

数量适应后效的皮层映射特征*

张智君¹ 刘 炜^{1,2} 赵亚军³ 张婧姝¹ 吴彬星¹

(¹ 浙江大学心理与行为科学系, 杭州 310028) (² 云南民族大学教育学院, 昆明 650504)

(³ 西南民族大学社会学与心理学学院, 成都 610041)

摘 要 本研究探讨了观察者与观察目标存在相对运动时视觉系统对目标数量特征的适应后效的皮层映射特征, 并与对比度适应后效的映射规律进行比较。包括两项实验。其中, 实验一要求被试在适应目标后转换注视点, 考察眼跳后相同和不同视网膜区域以及相同和不同空间区域的适应后效, 发现数量适应后效具有部分空间-皮层映射特性, 而对比度适应后效则表现出完全的视网膜-皮层映射特征。实验二采用固定的注视点, 考察目标运动后目标原位置和新位置区域的适应后效, 发现数量适应后效不完全依赖于视网膜-皮层映射, 它可以“追随”客体运动重新映射到新的位置, 表现出基于客体映射的特征, 而对比度适应后效则完全依赖于视网膜-皮层映射, 不能“追随”客体移动在目标新位置重新形成映射。两项实验结果提示, 相对于对比度等低级表面特征而言, 数量特征对目标的描述涉及更高的加工水平, 它可以与观察目标的相对运动信息进行整合, 且这种整合在眼跳和非眼跳的观察条件下都可发生。

关键词 数量加工; 数量适应后效; 视网膜-皮层映射; 空间-皮层映射; 基于客体的映射

分类号 B842

1 前言

数量加工是基于数量本身, 还是基于明度、对比度和密度特征等其他初级视觉线索, 这是目前数量加工研究的一个关键问题(Kramer, Bono, Zorzi, & Rustichini, 2011)。一些研究提出, 数量判断任务的加工基础是刺激的空间特征分析(Allik & Tuulmets, 1991)或密度知觉(Durgin, 1995, 2008), 数量感知(估计)是上述低级视觉特征知觉的副产品。但是, 许多研究对此提出了反对意见。例如, Kramer 等人(2011)的研究表明, 数量比较可以直接建立在数量信息的基础上, 相对于明度、空间面积和密度特征等低级描述信息而言, 数量特征是对材料较高水平的描述(Kramer et al., 2011)。总之, 如果直接考察数量感知(外显数量判断)阶段, 那么为了检验数量加工的独立性, 就需要比较数量信息与非数量线索在数量判断过程中的主次关系(Allik & Tuulmets, 1991; Durgin, 1995, 2008; de Hevia, 2011),

或者采用排除法, 考察明度、密度等初级特征缺失时数量判断任务的结果是否会受到影响(Kramer et al., 2011)。这类研究往往需要进行复杂的控制, 对其结果进行解释时, 通常也难以排除其他因素的潜在影响。我们认为, 考察数量适应的性质, 可以从新的角度对数量信息的加工机制进行明确, 有助于澄清上述争论。

数量适应是指观察者在知觉上适应刺激数量的过程, 这一过程可以通过考察适应后其数量感知(Dehaene, 1992)的变化加以揭示(刘炜, 张智君, 赵亚军, 2012)。例如, 某一视野区域对较多的数量(刺激个数)进行适应后会导致该区域感知的数量幅度(numerical magnitude)下降; 适应较少的数量则会导致感知的数量幅度上升。这些感知变化可以通过后续的数量判断反映出来(Burr & Ross, 2008a)。适应效应为研究视觉特征加工提供了一种有效的心理物理行为指标(Sweeny, Grabowecky, & Suzuki, 2011)。从时间进程来看, 数量适应发生在外显的数

收稿日期: 2013-01-11

* 教育部人文社会科学研究规划基金(11YJA190025)资助。

通讯作者: 张智君, E-mail: zjzhang@zju.edu.cn

量比较任务(测试阶段)之前,是一个相对内隐的加工过程:虽然数量比较中被试可能对密度、对比度等非数量线索进行综合推导,但上述过程却不会自动地引发数量适应(Burr & Ross, 2008a)。因此,数量适应和对比度等因素的适应过程是可区分的。对数量适应特征的后效进行考察,有助于从加工基础的水平上对数量感知的机制进行明确。具体的说,如果数量适应的后效与其他表面特征的适应后效存在不同性质,就可以认为数量认知与其他表面特征在加工基础上就存在差异,而不是建立在对后者加工基础上的综合与推导。在本研究中,我们考察了数量适应后效的皮层映射特征,进一步对数量信息的加工机制进行分析。

在加工视觉刺激时,初级视觉皮层的神经细胞群会在皮层内对刺激形成一个与视觉图像同构的“映射”(mapping)。如果视觉后效保持在接收该视觉刺激的同—视网膜区域,则称为视网膜-皮层映射(retinotopy, Burr & Morrone, 2011),而如果视觉信息以空间坐标为基础映射到皮层,则称为空间-皮层映射(spatiotopy)。视觉加工中可能存在从视网膜-皮层映射到空间-皮层映射的转换过程。具体地说,观察者为刺激进行适应之后,如果注视点在视野内发生改变(如眼跳),那么视觉系统可将刺激的某些特征与眼跳信息进行整合,并重新定位,使适应后效保持在它原来出现时的空间(屏幕)位置上,以保证眼跳情境下的知觉恒常性(Burr & Morrone, 2011)。从视网膜坐标转换到空间坐标的加工可能仅存在于较高级的皮层水平。例如, fMRI 研究表明,人类的外侧顶内沟(lateral intraparietal area, LIP, Duhamel, Bremmer, BenHamed, & Graf, 1997)、腹侧顶内沟(ventral intraparietal area, VIP, Sereno & Huang, 2006)、外侧枕叶区(lateral occipital area, LO, McKyton & Zohary, 2006)都表现出一定的空间-皮层映射特性,而初级视觉皮层的 V1 区则表现出完全的视网膜-皮层映射特性(Burr & Morrone, 2011)。综合相关研究结果可知,眼跳发生时,较低水平的描述信息(descriptions)并不在眼跳过程中进行整合,其适应后效表现出完全的视网膜-皮层映射特征,如对比度(Burr & Morrone, 2011; Melcher, 2005)和密度(Durgin & Proffitt, 1996),而较高级水平的描述信息则可以参与眼跳时的重建过程,其后效表现出一定程度的空间-皮层映射特性(Burr & Morrone, 2011),如颜色、方位、形态、人脸及事件持续时间等(Melcher, 2005; Wittenberg, Bremmer, & Wachtler,

2008; Johnston, Arnold, & Nishida, 2006; Zimmer & Kovacs, 2011)。

由于外侧顶内沟(LIP)是加工数量特征的重要区域(Roitman, Brannon, & Platt, 2007),而数量加工与客体表征有密切关系(刘炜等, 2012; He, Zhang, Zhou, & Chen, 2009),同时外侧顶内沟以及与客体加工相关的外侧枕叶区(LO)都表现出了空间-皮层映射特征,因此,我们推测数量适应后效也具有空间-皮层映射性。我们假设,在眼跳发生时,与对比度和密度等低级特征信息表现出的完全视网膜-皮层映射特性不同,数量适应可能存在一定程度的空间-皮层映射特征。如果这一假设得到验证,则有助于进一步了解数量特征的加工机制,对“数量感知不是密度等初级视觉特征加工副产品”的观点(Kramer et al., 2011; de Hevia, 2011)提供一定的支持证据。

