

平均大小的整体感知偏差研究进展及影响因素

蒋双联, 刘继隆, 何东军*

成都医学院心理学院, 四川 成都

收稿日期: 2024年4月20日; 录用日期: 2024年6月5日; 发布日期: 2024年6月14日

摘要

整体感知(Ensemble perception)是指人类视觉系统对一组相似物体或场景的整体特征进行信息提取, 对整组信息汇总统计并进行处理的能力。本篇综述回顾了平均大小的整体感知偏差及其背后的影响因素, 揭示了人类视觉系统在处理复杂视觉环境中的信息时所展现出的独特能力和局限性。研究表明, 尽管我们倾向于将视野中的对象分组并提取每组内部的信息以形成整体的印象, 但存在一种“放大效应”, 即人们倾向于高估一组物体的平均大小。本文梳理了需要进一步研究的关键领域, 包括深入探索选择性注意机制、基于显著性的加权策略, 以及参照对象如何影响平均大小感知。这些研究对于理解人类如何处理复杂视觉环境中的信息具有重要意义, 并为开发能够模拟这些复杂认知过程的人工智能系统提供了更多的启发。

关键词

整体感知, 平均大小, 知觉偏差, 放大效应

Study Progress and Influencing Factors of Bias in Ensemble Perception of Average Size

Shuanglian Jiang, Jilong Liu, Dongjun He*

School of Psychology, Chengdu Medical College, Chengdu Sichuan

Received: Apr. 20th, 2024; accepted: Jun. 5th, 2024; published: Jun. 14th, 2024

Abstract

Ensemble perception refers to the human visual system's ability to extract information about the overall characteristics of a group of similar objects or scenes, and to summarize and process the entire set of information. This review looks back on the biases in the perception of average size in

*通讯作者。

ensemble perception and the underlying influencing factors, revealing the unique abilities and limitations of the human visual system in processing information in complex visual environments. Studies show that, although we tend to group objects in our field of view and extract information within each group to form an overall impression, there is an “amplification effect”, meaning that people tend to overestimate the average size of a group of objects. This article combs through key areas that require further research, including in-depth exploration of selective attention mechanisms, saliency-based weighting strategies, and how reference objects affect the perception of average size. These studies are significant for understanding how humans process information in complex visual environments and provide further insights for the development of artificial intelligence systems capable of simulating these complex cognitive processes.

Keywords

Ensemble Perception, Average Size, Perceptual Bias, Amplification Effect

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

视觉环境中充满了冗余信息，面对复杂的视觉环境，一般情况下我们不仅仅是注意到某单个物体的特征，而是倾向于将视野中的物体进行分组，提取并汇总每组内部的信息，进而形成对整体的印象。例如，我们可以轻松地多盒草莓中挑选出平均大小最大的一盒，这种能力，被称为整体感知。

整体感知是一种分组提取整体信息的方式，它将冗余的视觉信息压缩成具有代表性的统计量，如均值或方差(Ariely, 2001; Dakin & Watt, 1997; Solomon, 2010; Watamaniuk & Duchon, 1992)。整体感知调和了感知错觉(Noe, Pessoa, & Thompson, 2000)，尽管有许多关于意识瓶颈的现象，视觉印象依旧保证了难以置信的完整性(Luck & Vogel, 1997; Rensink, O'Regan, & Clark, 1997; Simons & Chabris, 1999)，视觉系统的整体感知还展现了其高效性(Brady, Shafer-Skelton, & Alvarez, 2017; Chetverikov, Campana, & Kristjánsson, 2017; Haberman & Whitney, 2011; Jazayeri & Shadlen, 2010; Olkkonen, McCarthy, & Allred, 2014)和强大的抗干扰能力(Chong & Treisman, 2005; Haberman & Ulrich, 2019; Sweeny & Whitney, 2014)，这些特性在我们识别个体对象之前便已经发挥作用(Sweeny, Wurnitsch, Gopnik, & Whitney, 2015)，并在视觉处理的多个层面上独立操作(Haberman, Brady, & Alvarez, 2015)。因此，深入探索整体感知的本质对于理解我们如何处理视觉信息至关重要。

尽管早期研究认为无论集合中子集的各方面情况如何，我们对整个集合的平均尺寸大小感知都相当准确(Ariely, 2001; Chong & Treisman, 2005; Robitaille & Harris, 2011)，但是最近的一些研究发现事实并非如此，最近的一些研究发现人们对集合的整体感知会由于知觉放大而产生一种“放大效应”。“放大效应”指的是人们对一组物体的平均大小的评估出现了一个“高估”的现象，就是说对一组物体的整体大小感知到的主观的平均值一般情况下会大于实际的客观平均值。放大效应之所以没有在以往的文献中体现出来，可能是因为以往的这些研究并未直接测量并量化感知平均值(Ariely, 2001; Chong & Treisman, 2005; Robitaille & Harris, 2011)。Kanaya 等人(2018)的研究是首次比较感知平均值和实际平均值，证明了无论是在空间还是时间领域的集合感知中，都存在这种“放大效应”。

