

统计概要表征的内容与机制*

仝 可^{1,2} 唐 薇^{1,2} 陈文锋¹ 傅小兰¹

(¹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)

(²中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要 人类能够快速提取集合刺激中的统计信息, 并形成以集中趋势和变异性为主要内容的统计概要表征。根据注意资源的使用, 统计概要表征的加工方式可分为分布式注意下的整体加工和聚焦注意下的个体加工。两种加工在工作记忆中相互影响, 共同构建了对集合刺激的表征。统计概要表征适用于多种刺激类型, 发生在低水平和高水平加工中, 因而可能是一种普遍的知觉加工方式。未来研究可关注统计概要表征的神经基础及其对决策的影响。

关键词 统计概要表征; 集中趋势; 变异性; 整体表征; 抽样策略

分类号 B842

1 引言

由多个体组成的集合刺激在真实生活中十分常见, 人们的很多决策依赖于对集合刺激的加工和判断(例如, 观察球队的阵型并做出调整)。然而, 受制于有限的注意资源, 人类只能对 4 个左右的个体进行同时加工(Cowan, 2001; Luck & Vogel, 1997), 但集合中个体的数量经常超出这个范围。为了更有效的加工集合刺激, 人类必须提取更精炼, 更有概括性的表征(Marr, 1982)。

统计指标(例如, 平均值、标准差)能够描述集合刺激的整体特征, 因而是概括性表征的一个备选方案。幸运的是, 人类可能是“天生的统计学家”, 对环境中的统计指标有很强的主观估计能力, 而且不需要额外的训练(Peterson & Beach, 1967)。越来越多的研究表明, 人类可以提取集合刺激中的统计信息并形成统计概要表征(statistical summary representation)。用统计指标来表征集合刺激是一种高效的加工方式, 对统计概要表征的研究有助于我们理解知觉系统如何处理海量信息。

本文首先分析介绍了统计概要表征的主要内

容和机制, 然后在此基础上提出了一个整合性的研究框架, 为该领域的已有研究提供了全局背景。文章最后给出了对未来研究的展望。

2 统计概要表征的内容

集中趋势(central tendency)和变异性(variability)是描述集合数据的主要指标, 相应的, 集中趋势表征和变异性表征是统计概要表征的主要内容。这两种表征相辅相成, 帮助人们从复杂信息中提取重要内容, 完成各种决策任务。

2.1 集中趋势表征

作为最常用的集中趋势指标, 平均值(mean)被广泛应用于各种对集合刺激的决策任务中(例如, 用平均成绩判断学业水平)。张云帆等(2009)发现, 集合的平均值可以得到自动加工, 同为集中趋势指标的众数(mode)却无法得到自动加工。因此对集合平均值的加工可能具有特异性, 平均值表征可能是集中趋势表征的主要内容(张云帆等, 2009)。

平均值表征可以带来双重加工优势, 既节省了认知资源, 又提高了表征的准确度。首先, 用平均值代表集合的整体强度避免了对每个个体强度的分别表征, 这种加工方式大大减少了集合表征所需的信息量, 从而节省了认知资源(Ariely, 2001)。此外, 平均值还可以带来更高的准确性,

收稿日期: 2015-01-23

* 国家自然科学基金面上项目(31371031), 国家重点基础研究发展计划课题(2011CB302201)。

通讯作者: 陈文锋, E-mail: chenwf@psych.ac.cn

因为内部噪声导致的个体加工误差可以在平均过程中相互抵消,从而形成更准确的综合强度表征(Alvarez, 2011)。然而这种加工优势也有相应的代价,因为平均值仅保留了集合刺激的整体强度信息,无法表征刺激强度在个体间的分布状态等信息。

用平均值表征集合刺激可能是一种普遍的知觉加工方式。一方面,平均表征适用于不同类型的简单刺激。例如在视觉通道中,被试可以对圆点大小(Ariely, 2001; Chong & Treisman, 2003; Im & Chong, 2009)、运动方向(Watamaniuk & Duchon, 1992)、纹理或光栅的朝向(Dakin & Watt, 1997; Parkes, Lund, Angelucci, Solomon, & Morgan, 2001)、明度(Bauer, 2009)、位置(Alvarez & Oliva, 2008)等刺激的平均值进行准确的表征。在视觉通道之外,平均表征还发生在听觉(Holt, 2006; Albrecht, Scholl, & Chun, 2012; Piazza, Sweeny, Wessel, Silver, & Whitney, 2013)、时间知觉(Schweickert, Han, Yamaguchi, & Fortin, 2014)等多种知觉通道。以上研究共同说明对平均值的提取在对不同类型刺激的加工中具有普适性。