观察者眼跳时,如果数量适应后效表现出了空间-皮层映射特征,那么这一现象是数量信息与眼跳信息整合的结果(Burr & Morrone, 2011),还是它与(观察者和观察对象的)相对运动信息整合加工的结果?为了分析这一问题,本研究将进一步考察注视点恒定而适应客体运动的情境下,数量适应后效是否仍可发生与视网膜位置无关的重新映射。Melcher (2008)提出,观察者为刺激进行适应之后,如果适应刺激客体在视野内移动到新位置,则适应也可能“跟随”客体移动,在新位置上保持其后效,这称为“基于客体的映射”(object-based remapping)。即使没有眼跳,适应后效仍然可以进行与视网膜位置无关的上述映射,保证了无眼跳时加工运动客体的知觉恒常性(Melcher, 2008)。目前,“基于客体映射”的加工机制尚不明确。特别地,如果这一映射是由于视觉系统对客体特征和其运动信息进行了绑定加工,与眼跳情境下“空间-皮层映射”的加工机制类似,那么考察非眼跳情境下,数量适应后效是否会发生“基于客体的映射”,就可以对上述问题进行回答,对眼跳和非眼跳情境下数量适应后效的加工机制进行统一。

在非眼跳的情境下,考察不同水平信息的适应后效在“基于客体映射”时是否会发生分离,有助于推测这一映射的加工机制。具体地说,如果其机制是视觉系统对客体的特征和运动信息进行了绑定,与眼跳情境下“空间-皮层映射”的加工类似,那么可能仅有高水平的视觉特征才能得到加工,低水平特征的后效则停留在原来的视网膜位置上,不同水

平信息的适应后效会出现不同的规律; 如果其机制与眼跳情境下的加工不同, 如, 它是基于工作记忆的客体文件更新(Kahneman, Treisman, & Gibbs, 1992; 水仁德, 徐飞, 沈模卫, 2004), 那么对不同水平的信息都可以进行更新, 各种特征适应后效的映射规律应该是一致的。

综上所述, 在数量适应后效的空间-皮层映射特征(眼跳情境)进行研究的基础上, 考察非眼跳的情境下, 数量适应后效是否会发生“基于客体的映射”, 并比较数量和其他初级信息(如对比度)后效的映射规律, 有助于推测眼跳情境下数量适应后效发生皮层映射的机制, 对眼跳和非眼跳情境下数量适应后效的映射规律及其机制进行统一。我们假设, 在非眼跳情境下, 如果数量适应后效可以发生基于客体位置的映射, 而对比度适应后效不会发生这样的映射, 那么此时视觉系统对客体运动和特征信息的绑定与眼跳条件下有类似的加工机制。由此可以推测, 数量适应后效的空间-皮层映射是数量信息与刺激的相对运动信息整合加工的结果; 客体的数量特征在眼跳和非眼跳的情境下都可与该客体的相对运动信息整合, 使其适应后效进行与视网膜位置无关的重新映射。进一步推测, 无论有无眼跳, 观察对象的特征信息及其相对运动信息都可以按照统一的机制进行整合, 且这一加工仅针对较高水平的特征信息进行。

综上所述, 本研究采用数量适应范式, 从两个方面(有、无眼跳)探讨视觉系统对数量适应后效进行皮层映射的规律, 并与对比度适应后效进行比较, 从而对数量的加工机制做出进一步分析。本研究包括两项实验。实验一要求被试在对刺激进行适应后改变注视点位置并进行数量判断, 比较眼跳前后相同视网膜位置和相同空间位置上的适应后效。实验一也考察了对比度适应效应, 以比较两种后效的映射规律。实验二采用固定的注视点, 在被试适应刺激后, 将具有适应刺激的客体移动到新的位置, 要求被试进行数量判断, 比较目标移动前后相同视网膜位置和相同客体位置上的数量适应后效。同样, 实验二也以对比度适应后效的映射特征为对比。总之, 本研究将系统考察观察眼和观察对象有相对运动时数量适应后效重新进行映射的规律, 以进一步分析数量适应的加工特征。此外, 通过比较注视点恒定而物体运动时不同特征(数量、对比度)适应后效的映射规律, 本研究也有助于进一步了解无眼跳时视觉系统对运动刺激特征进行加工的机制, 完善

现有的基于眼跳情境的刺激特征皮层映射理论(Burr & Morrone, 2011)。

2 实验一: 观察者的眼跳对数量 and 对比度适应后效的影响

实验一考察眼跳情况下数量适应后效的映射规律, 并用同样的范式考察了对比度适应后效的映射特征。

2.1 方法

2.1.1 被试

30 名被试参加了实验, 他们视力或矫正视力正常, 实验结束后可获得一定的报酬。其中, 16 名被试(男 6 人, 女 10 人)参加数量适应实验, 他们的平均年龄为 22.56 岁(19~27 岁); 其余 14 名被试(男 4 人, 女 10 人)参加对比度适应实验, 他们的平均年龄为 20.95 岁(18~26 岁)。

2.1.2 实验装置和材料

实验在暗室中进行, 装置为一台 Pentium IV 电脑, 17 英寸纯平显示器, 分辨率 1024×768, 刷新率为 85 Hz, 背景 RGB 为 120, 120, 120。被试眼睛距屏幕中心约 75 cm。为保证注视要求, 实验采用下巴托垫固定被试的头部, 并使用 ASL R6 眼动仪对被试进行眼动监控。

程序编写和刺激呈现均采用 E-Prime 1.0 软件, 刺激材料由 WalkISurvey Personal 软件生成。图 1 为刺激材料示意图, 6 个灰色圆区域(RGB 值为 128, 128, 128)均匀分布在屏幕内(从左到右记为第一对、第二对和第三对圆), 圆直径为 10 cm (7.59°视角), 相邻两圆边的水平距离为 3.5 cm (2.67°视角), 垂直距离为 6.9 cm (5.26°视角)。注视点与邻近圆心的距离均为 11 cm (8.34°视角)。适应阶段注视点均位于屏幕左侧中部(即第一、二对圆的中央); 测试阶段注视点以等概率随机出现在屏幕左侧或右侧中部(即第二、三对圆的中央)。适应刺激点总是呈现在第二对圆内, 测试刺激在三对圆之一中按一定概率随机出现。

在数量组中, 适应条件下呈现大小为 4×4 像素(0.11°×0.11°视角)的黑、白方块点作为适应刺激, 上方圆内有 5 个点(黑点 2 个, 白点 3 个), 下方圆内有 400 个点(黑、白点各 200 个)。测试刺激(不同数量的点)则按设定好的反应序列在上下两个圆内随机呈现。

