

视觉工作记忆中的特征捆绑*

禩宇明 傅小兰

(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)

摘要 特征捆绑是认知科学和神经科学研究的前沿问题, 近来已经成为研究者们关于意识问题争论的焦点所在。很多心理活动涉及复杂对象各种特征的捆绑, 在工作记忆中保持这些捆绑的机制是心理加工得以有效进行的基础。视觉工作记忆中的特征捆绑近来成为研究热点之一, 有关研究大多凭借变化检测范式和单刺激探测范式, 探讨了视觉工作记忆中捆绑特征的保持是否需要注意参与, 以及分离特征存储和捆绑特征存储的关系等问题, 但目前这些问题仍都没有明确的答案。

关键词 特征捆绑, 工作记忆, 注意, 视觉。

分类号 B842

1 前言

特征捆绑 (feature binding) 是认知科学和神经科学研究的前沿问题之一^[1], 近来已经成为研究者们关于意识问题争论的焦点所在^[2]。很多心理活动涉及复杂对象各种特征的捆绑, 这些对象可以是知觉物体或者图像, 也可以是抽象的命题。在工作记忆中保持这些捆绑的机制是心理加工得以有效进行的基础。有关捆绑问题的视知觉研究很多^[3], 但关于捆绑特征的提取和保持的研究还很少^[4]。

心理学家 Baddeley^[5]提出的工作记忆模型包括中央控制器 (central executive)、语音回路 (phonological loop) 和视空模板 (visuo-spatial sketchpad) 3 个部分, 其中中央控制器为控制系统, 语音回路和视空模板

为存储系统, 分别用于存储语言信息以及视觉和空间信息。语音回路涉及的存储信息比较单一^[5], 得到了较多研究者的关注。而视空模板则涉及不同类型特征的存储^[5], 相关研究也比较少。行为研究和脑成像研究表明, 与视知觉加工的物体 (What) 和空间 (Where) 通路的区分类似, 有专门化的脑区分别与物体特征信息和物体空间信息的工作记忆有关^[4, 6]。

同时, 很多研究表明, 即使视觉场景发生了很大的变化, 比如场景中物体消失, 颜色变化, 或者是布局变化等, 人们也常常觉察不到这些变化; 但如果有线索引导注意指向这些变化, 那么这些变化却是显而易见的。心理学家把这种现象称为变化知盲 (change blindness)^[7]。变化知盲现象表明, 对任一视觉场景, 我们在工作记忆中只保持其中非常有限的部分信息。

一方面, 视觉特征信息和空间信息在工作记忆中分离存储; 另一方面, 视觉工作记忆容量有限。那么, 在存储容量有限的情况

收稿日期: 2005-04-06

* 本研究得到中国科技部 973 项目 (2002CB312103)、国家自然科学基金重点项目 (60433030) 和面上项目 (30270466)、以及中国科学院心理研究所创新重点项目 (0302037) 经费支持。

通讯作者: 禩宇明, E-mail: xuanyym@psych.ac.cn

下, 存储的信息是分离的特征 (separate features) 还是捆绑的特征 (bound features)? 还是两者兼而有之? 如果两者都有, 那么两者的存储是彼此独立的还是会相互竞争有限的存储容量呢? 这些问题已成为视觉工作记忆中特征捆绑问题研究的焦点。本文概述目前研究者们在这类问题上所取得的进展, 并进行总结和分析。

2 研究现状

2.1 工作记忆中存储的是分离特征还是捆绑特征?