此外，早期研究认为对集合信息的提取可能涉及对视觉范围内整个集合的分散注意(Chong & Treis-

man, 2005; Chong et al., 2008), 但最新研究显示, 在信息整合的过程中, 并不是所有项目都被赋予同等的权重(Sweeny & Haroz, 2013; Maule & Franklin, 2016; Dakin, 2001)。近期的荟萃分析揭示, 对于 N 个物体的集合, 至少有 pN 个物体被有效地整合到平均值中(Whitney & Yamanashi, 2018), 这意味着特定项目的权重可能高于其他项目, 且这种权重分配可能受到多种因素影响, 例如任务中视觉注意力的分配(de Fockert & Marchant, 2008)。

另一种可能的策略是基于显著性的加权, 即观察者对视觉上更为显著的项目给予更多的权重。还有研究表明, 计算平均大小时所涉及项目的参照对象也会影响整体感知。例如, 具有深度线索、看似更远的圆, 会被评估为比同一平面上无深度线索的圆更大。这引发了一个问题: 大小的整体感知是否仅仅是输入的直接线性组合, 还是被概念性地转化, 代表了一种更高级的、终极的意识感知? 虽然许多视觉层面的早期计算并不直接反映视觉意识(He, Cavanagh, & Intriligator, 1996), 但有证据表明, 与物体大小的重新缩放相关的计算可能早在视觉处理的 V1 阶段就已经进行(Murray, Boyaci, & Kersten, 2006); 基于刺激的传入角度大小预期的视网膜视觉激活范围更广, 尽管这些激活可能是反馈机制的结果。

本文旨在深入探讨大小的整体感知偏差及其背后的影响因素。通过对最新研究成果的综述, 本文揭示了当前研究的局限性, 并对未来的研究方向提出了展望。认识到集合感知中的放大效应、注意力分配机制、基于显著性的加权策略, 以及参照对象对平均大小感知的影响, 不仅对于理解人类如何处理复杂视觉环境中的信息具有重要意义, 也对于开发能够模拟这些复杂认知过程的人工智能系统提供了新的视角和启示。

2. 选择性注意对平均大小整体感知的影响

在日常生活中, 我们的视觉系统不断地接触到分布于整个场景中的复杂且杂乱的信息, 尽管处理这些信息的资源有限(Palmer, 1990)。为了克服资源限制并优化场景中信息的处理, 我们的视觉系统采取了一项重要策略: 选择性注意。选择性注意是一种自上而下的注意力分配策略, 它通过优先排序需要的信息, 更快更高效地集中注意力于提取信息所需的对象, 从而有效地分配有限的注意力资源(Carrasco, 2011)。这种注意力分配方式可以更高效地处理复杂场景信息并精准的提取到所需信息。研究(de Fockert & Marchant, 2008)证明了自上而下的注意力如何集中在最小或最大的项目上并对集合报告产生偏差。有几项研究指出, 在注意力无法完全集中的情况下也能实现集合编码(Chong & Treisman, 2005; Alvarez & Oliva, 2008), 所以注意力集中与否都在集合编码中发挥着重要作用(Chong & Treisman, 2005; de Fockert & Marchant, 2008; Dakin et al., 2009)。例如, (de Fockert & Marchant, 2008)的研究报告指出单个被注意项目的大小会系统地调节整个项目的感知平均大小。

以往的研究揭示了整体感知与注意力之间的密切联系(Chong & Treisman, 2005; de Fockert & Marchant, 2008; Im, Park, & Chong, 2015; Li & Yeh, 2017)。在计算集合内项目的平均大小过程中, 受到注意力关注的子项目在平均值的计算中被赋予了更多的权重(de Fockert & Marchant, 2008; Li & Yeh, 2017)。当感知集合中多个大小不一的项目的整体平均大小时, 那些被注意力选中的对象可能对整体平均值的贡献大于其他项目。这种由注意力引起的偏差影响了对集合的主观平均值的感知。