在对比度组中, 适应条件下呈现大小为 4×4 像素(0.11°×0.11°视角)的有黑框的白色方块, 黑框宽

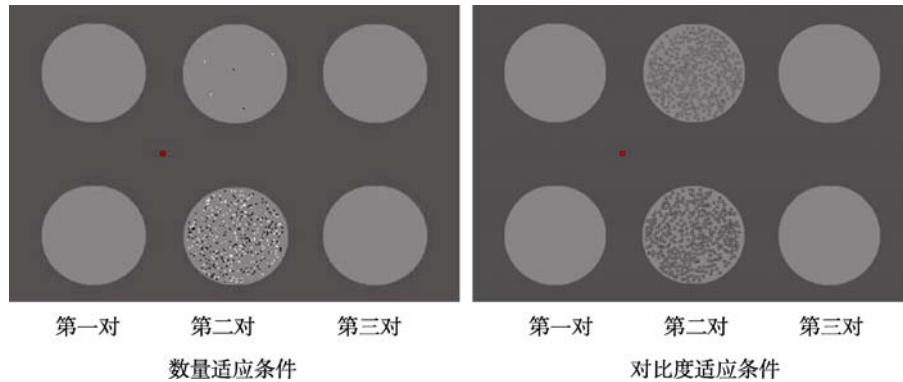


图1 实验一适应刺激材料

1 像素(0.03° 视角), 白色方块为 2×2 像素($0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 视角), 两圆内均有 400 个点。参照 Durgin (2001) 的研究, 实验中对比度的控制是通过调整每一个有框方块的局部对比度实现的, 而圆区域的整体对比度保持不变。假设背景亮度为 L , 小方块中心亮度为 C , 则其局部对比度为 $100 \times (C - L) / 3$ 。当其中心亮度为 $4L$ 、边框亮度为 0 时, 对比度达到最大值 100 ; 随着中心亮度下降、边框亮度上升, 对比度下降, 直到中心和边框亮度均为 L 时, 对比度达到最小值 0 。按照上述定义, 我们用 Xnview v1.97.8 和 Photoshop CS4 等软件生成了一系列不同值的对比度刺激图片, 作为适应刺激和测试刺激呈现在相应的圆区域内。对于适应材料, 上方圆内点的对比度为 10 , 下方为 100 。对于测试刺激(不同对比度的方块), 同样按照设定好的反应序列在上下两个圆内随机呈现。

2.1.3 实验设计和程序

在数量组中, 因变量为适应前后被试的数量感知的变化情况(适应效应量), 用适应前后数量判断的主观相等点(point of subjective equation, PSE)的对数(Dehaene, Izard, Spelke, & Pica, 2008)差值进行衡量(Durgin, 2001)。用恒定刺激法测量 PSE: 在测试阶段, 要求被试判断相继出现在视野内两个区域内的点“哪一边更多”, 规定判断反应为二择一的迫选任务。恒定刺激(probe)为 30 个点, 比较刺激(test)的点数则根据预实验的结果选定 10 个对数等距分布的数值(Dehaene et al., 2008, 具体分别为 20, 27, 33, 40, 55, 67, 81, 99, 122, 148)。需要说明的是, 参照 Burr 和 Ross (2008a) 的实验和本研究预实验结果, 考虑到适应前后 PSE 的变化, 实验中的各个比较刺激并不以恒定刺激作为中心对称分布(即大于和小于 probe 的刺激各 5 个), 而是设定点数少于 probe

的刺激 2 个, 多于 probe 的刺激 8 个。

在对比度组中, 因变量为适应前后被试的对比度感知变化情况, 在测试阶段要求被试判断两个区域内的点“哪一边更亮”, 用适应前后 PSE 的差值对其进行衡量。参照 Durgin (2001) 的实验方法, probe 的对比度值为 30 , test 的值从 10 变化到 100 , 按照线性等距分布选定 10 个值。此处采用与数量组类似的反应序列, 以排除反应序列不一致可能造成的干扰。对比度和数量组的其他条件和流程均相同, 下面仅介绍数量组的实验流程。

在数量组中, 被试进行 16 次练习, 并对判断结果给出反馈, 之后进行无反馈的正式实验。在正式实验中, 被试先完成无适应条件, 再完成适应条件的实验。在适应条件下, 按照注视点和测试刺激呈现的位置差异, 可分为 4 种实验条件: (1) 注视点在左侧中间, 测试刺激在第二对圆内(适应和测试刺激的视网膜、屏幕位置均相同); (2) 注视点在右侧中间, 测试刺激在第三对圆内(适应和测试刺激的视网膜位置相同, 屏幕位置不同); (3) 注视点在右侧中间, 测试刺激在第二对圆内(适应和测试刺激的视网膜位置不同, 屏幕位置相同); (4) 注视点在左侧中间, 测试刺激在第一对圆内(适应和测试刺激的视网膜、屏幕位置均不同)。具体可见图 2。这 4 种实验条件随机呈现。

在适应条件下, 分为适应阶段和测试阶段: 首先为适应阶段, 在每个 trial 开始时, 先呈现注视点 200 ms (左侧中央), 再在第二对圆中呈现适应刺激 3000 ms。然后, 进入测试阶段。在测试阶段中, 先呈现注视点(按照等概率随机出现在左侧或右侧中央) 400 ms, 接着此注视点闪烁 200 ms 以引导被试注意, 再继续呈现 400 ms。然后, 按一定概率选择三对圆中的一对(概率为: 第一对圆, $1/4$; 第二对圆,

2/4; 第三对圆, 1/4), 在选定的圆中, 先在下部的圆内呈现比较刺激(test) 200 ms, 比较刺激消失后在上部的圆内呈现恒定刺激(probe) 200 ms, 两者之间插入空屏 400 ms。要求被试判断恒定刺激和比较刺激的多少。若被试在 1000 ms 内无反应, 自动进行下一 trial, 两个 trial 之间空屏 400 ms。实验流程如图 3。

在实验中, 每一个 probe 有 8 张等效图片, 每一个 test 有 4 张等效图片。probe 与每一个 test 的其中一张等效图片随机配对, 生成 8 张刺激对图片, 10 个 test 共生成 80 张图片。在 4 种实验水平下, 这 80 张图片调整 probe 和 test 的呈现位置, 共重复 4 次, 因此, 对恒定刺激总共判断 320 次, 每进行 80 次判断后有短暂休息。

在无适应条件下, 直接进入测试阶段, 其 PSE

作为基线。共有 4 种基线条件, 它们的 probe 和 test 所呈现的位置分别与前述 4 种适应条件相对应。为了排除上、下视野不对称可能造成的影响, 将被试等分为 A、B 两组, A 组适应和测试情况如上, B 组适应材料与前者上下相反, 测试区域也进行了相应变化。

2.2 结果与讨论

在数量适应条件下, 被试的眼跳有效率为 96.28% (符合要求的试次/总试次); 在对比度适应条件下, 眼跳有效率为 93.50%。将有效试次的数据用于分析。参照 Burr 和 Ross (2008a) 的研究, 用累加正态分布函数分别拟合数量和对比度判断曲线, 数量组中, 4 种适应条件的拟合结果如图 4 所示。据此求出每位被试的 PSE 并计算出各组平均值, 结果如表 1 所示。

数量适应后效表现为, 某一视野区域对较多的

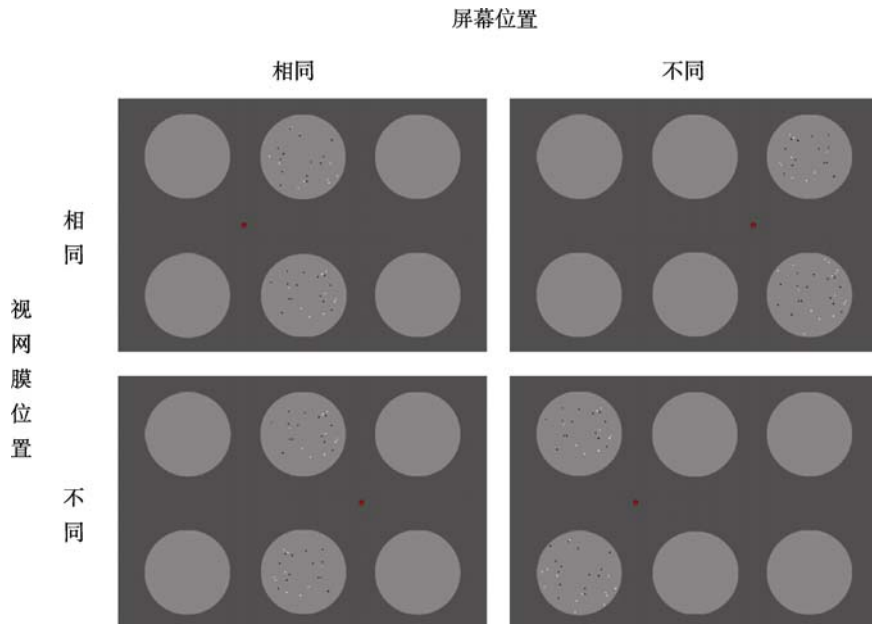


图 2 实验一测试刺激材料示意图(数量组)