对这个问题, 我们有相互矛盾的两方面证据。Luck 和 Vogel^[8]的研究支持工作记忆中存储捆绑特征的观点, 而后来以 Wheeler 和 Treisman^[4]为代表的研究支持工作记忆中存储分离特征的观点。

研究者们采用的研究范式主要有两种, 即变化检测范式 (change detection) 和单刺激探测范式 (single probe)。变化检测范式的基本程序是先后呈现两帧刺激, 每帧刺激有若干个项目, 第 2 帧刺激可能与第 1 帧刺激完全相同, 或者会发生变化。被试的任务是检测是否发生了变化。由于两帧刺激之间会有空屏作为掩蔽, 因此被试能否成功检测出前后两帧刺激发生了变化, 必须依赖于对第 1 帧刺激的视觉短时记忆。研究者操纵的主要是每个项目包含的特征数, 如果被试的记忆绩效只和项目数有关而与特征数无关, 那么表明短时记忆中存储的物体而非特征; 如果被试的记忆绩效取决于每帧刺激的特征数目, 而不是项目数, 那么表明短时记忆中存储的是特征而不是物体。

Luck 和 Vogel^[8]的研究采用变化检测范式。他们以单色色块为实验材料, 发现当色块数为 1~3 时, 被试几乎能 100% 正确反

应, 而当色块数目增至 4 及 4 以上时, 被试绩效开始下降。然后, Luck 和 Vogel 采用多特征的物体作为刺激材料, 比如, 双色色块, 或者是朝向和颜色都会变化的线段。对朝向-颜色任务, 前后两帧刺激每帧呈现 4 条线段, 并告知被试不同 block 内线段的颜色 (或朝向, 或两者) 可能会有变化。因此, 单维特征探测条件下被试只需要记住 4 个特征 (4 种颜色或 4 种朝向), 二维特征探测条件下被试需要记住 8 个特征。有的实验中每个物体甚至包含 4 个特征, 4 个物体则一共有 16 个特征。结果发现, 被试的绩效只取决于物体的数量而与特征数量无关。因此, Luck 和 Vogel 认为视觉工作记忆中存储的是捆绑特征, 其容量为 3~4 个项目, 但每个项目的组成特征相对来说几乎是无限的。也就是说, 无需额外努力工作记忆中就会自然存储捆绑特征。

而 Wheeler 和 Treisman^[4]采用了类似于 Luck 和 Vogel^[8]的范式和刺激, 却发现了不一致的实验现象。他们以单色色块和双色色块作为实验材料, 实验 1、2 的结果表明, 正确检测出前后两帧刺激是否有变化的百分率取决于每帧刺激的特征数目而不是物体数目, 因此, 双色色块并不会自动成为一个记忆单元。实验 3a 中每帧刺激由 3 或 6 个单色色块组成, 在不同 block 内, 前后两帧刺激可能仅在颜色上有变化, 或仅在位置上有变化, 或一半为颜色变化而另一半为位置变化, 或者是两个色块之间的颜色互换 (捆绑条件)。结果捆绑条件下被试正确率最差, 颜色变化条件下的正确率显著低于位置变化条件, 而颜色或位置都有可能变化条件下的正确率处于颜色变化和位置变化条件的正确率之间。这一结果表明, 工作记忆

中存储的是分离特征，而特征捆绑需要额外努力才能实现。

2.2 特征存储和物体存储的关系

如上所述，Luck 和 Vogel^[8]的研究采用了双色色块作为刺激材料，而且结果发现记忆绩效取决于色块数而不是颜色数。这不仅表明工作记忆中存储的是物体，而且表明两种颜色可以捆绑成为一个整合的特征。但是，Wheeler 和 Treisman^[4]的研究则得到了相反的结论，他们发现双色色块不能自动成为一个记忆单元。而且，Wheeler 和 Treisman^[4]在实验 3b 中采用了单刺激探测范式，即第 2 帧刺激只包含一个色块，被试任务是判断该色块是否在第 1 帧刺激中出现过。结果发现，捆绑条件下的被试绩效与仅颜色有变化条件的绩效相同。这表明在单刺激探测条件下，被试能够保持对物体的存储。实验 4 中对颜色和形状维度的研究结果与实验 3 的结果类似。

Wheeler 和 Treisman 因此提出了双重存储模型 (dual-storage model)，认为不同维度的特征可以平行存储，而同一维度的不同特征（如两种颜色）竞争有限的存储容量，彼此不会被捆绑在一起；不同维度特征之间的捆绑的保持需要集中注意的参与，而且捆绑特征的保持易受干扰的影响（因为只在单刺激探测条件下保持了物体记忆，而在变化检测范式下由于有其他项目的干扰，并没有表现出保持物体记忆的证据）。