研究还发现, 注意力可以改变被注意刺激物的外观(Carrasco & Barbot, 2019), 这意味着对单个项目的选择性注意会增大被注意项目的外观大小, 从而导致整个集合的平均大小被高估。例如, (Kirsch et al., 2018)发现, 当集中注意力于某个圆的情况之下, 无论是外源性还是内源性注意, 都会使被注意圆的感知尺寸增大。此外, 人们对于一个集合的整体平均大小的计算会基于他们感知到的大小, 而非单单就视网膜呈现的物理大小进行评估(Im & Chong, 2009)。因此, 当单个刺激物因注意力的集中而显得感知到的外观大小更大时, 整个刺激集合的外观平均大小也相应增大。

以往的研究通常只测试了有限的大小范围(de Fockert & Marchant, 2008; Li & Yeh, 2017)。虽然这足以证实注意力对平均大小计算的影响,但不足以比较不同的大小尺寸对平均大小计算的相对贡献。因此(Choi & Chong, 2020)的研究扩展了实验中项目大小的范围,使研究更为全面。他们不仅考虑了尺寸大小极端的项目,还考虑了尺寸大小中间的项目,以探索估计误差与项目大小的关系。研究结果支持了注意力、加权平均和知觉放大效应的假设。具体来说,选择性注意通过增加被注意项目的注意力贡献或外观大小,导致集合整体平均值的大小出现偏差。研究还探讨了被注意项目的时间位置和大小如何影响项目集合整体平均大小的计算,发现了支持选择性注意两种效应的证据:加权平均和知觉放大。基于加权平均的假设,估计的集合平均大小应偏向于被注意项目的大小,这表现为随着被注意项目大小如果增大,集合平均大小的主观值与客观值偏差也随之增加。这项研究的发现强化了加权平均作为个体选择性注意结果的观点,与之前的研究(de Fockert & Marchant, 2008; Kanaya et al., 2018; Li & Yeh, 2017)相一致。有部分研究认为,对一个项目的关注可以通过减少内部噪声来提高其精度(Lu & Doshier, 1998),意味着减少的噪声可以提高平均的精度(Baek & Chong, 2020)。因此,如果视觉系统在平均期间根据其相对精度给予关注项目更多的权重,那么平均表示将变得更加精确,并且偏向于被关注项目的大小。

此外,研究(Choi & Chong, 2020)还揭示了知觉放大作为选择性注意的一种效应。在前提示条件下,被注意的三个大小项目的平均大小都被高估了,但在后提示条件下,只有最大的项目的平均大小被高估。这表明,选择性注意通过增加被注意项目的外观大小,导致人们高估了集合的平均大小,与之前的研究结果一致(de Fockert & Marchant, 2008; Li & Yeh, 2017)。然而,当注意力不指向平均化所包含的任一项目时,以往研究未发现平均大小的高估现象(Allik et al., 2013; Baek & Chong, 2020; Lee et al., 2016)。因此,平均大小的高估很可能是由于注意力对单个项目大小尺寸感知的放大所致,特别是在刺激呈现之前(Gobell & Carrasco, 2005)。有研究表明外观大小的增加可能是由于感受野向注意位置的移动(Anton-Erxleben & Carrasco, 2013; Kirsch et al., 2018)。Anton-Erxleben & Carrasco (2013)的研究还提出,被注意的大小之所以看起来更大,是因为被注意的项目由于感受野的转移而激活了更多的神经元。

为了最大限度地利用我们有限的认知资源,视觉系统采用了整体感知和选择性注意这两种互补策略。前者尽可能多地总结信息,后者则优先考虑相关信息。然而,整体感知应灵活多变,不能忽略项目的重要性。同样,优先排序也应考虑到跨选择维度的整体信息。实际上,以往研究表明,平均定大小在特定情境下计算得出的(Cha & Chong, 2018),且选择基于统计总结(Im et al., 2015)。(Choi & Chong, 2020)的发现进一步表明,整体感知是在考虑选择性注意的背景下形成的。注意力通过增加被注意项目的贡献和外观大小,使得平均大小的估计出现了偏差。这些研究结果强调了整体感知和选择性注意之间的动态互动,展示了它们是如何协同工作以有效利用有限的认知资源的。

总之,通过这些研究,我们可以看到选择性注意不仅影响了我们如何感知个体刺激物的大小,而且也影响了我们对群体或集合的整体大小感知。注意力的分配,无论是通过显著性引导还是通过任务驱动的指令,都会导致对平均大小的系统性偏差。这些发现对于理解人类如何从复杂视觉场景中提取有用信息提供了重要视角,并对设计旨在模仿人类视觉处理的计算模型提出了新的要求。

