M. W., Miller, J. R., & Liu, T. S. (2013). A severe capacity limit in the consolidation of orientation information into visual short-term memory. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 75(3), 415–425.
- Chen, H., & Wyble, B. (2015). The location but not the attributes of visual cues are automatically encoded into working memory. *Vision Research*, 107, 76–85.
- Chen, H., & Wyble, B. (2016). Attribute amnesia reflects a lack of memory consolidation for attended information. *Journal of Experimental Psychology Human Perception & Performance*, 42(2), 225–234.
- Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral & Brain Sciences*, 24(1), 87–114.
- 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 & Performance*, 31(6), 1416–1438.
- Eriksen, C. W., & St James, J. D. (1986). Visual attention within and around the field of focal attention: A zoom lens model. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 40(4), 225–240.
- Franklin, A., Pilling, M., & Davies, I. (2005). The nature of infant color categorization: Evidence from eye movements on a target detection task. *Journal of Experimental Child Psychology*, 91(3), 227–248.
- Fukuda, K., Awh, E., & Vogel, E. K. (2010). Discrete capacity limits in visual working memory. *Current Opinion in Neurobiology*, 20(2), 177–182.
- Fuller, R. L., Luck, S. J., Braun, E. L., Robinson, B. M., McMahon, R. P., & Gold, J. M. (2009). Impaired visual working memory consolidation in schizophrenia. *Neuropsychology*, 23(1), 71–80.
- 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 & Cognition*, 41(2), 325–347.
- Hollingworth, A., & Luck, S. J. (2008). Visual memory systems. In *Visual memory* (pp. 3–8). New York, NY: Oxford University Press.
- Holt, J. L., & Delvenne, J. F. (2014). A bilateral advantage in controlling access to visual short-term memory. *Experimental Psychology*, 61(2), 127–133.
- Hüttermann, S., Memmert, D., & Simons, D. J. (2014). The size and shape of the attentional "spotlight" varies with differences in sports expertise. *Journal of Experimental Psychology Applied*, 20(2), 147–157.
- Huang, L. Q., & Pashler, H. (2007). A Boolean map theory of visual attention. *Psychological Review*, 114(3), 599–631.
- Jolicoeur, P., & Dell'Acqua, R. (1998). The demonstration of short-term consolidation. *Cognitive Psychology*, 36(2), 138–202.
- Laberge, D., & Brown, V. (1989). Theory of attentional operations in shape identification. *Psychological Review*, 96(1), 101–124.
- Liu, T. S., & Becker, M. W. (2013). Serial consolidation of orientation information into visual short-term memory. *Psychological Science*, 24(6), 1044–1050.
- Luck, S. J., & Vogel, E. K. (2013). Visual working memory capacity: From psychophysics and neurobiology to individual differences. *Trends in Cognitive Sciences*, 17(8), 391–400.
- Ma, W. J., Husain, M., & Bays, P. M. (2014). Changing concepts of working memory. *Nature Neuroscience*, 17(3), 347–356.
- Malcolm, G. L., & Shomstein, S. (2015). Object-based attention in real-world scenes. *Journal of Experimental Psychology: General*, 144(2), 257–263.
- Mance, I., Becker, M. W., & Liu, T. S. (2012). Parallel consolidation of simple features into visual short-term memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 38(2), 429–438.
- Miller, J. R., Becker, M. W., & Liu, T. S. (2014). The bandwidth of consolidation into visual short-term memory depends on the visual feature. *Visual Cognition*, 22(7), 920–947.
- Potter, M. C. (1976). Short-term conceptual memory for pictures. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning & Memory*, 2(5), 509–522.
- Railo, H. (2014). Bilateral and two-item advantage in subitizing. *Vision Research*, 103, 41–48.
- Remington, R., & Pierce, L. (1984). Moving attention: Evidence for time-invariant shifts of visual selective attention. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 35(4), 393–399.
- Rideaux, R., Apthorp, D., & Edwards, M. (2015). Evidence for parallel consolidation of motion direction and orientation into visual short-term memory. *Journal of Vision*, 15(2), 17.
- Ruzzoli, M., Gori, S., Pavan, A., Pirulli, C., Marzi, C. A., & Miniussi, C. (2011). The neural basis of the enigma illusion: A transcranial magnetic stimulation study. *Neuropsychologia*, 49(13), 3648–3655.
- Shulman, G. L., Remington, R. W., & Mclean, J. P. (1979). Moving attention through visual space. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 5(3), 522–526.
- Stevanovski, B., & Jolicoeur, P. (2011). Consolidation of multifeature items in visual working memory: Central capacity requirements for visual consolidation. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 73(4), 1108–1119.
- Tsal, Y. (1983). Movement of attention across the visual field. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 9(4), 523–530.
- Vogel, E. K., Luck, S. J., & Shapiro, K. L. (1998). Electrophysiological evidence for a postperceptual locus of suppression during the attentional blink. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 24(6), 1656–1674.
- 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 & Performance*, 27(1), 92–114.
- Vogel, E. K., Woodman, G. F., & Luck, S. J. (2006). The time course of consolidation in visual working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 32(6), 1436–1451.
- West, G. L., Pun, C., Pratt, J., & Ferber, S. (2010). Capacity limits during perceptual encoding. *Journal of Vision*, 10(2), 14.1–14.12.
- Wilkinson, D., Ko, P., Milberg, W., & McGlinchey, R. (2008). Impaired search for orientation but not color in hemi-spatial neglect. *Cortex*, 44(1), 68–78.
- Zimmer, H. D. (2008). Visual and spatial working memory: From boxes to networks. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 32(8), 1373–1395.