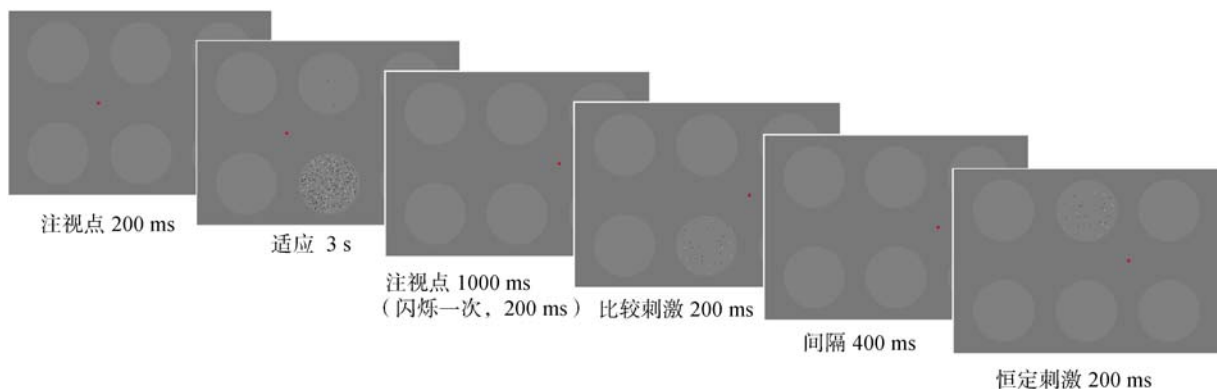


图 3 实验一适应条件实验流程

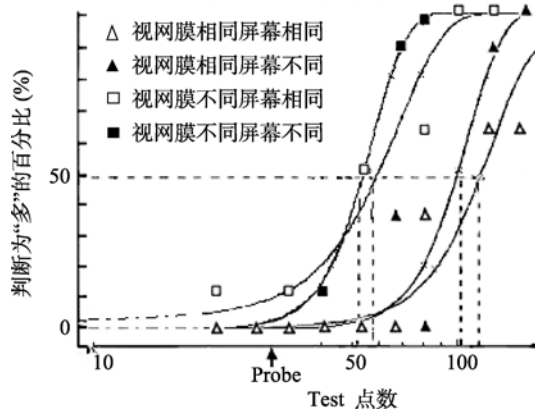


图4 实验一数量适应结果示意图(适应后)

数量(刺激个数)进行适应后会导致该区域感知的数量幅度下降;适应较少的数量则会导致感知的数量幅度上升。这些感知变化可以通过后续的数量判断反映出来(将比较刺激呈现在适应“多”的区域、恒定刺激呈现在适应“少”的区域时,对恒定刺激进行数量判断的 PSE 会增大)。在实验中,对两个适应区域分别呈现 400 个点和 5 个点,所测得的数量适应的后效实际上是两个区域数量感知情况变化的综合,适应效应统一表现为 PSE 的增大。

在数量适应条件下,参照 Durgin 和 Proffitt (1996)的研究,将各种条件下适应前后 PSE 的对数值之差作为其适应量,进行 2(视网膜位置) $\times$ 2(屏幕位置)重复测量方差分析(ANOVA)。结果表明:视网膜位置的主效应显著, $F(1, 15) = 343.67, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.96$, 屏幕位置的主效应显著, $F(1, 15) = 16.00, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.52$; 两因素交互作用不显著($p > 0.05, \eta_p^2 = 0.00$)。比较效果量的大小可以发现,眼跳发生时,大部分适应后效保留在眼跳后的视网膜位置(即视网膜-皮层映射),同时,屏幕位置因素的适应量也有显著的主效应,提示部分后效能够保留在眼跳前的空间位置上,即此后效表现出一定程度的空间-皮层映射性质。

将对比度条件进行类似的分析,结果表明:视

网膜位置的主效应显著, $F(1, 13) = 105.42, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.89$, 屏幕位置的主效应不显著($p > 0.05, \eta_p^2 = 0.17$); 两因素交互作用不显著($p > 0.05, \eta_p^2 = 0.04$)。该结果表明,眼跳发生时,对比度适应后效表现出了完全的视网膜-皮层映射性质,空间坐标对这一映射不产生影响,这与前人的研究一致(Burr & Morrone, 2011; Melcher, 2005)。

2.3 结论

在眼跳发生的情境下,数量适应后效表现出视网膜-皮层映射和部分空间-皮层映射特性,对比度适应效应则表现出完全的视网膜-皮层映射性质。

3 实验二:观察对象运动对数量 and 对比度适应后效的影响

当观察对象运动时,某些适应后效(如倾斜度)可以基于运动的客体重新映射,即适应后效可以迁移到客体运动的目标位置,且该现象在没有眼跳时仍然存在(Melcher, 2008)。考察这一情境下视觉系统对不同刺激特征的映射规律,有助于分析非眼跳情境下刺激特征与运动信息的整合机制,进一步明确(数量)适应后效的皮层映射规律。因此,实验二采用固定的注视点和运动的客体,分别考察数量适应和对比度适应后效的映射规律。

由于实验二的注视任务比较简单,且在预备实验中(通过眼动仪监视)发现在实验二中被试基本上可以按照要求进行注视,因此正式实验中不再进行眼动监视。

3.1 方法

3.1.1 被试

36 名大学生参加实验,他们视力或矫正视力正常,实验结束后可获得一定的报酬。其中,20 名被试(男 9 人,女 11 人)参加数量适应实验,他们的平均年龄为 23.05 岁(19~30 岁);其余 16 名被试(男 7 人,女 9 人)参加对比度适应实验,他们的平均年龄为 26.38 岁(22~34 岁)。

表 1 各条件下判断曲线的主观相等点计算结果

实验条件		视网膜位置相同		视网膜位置不同	
		屏幕位置相同	屏幕位置不同	屏幕位置相同	屏幕位置不同
数量组 (单位: 个)	无适应 PSE	46.10 (7.59)	47.85 (6.05)	47.48 (7.46)	48.99 (9.22)
	适应后 PSE	111.61 (25.53)	103.46 (25.14)	56.31 (7.50)	51.26 (7.04)
对比度组 (无单位)	无适应 PSE	34.40 (14.43)	33.72 (10.55)	39.43 (9.47)	38.73 (13.62)
	适应后 PSE	73.08 (12.84)	67.62 (11.45)	47.61 (12.87)	47.09 (12.23)