3. 显著性对平均大小整体感知的影响

尽管我们的视觉系统能够在短短的一瞥中捕捉到丰富的场景信息,一系列研究却表明我们整体感知的能力受到一些注意力和认知因素的限制。本篇综述前面部分提到了选择性注意与尺寸大小这种低级属性整体感知之间的关系,但是还存在着另一种策略:“基于显著性”的加权,这是一种自下而上的视觉信息感知策略,人们会对视觉范围内显著性更大的项目投入更多更快的注意力,这种机制促使人们在评估一个集合时,倾向于偏向那些显著的子项目,在不知不觉中为这些显著对象分配更多的权重(Iakovlev &

Utochkin, 2021)。

早期一些研究指出,提取统计摘要信息可能涉及对显示中整组项目的分散注意(Chong & Treisman, 2005; Chong et al., 2008)。但最近的研究表明,在整合过程中不可能对所有显示的项目进行统一加权(Sweeny & Haroz, 2013; Maule & Franklin, 2016; Dakin, 2001)。一项较新的荟萃分析揭示,对于 N 个物体的集合,至少有 pN 个物体在整体感知中被有效地整合进平均值中(Whitney & Yamanashi, 2018),这意味着某些特定项目的权重超过了其他项目。

Kanaya, Hayashi, & Whitney (2018)深入研究了自下而上的决定因素,如显著性在整体感知中对项目抽样所起的作用。该研究通过比较随机加权和基于显著性的加权两种整合策略,探讨了如何表示一组项目的平均值。研究发现,随着集合大小的增加,对平均大小和平均时间频率判断的高估偏差有所增长。这种增长的偏差可能反映了对约 $\sqrt{N}$ 个最突出项目的非随机抽样,即尺寸较大和时间频率(TF)较高的项目更容易被采集到。这表明,当评估一组不同大小的项目时,较大的一部分项目(例如, $\sqrt{4} = 2$)会被优先采样或放大,产生轻微的高估偏差。随着集合项目数增加至 16,仅四分之一(即 $\sqrt{16} = 4$)的最大项目被采样。随着集合大小的增加,除最显著的项目外,几乎无法对任何项目进行采样,导致更严重的高估偏差。

Iakovlev & Utochkin (2021)的后续实验排除了放大效应仅仅是反应偏差的可能性。研究表明,放大效应不是由于集合项目数的简单增加而产生的;它只在具有变异性(如时间频率或尺寸)的集合中出现。视觉搜索任务的结果表明,寻找时间频率值或大小值较大的目标,通常比寻找较小值的目标更快、更有效。这一发现支持了一种观点,即在空间和时间的平均感知中,时间频率较高或者大小的项目更可能被优先加权或采样,从而证实了基于显著性的加权机制的存在。这项研究的一个关键发现是,大项目和小项目都对集合的平均值产生影响,这一点从误差自我标度的范围效应中得到了证明(Dakin, 2001; Fouriezos et al., 2008; Im & Halberda, 2013; Marchant et al., 2013; Maule & Franklin, 2015; Solomon et al., 2011; Sweeny et al., 2013; Utochkin & Tiurina, 2014)。这些结果有力地说明了在集合平均大小感知中基于显著性的加权是如何发挥作用的。特别是,当对集合中的不同大小项目进行平均处理时,较大的项目通过非随机采样被优先考虑,这导致了对平均大小的轻微高估。而这种高估随着集合大小的增加而加剧,因为只有极少数最显著的项目被采样。

实验(Iakovlev & Utochkin 2021)进一步排除了放大效应仅仅反映了反应偏差的可能性。特别是,当集合由同质项目组成时,单纯增加集合大小并不会导致放大效应;这一效应仅在集合具有一定变异性(例如,不同的时间频率或大小)时才会出现。与前两个实验类似的视觉搜索任务也显示,寻找相对较大或时间频率较高的目标比寻找相对较小或时间频率较低的目标更快、更有效,这进一步支持了基于显著性的加权机制在空间和时间平均感知中的作用。

这些研究的意义在于,它不仅阐明了集合中大项目和小项目如何影响集合平均的计算,而且揭示了加权平均和基于显著性的放大效应如何共同作用于我们对集合特性的感知。后续的研究更新了只关注显著项目而完全忽略不显著项目的策略,表明即使在平均值估计中缺乏敏感性和可靠性时,观察者也不会忽视位于极端位置的小项目,即集合平均大小的整体感知虽然首先由于部分大尺寸的显著项目的影响而产生了感知偏差,从而集合整体的平均大小高于平均值,产生一种“放大效应”,但这并不意味着整体感知大过程中会忽略所有其他的项目,人们还会根据小尺寸的显著项目来进行一种“平衡”,以保证整体平均值并不会偏差的太离谱。