Effects of spatial distance on visual working memory consolidation

LI Tengfei; MA Nan; HU Zhonghua; LIU Qiang

(Research Center of Brain and Cognitive Neuroscience, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract

During past years, visual working memory (VWM) consolidation has been studied extensively. Consolidation of visual information into VWM is widely considered to occur with capacity limit. Previous studies have demonstrated that two colors could be consolidated in parallel and two oriented gratings could be consolidated only in serial. Some researchers provided a bandwidth hypothesis for these results: because of the difference between the informational demands for color and for oriented grating, two colors could be consolidated in parallel without exceeding the bandwidth limit, whereas two oriented gratings could only be consolidated in serial because of exceeding the bandwidth limit. But other researchers recently realized that different positions of stimulus could affect the VWM consolidation as well. In the present study, we used change detection paradigm and sequential-simultaneous manipulation to examine whether the spatial distance between memory items could affect the VWM consolidation.

In Experiment 1, we briefly presented two masked color patches (targets) within one of three levels of spatial distance (4.6° , 8.5° and 11.1°). A probe color then appeared, and participants needed to judge whether the probe color matched any one of the targets. The results showed that no difference was found between sequential and simultaneous presentations in 4.6° and 8.5° spatial distance conditions, while the performance for sequential presentation was better than simultaneous presentation in 11.1° spatial distance condition. These results suggested that two colors were consolidated in parallel in 4.6° and 8.5° spatial distance conditions, but in serial in 11.1° spatial distance condition.

In Experiment 2, we presented a color target firstly, and then two masked color patches appeared and the participants needed to judge whether the color target matched any one of the two masked color patches. As a result, no difference was found in the three given spatial distance conditions, eliminating the possibility that perceptual encoding led to the results in Experiment 1. Considering that the consolidation for oriented grating was different from the process for color and color might also be a unique visual feature, we attempted to use oriented grating to replicate the results of Experiment 1.

In Experiment 3, we briefly presented two masked oriented gratings (targets) within three levels of spatial distance (4.6° , 8.5° and 11.1°). A probe cue then appeared, and participants needed to judge whether the cued sinusoidal grating had been oriented in a cardinal (horizontal or vertical) or an oblique ($\pm 45^\circ$) orientation. Despite superior performance for sequential over simultaneous presentations in all three spatial distance conditions, we found that the performance for parallel presentation was better than the *accuracy*' in 4.6° spatial distance condition. The results suggested that parallel consolidation of oriented gratings into WVM was possible when the spatial distance between memory items was short enough.

According to the results, we speculated that consolidation into VWM might be related to the distribution of the visual spatial attention, and the consolidation bandwidth increased with increasing resources of attention which memory items could get.

Key words visual working memory; consolidation; bandwidth.