Delvenne 和 Bruyer^[9]的研究基本支持 Wheeler 和 Treisman^[4]的结论。除了得到与 Wheeler 和 Treisman 类似的结果外，Delvenne 和 Bruyer 发现，对 2 个双色色块的记忆比对 4 个单色色块的记忆还要差。如果两个维度的特征（形状和纹理）具有相同

的空间信息（如外周轮廓），那么它们是以捆绑特征的形式保持在工作记忆中。但捆绑特征的提取比单特征的提取要慢，因此这似乎提示捆绑特征的保持需要注意的参与。而且，记忆两种形状和两种纹理的绩效比记忆 4 种形状或 4 种纹理要好。因此，维度内的干扰似乎比其他维度的干扰要大得多。

Finke 等^[6]采用类似 Wheeler 和 Treisman^[4]的探测范式，以不规则多边形为实验刺激，单任务条件下只要求被试记忆多边形的形状或位置中的一个，而双任务条件下被试需要同时记住形状和位置，结果表明：在双任务条件下，位置记忆的绩效下降，而形状记忆的绩效几乎不变。在 Finke 等的实验 2 中，一半被试完成位置记忆任务，而另一半被试完成形状记忆任务，结果表明：当只需要记忆一个项目时，位置记忆和形状记忆的绩效是相当的。所以 Finke 等认为，不规则多边形的形状不是比位置更难编码和保持，而是因为形状信息更复杂，因此需要更大的存储容量，当需要记忆不止一个形状时，其绩效就下降。对于双任务中位置记忆的特异性受损，Finke 等认为这是因为认知加工通用资源会优先分配给复杂性高的维度。

综上所述，除了早先 Luck 和 Vogel 的研究^[8]认为同一维度的特征可以捆绑存储以外，以后的研究^[4,9]都支持 Treisman 的双重存储理论。

2.3 注意对工作记忆中的特征捆绑的作用

从以上讨论我们可以看到，问题的关键似乎在于：对工作记忆中的特征捆绑，注意到底起什么作用？Luck 和 Vogel^[8]的研究表明，无需额外努力工作记忆中就会自然存储捆绑特征。而 Wheeler 和 Treisman^[4]只在单

刺激探测条件下发现被试保持了物体记忆,而在变化检测范式下由于有其他项目的干扰,没有表现出保持物体记忆的证据;Delvenne 和 Bruyer^[9]也发现,捆绑特征的提取比分离特征的提取要慢。因此似乎捆绑特征的保持需要集中注意的参与。

认知神经科学的有关研究表明,捆绑特征的保持和注意的参与可能涉及相同的脑区,提示两者之间有密切的关系。例如, Todd 和 Marois^[10]的工作提示,与视觉工作记忆容量有限相关的神经基础可能是顶叶后部 (posterior parietal cortex), 而以往研究^[5, 11]提示额叶/前额叶 (frontal/prefrontal cortex) 与存储信息的巩固/保持以及执行控制有密切关系。Hoshi 等^[12]使用光成像技术,发现考察工作记忆广度的任务中被试的前额叶侧后部有明显激活。Olesen 等^[13]用 fMRI 实验发现,成人经过 5 周的工作记忆任务训练后,前额中回和顶叶上部和下部的活动更为活跃。而顶叶被认为是和空间注意密切相关的脑区,而额叶和注意转换任务有关^[14]。

Gold 等^[15]最近的研究采用变化检测范式考察了精神分裂症 (schizophrenia) 患者的工作记忆容量。给被试呈现 2, 3, 4 或 6 条彩色线段,然后在单维度 (颜色、朝向) 或双维度条件下进行测试。结果发现,病人在不同项目数下的绩效都显著低于正常控制组,但病人的特征捆绑能力正常;病人的工作记忆容量在项目数为 6 时开始下降,而正常控制组是在项目数为 4 时开始下降。结果还表明,病人的绩效之所以低于正常控制组,在项目数少时是因为病人保持任务集合的能力下降;而项目数多时是因为病人对工作记忆中项目的选择性编码的能力下降。Gold 等据此认为,精神分裂症病人的绩效模

