

双特征空间客体捆绑关系的存储机制 ——来自 ERP 的证据*

傅亚强

(杭州师范大学心理学系, 杭州 311121)

摘要:利用事件相关电位技术(ERPs),采用延迟匹配任务的实验范式,调查了16名正常被试完成位置客体、方向客体和位置—方向捆绑客体的工作记忆诱发的皮层慢电位。实验发现:在第1个客体呈现后的300ms到600ms之间,在顶叶皮层(CP5、P7、P3),位置客体、方向客体比捆绑客体诱发了一个更负的成分;在右额(F4、FC6、FC2、F8)、右后颞(TP10)、左颞(T7)、左后颞(TP9)等脑区,捆绑客体比单一特征客体诱发了一个更正的成分;在800至1400ms的慢波成分上,位置和方向捆绑客体在F4、FC6和F8三个记录点诱发的波形比单一特征客体的波形波幅更正。右侧前额叶参与了客体整合表征的存储,该结果支持了情景缓冲器的假设。

关键词:捆绑过程;皮层慢电位;情景缓冲器;视空间模板

中图分类号:B842.5

文献标识码:A

文章编号:1003-5184(2019)02-0127-06

1 引言

许多日常任务需要人们记住观察对象的多方面特征。在工作记忆中,这些特征整合起来,成为一个完整客体表征,该过程称为捆绑过程(binding),例如“向东南飞行的飞机在我的右前方”。捆绑过程的相关研究聚焦于捆绑过程是否涉及特定的工作记忆资源之问题。对此,研究者提出了两种观点:一种观点认为捆绑过程依赖于视觉空间模板,注意指向某一空间位置,把该位置上的多个特征捆绑起来,形成整合表征,即空间位置充当了特征捆绑的线索。第二种观点认为,特征捆绑后形成的整合表征由情景缓冲器存储。Langerock(2014)认为情景缓冲器是一个多种形式编码的存储系统,它有两项重要功能,一是将来自视空间模板的信息进行整合,二是存储整合表征。

第一种观点得到了Klaver(1999)研究的支持,Klaver采用ERP的方法探索了形状客体、位置客体和形状—位置捆绑客体的工作记忆激活脑区和时程。ERP数据分析发现,三类客体都激活了后部脑区的P100、N180、P400成分和前部脑区的N80、P200、P380成分,而且上述ERP成分在客体类型之间的差异很小,说明捆绑表征和单一特征表征的脑区激活模式是相同的,意味着捆绑表征主要依赖视

空间模板。Xu(2006)的研究中发现,为保存客体的空间位置,上顶叶和枕叶与形状特征加工有关,下顶叶与特征加工和形状—位置捆绑关系加工有关,但是没有只有与捆绑关系有关的脑区。

但是,更多的研究发现相对于单一特征客体的工作记忆过程,多特征客体的工作记忆激活了多个脑区。有研究发现顶叶皮层参与了多特征客体的捆绑过程。Campo(2008)考察了单词及其位置捆绑过程的脑区激活模式,结果表明,上顶叶(superior parietal lobe)参与了单词与位置捆绑过程。Ohara(2008)研究了触觉刺激与听觉刺激的捆绑过程,发现两个特征捆绑条件下,左侧顶叶产生了潜伏期为600毫秒的晚期正波成分,Ohara认为这个晚期成分代表了触觉特征与听觉特征捆绑关系的存储过程。

此外,有研究发现了额叶和颞叶被捆绑过程激活(Calvert, 2001; Sommer, Rose, Glascher, Wolbers, & Bushel, 2005)。相对而言,在捆绑过程激活的各个脑区中,右侧前额叶激活程度最高(Song & Jiang, 2006)。此外,右侧颞叶也是空间信息与其它信息捆绑过程的激活脑区(Postma, Kessels, & van As-selen, 2008)。

