

# Spatial and Feature-Based Attention in Visual Processing

Taoxi Yang, Yan Bao

Department of Psychology & Key Laboratory of Machine Perception (MoE), Peking University, Beijing  
Email: yangtaoxi@pku.edu.cn, baoyan@pku.edu.cn

Received: Jun. 9<sup>th</sup>, 2013 revised: Jun. 28<sup>th</sup>, 2013; accepted: Jul. 8<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2013 Taoxi Yang, Yan Bao. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Abstract:** Attention can be selectively directed to a spatial location or non-spatial features of a stimulus. Previous studies have examined the effects of spatial attention and feature-based attention (FBA) on basic visual processes, but whether and how these two types of attention interact with each other still remain unclear. This article aims to systematically summarize all related studies concerning this topic. Following an initial introduction of some theoretical backgrounds, it makes an intensive review on both the behavioral and neuro-physiological studies based mainly on some newly developed experimental paradigms, focusing on both the cognitive and neural mechanisms underlying these two types of attention. The authors suggest that besides separate studies a combination of both spatial and feature-based attention should be emphasized in future research in this field.

**Keywords:** Selective Attention; Spatial Attention; Feature-Based Attention

## 视觉信息加工中的空间注意与特征注意

杨桃溪, 包燕

北京大学心理学系及机器感知与智能教育部重点实验室, 北京  
Email: yangtaoxi@pku.edu.cn, baoyan@pku.edu.cn

收稿日期: 2013年6月9日; 修回日期: 2013年6月28日; 录用日期: 2013年7月8日

**摘要:** 选择性地注意一个空间位置, 或者一个刺激特征(如朝向、颜色或形状)能够导致我们探测和报告感觉世界中刺激的能力发生改变, 即影响大脑的信息加工过程。已有研究表明, 注意既可以指向某个空间位置, 又可以指向目标刺激的某个非空间特征, 但是对于两者之间关系较少有研究者进行系统地探讨。本文对该领域的研究进行了细致地梳理和归纳, 在介绍了相应的理论背景的基础上, 结合较新的实验范式, 总结归纳了对比空间效应和特征效应的行为和电生理学研究, 探讨了空间注意和特征注意可能的认知和神经机制。最后, 本文指出对特征注意和空间注意的独立或者联合的作用进行系统地考察是今后研究的一个重要方向。

**关键词:** 选择性注意; 空间注意; 特征注意

### 1. 引言

正如 Pashler (1998)所言, “注意”(attention)在很长一段时间里给心理学家带来了巨大挑战。注意通常指心理活动对一定对象的指向和集中。这也正是

James (1890)所强调的关于注意的意义: “每个人都知道注意是什么。它是心理接受信息的过程。注意是以一种清晰和生动的形式从同时呈现的几个物体或思维序列中选择一个对象的过程。意识的集中和专注是

注意的核心” (Solso, MacLin M. K., & MacLin O. H., 2005)。其中,“从同时呈现的几个物体或思维序列中选择一个对象”涉及注意的选择性功能,它使得有机体能够对外界丰富的信息进行筛选以确保有限的认知资源得以高效运行,本文将主要探讨视觉注意的选择性功能。

在选择性注意的研究中,基于空间的注意(spatial attention)和基于特征的注意(feature-based attention, FBA)是研究者们关注的焦点。基于空间的注意理论认为,注意如同聚光灯(spotlight)一样优先选择空间位置,尔后对该位置上的刺激进行知觉加工。研究者以空间线索化范式(spatial cuing paradigm)验证聚光灯模型,形成了基于空间的选择性注意理论的基本框架(Posner, 1980; Tsal, 1983; Eriksen & Murphy, 1987)。基于特征的注意理论认为,视觉刺激由空间和非空间特征构成,是形状、大小、朝向、颜色和明度等特征的复合体,某一个特征维度的信息或某几个特征维度信息的组合都可以被注意系统选择性地加工(Allport, 1971; Folk, Remington, & Johnston, 1992; Remington, Folk, & McLean, 2001)。