另一方面,人类可以对复杂视觉刺激中的高水平信息进行平均表征。例如被试可以准确提取面孔情绪(Haberman & Whitney, 2007, 2009)、吸引力(Rhodes, Maloney, Turner, & Ewing, 2007)、身份(de Fockert & Wolfenstein, 2009; Neumann, Schweinberger, & Burton, 2013)、生物运动(Sweeny, Haroz, & Whitney, 2013)的平均值信息。这说明平均表征发生在视觉加工的不同阶段,进一步支持了这种加工的普适性。

综上所述,人类可以通过提取刺激的平均值来表征集合刺激的集中趋势,其优势是认知资源的节省和表征准确性的提高。平均值表征可能是一种普遍适用的知觉加工方式。

2.2 变异性表征

在很多情境中,人们需要对集合内的变异性进行判断(例如,根据路面高低的变异性来调整行走方向)。错误的变异性知觉可能引发危险的判断(例如,走入崎岖路段导致受伤),因此变异性知觉具有重要的生存意义。变异性表征包含集中趋势表征无法体现的刺激强度分布信息。借助变异性表征,人们可以在集中趋势信息相同或缺失的情况下对集合刺激进行判断(例如,比较不同集合刺激的同质性)。

人类可能用一种或几种统计指标来表征变异性,然而具体使用何种指标尚无定论。标准差(standard deviation)是最有可能的一个候选,因为与其他变异性指标相比,标准差是亮度变异性最有效的描述指标(Moulden, Kingdom, & Gatley, 1990; Bex & Makous, 2002)。当启动刺激和目标刺激的颜色或形状信息的标准差匹配时,后续加工可以得到易化,这说明集合刺激的标准差信息得到了自动加工(Michael, de Gardelle, & Summerfield, 2014)。全距(range)是另一个可能的候选。在成员报告任务中,当探测刺激超出集合刺激的强度范围时,被试报告该刺激为集合成员的比例显著下降,这说明被试能够对集合刺激的全距进行一定程度的表征(Lovie, 1978; Ariely, 2001)。高阶的变异量数也影响主观知觉,例如亮度的偏度(skewness)和峰度(kurtosis)变化被认为和光泽感知觉有关(Motoyoshi, Nishida, Sharan, & Adelson, 2007)。集合内个体的排列顺序也影响主观知觉到的变异性,具有相同平均值和标准差的两个集合,局部变异性大的集合引发的主观变异性更大(Lathrop, 1967)。

另一种可能是,人对变异性的知觉并不对应某种确定的统计指标。研究发现,被试可以比较不同集合变异性的相对水平,却无法对变异性的绝对水平进行准确估计(Beach & Scopp, 1968),判断性的研究也许不能说明被试真的理解或者使用了统计指标去表征集合变异性。对变异性的表征可能是长时间适应与学习的结果,而不存在与统计学对应的指标(Pollard, 1984)。

变异性会影响人们对集合其他特性的加工,高变异性可能导致平均值判断任务正确率的下降(Corbett, Wurnitsch, Schwartz, & Whitney, 2012; Marchant, Simons, & de Fockert, 2013)。有研究者认为变异性调控了对集合的加工方式:人们在面对集合刺激时会先根据标准差或全距进行归类,对相对均匀的集合进行整体加工,对相对离散的集合采取个体加工(Allard & Cavanagh, 2012; Utochkin & Tiurina, 2014)。

综上所述,变异性表征弥补了集中趋势表征对刺激分布描述的不足,为决策提供了更多的参考依据。然而目前只有少量研究直接考察变异性知觉,采用的刺激材料也限制在亮度、颜色等视觉刺激,因此变异性表征是否像平均值表征一样

具有知觉普遍性尚未得知。

3 概要统计表征的机制

研究者对统计概要表征的加工方式提出了两种主要解释,即基于分布式注意的整体加工和基于聚焦注意的个体加工。已有研究表明,统计概要表征的形成可能同时采用了这两种加工方式,并发生在多个加工水平中。统计概要表征的神经基础研究仍处在起步阶段,但已有部分结果提示我们统计概要表征的不同成分可能具有分离的神经基础。