综上所述,已有研究存在两方面不足之处。其一,上述研究多讨论了颜色与形状、字母与位置之间

* 基金项目:2013年度教育部人文社科研究青年基金项目(13YJC190005)。

通讯作者:傅亚强, E-mail: fuyaqiang126@126.com。

的捆绑过程,这些客体的特征间关系多为人定义,导致长时记忆难以参与多特征捆绑过程,整体表征的形成存在不确定性。因此,有必要在有意义捆绑关系条件下,探究捆绑客体是否占用了不同于视空间模板的工作记忆子系统。其二,虽然上述研究得出了多特征捆绑过程有自己特定的神经机制之结论,但是由于被试的客体编码方法并不确定,捆绑的脑区定位也就表现出不确定性。例如,已有研究表明顶叶是字母位置捆绑过程的激活脑区,但是无法确定顶叶的激活是与位置加工有关,还是与字母位置捆绑关系的加工有关。为此,有必要设置两种空间特征,如位置特征、方向特征,便于分离空间加工资源与捆绑关系加工资源。在个体已有经验中,方向与位置特征经常结合在一起,以完成移动客体运动知觉、预测、判断等认知任务。意味着,位置与方向的捆绑是有意义的非人为过程。

本研究采用 ERP 技术,通过比较位置客体、方向客体、位置—方向捆绑客体保持过程激活的脑区,考察位置—方向捆绑关系保持的相关神经过程和脑区定位,探讨捆绑关系的存储资源是否与空间特征的存储资源有所区分。

本研究有两个假设:(1)如果捆绑客体与单一特征客体所需工作记忆资源是不同的,那么捆绑条件激活的脑区与单一特征客体的激活脑区不同;(2)如果捆绑客体与单一特征客体诱发的 ERP 成分不同,那么捆绑关系是在情景缓冲器中得到保持,而不是存储于视空间模板。近期的 ERP 研究发现,时程在 200 毫秒至几秒之间的慢波(slow cortical potentials, SP),与工作记忆表征的存储有关(Bosch, 2001)。本研究主要借助 ERP 的慢波成分,分离位置、方向与位置—方向捆绑三种客体的激活脑区。

2 方法

2.1 被试

选取 16 名在校大学生为被试,其中男生 5 名,女生 11 名。所有被试的视力或矫正视力为 1.0 以上。

2.2 实验材料

实验材料是一个带短线的圆,它可以包含两种特征,一是圆所在的位置,二是短线所指的方向。以屏幕中央的“+”作为参照点,圆所在位置有东北、西北、西南、东南 4 种;短线所指方向亦有东北、西北、西南、东南 4 种,这两个特征组合在一起可以形象地表征一架飞机的位置与飞行方向。实验设置了

三种客体:(1)位置客体——只包含位置特征(圆位置变化、短线指向不变);(2)方向客体——只包含方向特征(短线指向变化、圆位置不变);(3)捆绑客体——包含位置和方向两个特征(圆位置、短线指向同时变化)。

2.3 实验步骤

在屏幕中央呈现一个“+”字,作为注视点和参照点。之后,呈现第一个客体(S1),呈现时间为 1000 毫秒。S1 消失后,间隔 500 毫秒,呈现第二个客体(S2),要求被试准确判断 S1 和 S2 表征的信息是否一致,只有 S1 和 S2 的位置特征一致或方向特征一致或位置与方向均一致,才能作出“是”判断。若被试判断为一致,则按下“1”键;若不一致,则按下“2”键。主试陈述指导语过程中,不使用“东北、西北”等词汇,而只用图形描述位置与方向。

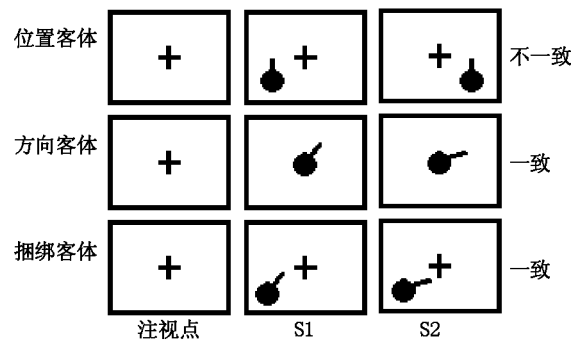


图 1 实验步骤

2.4 实验设计

本实验的自变量是客体类型,具体分为位置客体、方向客体和位置—方向捆绑客体三种类型。因变量是判断 S1、S2 两个客体表征信息是否一致的正确率、反应时间和脑电数据。