注: 括号内为标准差,下同。“无适应 PSE”为各种适应条件所对应的无适应(基线)条件的 PSE。

3.1.2 实验装置和材料

实验装置为一台 PentiumIV PC 电脑, Philips 17 英寸纯平显示器, 被试眼睛距离屏幕中心约 70 cm。其他装置及实验条件同实验一。

图 5 为两种实验条件下的适应刺激, 刺激点呈现在注视点上、下方的两个圆区域内, 圆直径为 10 cm (7.59°视角), 圆心距离注视点 5.5 cm (4.19°视角)。左侧为数量条件的适应材料, 上方圆区域有 5 个点, 下方圆内有 400 个点; 右侧为对比度条件的适应材料, 上方圆内每个方块的对比度值为 10, 下方的对比度值为 100。刺激的其他参数同实验一。

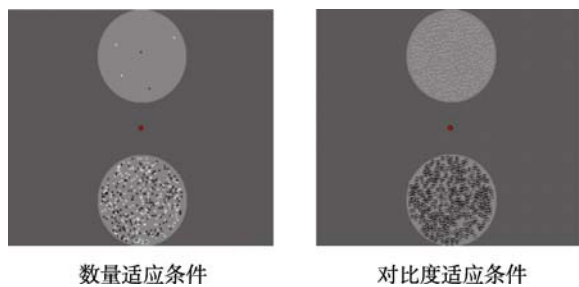


图 5 实验二适应刺激材料

3.1.3 实验设计和程序

在数量适应和对比度适应两种情境下, 每一个 probe 有 8 张等效图片, 每一个 test 有 4 张等效图片。probe 与每一个 test 的其中一张等效图片随机配对, 生成 8 张刺激对图片, 10 个 test 共生成 80 张图片用于实验判断。因变量、恒定刺激及反应序列均与实验一相同。

数量和对比度两个实验的流程相同, 下面仅介绍数量适应组的实验流程。

首先, 被试进行 16 次有反馈的数量判断练习, 之后进行无反馈的正式实验。在正式实验中, 被试先完成无适应条件的实验, 再完成适应条件的实验。在适应情况下, 按照适应刺激是否旋转以及测试水平位置(目标位置)还是竖直位置(原位置), 又可分为 4 种实验条件(参见后面的描述): (1)刺激旋转, 测试水平位置; (2)刺激旋转, 测试竖直位置; (3)刺激不旋转, 测试水平位置; (4)刺激不旋转, 测试竖直位置。对 4 种实验条件分组进行测试, 随机安排实验顺序, 其间进行充分休息。

在适应条件下, 分为适应阶段和测试阶段。以条件(1)为例, 在适应阶段, 在每个 trial 开始时, 先呈现注视点 200 ms, 再呈现适应刺激 3000 ms, 然后刺激点在 150 ms 内淡出(消失), 刺激圆在 750 ms 内按顺时针方向旋转到水平位置, 停顿 100 ms。接下来, 进入测试阶段, 先在注视点左侧的圆内呈现比较刺激(test) 200 ms, 比较刺激消失后在注视点右侧的圆内呈现恒定刺激(probe) 200 ms, 两者之间插入空屏 400 ms。要求被试判断恒定刺激和比较刺激的多少。若被试在 1000 ms 内无反应, 自动进行下一 trial, 两个 trial 之间空屏 400 ms。实验流程如图 6。

在条件(2)中, 测试刺激出现在刺激圆旋转前的位置, 即先在下方圆内呈现比较刺激, 再在上方圆内呈现恒定刺激。在条件(3)、(4)中, 刺激点消失后圆形先在原地停顿 850ms (保证 4 种条件下的适应与测试间隔时间相等), 然后进入测试阶段, 测试序列与前两个条件相同, 分别出现在水平和竖直位置。

在无适应条件下, 直接进入测试阶段, 测试序

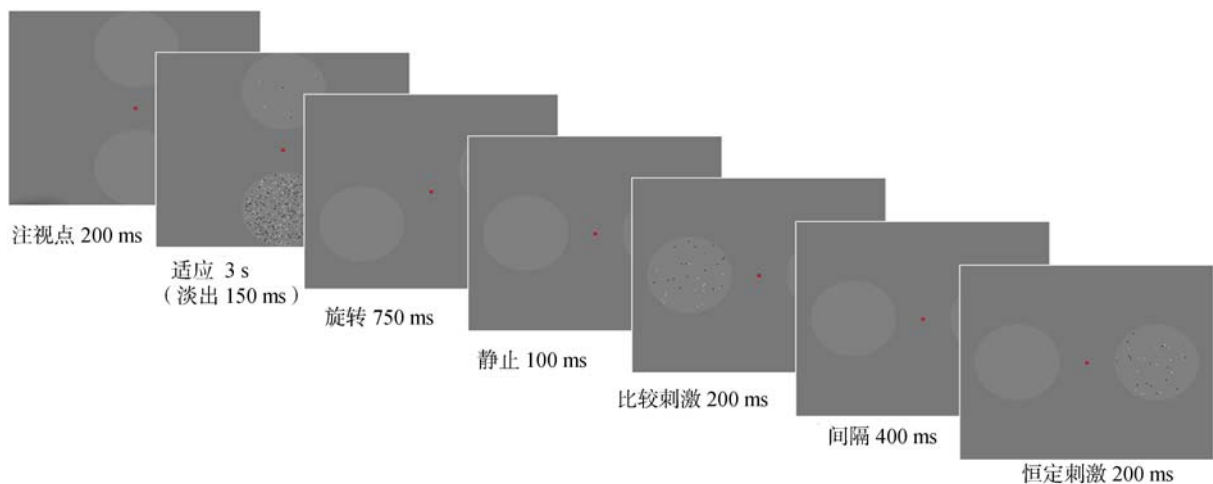


图 6 实验二适应条件实验流程

列分别出现在水平和竖直位置。

为控制左、右侧信息不对称可能带来的影响,将 20 名被试等分为两组,每组中适应刺激分别按顺时针和逆时针方向旋转,未适应条件、适应条件的测试阶段中 test 和 probe 的位置也相应变化。两种实验条件在被试间平衡,对同一被试则保持一致。

3.2 结果与讨论

用累加正态分布函数分别拟合两种条件的判断曲线,结果如图 7 所示(数量组)。通过拟合曲线求出每个被试的 PSE,把平均 PSE 作为分析指标,统计结果见表 2。

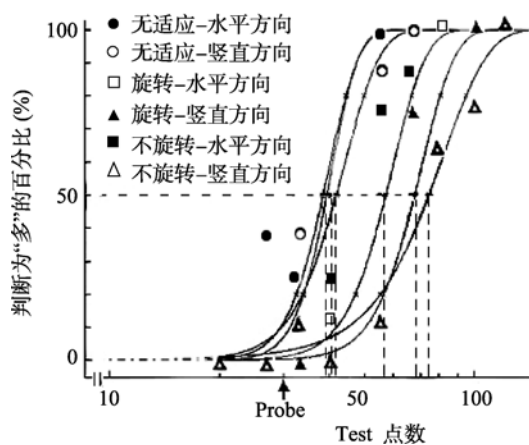


图 7 实验二数量适应结果示意图

将各种条件下适应前后数量判断的 PSE 的对数值之差作为数量适应效应量,进行 2(客体运动:旋转/不旋转) $\times$ 2(测试位置:水平/垂直)重复测量方差分析(ANOVA)。结果表明:客体运动的主效应不显著($p > 0.05$),测试位置的主效应显著, $F(1, 19) = 24.03, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.56$; 两因素交互作用显著, $F(1, 19) = 9.65, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.34$ 。进一步进行简单效应分析,结果表明:“客体运动”因素在“测试位置”因素的第一个水平差异显著, $F(1, 19) = 18.05, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.49$, 这表明客体旋转和不旋转的情况下,水平方向的数量适应量有显著差异;“客体运