一直以来,上述两种类型的选择性注意都是心理学研究领域备受关注的课题,各自得到了广泛而深入的研究,形成了许多成熟的理论模型和实验范式。然而,与这两个认知系统分别得到的大量研究相比,对这两个系统之间关系的研究起步较晚,直到近年来才得到了研究者的关注。基于空间的注意和基于特征的注意二者有何区别,它们是否会对视觉信息加工过程产生不同影响?这正是本文所关心的问题。

## 2. 理论背景

已有研究表明,选择性注意能对早期视觉加工过程(如对比感受性、空间分辨率等)产生影响。知觉模板模型(perceptual template model, PTM)通过系统地操纵外部噪声的量值,观测其对知觉任务表现的调制作用,从而为研究选择性注意的机制提供了一个理论上和经验上的分析框架。而神经生理学领域的研究通过记录神经元的活动提供了丰富的关于选择性注意神经机制的信息。因此,下文将首先对知觉模板模型和神经元响应模型进行简要介绍,以期为后续讨论提供相应的理论背景。

### 2.1. 知觉模板模型

PTM由五部分组成:知觉模板;非线性转换器(幂函数);内部乘法噪声,其标准差和非线性转化后刺激的总能量成比例;表明绝对阈值的内部加法噪声,其量值不依赖刺激强度;决策过程(Lu & Doshier, 1998, 1999, 2008)。

选择性注意通过与知觉模板的相互作用可以提升任务表现。根据PTM理论,选择性注意可以有三种不同的改进机制:刺激增强(stimulus enhancement),外部噪声的排除(external noise exclusion)和对比度增益控制(contrast gain control)的改变。这些机制与信号处理的三个方面相类似:扩大,过滤以及增益控制调整。每种机制在相应的心理物理实验中都具有典型的表现模式:1) 基于刺激增强的机制是刺激放大增强的过程,导致在零噪声或低噪声下的阈值(例如绝对阈值)降低,其值等于内部加法噪声降低的量值;2) 基于外部噪声排除的机制是过滤信号刺激中的外部噪声的能力增强的过程,导致在高外部噪声条件下的阈值降低,这反映了注意对特定空间区域或刺激特征的选择作用;3) 基于内部乘法噪声降低的增益控制的改变是系统对刺激对比度反应发生变化的过程,在所有外部噪声水平上的任务表现均得到提高,但目前缺乏相应的实验证据。

此外,值得注意的一点是,选择性注意对早期视觉加工产生的影响也有可能是基于决策标准的改变,反映了刺激的感官编码与更高皮层水平的决策单位之间连接的变化。换言之,早期的视觉表征保持不变,而决策权重发生了改变(Eckstein, Shimozaki, & Abbey, 2002)。

### 2.2. 神经元响应模型

随着对神经信息编码研究的不断深入,已有众多实验结果表明,神经系统中信息的编码与处理在很大程度上是通过大量神经元构成的集群协同活动完成的,即神经元集群编码(population coding)。关于选择性注意影响神经元集群响应的机制,主要有两种理论:增益调制(gain modulation)和调谐曲线改变(tuning change) (Herrmann, Montaser-Kouhsari, Carrasco, & Heeger, 2010; Martinez-Trujillo & Treue, 2004; Mazer, 2011; McAdams & Maunsell, 1999; Reynolds & Chelazzi, 2004;

Reynolds & Heeger, 2009; Williford & Maunsell, 2006)。

基于增益调制的理论认为,当被试被要求注意空间中的一个特定区域时,这个区域落在神经元的感受野内,这些神经元就会出现活动增强,即注意的调控能够使神经元敏感性提高。这样的激活增强被计算性地描述为感觉加工过程的“增益(gain)”。