4. 大小恒常性对平均大小整体感知的影响

以往的研究已经探索了集合内项目如何根据参照物重新调整尺寸感知的问题(Im & Chong, 2009; Tiurina & Utochkin, 2019)。人们使用多种启发式方法来评估环境中的主要信息,其中尺寸恒定性现象最为

人们熟知(Carlson, 1962; Ross & Plug, 1998)。即使感知距离和视网膜图像尺寸发生变化, 物体尺寸的感知也保持不变。这表明视觉系统结合了距离信息来正确解释物体的大小。Holway 和 Boring (1941 年)首次提出大小距离不变性假说, 但物体大小的重新缩放是否真实取决于观察者在观察场景时被要求采取的视角以及任务的性质(Epstein, Park, & Casey, 1961; Kilpatrick & Ittelson, 1953)。

Im 和 Chong (2009)向观察者展示了一组目标圆, 其两侧分别有或大或小的干扰物, 从而诱发了著名的艾宾浩斯错觉。在典型的观察条件下, 侧面的圆会改变中心目标圆的感知大小(有较大的侧面干扰物的目标看起来小于有较小侧面干扰物的另一个相同尺寸的目标)。在实验中, 研究人员展示了多个“艾宾浩斯集合”, 观察者必须比较屏幕一侧和另一侧目标圆的平均大小。因此, 他们要测试的是, 集合大小感知反映的是目标圆的物理大小, 还是在侧翼物体存在的情况下经过重新调整的感知大小。他们的结果证实了后者; 观察者不太可能将一组被侧翼大圆包围的目标的平均大小报告为大于一组被侧翼小圆包围的目标, 即使两者的平均大小相同。

最近, Tiurina 和 Utochkin (2019)使用了一种巧妙的设计来进一步评估整体大小感知是否考虑了大小恒常性。研究人员立体地呈现了不同大小的圆组, 使得这些圆组出现在注视平面的前面或后面。报告的在固定平面之后出现的圆组的平均尺寸大于固定平面处或前面的平均尺寸, 这与单个物体根据参照物重新估算尺寸一致。在后续实验中, 研究人员要求观察者报告出现在多种深度情况平面上的一组圆组的平均大小。在一半的试验中, 视网膜图像大小和感知深度之间存在反比关系, 这意味着看远处的物体的双眼视轴辐合角度会更小。这种关系与埃默特定律一致, 并且可以有效地减少集合内尺寸的感知范围, 从而提高整体表示精度(Im & Halberda, 2013; Maule & Franklin, 2015)。在另一半的试验中, 这种关系却相反——被认为距离较远的物体会在视网膜上投射出更大的图像。当感知距离与视网膜图像大小呈负相关时, 平均大小判断的误差较小。鉴于这一结果, 研究人员得出较为一致的结论, 在对集合的整体情况感知得出集合的平均值之前, 大脑会重新根据集合内单个项目的参照情况来调整它的大小。

这些实验结果揭示了一个重要的见解: 在形成对集合整体情况的平均值感知之前, 大脑会根据集合内单个项目的参照物重新调整它们的大小。大小感知的深度可能受到双眼深度线索等多种因素的影响, 这反过来又影响了大小的感知(Barlow et al., 1967; Haberman & Suresh, 2020)。特别是, Haberman 和 Suresh (2020)的实验通过操作视觉处理早期出现的双眼深度线索, 进一步支持了集合大小表示反映感知大小而非绝对角度大小的观点。当观察者在存在线性透视线索的条件下观看三角形集合时, 他们倾向于认为具有深度线索的集合总体上比没有深度线索的集合大。这一现象强调了整体感知在视觉处理中比预期的发生得更晚, 特别是当涉及单眼和线性透视的深度线索时, 观察者会经历整体大小的重新缩放(Im & Chong, 2009; Tiurina & Utochkin, 2019)。此外, Haberman & Suresh (2020)的实验展示了, 单个项目被重新调整的程度预测了整体重新调整的程度, 被感知为较远的对象可能比被视为较近的对象对整体重新缩放的贡献更大。

这些发现补充了以往关于大小感知和参照物调整的研究, 揭示了视觉系统如何利用深度线索来改善集合内大小在视网膜上投射更小的图像时, 平均大小判断的误差较小。这表明大脑在评估集合的整体情况之前, 会感知范围, 从而提高对整体情况的评估精度。当深度线索与视网膜图像大小呈负相关时, 即较远物体重新根据单个项目的参照情况来调整它们的大小, 遵循大小恒常性的原则。

5. 结论与展望

在本篇综述中, 我们深入探讨了平均大小的整体感知偏差及其背后的影响因素。我们发现, 尽管人类具有将复杂视觉信息压缩成简单统计量的能力, 但这一过程存在着一些偏差, 就是所谓的“放大效应”, 即人们倾向于高估一组物体的平均大小。此外, 选择性注意和基于显著性的加权等机制在整体感