3.1 加工方式

3.1.1 整体加工

整体加工的观点认为视觉系统采用了一种性质上不同于个体加工的机制,将注意资源分摊在所有个体上,对集合刺激进行平行加工。Ariely (2001)先给被试呈现由大小不同的圆点组成的集合,然后呈现单个圆点,要求被试报告该圆点是否出现过。结果发现,当单个圆点大小等于圆点集合的平均值时,被试报告出现过的频率最高,报告出现过的频率随单个圆点大小与平均值距离的增大而减小,但圆点是否真实出现过对被试的报告影响不大。Ariely (2001)的另一实验要求对单个圆点的大小与圆点集合的平均大小进行比较,发现被试能够准确地完成该任务。两个实验共同说明被试能够准确表征集合平均值,却不能够对集合内的个体进行准确表征。整体平行加工的一个推论是表征水平不会因集合变大而降低,这一点得到了实验支持(Ariely, 2001; Robitaille & Harris, 2001)。进一步研究使用快速序列视觉呈现(rapid serial visual presentation task, RSVP)范式验证了被试在没有对个体进行外显编码的情况下提取了整体的统计信息(Corbett & Oriet, 2011)。变异累加模型(Variation summation modeling, VSM)分析发现,整体加工的内部噪声显著低于个体加工的内部噪声,也支持了统计概要表征采用整体加工的观点(Im & Halberda, 2013)。

整体加工观点认为统计概要表征的形成是自动的,主要证据有四点。首先,人们可以快速提取集合刺激的统计信息。平均值和变异性表征可以在 100 ms 内完成(Chong & Treisman, 2003; Michael et al., 2014)。第二,任务无关的刺激也会形成平均表征,可能说明平均值提取在选择性注

意之前自动完成(Oriet & Brand, 2013)。第三,被试提取圆点大小平均值的能力不会因为注意分配而降低(Chong & Treisman, 2005b),并能够在注意资源被主任务占据的条件下完成平均值任务(Alvarez & Oliva, 2009)。第四,被试在不能检测到局部变化的情况下依然可以检测到整体的变化(Haberman & Whitney, 2011),说明整体信息的提取可能不受注意资源的限制。

在整体加工观点下,集合中的个体信息充满了噪声而难以被单独加工,分布式注意(distributed attention)将个体信息整合并提取统计信息,进而引导注意焦点的移动(Chong & Treisman, 2005a; Corbett & Melcher, 2014a)。统计概要表征的功能性可能体现在注意资源不足情况下,例如当无法精细加工处在外周视野的多个个体时,视觉系统会提取这些个体的统计信息,从而用较少的加工资源完成对外周视野的加工(Whitney & Levi, 2011)。

3.1.2 个体加工

有研究者对整体加工提出了质疑,认为平行加工不是必须的,被试选取少数个体进行个体加工即可达到之前研究中对集合的表征水平(Myczek & Simons, 2008)。基于个体的抽样加工策略认为被试将有限的注意资源集中在从集合中抽取的少数样本上,并对其进行精细加工,然后通过样本信息来推断集合整体的信息。这种策略的推论是,在统计概要表征任务中,被试没有采用与个体表征不同的机制。与前述研究结果相反,部分研究中被试统计表征的水平随集合样本量增大而下降,支持了抽样加工理论(Allik, Toom, Raidvee, Averin, & Kreegipuu, 2013; Marchant et al., 2013)。

在抽样加工策略中,聚焦注意(focused attention)参与统计概要表征的形成,并且聚焦注意下的个体加工在统计概要表征中占据重要地位。de Fockert和Marchant (2008)在研究中引导被试将注意资源集中到集合中的某个个体上,然后让被试完成平均值判断任务,发现被试对平均值的表征偏向于被注意个体。这说明统计概要表征受聚焦注意的调控(de Fockert & Marchant, 2008)。Myczek和Simons (2008)利用抽样策略来模拟平均值判断任务,发现抽样加工少数个体可以达到先前整体加工研究中的表现水平。

抽样加工观点质疑了统计概要表征加工的自

动性,尤其对自动性的判断标准提出了批评。以加工速度为例,有研究者认为先前研究中没有对刺激加以掩蔽,实际加工时间可能更长(Whiting & Oriet, 2011)。另外,统计概要表征的不同部分可能有不同的自动性:有自动加工的一部分(Chong & Treisman, 2005a),也有一部分受到注意资源的限制(Brand, Oriet, & Tottenham, 2012)。

3.1.3 整体加工与个体加工的整合

整体加工和个体加工并不一定是排他性的两种解释,对集合刺激的加工可能同时采用了这两种加工方式(Allik, Toom, Raidvee, Averin, & Kreegipuu, 2014)。

一方面,对整个视野采用绝对的平行加工的说法并不符合现实。因为在现实场景中,注意资源在视野中的分配是动态且不均匀的。注意焦点并非固定不动,中央视野随着注意焦点移动,占据大量注意资源,仅有少量注意资源分配在外周视野。绝对的平行加工要求注意资源完全平均分配,与事实不符。然而这不意味着平行加工是不存在的,平行加工可能发生在局部视野(尤其是在注意资源稀少的外周视野),或者是同质性比较高的整体视野(Utochkin & Tiurina, 2014)。另一方面,绝对的个体加工亦不可行,因为有限的注意资源无法支持对每个个体的加工。