描述神经元放电率的调谐曲线函数,是建立神经元活动函数的关键,它反映了刺激信号与神经元电发放信号之间的关系。调谐曲线的函数形式由描述刺激特征参数决定,钟型曲线是较为常见的一种。例如,在猫的视野中呈现闪动的垂直条纹,这种刺激会导致一些神经元进入高度活跃的状态。同样的,水平条纹的闪动可以刺激另一些神经元进入高度活跃的状态,而倾斜的条纹将会刺激两种神经元都处于某种中度活跃的状态(Inman, 2006)。基于调谐曲线改变的理论认为,选择性注意并未增强神经元对被注意刺激的反应,而是抑制了无关噪音的干扰,从而使调谐曲线的形状发生了改变。

### 3. 空间效应和特征效应的行为研究

基于知觉模板模型及其相关的理论,研究者通过心理物理实验,探讨知觉系统加工信息的特点,从而对空间选择和特征选择对视知觉系统产生的影响进行比较。这一类研究多采用行为作指标确定心理物理调谐曲线。潜在的假设是:知觉的调谐曲线不但可以反映知觉系统的信息加工特点,而且可以灵敏并有效地反映特征注意和空间注意对知觉加工产生的影响。如果两种注意使知觉调谐曲线产生了不同变化(增益改变或调谐改变),则在一定程度上反映了空间效应和特征效应的分离。

除了经典的线索化范式(cuing paradigm),近年来的研究采用了许多新的实验技术,不断丰富着探索选择性注意机制的研究手段。下面将结合这些范式,对空间效应和特征效应的比较研究进行梳理和归纳总结。

#### 3.1. 基于线索化范式的实验研究

线索化范式是研究选择性注意的经典范式。在与任务相关的目标刺激呈现之前,用线索将被试的注意引导到一个特定的位置或目标特征上去。在这些线索化任务中,研究者通过提示信号中的信息来操纵被试

的注意焦点:线索化目标的空间位置或线索化目标刺激某个维度的特征,从而探讨空间效应或特征效应。

利用线索化范式,Liu, Stevens 和 Carrasco (2007)以反应的正确率为因变量对比了空间注意和特征注意。在空间注意条件下,他们使用箭头线索来提示注意应该指向的位置;而在特征注意条件下,同样的箭头则指示将要出现的目标的运动方向。研究者发现,线索提供的先验知识在空间注意任务中产生了促进效应,即典型的中心线索效应:在线索有效的条件下(目标刺激出现在被提示过的位置上),相比中性线索(提示线索为双箭头,不指向任何位置)的情况,被试能够更准确地探测到目标(运动点的速度的变化)的出现。在特征注意条件下,研究者发现无论目标出现在左侧还是右侧视野,对目标运动方向的提示均能提高正确率。该实验结果表明,提供空间线索和特征线索均能使任务表现提升,更重要的是,在空间注意条件下,与特征注意条件相比,注意效应出现得更早,即在线索呈现到目标呈现的时间间隔(stimulus onset asynchrony, SOA)更短的情况下出现,但是当 SOA 为 500 ms 时,两种注意产生的效应大致相等。

#### 3.2. 基于外部噪声范式的实验研究

外部噪声范式(equivalent-noise paradigm)一般使用阈限-噪声(threshold vs noise, TvN)曲线描绘知觉阈限和添加到目标刺激上的外部噪声数量之间的函数关系。大脑的信息处理过程受到内部刺激的可变性、感受器取样误差、神经元响应的随机性以及神经传导中的信息丢失等因素的限制。在整个系统水平上,这些限制因素可以用等效的内部噪声进行量化。等效内部噪声的数量通过系统地操纵添加到信号刺激的外部噪声的数量(类似于电视里的黑白雪花)和观察阈值(被试保持某一特定的表现水平所需的信号刺激强度)怎样依赖外部噪声的数量而估计出来(Dakin, Mareschal, & Bex, 2005; Doshier & Lu, 2000a, 2000b; Lu & Doshier, 1999; Pelli & Farell, 1999)。