知中起着关键作用,影响我们对集合特性的感知。

我们还探索了大小恒常性原则在集合尺寸感知中的作用,发现在形成对集合整体的平均值感知之前,大脑会重新根据集合内单个项目的参照物来调整它们的大小。这种调整机制表明,尺寸感知不仅受到直接视觉输入的影响,还受到认知因素如深度线索的影响,这些线索帮助我们更准确地评估环境。

尽管我们已经取得了一定的进展,但在尺寸整体感知的研究领域仍然存在许多未被探索的问题。未来的研究需要进一步探讨如何精确地量化和理解注意力分配、显著性加权以及尺寸恒常性在不同视觉任务和环境中的作用机制。此外,探索不同文化背景和年龄组人群在尺寸整体感知能力上的可能差异,将为我们提供关于视觉感知多样性的更深入见解。

技术的进步为我们提供了新的工具和方法,以更精确地研究这些复杂的视觉和认知过程。例如,使用高级脑成像技术,可以帮助我们更好地了解大脑是如何处理和整合来自不同源的视觉信息的。此外,人工智能和机器学习模型的发展为模拟人类视觉处理提供了新的可能性,可能会揭示整体感知的基本原则和机制。

在现实生活中,将这些研究成果应用于实际场景,如改善人机交互设计、提高视觉信息的呈现质量以及开发针对特定人群的视觉辅助工具,将是未来工作的重要方向。通过这些努力,我们不仅能够增进对人类视觉系统的理解,还能够利用这些知识来解决现实世界中的问题。

参考文献

- Allik, J., Toom, M., Raidvee, A., Averin, K., & Kreegipuu, K. (2013). An Almost General Theory of Mean Size Perception. *Vision Research*, 83, 25-39. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2013.02.018>
- Alvarez, G. A., & Oliva, A. (2008). The Representation of Simple Ensemble Visual Features Outside the Focus of Attention. *Psychological Science*, 19, 392-398. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2008.02098.x>
- Anton-Erxleben, K., & Carrasco, M. (2013). Attentional Enhancement of Spatial Resolution: Linking Behavioural and Neurophysiological Evidence. *Nature Reviews Neuroscience*, 14, 188-200. <https://doi.org/10.1038/nrn3443>
- Ariely, D. (2001). Seeing Sets: Representation by Statistical Properties. *Psychological Science*, 12, 157-162. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00327>
- Baek, J., & Chong, S. C. (2020). Distributed Attention Model of Perceptual Averaging. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 82, 63-79. <https://doi.org/10.3758/s13414-019-01827-z>
- Barlow, H. B., Blakemore, C., & Pettigrew, J. D. (1967). The Neural Mechanism of Binocular Depth Discrimination. *Journal of Physiology*, 193, 327-342. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1967.sp008360>
- Brady, T. F., Shafer-Skelton, A., & Alvarez, G. A. (2017). Global Ensemble Texture Representations Are Critical to Rapid Scene Perception. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 43, 1160-1176. <https://doi.org/10.1037/xhp0000399>
- Carlson, V. (1962). Size-Constancy Judgments and Perceptual Compromise. *Journal of Experimental Psychology*, 63, 68-73. <https://doi.org/10.1037/h0045909>
- Carrasco, M. (2011). Visual Attention: The Past 25 Years. *Vision Research*, 51, 1484-1525. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2011.04.012>
- Carrasco, M., & Barbot, A. (2019). How Attention Affects Spatial Resolution. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 79, 149-160. <https://doi.org/10.1101/sqb.2014.79.024687>
- Cha, O., & Chong, S. C. (2018). Perceived Average Orientation Reflects Effective Gist of the Surface. *Psychological Science*, 29, 319-327. <https://doi.org/10.1177/0956797617735533>
- Chetverikov, A., Campana, G., & Kristjánsson, Á. (2017). Rapid Learning of Visual Ensembles. *Journal of Vision*, 17, 21. <https://doi.org/10.1167/17.2.21>
- Choi, Y. M., & Chong, S. C. (2020). Effects of Selective Attention on Mean-Size Computation: Weighted Averaging and Perceptual Enlargement. *Psychological Science*, 31, 1261-1271. <https://doi.org/10.1177/0956797620943834>
- Chong, S. C., & Treisman, A. (2005). Statistical Processing: Computing the Average Size in Perceptual Groups. *Vision Research*, 45, 891-900. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2004.10.004>
- Chong, S. C., Joo, S. J., Emmanouil, T. A., & Treisman, A. (2008). Statistical Processing: Not So Implausible after All.