动”因素在“测试位置”因素的第二个水平差异不显著($p > 0.05, \eta_p^2 = 0.07$), 这表明无论适应刺激客体是否旋转,竖直方向上的数量适应量都没有受到显著影响。

由简单效应分析的结果可知,适应条件(1)与适应条件(3)的效应量差异显著。其中,条件(1)的 PSE 与其对应基线(无适应)条件的 PSE 差异显著, $t(19) = 5.00, p < 0.001$, 提示客体旋转时,水平方向出现了显著的数量适应效应。在实验中,条件(1)和条件(3)的适应位置和测试位置相同,刺激呈现时间和测试间隔时间均相同,唯一区别是条件(3)中两个刺激圆不旋转,竖直和水平方向的圆区域是相对独立的,而条件(1)中的刺激圆在刺激点消失后旋转到水平位置,被试结合这一线索知道水平方向的圆和竖直方向的圆是同一客体。因此,两种条件的差异不是由于水平和垂直方向上圆区域的空间临近性造成的,而是由于竖直方向的适应效应“跟随”客体运动到水平方向产生的。

另一方面,条件(2)和条件(4)的适应量差异不显著,而它们与其基线(无适应)条件 PSE 的差异均显著, $t(19) = 6.67, p < 0.001$; $t(19) = 7.09, p < 0.001$, 提示上述两种条件下都产生了显著的适应效应。上述结果表明,在适应客体运动时,虽然有显著的适应效应“追随”客体运动到了新位置,但原位置保留的适应量仍与不运动条件下无显著差异,即适应后效没有随着客体的运动而“离去”。对此,有一些可能的解释。

首先,这一现象可能是被试的期待造成的。适应条件(2)中,客体虽然旋转到了水平方向,但测试刺激却 100%地出现在原位置(竖直方向),可以理解为,测试时刺激实际上返回到了原位置,因此,在心理上“旋转”客体是不必要的,这一加工可能受到了抑制。

第二,这一现象可能是测试目标的位置不确定性造成的。在 Melcher (2008)的研究中发现,客体运动后,如果测试刺激出现的位置没有可预测性

表 2 各条件判断曲线的主观相等点计算结果

实验条件	未适应		客体旋转		客体不旋转	
	水平方向	竖直方向	水平方向 条件(1)	竖直方向 条件(2)	水平方向 条件(3)	竖直方向 条件(4)
数量判断 PSE (单位: 个)	41.87(6.35)	43.07(7.83)	52.90(7.35)	67.19(15.55)	44.15(6.60)	72.71(15.90)
对比度判断 PSE (无单位)	46.62(10.58)	43.89(12.74)	42.55(10.28)	65.78(13.24)	46.87(9.43)	64.88(16.36)

(不一定出现在运动的目标位置), 那么适应后效将保留在原位置, 目标位置上的后效几乎消失。我们曾对这一解释进行过验证, 当条件(2)中测试刺激出现在原位置(竖直位置)的概率为 60%时, 12 名被试的测试结果表明, 竖直位置上的 PSE 与实验二条件(4)的 PSE 无显著差异($p > 0.05$), 提示适应效应仍完全保留在原位置; 水平方向上的 PSE 与基线水平差异不显著($p > 0.05$), 提示水平位置不再有显著的适应效应。Melcher (2008)认为, 要将客体与其特征进行绑定, 必须建立在观察者能对客体运动轨迹进行预测的基础上。现实情境中, 客体的运动轨迹往往是可预测的, 因此客体和其特征的整合加工才能够实现。我们的研究结果支持了这一观点。

第三, 这一现象也可能是数量加工和特征信息皮层映射加工的复杂性造成的。数量加工可能存在不同水平的并行加工阶段(Dehaene & Changeux, 1993), 客体特征的皮层映射加工也具有阶段性, 上述加工过程可能导致了(数量)特征皮层映射规律的复杂性。具体地说, 在不同条件下, 两个位置上的后效并无线性关系(Melcher, 2008), 即, 两个位置的效应量之和并不是一个常数, 空间-皮层映射和视网膜-皮层映射也不一定是此消彼长的关系。

将对比度条件进行类似的分析, 结果表明: 客体运动的主效应不显著($p > 0.05$, $\eta_p^2 = 0.03$), 测试位置的主效应显著, $F(1, 15) = 95.41$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.86$; 两因素交互作用不显著($p > 0.05$, $\eta_p^2 = 0.07$)。这一结果表明, 被试适应竖直方向两个圆内的刺激对比度后, 无论适应刺激是否运动, 在水平和垂直方向上的对比度后效都未受到显著影响。当适应刺激旋转到水平位置时, 对比度适应后效并未“跟随”其旋转到相应的水平位置。

3.3 结论

在注视点保持恒定的情况下, 适应刺激客体在视野内发生运动时, 数量适应后效会“跟随”客体运动到新的位置, 即进行基于客体的重新映射, 而对比度适应的后效不会“跟随”客体运动到新位置。

4 总讨论

在眼跳时, 视觉加工中存在从视网膜-皮层映射过渡到空间-皮层映射的加工(Burr & Morrone, 2011)。综合现有研究的结果可知, 刺激个体的低水平细节描述性信息(如对比度)不能参与眼跳时的信息整合, 表现为完全的视网膜-皮层映射, 而刺激整体的较高水平描述信息(如数量、人脸等)则可以

参与眼跳时的信息整合, 表现出一定程度的空间-皮层映射特征(Burr & Morrone, 2011; Melcher, 2005; Wittenberg et al., 2008; Johnston et al., 2006; Zimmer & Kovacs, 2011)。在本研究的实验一中, 我们通过分析眼跳发生时数量和对比度适应后效的映射特征, 对数量特征的认知加工等级进行了进一步的分析。结果显示, 数量适应后效可以进行一定程度的空间-皮层映射, 从而证实了数量特征存在空间-皮层映射编码的神经机制; 而对比度适应后效则表现为完全的视网膜-皮层映射, 这与前人的研究结果一致(Burr & Morrone, 2011)。Durgin 和 Proffitt (1996)曾采用类似的方法研究了密度适应后效的映射特征, 发现密度适应后效也仅表现出视网膜-皮层映射性质。相对于数量特征, 密度是视觉对象的“局部”特征(Burr & Ross, 2008b), 属于较低水平的描述信息, 可能没有参与到眼跳时的信息整合与重构过程中, 因此表现出完全的视网膜-皮层映射特性。同样, 对比度加工主要依赖初级视觉皮层, 网膜细胞对于对比度值的变化反应非常敏感(Avidan et al., 2002)。在实验一中, 数量适应后效表现出空间-皮层映射特性, 与对比度和密度适应后效不同。从时间进程上来看, 数量适应阶段尚未涉及数量比较中可能存在的线索综合与推导等加工(这些加工应该在外显的数量比较任务中才出现)。如果数量适应的后效与其他表面特征的适应后效存在不同性质, 则可以认为数量认知与其他表面特征在加工基础上就存在差异, 而不是建立在对后者加工基础上的综合与推导。因此, 这一结果为否定“数量加工是非数量初级特征加工的副产品”(Durgin, 1995, 2008; Allik & Tuulmets, 1991)的观点提供了一定的证据支持, 并进一步支持数量是对观察对象较高水平的描述信息, 它的适应后效能参与眼跳时的信息整合过程。