因此,更可能的解释是整个视野内的个体同时参与统计概要表征的加工,区别在于加工方式和所占权重。在加工方式上,外周视野统计概要信息的提取更依赖于自动加工,而中央视野更依赖于主动加工。中央视野的个体获得了更多的注意资源,因此在最终的统计概要表征中占据更大的权重。

来自工作记忆研究的证据表明两种加工之间存在相互影响。前文提到整体表征会偏向受注意的个体(de Fockert & Marchant, 2008),相应的,被试对个体的记忆亦会偏向整体平均值(Brady & Alvarez, 2011)。这说明对整体和个体的表征同时存在于工作记忆中并相互影响,统计概要表征不是将每个个体独立存储,而是在多个抽象级别上编码,并存在跨级别整合(Brady & Alvarez, 2011; Walker & Vul, 2013)。整体加工也会导致个体加工的表征偏差,由于自动发生的整体加工没有对个体进行区分,任务无关个体会通过整体加工间接地干扰任务相关个体在工作记忆中的表征(Dubé,

Zhou, Kahan, & Sekuler, 2014)。

综上,统计概要表征应该存在至少两种加工方式,整体加工和个体加工都有助于人类对集合刺激的知觉,并且两者在工作记忆中存在相互影响。

3.2 加工水平

如前文所述,人类既可以对多种低水平刺激(例如,圆点大小、光栅朝向)进行统计概要表征,也可以对多种高水平刺激进行统计概要表征。Haberman 和 Whitney (2007)采用面孔刺激研究人们对情绪的统计概要表征,发现被试可以准确的提取多张面孔中的平均情绪。后续研究发现,视觉系统也可以提取性别(Haberman & Whitney, 2007)、种族(Jung, Bülthoff, Thornton, Lee, & Armann, 2013)等高水平信息的统计概要表征。de Fockert 和 Wolfenstein (2009)用面孔集合作为刺激材料,让被试完成成员身份判断任务,结果被试报告用面孔集合软件合成的平均脸为集合成员的比例显著高于真实的集合成员,由此推论,统计概要表征在面孔身份这一高水平维度上也适用。

与采用倒立或打乱的面孔集合作为刺激的试次相比,被试在采用正立面孔集合作为刺激时表现出更好的平均情绪判断能力,这说明被试在完成平均情绪判断任务时依靠的是高水平情绪信息,而非低水平图像特征(Haberman & Whitney, 2009)。Sweeny 和 Whitney (2014)研究群体注视朝向的平均表征,刺激材料用瞳孔朝向和面孔朝向两种局部特征的组合来构成注视朝向,发现被试可以生成注视朝向的平均表征,而且这种表征并不基于某种局部特征,而基于两种局部特征整合而成的整体特征。此外,脑成像研究表明被试对集合刺激的疏密程度的知觉依赖于集合物体比例等高水平信息,而非间距、空间频率等低水平信息(Cant & Xu, 2014)。对高水平类别信息的加工可能使得由不同类别物体组成的集合刺激具有加工优势(Cohen, Konkle, Rhee, Nakayama, & Alvarez, 2014)。上述研究说明人类确实可以对集合刺激中的高水平信息进行统计概要表征。

统计概要表征可能发生在视觉加工的多个层级上(Sweeny & Whitney, 2014),它不仅影响人们对集合刺激大小、纹理等特征的知觉(Ariely, 2001; Dakin, Bex, Cass, & Watt, 2009),也影响对群体社会性信息的认知(Haberman & Whitney, 2007; Sweeny et al., 2013)。群体的注意朝向比个人的注

意朝向表现出更多的社会性信息, 因此, 对具有社会性线索的高水平刺激进行统计概要表征可能具有进化意义(Gallup et al., 2012)。

3.3 神经机制

统计概要表征的脑机制研究尚处于起步阶段。初步研究表明, 平均表征的发生应该形成于初级视皮层之后。Joo, Shin, Chong 和 Blake (2009) 用双眼分视范式研究对圆点大小的平均表征, 结果发现, 控制左右两眼的视觉输入, 让两眼内容互相遮蔽时, 被遮蔽的元素不再对平均表征有贡献, 这说明平均值表征采用的刺激信息是在双眼融合之后的阶段进行表征的, 而视觉信息的双眼融合被认为发生在初级视皮层之后(Hubel & Wiesel, 1968; Poggio & Fischer, 1977)。