- Perception & Psychophysics*, 70, 1327-1334. <https://doi.org/10.3758/PP.70.7.1327>
- Dakin, S. C. (2001). Information Limit on the Spatial Integration of Local Orientation Signals. *Journal of the Optical Society of America A*, 18, 1016-1026. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.18.001016>
- Dakin, S. C., & Watt, R. (1997). The Computation of Orientation Statistics from Visual Texture. *Vision Research*, 37, 3181-3192. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(97\)00133-8](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(97)00133-8)
- 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, 1-16. <https://doi.org/10.1167/9.11.28>
- de Fockert, J. W., & Marchant, A. P. (2008). Attention Modulates Set Representation by Statistical Properties. *Perception & Psychophysics*, 70, 789-794. <https://doi.org/10.3758/PP.70.5.789>
- Epstein, W., Park, J., & Casey, A. (1961). The Current Status of the Size-Distance Hypotheses. *Psychological Bulletin*, 58, 491-514. <https://doi.org/10.1037/h0042260>
- Fouriez, G., Rubinfeld, S., & Capstick, G. (2008). Visual Statistical Decisions. *Perception & Psychophysics*, 70, 456-464. <https://doi.org/10.3758/PP.70.3.456>
- Gobell, J., & Carrasco, M. (2005). Attention Alters the Appearance of Spatial Frequency and Gap Size. *Psychological Science*, 16, 644-651. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2005.01588.x>
- Haberman, J., & Suresh, S. (2020). Ensemble Size Judgments Account for Size Constancy. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 83, 925-933. <https://doi.org/10.3758/s13414-020-02144-6>
- Haberman, J., & Whitney, D. (2011). Efficient Summary Statistical Representation When Change Localization Fails. *Psychonomic Bulletin & Review*, 18, 855-859. <https://doi.org/10.3758/s13423-011-0125-6>
- Haberman, J., Brady, T. F., & Alvarez, G. A. (2015). Individual Differences in Ensemble Perception Reveal Multiple, Independent Levels of Ensemble Representation. *Journal of Experimental Psychology General*, 144, 432-446. <https://doi.org/10.1037/xge0000053>
- Haberman, M., & Ulrich, L. (2019). Precise Ensemble Face Representation Given Incomplete Visual Input. *i-Perception*, 10, No. 1. <https://doi.org/10.1177/2041669518819014>
- He, Z. J., Cavanagh, P., & Intriligator, J. (1996). Attentional Resolution and the Locus of Visual Awareness. *Nature*, 383, 334-337. <https://doi.org/10.1038/383334a0>
- Holway, A. H., & Boring, E. G. (1941). Determinants of Apparent Visual Size with Distance Variant. *The American Journal of Psychology*, 54, 21-37. <https://doi.org/10.2307/1417790>
- Iakovlev, A. U., & Utochkin, I. S. (2021). Roles of Saliency and Set Size in Ensemble Averaging. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 83, 1251-1262. <https://doi.org/10.3758/s13414-020-02089-w>
- Im, H. Y., & Chong, S. C. (2009). Computation of Mean Size Is Based on Perceived Size. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 71, 375-384. <https://doi.org/10.3758/APP.71.2.375>
- 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. <https://doi.org/10.3758/s13414-012-0399-4>
- Im, H. Y., Park, W. J., & Chong, S. C. (2015). Ensemble Statistics as Units of Selection. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 27, 731-744.
- Jazayeri, M., & Shadlen, M. N. (2010). Temporal Context Calibrates Interval Timing. *Nature Neuroscience*, 13, 1020-1026. <https://doi.org/10.1038/nn.2590>
- Kanaya, S., Hayashi, M. J., & Whitney, D. (2018). Exaggerated Groups: Amplified Collective Representation of Group Size in Human Ensemble Perception. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 80, 1321-1333.
- Kilpatrick, F. P., & Ittelson, W. H. (1953). The Size-Distance Invariance Hypothesis. *Psychological Review*, 60, 223-231. <https://doi.org/10.1037/h0060882>
- Kirsch, W., Heitling, K., & Kunde, W. (2018). How Visual and Semantic Information Influence Learning in Familiar Contexts. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 44, 621-634.
- Lee, J., Baek, J., & Chong, S. C. (2016). Clustering and Switching Strategies in Ensemble Perception of Multiple Numerosity. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 42, 599-609.
- Li, K. A., & Yeh, S. L. (2017). Mean Size Estimation Yields Left-Side Bias: Role of Attention on Perceptual Averaging. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 79, 2538-2551. <https://doi.org/10.3758/s13414-017-1409-3>
- Lu, Z. L., & Doshier, B. A. (1998). External Noise Distinguishes Attention Mechanisms. *Vision Research*, 38, 1183-1198. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(97\)00273-3](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(97)00273-3)
- Luck, S. J., & Vogel, E. K. (1997). The Capacity of Visual Working Memory for Features and Conjunctions. *Nature*, 390, 279-281. <https://doi.org/10.1038/36846>