式是源于注意的选择性加工受损,而不是因为工作记忆容量的下降。因此,Gold 等的研究也表明了工作记忆绩效与注意有关。

但以上研究都没有直接操纵注意条件,因此不能直接回答捆绑特征的保持是否需要集中注意的参与的问题。最近,有一些研究者从这个角度进行了研究。

陈彩琦等^[16]采用单刺激探测范式,比较了被试在集中注意条件下和分配注意条件下在工作记忆中保持分离特征和捆绑特征的绩效。结果发现,分离特征的储存不受注意水平的影响,可能是一种自动化的过程;而捆绑特征的保持需要集中性注意的参与。我们认为,考虑到工作记忆容量有限这一性质,自动化存储分离特征的观点有待商榷。而且,值得注意的是,该研究集中和分配注意条件的区分在于是否需要进行两个数字的加法,因此陈彩琦等所操纵的是认知负荷而不是视觉注意。

最近,Johnson, Hollingworth 和 Luck^[17]的研究结果似乎又表明捆绑特征的保持并不需要集中注意的参与。首先,他们在实验 1 中采用变化检测范式,发现被试在颜色-朝向任务中对特征和捆绑特征的记忆绩效没有显著差异;然后,在实验 2 中,他们在前后呈现的两帧刺激中加入了一个联合搜索任务。由于该视觉搜索任务是需要集中注意参与,因此,如果捆绑特征的保持需要集中注意的持续参与,那么视觉搜索任务将会大大损害捆绑特征的记忆,而分离特征的记忆则不会受损。实验 2 结果表明,中间加入搜索任务后,被试的变化检测绩效会小幅下降 (统计上是显著的),但是对分离特征和捆绑特征的记忆的下降程度是同等的。因此 Luck 及其同事认为,捆绑特征的存储不需

要注意的持续参与,这支持了工作记忆中存储的就是整合的物体的观点。

因此,从直接控制注意条件角度进行的研究结果目前也不一致,我们仍然不清楚工作记忆中的捆绑特征的保持是否需要注意的参与。

3 总结和讨论

综上所述,有关工作记忆中的特征捆绑问题的研究仍处于起步阶段,对以下3个问题的答案仍然没有达成共识。

(1) 视觉工作记忆中存储的是分离特征还是捆绑特征? Luck 和 Vogel 的研究^[8]支持不需额外加工就可保持捆绑特征的观点,而 Wheeler 和 Treisman^[4]、Delvenne 和 Bruyer^[9]、Finke 等^[6]支持捆绑特征的保持需要注意(或所谓的额外的通用加工资源^[6])参与的观点。

(2) 分离特征的存储和捆绑特征的存储是什么关系? Luck 和 Vogel^[8]认为,视觉工作记忆容量只取决于物体的数量而不是特征的数量,而不同特征的捆绑存储几乎没有什么限制。而 Wheeler 和 Treisman^[4]的双存储模型认为,不同维度特征的存储容量彼此独立,同一维度的特征竞争有限的存储容量,而且不能形成捆绑特征保持在工作记忆中;不同维度的特征的捆绑的产生和保持需要消耗注意资源,而捆绑特征的存储只占用很少或不占用分离特征的存储容量。但 Delvenne 和 Bruyer^[9]、Finke 等^[6]却认为,不同维度特征的存储不是完全独立的,而是受知觉组织的影响或者是通用资源分配策略的影响。

(3) 注意对工作记忆中捆绑特征的存储有什么影响? 这个问题与前两个问题都有密切关系,但已有研究既有捆绑特征的存

储和注意无关的证据^[8,17],也有两者相关的证据^[4,6,10]。

其次,除了上述相互矛盾的证据外,我们认为已有研究还存在以下三方面的不足:

(1) 已有研究大多采用变化检测范式或单刺激探测范式。虽然这两种任务在研究工作记忆上有其独到优势,但被试在完成这两种任务过程中均无需对工作记忆中保持的信息进行主动的更新和操纵,而主动更新和操纵是工作记忆的主要功能之一^[18]。

(2) 只有少数研究直接操纵视觉注意条件,观测在不同注意条件下对工作记忆中捆绑特征的保持和提取。

(3) 已有研究大多侧重研究同时呈现的项目的工作记忆和特征捆绑问题,而对工作记忆中不同时程的特征的捆绑的研究则很少。考虑到工作记忆的动态特性,有关时程的研究应该是不可或缺的。因为视觉系统不仅需要对当前场景中与任务相关的信息进行编码,有时还需要将随时间变化的前后场景中的相关信息整合起来。实际上,最近也有少数研究关心工作记忆中对不同时程的特征的捆绑问题。Jiang 和 Kumar^[19]以点阵为刺激材料,先后呈现两帧点阵,每帧点阵包含6个点,要求被试记住这些点的位置并报告探测点的位置是否在前面出现过。为了考察被试是否将两帧点阵整合起来表征,伴随探测点一起出现的可能都是第1帧的点,也可能都是第2帧的,也可能两帧的点都有。结果发现,如果探测点和第2帧的点一起出现,那么对第1帧点阵位置的记忆绩效就受损;反之亦然。这意味着两帧点阵是分开表征的。这种效应只在 ISI 大于 500ms 的条件下出现。Jiang 和 Kumar 认为,两帧点阵之间的间隔时间愈长,被试用来巩固第

1 帧的表征的时间就愈多, 两帧的表征彼此就愈加独立。因此, 不同时程的特征能否捆绑起来和时间间隔似乎有密切关系。

我们认为, 未来研究的方向可能包括: 在原有变化检测和单刺激探测范式基础上发展新的范式, 如借鉴工作记忆刷新的范式^[13], 以考察人对工作记忆中保持的信息进行主动更新和操纵的能力; 直接操纵视觉注意条件, 从而更有效地澄清注意、工作记忆、特征捆绑三者的关系; 加强对不同时程的特征捆绑的研究, 这可以借鉴有关视觉标记^[20]的工作; 在行为数据基础上结合眼动、脑成像数据寻求汇聚性证据, 以从心理和生理不同角度更深入地理解特征捆绑问题。