此外, 统计表征的不同内容可能有不同的神经基础。Bonin, Mante 和 Carandini (2006)研究了猫的外侧膝状体(lateral geniculate nucleus, LGN)对不同统计表征的敏感度, 发现 LGN 对视觉刺激的亮度标准差具有特异性激活。这说明 LGN 可能是处理亮度变异性信息的重要区域。Cant 和 Xu (2012) 采用 fMRI 适应范式考察了人类被试对物体集合的平均表征激活脑区, 发现人的前内侧腹侧视觉皮层(anterior-medial ventral visual cortex)在平均表征中起重要作用。Michael 等(2014)指出了统计概要表征形成的两种可能通路: 一是负责高水平抽象表征的腹侧通路, 二是依赖于与主旨加工和内隐注意相关的背侧通路。然而这种表达非常宽泛, 统

计概要表征有很大的可能是依赖于多条通路, 未来研究需要将范围缩小, 具体到特定功能结构。

4 统计概要表征的整合框架

前述研究表明, 人类能够对集合刺激形成统计概要表征, 这种表征包含了集合的集中趋势和变异性信息, 可能存在多种加工方式和加工水平。通过分析整合, 已有研究可以被纳入图 1 所示的研究框架。

该框架包含两条主要通路: 基于分布式注意的整体表征通路和基于聚焦注意的个体表征通路。两条通路的设定解决了统计概要表征加工范围和加工方式研究中现存的矛盾。在该框架下, 完整视野内的集合刺激都参与统计概要信息的提取和加工, 整体加工和个体加工共同完成对集合刺激的表征。

两条通路在加工完成后汇合, 统计概要表征的不同成分共同存储在工作记忆中。已有研究发现整体表征和个体表征在工作记忆中存在相互影响, 这种影响是否发生在两条通路的加工阶段仍需进一步研究考察。完整的统计概要表征提供了对集合刺激的认识, 与先验知识一起影响人们对集合刺激的决策判断。

5 研究展望

图 1 所示的研究框架体现了统计概要表征研究的三个重要问题: 注意资源分配、表征内容和

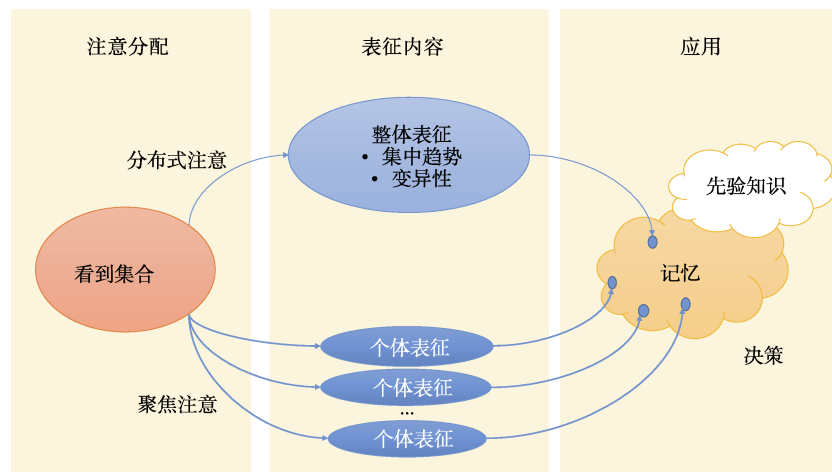


图 1 统计概要表征的整合框架

表征的应用。对于这三个问题,尽管前述研究已经有了初步的理解,但仍然存在许多尚未解决或触及的地方等待未来研究的深入考察。

首先,加工速度是已有研究中自动化讨论的主要标准(Chong & Treisman, 2003; Michael et al., 2014; Whiting & Oriet, 2011),但自动化加工的其他重要标准——无意识、任务无关、特定神经激活等(Moors, 2013)——尚未得到充分研究。自动化推论人们对单个集合形成统计概要表征时不受样本量限制,然而同时形成多个统计概要表征却受到集合数目的限制(Attarha, Moore, & Vecera, 2014),这说明不同级别的概要表征可能有不同的加工方式。此外,以往研究更多关注刺激特性对注意资源分配自下而上的调控(Alvarez & Oliva, 2009),但鲜有研究考察先验知识、任务要求等高水平因素对统计概要表征加工自上而下的影响。

第二,目前研究的统计概要表征内容主要是集中趋势和变异性,但这两者可能不是全部。例如,在匹配了集中趋势和变异性信息的前提下,形状信息仍会影响物体在外周视野的加工(Alexander, Schmidt, & Zelinsky, 2014)。此外,前述研究表明集中趋势和变异性表征存在相互作用,但这是否暗示着两者共享某些的神经机制目前尚未可知。已有研究主要采用行为学实验范式,无法提供直接证据回答以下问题:统计概要表征的不同成分共用一条加工通路吗?不同成分的形成是否由特定脑区负责?分别发生在哪个阶段?研究者需要借助影像学技术考察以上问题,这将对研究视觉系统处理统计信息的基本模式提供重要参考。