在眼跳的信息整合过程中, 数量特征是与眼跳信息进行了整合(Burr & Morrone, 2011), 还是在一个更广泛的意义上, 与观察者和观察对象间的相对运动信息进行了整合? 对非眼跳情境下刺激特征的皮层映射规律进行研究, 有助于明确这一问题。有研究者(Melcher, 2008)指出, 编码感觉信息的神经元按照基于外部环境的坐标进行反应, 与“空间-皮层映射”并没有必然联系。他提出, 运动客体的特征可以基于客体的目标位置进行重新映射, 这一映射也可以在没有眼跳的情境下发生(Melcher, 2008), 而在此条件下, 该映射现象的加工机制尚不明确。

我们假设,在非眼跳情境下,如果视觉系统也仅对较高级的刺激进行“基于客体的映射”,而较低级刺激则表现出视网膜-皮层映射特征,那么此时视觉系统对刺激的映射规律就与眼跳条件下类似,可以推测非眼跳与眼跳条件下视觉系统对刺激的皮层映射加工具有统一的机制。进一步说,如果非眼跳与眼跳情境下刺激的皮层映射有统一的加工机制,那么在这两种情境下,视觉系统都会将(较高级的)特征信息和其相对运动信息进行绑定加工,而不是仅仅将其与眼跳信息进行整合(Burr & Morrone, 2011)。为了明确上述问题,实验二考察了注视点恒定而观察对象运动时客体的数量和对比度适应后效的映射特点。结果表明,数量适应后效可以基于运动的客体进行重新映射,在客体的目标位置上保留稳定的适应后效;对比度适应后效则表现出完全的视网膜-皮层映射特性,其后效完全停留在客体运动前的位置上。这表明,注视点恒定的情况下,客体运动信息和(较高级的)特征信息也能得到整合,这种整合加工和眼跳存在时具有类似的机制。实验二的结果也提示,客体特征信息不一定只能和眼跳信息进行绑定,而是在一个更加广泛的意义上和观察者与观察对象间的相对运动信息进行了整合。这一结果完善了目前基于眼跳的刺激特征的皮层映射理论(Burr & Morrone, 2011)。

对于数量适应后效的视网膜-皮层映射和空间-皮层映射的效应量关系,我们在此进行简单的讨论。相关研究曾对各种特征后效的视网膜映射和空间映射的效应量进行比较,在 Melcher (2005)的研究中,倾斜度和形式后效的空间皮层映射效应量约为网膜映射的一半,人脸后效的空间皮层映射与视网膜映射效应量相等。也有研究认为,人脸后效空间皮层映射的效应量不足网膜映射的一半(van Boxtel, Alais, & van Ee, 2008; Afraz & Cavanagh, 2009)。总的来说,各种(较高级)特征后效的映射规律表现为:空间和视网膜-皮层映射两者都存在,往往更多地表现出视网膜-皮层映射(Burr & Morrone, 2011)。在本研究中,数量适应后效与上述特征的映射规律类似。对这一现象,有一些可能的解释。第一,空间-皮层映射效应是(眼跳时)经视网膜-皮层映射转化而来的。存在“空间反应坐标”的皮层中,其神经细胞的反应坐标不完全一致,可以同时存在空间坐标和网膜坐标(Habak, Wilkinson, Zakher, & Wilson, 2004),这可能是刺激从网膜转换为空间-皮层映射时经常达不到 100%的原因之一。第二,数

量加工过程可能同时涉及了不同水平的加工阶段(Nieder & Dehaene, 2009)。Dehaene 和 Changeux (1993)提出,数量抽取包括两个平行的加工阶段,既有较低级的视网膜皮层映射(retinotopic map)加工,也存在较高级的抽象位置编码(position code)。我们推测,这可能也是数量适应后效既表现出空间-皮层映射、又主要表现为视网膜-皮层映射的原因。总之,数量加工和特征信息皮层映射加工的阶段性可能导致了(数量)特征皮层映射规律的复杂性。因此,在不同条件下,两个位置上的后效并无线性相关(Melcher, 2005, 2008),空间-皮层映射和视网膜-皮层映射也不一定是此消彼长的关系。

综上所述,本研究全面地探讨了眼跳和无眼跳的情境下,当观察者与观察对象发生相对运动时,对观察对象的数量适应后效进行皮层映射的规律。结合本研究中两个实验的结果可知,数量适应的后效并不局限在视网膜-皮层映射水平。在眼跳发生时,空间-皮层映射特征使其适应后效可以保持在眼跳前的空间位置上;而在没有眼跳时,数量适应的后效也可以“追随”客体运动到新的位置,进行基于客体的重新映射。与此形成对比的是,较低水平的信息在相对运动发生时仅仅表现出视网膜-皮层映射特征,如对比度(本研究; Burr & Morrone, 2011)和密度(Durgin & Proffitt, 1996)等。上述结果可以间接地支持“数量加工不是初级非数量视觉信息加工副产品”的观点(Kramer et al., 2011),并进一步支持数量的加工和适应可以涉及较高级的加工水平。同时,我们推测,无论是否有眼跳发生,观察者与观察对象的相对运动信息都可以与其特征信息进行整合加工,从视网膜位置到与注视位置无关的皮层感受野位置进行重新投射,且无论眼跳是否存在,视觉系统都只针对较高水平的视觉特征进行整合加工。

5 结论

在眼跳发生时,数量适应后效表现出一定程度的空间-皮层映射特征,而对比度适应后效则表现出完全的视网膜-皮层映射特征。在注视点恒定而目标客体在视野内运动时,客体数量特征的适应后效可以“追随”客体重新映射到新的位置,表现出基于客体映射的特征,而对比度适应后效则完全依赖于视网膜-皮层映射,不能“追随”客体在目标位置重新形成映射。因此,数量特征可以与观察目标的相对运动信息进行整合,且这种整合在眼跳和非眼