本实验采用单因素被试内实验设计。每位被试先在每种实验条件下进行 20 次练习判断,当练习正确率大于 98% 之后,再进入正式实验。正式实验中,每位被试在一种实验条件下进行 70 次试验,共进行 210 次试验。按照拉丁方设计平衡被试接受实验处理的顺序。

2.5 EEG 的记录与脑电数据分析

两台 DELL 台式机(Windows XP 系统)分别用于呈现刺激和记录行为数据、EEG 数据;三台 17 英寸纯平彩色 CRT 显示器(分辨率 1024 × 768,刷新率 100Hz)分别用于给被试呈现刺激、主试监视实验程序、主试监视 EEG 数据;采用 Visual Basic6.0 编写实验程序,并采用第三方计时模块,计时精度为 1 毫

秒;用下巴托固定被试头部与显示器之间的距离(60cm)。

采用 Brain Products 公司的 32 导 EEG 设备记录全部 EEG 数据。EEG 数据记录设备按国际标准 10~20 系统放置电极,左眼上侧安置垂直电(VEOG),右眼外侧安置水平电(HEOG),所有电极的阻抗均降到 5k Ω 以下,采样率为 500Hz,带通滤波为 0.01 至 80Hz,记录完整的 EEG 数据。

采用 EEGLAB12.0 软件处理 EEG 数据,滤波带通为 0.1~30Hz,剔除各种伪迹,矫正水平和垂直眼电。本实验分析 S1 出现后的 ERP 反应。参考以往类似研究,将 S1 呈现前 200ms 为基线,S1 出现后 1500 毫秒为一个 epoch,分别对位置、方向、捆绑三种条件下的 S1 的 EEG 进行分段,经叠加平均得到三种条件下的 S1 分段,最后所有被试的 S1 分段叠加平均分别得到三种条件下的 S1 总平均 ERP 数据。

3 结果

3.1 行为数据结果

本研究记录了被试判断 S1 与 S2 一致性的正确率和反应时,16 名被试的平均结果见表 1。对正确率进行重复测量方差分析,结果发现客体类型的主效应不显著($F_{(2,30)} = 1.45, p > 0.05$),对反应时进

行重复测量的方差分析,结果发现客体类型的主效应不显著($F_{(2,30)} = 2.65, p > 0.05$)。该结果表明,被试对三种任务都已掌握,保证有足够的试次可供 EEG 叠加。

表 1 三种客体类型条件下的判断反应时与准确率

信息类型	反应时(ms)	准确率(%)
位置信息	1029.72 \pm 231.24	0.96 \pm 0.04
方向信息	1092.28 \pm 270.45	0.98 \pm 0.03
捆绑信息	1025.97 \pm 320.40	0.96 \pm 0.05

3.2 ERPs 结果

根据研究目的和 ERP 总平均图,选取大脑皮层的 18 个记录点作为兴趣区。以 300~600ms 的平均波幅为因变量,进行 3 因素重复测量的方差分析,3 个因素分别为客体类型、皮层左-右位置和皮层前-后位置。头皮兴趣区的 4 个部分对应的记录点具体包括:左侧前部(F3、F7、FC1、FC5、T7)、左侧后部(CP5、P7、P3、TP9)、右侧前部(F4、F8、FC2、FC6、T8)、右侧后部(CP6、P8、P4、TP10)。方差分析的 P 值采用 Greenhouse Geisser 法校正。S1 呈现之后的 1500 毫秒时间内,三种任务所诱发的 ERP 总平均图如图 2 所示。