第三,统计概要表征带来了许多加工优势,如节省注意资源、提高准确度(Alvarez, 2011)和维护视觉稳定性(Corbett & Melcher, 2014a, 2014b)等,但这些优势的应用价值还没有得到充分讨论。如前文所述,对集合刺激统计信息的判断可能是很多情境中决策成败的关键,因此统计概要表征的应用价值可能体现在对决策的影响上(de Gardelle & Summerfield, 2011)。在考察统计概要表征的决策意义时,先前研究采用的实验刺激可能面临生态效度不足的问题(例如,被试在情绪实验中看到的刺激是单色背景下的一个个孤立的人脸,而类似刺激不符合真实的决策场景)。同样,已有研究范式中直接要求被试判断刺激的平均值或变异性,这也与日常决策场景有很大区别,因

为人们往往没有意识到统计指标而内隐地依靠统计指标做决策。提升实验范式和刺激材料的生态效度可能是研究统计概要表征与决策关系的必要条件。

最后,还有两个尚未得到关注但值得研究的问题:(1)个体差异。统计概要表征的能力在不同群体间可能存在差异,量化这种能力在人力资源规划上可能有重要意义,因为某些职业,如交通调度或安全检查,高度依赖于对集合刺激(车流、人群)的表征能力。(2)可塑性。人类对统计信息的知觉能力可能是一种适应性的进化结果,是知觉系统受环境输入信息塑造而得来的。研究者可通过创造新异视觉环境来考察统计概要表征的属性是否会在适应环境的过程中发生变化。

参考文献

- 张云帆, 周吉帆, 冯成志, 尹军, 王烜, 沈模卫. (2009). 客体特征统计属性表征机制的特异性. *应用心理学*, 15(2), 99-105.
- Albrecht, A. R., Scholl, B. J., & Chun, M. M. (2012). Perceptual averaging by eye and ear: Computing summary statistics from multimodal stimuli. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 74, 810-815.
- Alexander, R. G., Schmidt, J., & Zelinsky, G. J. (2014). Are summary statistics enough? Evidence for the importance of shape in guiding visual search. *Visual Cognition*, 22, 595-609.
- Allard, R., & Cavanagh, P. (2012). Different processing strategies underlie voluntary averaging in low and high noise. *Journal of Vision*, 12(11), 6.
- Allik, J., Toom, M., Raidvee, A., Averin, K., & Kreegipuu, K. (2013). An almost general theory of mean size perception. *Vision Research*, 83, 25-39.
- Allik, J., Toom, M., Raidvee, A., Averin, K., & Kreegipuu, K. (2014). Obligatory averaging in mean size perception. *Vision Research*, 101, 34-40.
- Alvarez, G. A. (2011). Representing multiple objects as an ensemble enhances visual cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 15, 122-131.
- Alvarez, G. A., & Oliva, A. (2008). The representation of simple ensemble visual features outside the focus of attention. *Psychological Science*, 19, 392-398.
- Alvarez, G. A., & Oliva, A. (2009). Spatial ensemble statistics are efficient codes that can be represented with reduced attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106, 7345-7350.
- Ariely, D. (2001). Seeing sets: Representation by statistical