跳的观察条件下都可发生。

参 考 文 献

- Afraz, A., & Cavanagh, P. (2009). The gender-specific face aftereffect is based in retinotopic not spatiotopic coordinates across several natural image transformations. *Journal of Vision*, 9, 1–17.
- Allik, J., & Tuulmets, T. (1991). Occupancy model of perceived numerosity. *Perception & Psychophysics*, 49, 303–314.
- Avidan, G., Harel, M., Hendler, T., Ben-Bashat, D., Zohary, E., & Malach, R. (2002). Contrast sensitivity in human visual areas and its relationship to object recognition. *Journal of Neurophysiology*, 87, 3102–3116.
- Burr, D. C., & Morrone, M. C. (2011). Spatiotopic coding and remapping in humans. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 366, 504–515.
- Burr, D. C., & Ross, J. (2008a). A visual sense of number. *Current Biology*, 18, 425–428.
- Burr, D. C., & Ross, J. (2008b). Response: Visual number. *Current Biology*, 18, 857–858.
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44, 1–42.
- Dehaene, S., & Changeux, J.-P. (1993). Development of elementary numerical abilities: A neuronal model. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 5, 390–407.
- Dehaene, S., Izard, V., Spelke, E., & Pica, P. (2008). Log or linear? Distinct intuitions of the number scale in Western and Amazonian indigene cultures. *Science*, 320(5580), 1217–1220.
- de Hevia, M. D. (2011). Sensitivity to number: Reply to Gebuis and Gevers. *Cognition*, 121, 253–355.
- Duhamel, J., Bremmer, F., BenHamed, S., & Graf, W. (1997). Spatial invariance of visual receptive fields in parietal cortex neurons. *Nature*, 389, 845–848.
- Durgin, F. H. (1995). Texture density adaptation and the perceived numerosity and distribution of texture. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21, 149–169.
- Durgin, F. H. (2001). Texture contrast aftereffects are monocular; texture density aftereffects are binocular. *Vision Research*, 41, 2619–2630.
- Durgin, F. H. (2008). Texture density adaptation and visual number revised. *Current Biology*, 18, 855–856.
- Durgin, F. H., & Proffitt, D. R. (1996). Visual learning in the perception of texture: Simple and contingent aftereffects of texture density. *Spatial Vision*, 9(4), 423–474.
- Habak, C., Wilkinson, F., Zakher, B., & Wilson, H. R. (2004). Curvature population coding for complex shapes in human vision. *Vision Research*, 44, 2815–2823.
- He, L. X., Zhang, J., Zhou, T. G., & Chen, L. (2009). Connectedness affects dot numerosity judgment: Implications for configural processing. *Psychonomic Bulletin & Review*, 16, 509–517.
- Johnston, A., Arnold, D. H., & Nishida, S. (2006). Spatially localized distortions of event time. *Current Biology*, 16, 472–479.
- Kahneman, D., Treisman, A., & Gibbs, B. J. (1992). The reviewing of object files: Object-specific integration of information. *Cognitive Psychology*, 24(2), 175–219.
- Kramer, P., Bono, M.-G., Zorzi, M., & Rustichini, A. (2011). Numerosity estimation in visual stimuli in the absence of luminance-based cues. *PLoS One*, 6(2), e17378.
- Liu, W., Zhang, Z. J., & Zhao, Y. J. (2012). Numerosity adaptation effect on the basis of perceived numerosity. *Acta Psychologica Sinica*, 44(10), 1297–1308.
- [刘伟, 张智君, 赵亚军. (2012). 基于数量感知的数量适应. *心理学报*, 44(10), 1297–1308.]
- McKyton, A., & Zohary, E. (2006). Beyond retinotopic mapping: the spatial representation of objects in the human lateral occipital complex. *Cerebral Cortex*, 17, 1164–1172.
- Melcher, D. (2005). Spatiotopic transfer of visual-form adaptation across saccadic eye movements. *Current Biology*, 15, 1745–1748.
- Melcher, D. (2008). Dynamic, object-based remapping of visual features in trans-saccadic perception. *Journal of Vision*, 8(14), 1–17.
- Nieder, A., & Dehaene, S. (2009). Representation of number in the brain. *The Annual Review of Neuroscience*, 32, 185–208.
- Roitman, J. D., Brannon, E. M., & Platt, M. L. (2007). Monotonic coding of numerosity in macaque lateral intraparietal area. *PLoS Biology*, 5, e208.
- Sereno, M. I., & Huang, R. S. (2006). A human parietal face area contains aligned head-centered visual and tactile maps. *Nature Neuroscience*, 9, 1337–1343.
- Shui, R. D., Xu, F., & Shen, M. W. (2004). Infant's number representations: Object-file and analog model. *Advances in Psychological Science*, 12(5), 784–790.
- [水仁德, 徐飞, 沈模卫. (2004). 婴儿数量表征的客体档案和类比模型. *心理科学进展*, 12(5), 784–790.]
- Sweeny, T. D., Grabowecky, M., & Suzuki, S. (2011). Awareness becomes necessary between adaptive pattern coding of open and closed curvatures. *Psychological Science*, 22(7), 943–950.
- van Boxtel, J. J. A., Alais, D., & van Ee, R. (2008). Retinotopic and non-retinotopic stimulus encoding in binocular rivalry and the involvement of feedback. *Journal of Vision*, 8(5), 17.1–17.10.
- Wittenberg, M., Bremmer, F., & Wachtler, T. (2008). Perceptual evidence for saccadic updating of color stimuli. *Journal of Vision*, 8, 9.1–9.9.
- Zimmer, M., & Kovacs, G. (2011). Position specificity of adaptation-related face aftereffects. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 366, 586–595.

Cortical Remapping Features of Numerosity Adaptation Aftereffects

ZHANG Zhijun¹; LIU Wei^{1,2}; ZHAO Yajun³; ZHANG Jingshu¹; WU Binxing¹

(¹ Department of Psychology and Behavioral Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310028, China)

(² College of Education, Yunnan University of Nationalities, Kunming 650504, China)

(³ College of Sociology and Psychology, Southwest University for Nationalities, Chengdu 610041, China)

Abstract

A key question in numerosity cognition is whether numerosity processing is based on quantity of items, rather than other low-level descriptions such as contrast or density. We can shed light on this question by investigating the cortical remapping features of numerosity adaptation across saccades, compared with those of low-level properties. As can be seen from previous studies, when the observer was sweeping across a stimulus, there was a spatiotopic representation of the stimulus, forming an isomorphic map in the visual cortex anchored in stable real-world coordinates. The remapping was based on transformation of retinotopic mapping of the neurons that occurred in the primary visual cortex. This transformation, however, was proposed to exist in high-level descriptions selectively by means of integrating visual properties with eye-movement information across saccades. Therefore, distinct mechanisms can be revealed if the remappings show different characteristics between numerosity and low-level properties such as contrast or density, which is helpful in supporting the statement that numerosity processing is relatively independent of primary visual cues.

Object-based remapping was thought to be possible when stimuli moved without saccades. The mechanism underlying this kind of mapping is not yet clearly demonstrated. Specifically, if this remapping is due to object-file updating, then all visual properties could be remapped when objects move without saccades, despite the different processing levels of them. By contrast, if the object-based remapping is based on a similar mechanism to that with saccades, then a distinction would appear in remapping features of descriptions in different levels: only higher-level descriptions' aftereffects could be remapped to final positions when objects moved. Therefore, exploring remapping features when objects are moving without saccades is an effective way to study the mechanism of object-based remapping without saccades.

In our study, remapping characteristics of numerosity adaptation aftereffects were investigated systematically when relative motion occurred between the target and the observing eyes, compared with those of contrast adaptation aftereffects. Two experiments were included. In Experiment 1, subjects were asked to shift their fixations to a new position after adapting to the stimulus. The adaptation effects in the same and different retinotopic/screen positions were compared. The numerosity and contrast adaptation were tested respectively. As a result, numerosity adaptation effects showed spatiotopic remapping features to some extent, whereas the remapping of contrast adaptation aftereffects appeared to be purely retinotopic. According to the result, we proposed that numerosity was a higher-level description of stimuli, which can be integrated with eye-moving information and built up across saccades. In Experiment 2, with a stable fixation and moving adapting targets, we determined the numerosity and contrast adaptation aftereffects in the original and final positions of targets, respectively. The results suggested that numerical adaptation aftereffects can be remapped to the final position of targets. On the contrary, contrast adaptation aftereffects could not be remapped to the final position of moved targets, showing a completely retinotopic remapping feature. The distinct results in Experiment 2 underlined further differences in numerosity and contrast processing, as well as an identical mechanism in remapping features of relatively moving objects with and without saccades.

In conclusion, cortical remapping of numerosity adaptation aftereffects was shown to be not constrained to the retinotopic level in our study. With saccades, it was shown to be spatiotopic; without saccades, the numerical aftereffects could also be remapped in the final position of moving objects. On the contrary, contrast showed completely retinotopic remapping features. These results provide new evidence to support the view that numerosity is processed at higher-level rather than being completely dependent on inferring of low-level visual cues. Moreover, we propose that the information of relative motion can be integrated with higher-level properties of stimuli no matter there are saccades or not.

Key words numerical processing; numerosity adaptation aftereffect; retinotopic mapping; spatiotopic remapping; object-based remapping