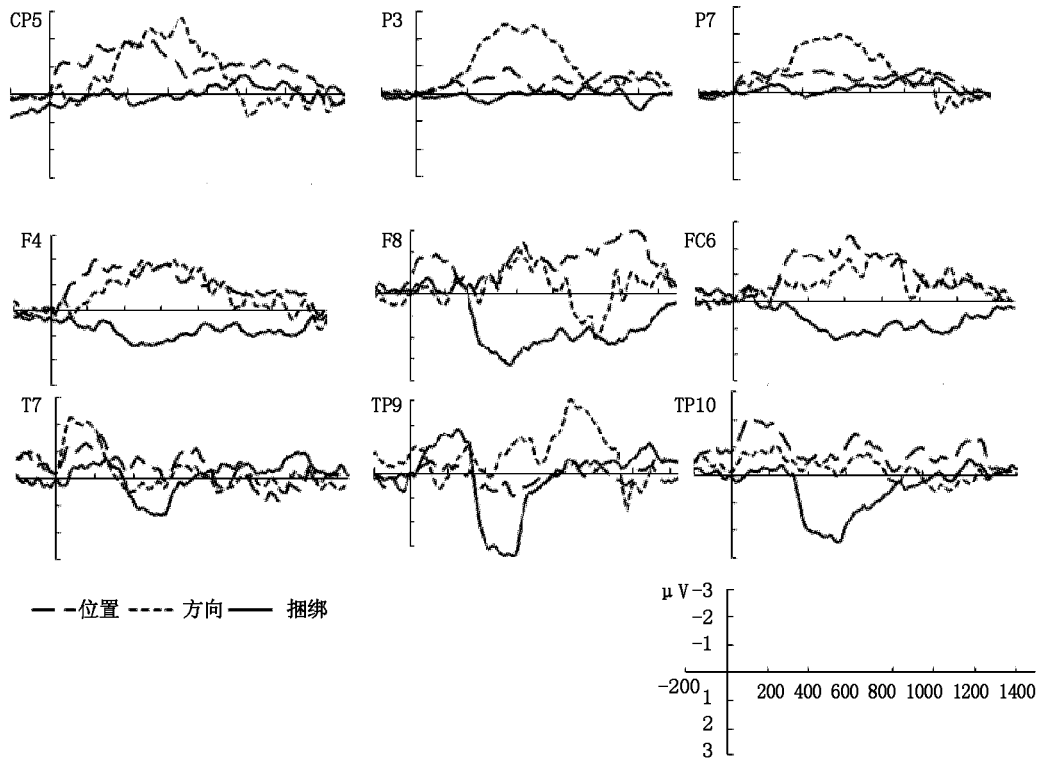


图 2 ERP 总平均图

在 300 ~ 600ms, 客体类型的主效应显著, $F_{(2,32)} = 6.48, p = 0.039, \eta^2 = 0.21$, 表明捆绑客体诱发的波形比单一特征客体的波形波幅更正; 客体类型与左-右位置的交互作用显著, $F_{(2,32)} = 6.54, p = 0.022, \eta^2 = 0.30$; 客体类型与前-后位置的交互作用显著, $F_{(2,32)} = 4.04, p = 0.028, \eta^2 = 0.21$ 。单一特征客体诱发更负的波形主要分布于左侧顶叶, 捆绑客体诱发更正的波形主要分布于右前额、右后颞、左颞、左后颞。

简单效应检验结果表明, 在 CP5、P3、P7 三个记录点, 三种客体诱发的 ERP300 ~ 600 毫秒平均波幅存在显著差异 (图 2), CP5: $F(2, 22) = 3.48, p = 0.049, \eta^2 = 0.24$; P3: $F(2, 22) = 5.14, p = 0.015, \eta^2 = 0.32$; P7: $F(2, 22) = 6.81, p = 0.005, \eta^2 = 0.38$ 。事后多重比较分析发现, 在顶叶, 方向客体比捆绑客体诱发了一个更负的成分 ($p < 0.05$), 位置客体也比捆绑客体诱发了一个更负的成分 ($p < 0.05$)。