- properties. *Psychological Science*, 12, 157–162.
- Attarha, M., Moore, C. M., & Vecera, S. P. (2014). Summary statistics of size: Fixed processing capacity for multiple ensembles but unlimited processing capacity for single ensembles. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 40, 1440–1449.
- Bauer, B. (2009). Does Stevens's power law for brightness extend to perceptual brightness averaging?. *The Psychological Record*, 59, 171–185.
- Beach, L. R., & Scopp, T. S. (1968). Intuitive statistical inferences about variances. *Organizational Behavior and Human Performance*, 3, 109–123.
- Bex, P. J., & Makous, W. (2002). Spatial frequency, phase, and the contrast of natural images. *Journal of the Optical Society of America A*, 19, 1096–1106.
- Bonin, V., Mante, V., & Carandini, M. (2006). The statistical computation underlying contrast gain control. *The Journal of Neuroscience*, 26, 6346–6353.
- Brady, T. F., & Alvarez, G. A. (2011). Hierarchical encoding in visual working memory: Ensemble statistics bias memory for individual items. *Psychological Science*, 22, 384–392.
- Brand, J., Oriet, C., & Tottenham, L. S. (2012). Size and emotion averaging: Costs of dividing attention after all. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue Canadienne de Psychologie Expérimentale*, 66(1), 63–69.
- Cant, J. S., & Xu, Y. (2012). Object ensemble processing in human anterior-medial ventral visual cortex. *The Journal of Neuroscience*, 32, 7685–7700.
- Cant, J. S., & Xu, Y. (2014). The impact of density and ratio on object-ensemble representation in human anterior-medial ventral visual cortex. *Cerebral Cortex*, doi: 10.1093/cercor/bhu145.
- Chong, S. C., & Treisman, A. (2003). Representation of statistical properties. *Vision Research*, 43, 393–404.
- Chong, S. C., & Treisman, A. (2005a). Attentional spread in the statistical processing of visual displays. *Perception & Psychophysics*, 67, 1–13.
- Chong, S. C., & Treisman, A. (2005b). Statistical processing: Computing the average size in perceptual groups. *Vision Research*, 45, 891–900.
- Cohen, M. A., Konkle, T., Rhee, J. Y., Nakayama, K., & Alvarez, G. A. (2014). Processing multiple visual objects is limited by overlap in neural channels. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111, 8955–8960.
- Corbett, J. E., & Oriet, C. (2011). The whole is indeed more than the sum of its parts: Perceptual averaging in the absence of individual item representation. *Acta Psychologica*, 138, 289–301.
- Corbett, J. E., & Melcher, D. (2014a). Stable statistical representations facilitate visual search. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 40, 1915–1925.
- Corbett, J. E., & Melcher, D. (2014b). Characterizing ensemble statistics: Mean size is represented across multiple frames of reference. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 76, 746–758.
- Corbett, J. E., Wurnitsch, N., Schwartz, A., & Whitney, D. (2012). An aftereffect of adaptation to mean size. *Visual Cognition*, 20, 211–231.
- Cowan, N. (2001). Metatheory of storage capacity limits. *Behavioral and Brain Sciences*, 24, 154–176.
- Dakin, S. C., Bex, P. J., Cass, J. R., & Watt, R. J. (2009). Dissociable effects of attention and crowding on orientation averaging. *Journal of Vision*, 9(11), 28.
- Dakin, S. C., & Watt, R. J. (1997). The computation of orientation statistics from visual texture. *Vision Research*, 37, 3181–3192.
- de Fockert, J. W., & Marchant, A. P. (2008). Attention modulates set representation by statistical properties. *Perception & Psychophysics*, 70, 789–794.
- de Fockert, J., & Wolfenstein, C. (2009). Rapid extraction of mean identity from sets of faces. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 62, 1716–1722.
- de Gardelle, V., & Summerfield, C. (2011). Robust averaging during perceptual judgment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108, 13341–13346.
- Dubé, C., Zhou, F., Kahana, M. J., & Sekuler, R. (2014). Similarity-based distortion of visual short-term memory is due to perceptual averaging. *Vision Research*, 96, 8–16.
- Gallup, A. C., Hale, J. J., Sumpter, D. J. T., Garnier, S., Kacelnik, A., Krebs, J. R., & Couzin, I. D. (2012). Visual attention and the acquisition of information in human crowds. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109, 7245–7250.
- Haberman, J., & Whitney, D. (2007). Rapid extraction of mean emotion and gender from sets of faces. *Current Biology*, 17, R751–R753.
- Haberman, J., & Whitney, D. (2009). Seeing the mean: Ensemble coding for sets of faces. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 35, 718–734.
- Haberman, J., & Whitney, D. (2011). Efficient summary statistical representation when change localization fails. *Psychonomic Bulletin & Review*, 18, 855–859.
- Holt, L. L. (2006). The mean matters: Effects of statistically defined nonspeech spectral distributions on speech categorization. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120, 2801–2817.
- Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1968). Receptive fields and

