

# A Review of Cognitive Mechanisms of Visual Symmetry Perception

Jian Li, Quanhong Wang

Faculty of Psychology, Southwest University, Chongqing  
Email: [chrislee.works@gmail.com](mailto:chrislee.works@gmail.com), [quanhong@swu.edu.cn](mailto:quanhong@swu.edu.cn)

Received: Feb. 19<sup>th</sup>, 2016; accepted: Mar. 12<sup>th</sup>, 2016; published: Mar. 15<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Human visual system is sensitive to the bilateral symmetry of the visual stimulus; many researchers have done magnificent works on it. These researches include the attributes of symmetry perception, modulating factors in symmetry perception, the role of symmetry in perceptual organization, and its neural underpinnings. The purpose of the article is to outline and evaluate empirical and theoretical studies about human symmetry perception. This article mainly focuses on the role of symmetry perception in visual cognitive process and the cognitive model of symmetry perception. The result shows that symmetry detection is a versatile visual process that interacts with other cognitive processes, which include a preprocessing stage involving spatial filters followed by information integration across the visual field in higher-tier cortical areas.

## Keywords

Symmetry Processing, Perceptual Organization, Visual Cognition, Cognitive Models

---

# 对称性视知觉的认知机制研究综述

李 健, 王权红

西南大学心理学部, 重庆  
Email: [chrislee.works@gmail.com](mailto:chrislee.works@gmail.com), [quanhong@swu.edu.cn](mailto:quanhong@swu.edu.cn)

收稿日期: 2016年2月19日; 录用日期: 2016年3月12日; 发布日期: 2016年3月15日

## 摘要

人类视觉系统对于处理视觉输入刺激的两侧对称性十分敏感, 许多研究者对对称性视知觉进行了广泛而深入的研究。从对称性知觉在视觉认知过程中的作用、对称性知觉的认知神经机制以及与之相关的认知模型等方面, 文章总结近年来关于对称性知觉的实证和理论研究工作。结果显示, 对称性知觉是一个包括通过多个滤波器进行预处理后, 在高级视觉加工脑区进行信息整合, 并在多个层面上与其他认知加工成分不断交互的开放性的视觉认知过程。

## 关键词

对称性加工, 知觉组织, 视觉加工, 认知模型

## 1. 引言

### 1.1. 概述

对称性现象广泛存在于自然界以及人类社会当中, 与之相关的研究也横跨物理学、化学、计算机等多个科学领域。基于人类视觉系统对对称性特征的显著敏感性, 心理学有关对称性的研究由来已久, 最初的心理物理学研究是在 1886 年由 Mach (1886) 指导的。该研究囊括了许多对人类对称性知觉研究工作的精彩洞见。而之后有关对称性的研究取得了全面性的进展。举例来说, 最新的一些实验研究关注于空间滤波器的作用(Dakin & Watt, 1994), 判别面部对称性处理过程的特异机制(Sirovich & Meytlis, 2009), 以及对对称性加工与其他诸如深度加工和运动加工的其他视觉加工过程的交互过程的考察。此外, 有关神经成像研究也开始提出对称性检测在大脑中执行的位置与过程的观点(Cattaneo et al., 2014)。

### 1.2. 对称性的本质

从几何学观点来看, 对称性的概念涉及等距同构的群即二维或三维欧几里得空间保持对象结构不变的几何变换。等距同构包括镜射对称(又名镜面对称或两侧对称)、旋转对称, 平移对称(又称重复)以及它们的复合形式。虽然人类视觉系统对所有的这些对称形式敏感, 但是两侧对称可能是唯一最显著的、最常被提及的、与人类及其他脊椎动物最相关的对称形式。从现象学来看, 对称的突出特点是它在被观察者观察到时能凸显对象的结构。

## 2. 对称性加工在知觉组织中的作用

### 2.1. 知觉形成

许多研究表明对视觉输入的知觉组织直接涉及对称性加工。例如, 对称性影响客体知觉形成的关键步骤之一的图形——背景分离过程。Driver (1992) 等人的研究发现在用两可图形作为视觉刺激时, 被试倾向于把感知到的对称形状作为图形而把不对称的形状作为背景。Machilsen et al. (2009) 的研究证实了在共现知觉组织中对对称性加工的参与。结果发现当形状对称时检测到的心理生理阈值显著低于当形状不对称时检测到的阈值。而对对称性参与客体知觉形成的有力证据始于对运动恢复结构(structure-from-motion, SFM)现象的研究(Treder & Meulenbroek, 2010)。结果表明三维体积结构可以通过实点的正弦运动得到。然而, 如果点动模式是二维对称的, 结果有可能会是两个相互分离的表面朝相反的方向移动, 这表明对称性直接参与感知对象的定义。