简单效应检验结果表明, 在 S1 呈现后的 300 至 600ms, 以下 6 个记录点的客体类型主效应显著, F4: $F(2, 22) = 3.59, p = 0.045, \eta^2 = 0.25$; F8: $F(2, 22) = 4.86, p = 0.024, \eta^2 = 0.29$; FC6: $F(2, 22) = 3.98, p = 0.036, \eta^2 = 0.23$; T7: $F(2, 22) = 4.36, p = 0.026, \eta^2 = 0.28$; TP9: $F(2, 22) = 4.34, p = 0.026, \eta^2 = 0.28$; TP10: $F(2, 22) = 3.06, p = 0.044, \eta^2 = 0.25$ 。事后多重比较表明在右额 (F4、FC6、FC2、F8)、右后颞 (TP10)、左颞 (T7)、左额 (F7)、左后颞 (TP9) 等脑区, 捆绑客体比单一特征客体诱发了一个更正的成分 ($p < 0.05$), 而位置客体和方向客体两种条件下诱发的成分不存在显著差异。

另外, 在 800 至 1400ms 的成份上, 以下 3 个记录点的客体类型主效应显著, F4: $F(2, 22) = 3.55, p = 0.045, \eta^2 = 0.25$; FC6: $F(2, 22) = 5.84, p = 0.009, \eta^2 = 0.35$; F8: $F(2, 22) = 3.18, p = 0.048, \eta^2 = 0.23$ 。事后多重比较表明, 在右侧额叶, 捆绑客体比单一特征客体诱发了一个更正的成分 ($p < 0.05$), 而位置客体和方向客体两种条件下诱发的成分不存在显著差异。

4 讨论

4.1 单一空间特征和两个空间特征捆绑关系存储的分离

本研究引入了位置客体、方向客体与位置-方向捆绑客体三种实验材料, 三者包含的特征均为空间特征, 若三种材料的存储都利用了视空间模板, 那

么三种客体激活的脑区应该相同。实验结果表明, 位置客体和方向客体诱发了一个位于顶叶的更负的慢波成分 (300 ~ 600 毫秒); 在右侧额叶、右侧颞叶等脑区, 捆绑客体的存储比比单一特征客体诱发了更正的慢波成分 (300 ~ 600 毫秒、800 ~ 1400 毫秒)。

多特征客体在额叶的激活增加是否归因于捆绑过程? 虽然有研究者发现额叶激活增加可能是由任务努力程度增加引起的 (Vogel & Machizawa, 2004)。但是, 从本研究的行为数据来看, 捆绑客体条件下的任务绩效等同于单一特征客体的任务绩效, 说明三种任务并不存在难度上的差异。可以认为, 为记忆位置-方向的捆绑关系, 被试无需付出更多的努力。因此, 额叶激活增强并非由于任务难度的变化。

额叶激活增强是否是记忆负荷的变化导致的? 捆绑客体存储任务中, 被试有可能加工了更多的信息量 (2 个特征), 方向客体和位置客体存储任务各只有 1 个特征, 这样额叶激活提高有可能只是记忆负荷效应。然而, 考虑到以往多数研究提出的工作记忆中客体以整合形式表征, 可以认为三种条件下的客体数量是一样的, 变化的只是客体的复杂性。Campo (2008) 也提出, 单词-位置捆绑客体数量增强并没有提高额叶 ERP 成分的波幅。因此, 本研究发现的额叶激活增强没有理由归因于记忆负荷的变化。

额叶的激活增强可归因于位置与方向的捆绑过程, 而且这种特异性激活反映出捆绑过程依赖于特异性认识资源。已有研究多采用形状-位置、单词-位置捆绑客体, 发现捆绑过程诱发了顶叶、额叶的慢波成分。但是, 由于额-顶叶皮质环路负责空间信息的加工 (Klingberg, 2006), 因此, 形状-位置材料若以特征表征存储, 就难以说明这些慢波成分与捆绑过程有关, 还是与空间特征存储有关。为此, 本研究将两个空间特征的捆绑客体与位置客体、方向客体诱发的 ERP 成分进行比较, 发现捆绑关系激活的脑区与位置、方向客体激活的脑区出现分离, 捆绑关系的存储机制不同于位置、方向的存储机制, 这种分离说明位置-方向捆绑关系存储机制并不是视空间模板。