- functional architecture of monkey striate cortex. *The Journal of Physiology*, 195, 215–243.
- Im, H. Y., & Chong, S. C. (2009). Computation of mean size is based on perceived size. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 71, 375–384.
- Im, H. Y., & Halberda, J. (2013). The effects of sampling and internal noise on the representation of ensemble average size. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 75, 278–286.
- Joo, S. J., Shin, K., Chong, S. C., & Blake, R. (2009). On the nature of the stimulus information necessary for estimating mean size of visual arrays. *Journal of Vision*, 9(9), 7.
- Jung, W. -M., Bülthoff, I., Thornton, I., Lee, S. -W., & Armann, R. (2013). The role of race in summary representations of faces. *Journal of Vision*, 13(9), 861.
- Lathrop, R. G. (1967). Perceived variability. *Journal of Experimental Psychology*, 73(4, Pt.1), 498–502.
- Lovie, P. (1978). Teaching intuitive statistics II. Aiding the estimation of standard deviations. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 9, 213–219.
- Luck, S. J., & Vogel, E. K. (1997). The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature*, 390, 279–281.
- Marchant, A. P., Simons, D. J., & de Fockert, J. W. (2013). Ensemble representations: Effects of set size and item heterogeneity on average size perception. *Acta Psychologica*, 142, 245–250.
- Marr, D. (1982). *Vision: A computational investigation into the human representation and processing of visual information*. WH San Francisco: Freeman and Company.
- Michael, E., de Gardelle, V., & Summerfield, C. (2014). Priming by the variability of visual information. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111, 7873–7878.
- Moors, A. (2013). Automaticity. In D. Reisberg (Ed.), *The Oxford Handbook of cognitive psychology* (pp. 163–175). Oxford: Oxford University Press.
- Motoyoshi, I., Nishida, S., Sharan, L., & Adelson, E. H. (2007). Image statistics and the perception of surface qualities. *Nature*, 447, 206–209.
- Moulden, B., Kingdom, F., & Gatley, L. F. (1990). The standard deviation of luminance as a metric for contrast in random-dot images. *Perception*, 19, 79–101.
- Myczek, K., & Simons, D. J. (2008). Better than average: Alternatives to statistical summary representations for rapid judgments of average size. *Perception & Psychophysics*, 70, 772–788.
- Neumann, M. F., Schweinberger, S. R., & Burton, A. M. (2013). Viewers extract mean and individual identity from sets of famous faces. *Cognition*, 128, 56–63.
- Oriet, C., & Brand, J. (2013). Size averaging of irrelevant stimuli cannot be prevented. *Vision Research*, 79, 8–16.
- Parkes, L., Lund, J., Angelucci, A., Solomon, J. A., & Morgan, M. (2001). Compulsory averaging of crowded orientation signals in human vision. *Nature Neuroscience*, 4, 739–744.
- Peterson, C. R., & Beach, L. R. (1967). Man as an intuitive statistician. *Psychological Bulletin*, 68, 29–46.
- Piazza, E. A., Sweeny, T. D., Wessel, D., Silver, M. A., & Whitney, D. (2013). Humans use summary statistics to perceive auditory sequences. *Psychological Science*, 24, 1389–1397.
- Poggio, G. F., & Fischer, B. (1977). Binocular interaction and depth sensitivity in striate and prestriate cortex of behaving rhesus monkey. *Journal of Neurophysiology*, 40, 1392–1405.
- Pollard, P. (1984). Intuitive judgments of proportions, means, and variances: A review. *Current Psychology*, 3, 5–18.
- Rhodes, G., Maloney, L. T., Turner, J., & Ewing, L. (2007). Adaptive face coding and discrimination around the average face. *Vision Research*, 47, 974–989.
- Robitaille, N., & Harris, I. M. (2011). When more is less: Extraction of summary statistics benefits from larger sets. *Journal of Vision*, 11(12), 18.
- Schweickert, R., Han, H. J., Yamaguchi, M., & Fortin, C. (2014). Estimating averages from distributions of tone durations. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 76, 605–620.
- Sweeny, T. D., Haroz, S., & Whitney, D. (2013). Perceiving group behavior: Sensitive ensemble coding mechanisms for biological motion of human crowds. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 39, 329–337.
- Sweeny, T. D., & Whitney, D. (2014). Perceiving crowd attention ensemble perception of a crowd's gaze. *Psychological Science*, 25, 1903–1913.
- Utochkin, I. S., & Tiurina, N. A. (2014). Parallel averaging of size is possible but range-limited: A reply to Marchant, Simons, and De Fockert. *Acta Psychologica*, 146, 7–18.
- Walker, D., & Vul, E. (2013). Hierarchical encoding makes individuals in a group seem more attractive. *Psychological Science*, 25, 230–235.
- Watamaniuk, S. N. J., & Duchon, A. (1992). The human visual system averages speed information. *Vision Research*, 32, 931–941.
- Whiting, B. F., & Oriet, C. (2011). Rapid averaging? Not so fast!. *Psychonomic Bulletin & Review*, 18, 484–489.
- Whitney, D., & Levi, D. M. (2011). Visual crowding: A fundamental limit on conscious perception and object recognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 15, 160–168.

Statistical Summary Representation: Contents and Mechanisms

TONG Ke^{1,2}; TANG Wei^{1,2}; CHEN Wenfeng¹; FU Xiaolan¹

(¹ State Key Laboratory of Brain and Cognitive Science, Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China) (² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Humans are capable of extracting statistical information from multiple stimuli and forming statistical summary representation (SSR), in which central tendency and variability of the stimuli are represented. According to the use of attentional resource, the mechanisms of SSR could be categorized into ensemble processing under distributed attention and individual processing under focused attention. Both mechanisms interact in the working memory, constructing the representation of multiple stimuli. SSR occurs across different stimulus types in both low-level and high-level processing, suggesting that it may be a common encoding method in perception. Future work on SSR may focus on its neural substrates and its impact on decision making.

Key words: statistical summary representation; central tendency; variability; ensemble representation; sampling strategy