Ling, Liu 和 Carrasco(2009)的研究中,采用外部噪声范式(外部噪声的量值通过操纵运动点阵的运动方向一致性实现),得出了被试在运动辨别任务中的阈限-噪声曲线。在空间注意的条件下,线索化四个可能的空间位置中的一个,要求被试判断该位置上或其他未线索化过的位置上的点阵的运动方向,任务是二择

一的迫选任务(2AFC),即要求判断点阵顺时针还是逆时针运动;在特征注意条件下,只在屏幕中央呈现点阵,线索化四个可能的运动方向中的一个,此时的线索也作为参照刺激,被试的任务是判断随后出现的目标刺激与线索刺激相比,是顺时针还是逆时针运动了。研究表明,在特征注意的条件下,高外部噪声水平和低外部噪声水平被试辨别运动方向的敏感性均得到提高,体现为在所有外部噪声水平上的阈限值降低(gain change 和 tuning change);而在空间注意的条件下,只有在低外部噪声的情况下阈限值显著降低(gain modulation)。

### 3.3. 基于视觉掩蔽范式的实验研究

视觉掩蔽(visual masking)是指某个物体因另一在空间或时间上与其相邻的物体的呈现而导致可见度降低的现象(Enns & Di Lollo, 2000)。目标刺激称为“靶”(target) (呈现时间一般小于 50 ms),而另一个导致目标物可见度降低的刺激,则称为“掩蔽物”(mask)。在研究空间注意和特征注意的实验中,多采用时间或空间上与目标刺激相同的线索作为掩蔽物。通过系统操纵掩蔽物与目标刺激之间的差异程度,可以得出知觉的调谐曲线(Legge & Foley, 1980)。

在 Baldassi 和 Verghese (2005)的实验中,目标刺激是朝向为 0°的正弦光栅,以 0°(中性条件)、14°、45°的光栅作为掩蔽物,通过线索化刺激的位置或者朝向,得出了行为的调谐曲线。结果表明,在空间注意的条件下,朝向选择的调谐曲线发生了整体下移,即阈限均下降;而在特征注意的条件下,朝向选择的调谐曲线形成了一个双峰分布。因此,研究者提出空间注意起作用的机制是重新分配单个知觉探测器的权重,从而使使得整体的调谐曲线发生改变,这种机制类似于改变增益(gain change);而特征注意起作用的机制是只增强对应于被注意特征的探测器的权重,而不影响其它探测器的权重,类似于改变调谐(tuning change)。

### 3.4. 基于反向相关技术的实验研究

反向相关技术(reverse correlation technique)来自于神经生理学领域,主要用于研究感受野的时间-空间结构特征以及神经元调谐曲线的特性。例如,使用快速闪动和变化的光栅测试序列来获得细胞的方位选择性。通过对刺激序列和细胞反应序列进行反向相

关分析后获得一个两维的时间-方位反应数组。而心理物理学实验中使用的是其变式。例如,在经典的运动逆向相关范式(motion reverse correlation, MRC)中,刺激为快速呈现的方向不同的运动点序列,同时记录神经元的放电活动,通过相关分析能得出这个运动序列显示的时序动态运动选择性,表现为特定时间点上某个特定运动方向引发的神经元动作电位的概率。类似地,心理物理学实验中采用 MRC 范式得到的是方向选择性的知觉调谐曲线,反映了被试对微小的、噪声驱动的刺激变化的敏感性,具有较高的时间分辨率(Neri, 2004; Neri & Levi, 2006, 2008; Tadin, Lappin, & Blake, 2006; Wyart, Nobre, & Summerfield, 2012)。

Busse, Katzner, Tillmann 和 Treue (2008)的研究中采用了 MRC 范式,要求被试进行一项双任务实验。主要任务是在每个试次(15 s)结束后报告中心注视点明度变化的次数(0~3 次);次要任务是在一个快速呈现在左侧或右侧视野的运动点序列中探测某个预先指定的运动方向。在两种不同的条件下(中心注视点明度变化更易觉察或者更难觉察),分配给次要任务的注意资源是不同的。研究结果发现,空间注意和特征注意均能增大知觉调谐曲线的幅度,但对其宽度并未造成影响。