4.2 捆绑关系与情意缓冲器

本研究发现, 位置与方向两个空间特征的捆绑主要激活了右侧额叶和右侧颞叶, 捆绑客体在这两个脑区诱发的 ERP 波幅显著高于单一特征客体。

右侧额叶和右侧颞叶的功能不是存储空间信息,而是存储捆绑关系。如果捆绑关系的存储依赖特异工作记忆资源,该资源应该是情景缓冲器。

本研究结果与双任务范式的行为实验结果一致。双任务范式研究表明情景缓冲器抑制任务会降低多特征捆绑客体的记忆效率,但是视觉抑制任务和语音抑制任务不会对捆绑关系存储产生抑制作用(傅亚强,2015)。Cortese(2010)采用双任务范式研究了舞蹈演员对舞蹈动作的工作记忆,这种记忆材料包含了身体多个部位的姿态,结果表明语音环或视空间模板都不是舞蹈动作的存储地点,舞蹈动作的捆绑表征应该存储于情景缓冲器。

同样,Zhang(2004)的研究指出数字和位置的捆绑关系激活了右侧前额叶。Prabhakaran的研究发现语音和空间特征的捆绑过程主要激活了右侧前额叶,语音或空间单一特征主要激活了后部脑区。Prabhakaran认为前额叶在情景缓冲器存储捆绑关系过程中发挥了重要作用。

本研究与Saito(2005)研究有不同之处,Saito发现言语过程中嘴部动作信息和语音信息的整合过程激活了后顶叶皮层,由此判断后顶叶与多形态表征捆绑过程相关。但是该研究的任务要求被试的注意指向两个不同的空间位置(嘴部图片和耳机语言)。因此,顶叶激活增强可能是注意分配过程的作用,而难以归因于捆绑过程。

综上所述,前额叶应是特征捆绑的神经基础,该过程是情景缓冲器的功能(Oksama,2008)。情景缓冲器可以暂时保持来自视空间模板和语音环的多形式表征。本研究为情景缓冲器提供了新的证据。

捆绑过程激活了右侧前额叶的慢波成分表明捆绑过程是在知觉加工的晚期进行的,发生于晚期的信息加工与联系建立的过程有关,这种联系可以将不同类型的信息整合在一起,形成多性质的整合表征(multimodal representation)(Vogel et al.,2001),整合表征的存储地点是情景缓冲器。而且,存储过程需要特定的保持机制以维持其激活水平。F4、FC6、F8三个记录点上,800~1400毫秒的正波可能就是捆绑表征保持过程诱发的ERP成分。可以认为,是多特征客体整合与存储的重要脑皮层,是情景缓冲器的神经基础。

5 结论

在第1个客体呈现后的300ms到600ms之间,在顶叶皮层(CP5、P7、P3),位置客体、方向客体比捆

绑客体诱发了一个更负的成分。

在右额(F4、FC6、FC2、F8)、右后颞(TP10)、左颞(T7)、左后颞(TP9)等脑区,捆绑客体比单一特征客体诱发了一个更正的成分;在800至1400ms的慢波成分上,位置和方向捆绑客体在F4、FC6和F8三个记录点诱发的波形比单一特征客体的波形波幅更正。