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2012.11.002>
- Maule, J., & Franklin, A. (2015). Effects of Ensemble Complexity and Perceptual Similarity on Rapid Averaging of Hue. *Journal of Vision*, 15, 6. <https://doi.org/10.1167/15.4.6>
- Maule, J., & Franklin, A. (2016). Accurate Rapid Averaging of Multihue Ensembles Is Due to a Limited Capacity Subsampling Mechanism. *Journal of the Optical Society of America A*, 33, A22-A29. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.33.000A22>
- Murray, S. O., Boyaci, H., & Kersten, D. (2006). The Representation of Perceived Angular Size in Human Primary Visual Cortex. *Nature Neuroscience*, 9, 429-434. <https://doi.org/10.1038/nn1641>
- Noe, A., Pessoa, L., & Thompson, E. (2000). Beyond the Grand Illusion: What Change Blindness Really Teaches Us about Vision. *Visual Cognition*, 7, 93-106. <https://doi.org/10.1080/135062800394702>
- Olkkonen, M., McCarthy, P. F., & Allred, S. R. (2014). The Central Tendency Bias in Color Perception: Effects of Internal and External Noise. *Journal of Vision*, 14, 5. <https://doi.org/10.1167/14.11.5>
- Palmer, J. (1990). Attentional Limits on the Perception and Memory of Visual Information. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16, 332-350. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.16.2.332>
- Rensink, R. A., O'Regan, J. K., & Clark, J. J. (1997). To See or Not to See: The Need for Attention to Perceive Changes in Scenes. *Psychological Science*, 8, 368-373. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.1997.tb00427.x>
- Robitaille, N., & Harris, I. M. (2011). When More Is Less: Extraction of Summary Statistics Benefits from Larger Sets. *Journal of Vision*, 11, 18. <https://doi.org/10.1167/11.12.18>
- Ross, H. E., & Plug, C. (1998). The History of Size Constancy and Size Illusions. In V. Walsh & J. Kulikowski (Eds.), *Perceptual Constancy: Why Things Look As They Do* (pp. 499-528). Cambridge University Press.
- Simons, D. J., & Chabris, C. F. (1999). Gorillas in Our Midst: Sustained Inattentional Blindness for Dynamic Events. *Perception*, 28, 1059-1074. <https://doi.org/10.1068/p281059>
- Solomon, A. (2010). Visual Discrimination of Orientation Statistics in Crowded and Uncrowded Arrays. *Journal of Vision*, 10, 19. <https://doi.org/10.1167/10.14.19>
- Solomon, J. A., Morgan, M., & Chubb, C. (2011). Efficiencies for the Statistics of Size Discrimination. *Journal of Vision*, 11, 13. <https://doi.org/10.1167/11.12.13>
- Sweeny, T. D., & Haroz, S. (2013). Color Binding within and across Feature Dimensions. *Journal of Vision*, 13, 1-12.
- Sweeny, T. D., & Whitney, D. (2014). Perceiving Crowd Attention Ensemble Perception of a Crowd's Gaze. *Psychological Science*, 25, 1903-1913. <https://doi.org/10.1177/0956797614544510>
- Sweeny, T. D., Haroz, S., & Whitney, D. (2013). Perceiving Group Behavior: Sensitive Ensemble Coding Mechanisms for Biological Motion of Human Crowds. *The Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 39, 329-337. <https://doi.org/10.1037/a0028712>
- Sweeny, T. D., Wurnitsch, N., Gopnik, A., & Whitney, D. (2015). Ensemble Perception of Size in 4-5-Year-Old Children. *Developmental Science*, 18, 556-568. <https://doi.org/10.1111/desc.12239>
- Tiurina, N. A., & Utochkin, I. S. (2019). Ensemble Summary Statistics as a Basis for Rapid Visual Categorization. *Journal of Vision*, 19, 14.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2013.11.012>
- Watamaniuk, S. N. J., & Duchon, A. (1992). The Human Visual System Averages Speed Information. *Vision Research*, 32, 931-941. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(92\)90036-I](https://doi.org/10.1016/0042-6989(92)90036-I)
- Whitney, D., & Yamanashi Leib, A. (2018). Ensemble Perception. *Annual Review of Psychology*, 69, 105-129. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010416-044232>