## 2.2. 自动化加工

对称性加工参与客体知觉的形成的事实并不必然地表明其加工是自动化的——不依赖于认知控制。然而, 还是有些证据支持对称性加工是自动化的。首先, 对称性加工快速并且抗干扰, 表明其被早期视觉加工机制所支持(Barlow & Reeves, 1979; Carmody et al., 1977)。第二而且是关键的一点, 对称性在与任务无关的情况下仍能够影响实验表现。在一项被试必须判断两个物体的正面轮廓是否对称的任务中, 与任务无关的外部轮廓也对称时, 实验结果更好(Koning & Wagemans, 2009; Bertamini, 2010; van der Helm & Treder, 2009)。第三, 如前所述, 对称性能决定图形——背景分离过程。在对患有单侧空间忽视症的被试进行图形-背景分离的视觉加工任务的研究中, 结果发现被试将刺激对称的部分感知为图形(与健康被试一样), 即使他对对称性并没有意识体验(Driver et al., 1992)。第四, 当分心物的空间分布对称时会提高视觉搜索任务的效率(Wolfe & Friedman-Hill, 1992)。第五, 基于部分对称的自然图片的显著性模型比传统的基于对比的图形更能预测人类眼动。这表明在眼动到达对称物体前局部对称就已经被检测到了, 也就意味着对于对称性知觉外显注意并不是必须的(Kootstra et al., 2009)。

## 3. 对称性加工与其他认知过程的关系

### 3.1. 注意与意识

注意是一个能调节外侧膝状体等部位的神经活动的多水平选择加工过程。最初的心理生理学研究表明知觉组织过程依赖于注意过程(Kastner & Pinsk, 2004)。更明确地说, 知觉组织过程之前被认为是自动化的, 而事实是只要在视野中被注意选中的时候才能做到。这一假说的支持者通过无意盲视范式来加以论证(Mack et al., 1992)。同样也有证据表明知觉组织的发生不仅不需要意识, 注意同样也不需要。不用依靠实验后的外显记忆(比如在无意盲视范式中), 一些研究证明了在实验期间的内隐组织效应(Chan & Chua, 2003; Lamy et al., 2006)。例如, 被试的任务是判断同时呈现的两条线段哪根更长。线段周围有许多随机分布的圆点。在无意盲视范式中, 这些实点组成向内后向外的箭头, 从而制造出 Müller-Lyer 错觉。虽然被试报告称没有感觉到组织图形, 实验还是得到了线条判断的组织效应(Moore & Egeth, 1997)。这就支持了意识和潜意识知觉组织之间是分离的观点。

至于对称性加工, 目前相关研究得到的结果很少。在一项脑成像研究中, Sasaki (2005)等人发现即使被试参与一项与对称性无关的实验任务, 对称性特异的脑区活动依然存在。Olivers 和 van der Helm (1998)用注视点呈现后的一到四个靶子的搜索任务来研究这一问题。被试的任务是尽快地决定其中任何一个靶子是否对称。作者把发现的边际效应即反应时随着靶子数量增加而递减作为对称性在视野中并非并行计算的证据。然而, 对于此研究还是存在些许疑议。第一, 它与无意盲视范式有着相同的缺点: 它需要被试做出外显的反应。也许诸如利用对称性进行的知觉组织并不需要意识参与, 而外显的口头报告肯定需要意识。第二, 研究还存在可能的易混淆点。当任务只有一个靶子时, 整体显示是总体对称的。当增加靶子数量后, 总体对称减弱, 当被试将总体对称作为判断线索时就可能导致反应时的增加。有研究显示总体对称优于局部对称(Nucci & Wagemans, 2007)。