## 4. 空间效应和特征效应的电生理研究

以上主要基于心理物理和行为实验,而神经生理学关注的主要问题是:在神经元水平上,选择性注意的调制作用是如何实现的?特征注意和空间注意对知觉过程产生的影响是否相同?两者是否基于相同的神经机制?已有的电生理研究显示了不同的结果。

通过系统地操纵空间注意和特征注意,David, Hayden, Mazer 和 Gallant (2008)观察记录了二者对 V4 区神经元响应的调制作用。研究表明,空间注意影响神经元的基线活动水平以及增益调控,但是并未改变神经元的调谐曲线;特征注意既影响神经元的基线活动水平以及增益调控,同时使调谐曲线朝着被注意的特征发生了移动,并且不论空间注意被导向感受野之内还是之外,均能观察到特征注意的这种调制作用。因而研究者提出,空间注意和特征注意基于不同的神经机制。

Patzwahl 和 Treue (2009)研究了注意对视皮层 MT 区神经元方向选择性响应模式的影响。研究者将不

同运动方向的半透明点阵重叠在一起呈现于猴子的感受野, 这样它们就占据了空间中的同一位置, 从而排除空间注意影响。通过训练, 猴子能够选择性地注意不同运动方向的点阵。当刺激分别呈现于左右视野, 此时空间注意和特征注意均会产生影响。实验结果表明, 当刺激呈现于中央时, 特征注意对神经元集群的调制幅度是刺激分别呈现于左右视野时的两倍, 并且在单个神经元上, 空间注意和特征注意的调制幅值具有相关关系。因此, 研究者提出, 可能空间注意和特征注意具有相同的神经机制, “空间位置”并不特殊, 它只是“特征”中的一种类型。

为了探讨空间注意和特征注意是否基于相同的神经机制, Cohen 和 Maunsell (2011) 训练恒河猴对正弦光栅的变化进行眼动反应。研究者通过线索化光栅发生变化的空间位置(左视野或右视野)以及光栅发生变化的特征(朝向或空间频率), 从而系统地操纵了空间注意和特征注意。对恒河猴大脑左右半球 V4 区神经元活动的记录表明, 空间注意以及特征注意均能影响神经元集群的增益调控, 但是不同于空间注意只作用于相对集中的局部神经元群体, 特征注意能对分布更广(大脑的同侧和对侧半球)的神经元群体活动产生影响。因此, 研究者认为空间注意和特征注意具有相似的神经机制, 但是涉及不同的认知加工过程。

## 5. 研究展望

综上, 不同的研究显示了不同的结果。在行为实验领域, Ling 等人认为空间注意作用于视知觉的机制是改变调谐, 特征注意起作用的机制是基于增益改变和调谐改变。而 Baldassi 和 Verghese (2005) 的研究结果表明, 空间注意能改变增益, 而特征注意的作用则是改变调谐。在电生理研究领域, David 等人(2008)认为空间注意和特征注意基于不同的神经机制, 而 Patzwahl 和 Treue (2009)认为二者具有相同的神经机制。目前我们还很难统一地解释这些研究结果的差异。

已有的关于空间注意和特征注意之间关系的研究存在一定的问题。由于空间效应和特征效应的获得条件很不相同, 对两者的作用还不能得出明确的结论。例如, 在空间线索条件和特征线索条件下所使用的刺激是不相同的, 因而难于进行比较(e.g., Baldassi & Verghese, 2005; Theeuwes, 1989)。更为重要的是, 空

间和特征因素在同一个实验中经常是分开考虑的, 很少有实验将两者联合起来考察。研究者更多的是对两种注意进行区分, 并未考察两者的联合作用。而这一类研究往往具有较高的生态学效度, 例如, 现实生活中, 当我们在人群中寻找一个朋友时, 我们并不仅仅搜寻朋友可能会在的地方, 而且我们也不会仅仅依靠上衣的颜色来寻找他, 如果我们能知道朋友的大概方位以及他的上衣颜色, 并将这两种线索结合, 那么, 相比只有单个线索的情况下, 可以预期我们的搜索能力会有所提高。因此, 对两种注意的独立或者联合的作用进行系统地考察可以作为未来关于选择性注意研究的一个重要方向。