参考文献

- [1] Watanabe W, Nakanishi K, Aihara K. Solving the binding problem of the brain with bi-directional functional connectivity. *Neural Networks*, 2001, 14(4-5): 395-406
- [2] Engel A K, Singer W. Temporal binding and the neural Correlates of sensory awareness. *Trends in Cognitive Sciences*, 2001, 5(1): 16-25
- [3] Quinlan T P. Visual Feature Integration Theory: Past, Present, and Future. *Psychological Bulletin*, 2003, 129(5): 643-673
- [4] Wheeler M E, Treisman A M. Binding in short-term visual memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, 2002, 131: 48-64
- [5] Baddeley A. Working memory: looking back and looking forward. *Nature Reviews Neuroscience*, 2003, 4(10): 829-39
- [6] Finke K. Combined processing of what and where information within the visuospatial scratchpad. *European Journal of Cognitive Psychology*, 2005, 17(1): 1-22
- [7] Simons D J, Rensink R A. Change blindness: past, present, and future. *Trends in Cognitive Sciences*, 2005, 9(1): 16-20
- [8] Luck S J, Vogel E K. The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature*, 1997, 390: 279-281
- [9] Delvenne J F, Bruyer R. Does visual short-term memory store bound features? *Visual Cognition*, 2004, 11(1): 1-27
- [10] Todd J J, Marois R. Capacity limit of visual short-term memory in human posterior parietal cortex. *Nature*, 2004, 428(6984): 751-754
- [11] Curtis C E, D'Esposito M. Persistent activity in the prefrontal cortex during working memory. *Trends in Cognitive Sciences*. 2003, 7: 415-423
- [12] Hoshi Y, Oda I, Wada Y, Ito Y, Yamashita Y, Oda M, Ohta K, Yamada Y, Tamura M. Visuospatial imagery is a fruitful strategy for the digit span backward task: a study with near-infrared optical tomography. *Cognitive Brain Research*, 2000, 9: 299-312
- [13] Olesen P J, Westerberg H, Klingberg T. Increased prefrontal and parietal activity after training of working memory. *Nature Neuroscience*, 2004, 7: 75-79
- [14] Roberston L C. *Space, Objects, Minds, and Brains*. New York, NY: Psychological Press, 2004
- [15] Gold J M, Wilk C M, McMahon R P, Buchanan R W, Luck S J. Working memory for visual features and conjunctions in schizophrenia. *Journal of Abnormal Psychology*, 2003: 112(1), 61-71
- [16] 陈彩琦, 付桂芳, 金志成. 注意水平对视觉工作记忆客体表征的影响. *心理学报*, 2003, 35(5): 591-597
- [17] Johnson J S, Hollingworth A, Luck S J. The Role of Attention in Binding Features in Visual Working Memory. Abstracts of VSS 5th Annual Meeting, Sarasota, Florida, May 6-11, 2005. p118
- [18] Cohen J D, Perlstein W M, Braver T S, Nystrom L E, Noll D C, Jonides J, Smith E E. Temporal dynamics of brain activation during a working memory task. *Nature*, 1997, 386: 604-608
- [19] Jiang Y H, Kumar A. Visual short-term memory for two sequential arrays: One integrated representation or two separate representations? *Psychonomic Bulletin & Review*, 2004, 11(3): 495-500
- [20] Jiang Y, Wang S W. What kind of memory supports visual marking? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 2004, 30(1): 79-91

Feature Binding in Visual Working Memory

Xuan Yuming, Fu Xiaolan

(State Key Laboratory of Brain and Cognitive Science, Institute of Psychology,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Binding problem is a central issue of cognitive sciences and neurosciences and is at the core of the dispute on consciousness. Much of mental life involves the manipulation of binding of features from different objects. The mechanisms that maintain these bindings within working memory are essential to efficient functioning. Feature binding in visual working memory turns to be a heated topic recently. Most related studies focus on whether visual working memory stores bound features, the relation between the storage of separate features and bound features, and the role of attention in the storage of bound features. However, there are not clear answers to above questions till now.

Key words: feature binding, working memory, attention, vision.

欢迎订阅《遗传学报》、《遗传》杂志

《遗传学报》、《遗传》杂志是中国遗传学会和中国科学院遗传与发育生物学研究所主办的学术期刊，中文生物学核心期刊，已被美国化学文摘、生物学数据库、生物学文摘、医学索引以及俄罗斯文摘杂志等 20 余种国内外重要检索系统与数据库收录。刊物内容涉及遗传学、发育生物学、基因组与生物信息学以及分子进化等领域，读者对象为基础医学、农林牧渔、生命科学各领域的科研、教学、开发人员，大学生、研究生、中学生物教师等。

2003 年，《遗传学报》、《遗传》的影响因子分别为 1.0224 和 0.8935，分别列于“人类学与生物科学”期刊的第 2 和第 3 位。2004 年，《遗传学报》获得“百种中国杰出学术期刊奖”和“第三届国家期刊奖提名奖”。

《遗传学报》(月刊) 邮发代号 2-819，2006 年定价 40 元，全年 480 元。

《遗传》(月刊) 邮发代号 2-810，2006 年定价 30 元，全年 360 元。

两刊全面实行网上投稿、网上审稿，网址：www.Chinagene.cn。

欢迎订阅，欢迎网上注册投稿，欢迎刊登产品与服务广告。

地址：北京市安定门外大屯路 中国科学院遗传与发育生物学研究所编辑室

邮政编码：100101

主 编：薛勇彪 E-mail: ybxue@genetics.ac.cn,

编辑室主任：李绍武 E-mail: swli@genetics.ac.cn,

电话/传真：010-64889354, 010-64889348