右侧前额叶参与了客体整合表征的存储,该结果支持了情景缓冲器的假设。

参考文献

- 傅亚强.(2015).工作记忆在图形符号联合加工中的作用. *浙江大学学报(理学版)*,42(4),494-498.
- Antonio Cortese, & Clelia Rossi - Arnaud. (2010). Working memory for ballet moves and spatial locations in professional ballet dancers. *Applied Cognition Psychology*, 24(2), 266 - 286.
- Bosch, V., Mecklinger, A., & Friederici, A. D. (2001). Slow cortical potentials during retention of object, spatial, and verbal information. *Cognitive Brain Research*, 10(3), 219 - 237.
- Calvert, G. A. (2001). Cross - modal processing in the human brain: Insights from functional neuroimaging studies. *Cerebral Cortex*, 11(12), 1110 - 1123.
- Campo, P., Maestu, F., Capilla, A., Morales, M., Fernandez, S., & DelRio, D. (2008). Temporal dynamics of parietal activity during word - location binding. *Neuro Psychology*, 22(1), 85 - 99.
- Klaver, P., Smid, H. G., & Heinze, H. J. (1999). Representations in human visual short - term memory: An event - related brain potential study. *Neuroscience Letters*, 268(2), 65 - 68.
- Klingberg, T. (2006). Development of a superior frontal - intraparietal network for visuo - spatial working memory. *Neuropsychologia*, 44(11), 2171 - 2177.
- Langerock, N., Vergauwe, E., & Barrouillet, P. (2014). The maintenance of cross - domain associations in the episodic buffer. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 40(4), 1096 - 1109.
- Lauri Oksama, & Jukka Hyönä. (2008). Dynamic binding of identity and location information: A serial model of multiple identity tracking. *Cognitive Psychology*, 56(4), 237 - 283.
- McNab, F., & Klingberg, T. (2008). Prefrontal cortex and basal ganglia control access to working memory. *Nature Neuroscience*, 11(1), 103 - 107.
- Mohr, H. M., & Linden, D. E. J. (2005). Separation of the systems for color and spatial manipulation in working memory revealed by a dual - task procedure. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17(2), 355 - 366.

- Ohara, S. , Wang, L. , Ku, Y. , Lenz, F. A. , & Hsiao, S. S. (2008). Neural activities of tactile cross – modal working memory in humans; An event – related potential study. *Neuroscience*, 152(3) , 692 – 702.
- Postma, A. , Kessels, R. P. , & van Asselen, M. (2008). How the brain remembers and forgets where things are; The neurocognition of object – location memory. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 32(8) , 1339 – 1345.
- Prabhakaran, V. , Narayanan, K. , Zhao, Z. , & Gabrielli, J. D. E. (2000). Integration of diverse information in working memory in the frontal lobe. *Nature Neuroscience*, 3(1) , 85 – 90.
- Saito, D. N. , Yoshimura, K. , Kochiyama, T. , & Okada, T. (2005). Cross – modal binding and activated attentional networks during audio – visual speech integration; A functional MRI study. *Cerebral Cortex*, 15(11) , 1750 – 1760.
- Sommer, T. , Rose, M. , Glascher, J. , & Wolbers, T. (2005). Dissociable contributions within the medial temporal lobe to encoding of object – location associations. *Learning and Memory*, 12(3) , 343 – 351.
- Song, J. H. , & Jiang, Y. (2006). Visual working memory for simple and complex features; An fMRI study. *Neuroimage*, 30(3) , 963 – 972.
- Vogel, E. K. , & Machizawa, M. G. (2004). Neural activity predicts individual differences in visual working memory capacity. *Nature*, 428(6984) , 748 – 751.
- 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(1) , 92 – 114.
- Xu, Y. , & Chun, M. M. (2006). Dissociable neural mechanisms supporting visual short – term memory for objects. *Nature*, 440(7080) , 91 – 95.
- Zhang, D. , Zhang, X. , Sun, X. , Li, Z. , & Wang, Z. (2004). Cross modal temporal order memory for auditory digits and visual locations; An fMRI study. *Human Brain Mapping*, 22(4) , 280 – 289.

An Event – related Potentials Study of Maintenance of Binding Spatial Object in Working Memory

Fu Yaqiang

(Department of Psychology, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121)

Abstract: This study aimed to examine the pattern of brain activation when location object, direction object or location – direction binding object was retained in working memory, taking advantage of the spatial – temporal properties of ERP slow waves. Within – subjects design was adopted. Sixteen volunteers participated in the present study. Two major results were: (1) Location object and direction object elicited a more negative ERP deflection on the left parietal lobe than did binding object in the time window from 300ms to 600ms after onset of the first object; (2) Binding object elicited a more positive ERP deflection on the right frontal lobe in the time window from 300ms to 600ms and from 800ms to 1400ms after onset of the first object. The right frontal lobe involved in maintenance process of binding object in working memory. These findings support the existence of episodic buffer for the maintenance of multi – features binding information.

Key words: binding process; slow wave; episodic buffer; visuo – spatial sketch pad