事实上, 人类视觉注意的选择性具有更大的灵活性和适应性。例如, 当环境仅由静态、单一的客体组成时, 注意的选择机制就不需要使用相对复杂的基于特征的信息, 而使用基于位置的选择性机制可能需要更少的资源, 相应地在这种情况下认知加工就更快速。相反, 当环境由动态和静态客体共同组成时, 就可能需要基于特征和基于空间的框架, 而这时基于位置和基于特征的选择性注意可能发生相互作用。但是, 目前对基于位置和基于特征的选择性注意之间的具体关系尚不清楚。因为基于特征的机制的使用并不排除基于位置的机制的使用, 也有可能基于特征的机制在某种程度上一直结合了基于空间位置的机制。此外, 基于位置和基于特征的选择性注意可能涉及不同的神经机制, 存在彼此分离的可能性, 这都为以后提出了新的研究方向。

## 参考文献 (References)

- Allport, D. A. (1971). Parallel encoding within & between elementary stimulus dimensions. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *10*, 104-108.
- Baldassi, S., & Verghese, P. (2005). Attention to locations and features: Different top-down modulation of detector weights. *Journal of Vision*, *5*, 556-570.
- Busse, L., Katzner, S., Tillmann, C., & Treue, S. (2008). Effects of attention on perceptual direction tuning curves in the human visual system. *Journal of Vision*, *8*, 1-13.
- Cohen, M. R., & Maunsell, J. H. (2011). Using neuronal populations to study the mechanisms underlying spatial and feature attention. *Neuron*, *70*, 1192-1204.
- Carrasco, M. (2011). Visual attention: The past 25 years. *Vision Research*, *51*, 1484-1525.
- David, S. V., Hayden, B. Y., Mazer, J. A., & Gallant, J. L. (2008). Attention to stimulus features shifts spectral tuning of V4 neurons during natural vision. *Neuron*, *59*, 509-521.
- Doshier, B. A., & Lu, Z. L. (2000a). Mechanisms of perceptual attention in precuing of location. *Vision Research*, *40*, 1269-1292.

- Dosher, B. A., & Lu, Z. L. (2000b). Noise exclusion in spatial attention. *Psychological Science, 11*, 139-146.
- Dakin, S. C., Mareschal, I., & Bex, P. J. (2005). Local and global limitations on direction integration assessed using equivalent noise analysis. *Vision Research, 45*, 3027-3049.
- Enns, J. T., & Di Lollo, V. (2000). What's new in visual masking? *Trends in cognitive sciences, 4*, 345-352.
- Eckstein, M. P., Shimozaki, S. S., & Abbey, C. K. (2002). The footprints of visual attention in the Posner cueing paradigm revealed by classification images. *Journal of Vision, 2*, 25-45.
- Eriksen, C. W., & Murphy, T. D. (1987). Movement of attentional focus across the visual field: A critical look at the evidence. *Attention, Perception, & Psychophysics, 42*, 299-305.
- Folk, C. L., Remington, R. W., & Johnston, J. C. (1992). Involuntary covert orienting is contingent on attentional control settings. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 18*, 1030-1044.
- Herrmann, K., Montaser-Kouhsari, L., Carrasco, M., & Heeger, D. J. (2010). When size matters: Attention affects performance by contrast or response gain. *Nature Neuroscience, 13*, 1554-1559.
- Inman, M. (2006). Tuning in to how neurons distinguish between stimuli. *PLoS Biology, 4*, e118.
- Legge, G. E., & Foley, J. M. (1980). Contrast masking in human vision. *Journal of the Optical Society of America, 70*, 1458-1471.
- Ling, S., Liu, T., & Carrasco, M. (2009). How spatial and feature-based attention affect the gain and tuning of population responses. *Vision Research, 49*, 1194-1204.
- Liu, T., Stevens, S. T., & Carrasco, M. (2007). Comparing the time course and efficacy of spatial and feature-based attention. *Vision Research, 47*, 108-113.
- Lu, Z. L., & Dosher, B. A. (1998). External noise distinguishes mechanisms of attention. *Vision Research, 38*, 1183-1198.
- Lu, Z. L., & Dosher, B. A. (1999). Characterizing human perceptual inefficiencies with equivalent internal noise. *Journal of the Optical Society of America A, 16*, 764-778.
- Lu, Z. L., & Dosher, B. A. (2008). Characterizing observers using external noise and observer models: Assessing internal representations with external noise. *Psychological Review, 115*, 44-82.
- Lu, Z. L., Lesmes, L. A., & Dosher, B. A. (2002). Spatial attention excludes external noise at the target location. *Journal of Vision, 2*, 312-323.
- Martinez-Trujillo, J. C., & Treue, S. (2004). Feature-based attention increases the selectivity of population responses in primate visual cortex. *Current Biology, 14*, 744-751.
- Mazer, J. A. (2011). Spatial attention, feature-based attention, and saccades: Three sides of one coin? *Biological Psychiatry, 69*, 1147-1152.
- McAdams, C. J., & Maunsell, J. H. (2000). Attention to both space and feature modulates neuronal responses in macaque area V4. *Journal of Neurophysiology, 83*, 1751-1755.
- Neri, P. (2004). Attentional effects on sensory tuning for single-feature detection and double-feature conjunction. *Vision Research, 44*, 3053-3064.
- Neri, P., & Levi, D. M. (2006). Receptive versus perceptive fields from the reverse-correlation viewpoint. *Vision Research, 46*, 2465-2474.
- Neri, P., & Levi, D. M. (2008). Temporal dynamics of directional selectivity in human vision. *Journal of Vision, 8*, 1-11.
- Pashler, H., & Johnston, J. C. (1998). Attentional limitations in dual-task performance. In H. Pashler (Ed.), *Attention* (pp. 155-189). Hove: Psychology Press/Erlbaum (UK) Taylor & Francis.
- Patzwahl, D. R., & Treue, S. (2009). Combining spatial and feature-based attention within the receptive field of MT neurons. *Vision Research, 49*, 1188-1193.
- Pelli, D. G., & Farell, B. (1999). Why use noise? *Journal of the Optical Society of America A, 16*, 647-653.
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 32*, 3-25.
- Remington, R. W., Folk, C. L., & McLean, J. P. (2001). Contingent attentional capture or delayed allocation of attention? *Perception & Psychophysics, 63*, 298-307.
- Reynolds, J. H., & Chelazzi, L. (2004). Attentional modulation of visual processing. *Annual Review of Neuroscience, 27*, 611-647.
- Reynolds, J. H., & Heeger, D. J. (2009). The normalization model of attention. *Neuron, 61*, 168-185.
- Solso, R. L., Maclin, M. K., & Maclin, O. H. (2005). *Cognitive psychology* (7th ed., pp. 82-83). Beijing: Peking University Press.
- Tadin, D., Lappin, J. S., & Blake, R. (2006). Fine temporal properties of center-surround interactions in motion revealed by reverse correlation. *Journal of Neuroscience, 26*, 2614-2622.
- Theeuwes, J. (1989). Effects of location and form cuing on the allocation of attention in the visual field. *Acta Psychologica, 72*, 177-192.
- Tsal, Y. (1983). Movement of attention across the visual field. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 9*, 523-530.
- Williford, T., & Maunsell, J. H. (2006). Effects of spatial attention on contrast response functions in macaque area V4. *Journal of Neurophysiology, 96*, 40-54.
- Wyart, V., Nobre, A. C., & Summerfield, C. (2012). Dissociable prior influences of signal probability and relevance on visual contrast sensitivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 109*, 3593-3598.