其他对称性——意识之间关系的相关研究是有关单侧空间忽视病人的个案研究。对于没有对称性视觉加工的意识经验, 被试依然倾向于将刺激物的对称的部分感知为图形。当然, 从临床个案研究很难作进一步推断, 也很难说明结论能在多大程度上从对称性推论到其他组织原则。各种证据似乎支持知觉组织的发生不需要意识和注意的参与, 但这一问题还远未解决。

### 3.2. 提示线索、预期和随意控制

研究表明对称性加工可能通过集中注意的方法受提示线索、预期和随意控制的影响。第一, 知识影

响对称性加工。如果对称轴的方向在各实验试次中不同但在每个试次前都加以提示的话, 相对于中性提示线索, 正性的提示线索会提高判断速率而负性的提示线索会降低判断反应速度(Pashler, 1990; Wenderoth & Welsh, 1998a)。第二, 通过调整任务参数改变被试的实验预期会影响实验结果。特别的是, 当大多数实验试次的刺激图形的对称轴都并非垂直或平行时, 垂直对称的显著性也大幅降低, 这意味着有注意的随意转换的参与(Wenderoth & Welsh, 1998b)。第三, 在由对称点阵组成的 SFM 刺激中, 被试至少能部分地随意控制感知物是否是基于运动的组织结果还是基于对称性的组织结果。

## 4. 对称性视知觉的神经机制

### 4.1. 功能脑成像研究

虽然对称性知觉的功能特性在某种程度上是易于理解的, 但是它的神经基础还是有待进一步研究。有些证据表明在对称性加工阶段双眼视觉神经元会得到补充(Julesz, 1960; Julesz, 1966)。对称性既可以被双眼视差定性也可被其破坏。与这点一致, 如果两个随机点阵的重叠部分对称, 这两个点阵分别呈现给不同眼睛时会被感知到具有对称性(Wenderoth, 2000)。另一项研究认为 V1 和纹状体, 单眼视觉和双眼视觉细胞都参与了对称性加工过程。通过使用对称点刺激, 研究者得到对称轴显示与有向线条一样的倾斜后效的结果。根据这些结果, 作者认为方向编码和对称编码可能具有相似的机制(van der Zwan et al., 1998)。有研究显示的不同空间尺度和不同方向的有关对称性的同时性加工表明在 V1 等皮层发现的单个皮层过滤器可以促进对称性检测(Dakin & Watt, 1994; Julesz & Chang, 1979; Rainville & Kingdom, 1999)。

在一项研究中, 被试参加标杆任务即被试需要判断横断线之间是否等长(Wilkinson & Halligan, 2002)。结果表明对称的出现与否与右扣带回的活动有关, 而后者涉及注意分配。但是, 实验并没有在早期视觉皮层发现针对对称性加工的神经活动。对于对称点阵, 主要针对对称性的活动出现在背外侧枕叶皮质区, 早期视觉皮层同样没有神经活动。而随后的研究改变了这一事实, 一个更广泛的包括 V3A, V4d/v, V7 和侧枕叶 LOC 的神经网络被辨别出来。这些脑区的反应基本不随刺激类型(例如点阵图和曲线图)和大小改变而变化(Tyler et al., 2005)。研究揭示了这些活动部分受注意的调节, 即便被试执行与刺激结构不相关的点探测任务时针对对称性的神经活动仍旧存在。这与对称性检测是自动化的作用于任何视觉输入刺激的加工过程的观点相一致。该研究的作者还发现 V3A, V4d/v, V7 和侧枕叶的激活强度与感知物的知觉显著性相关。换句话说, 对双重或一重对称而言, 四重对称激活更高, 完美对称比富噪对称更高, 垂直对称比水平对称激活更高(Sasaki et al., 2005)。

### 4.2. 脑电研究

使用电生理手段进行的有关对称性加工的时间动力学研究完善了由 fMRI 研究展开的实证工作。与初级视觉皮层不明显参与对称性检测的观点相一致, 对称性刺激改变的只有事件相关电位 ERP 的后期成分。例如, 在一项审美加工机制的研究, 被试需要判断实验所呈现的对称或非对称的抽象几何图形是否具有美感或时候对称。在对称性判断任务中, ERP 在后电极位置刺激后 500~1000 ms 内出现一个后期持续的负电位(Sustained Posterior Negativity, SPN) (Höfel & Jacobsen, 2007)。在另一项研究中, 被试看到的是每隔 500 ms 快速呈现的二重对称或随机点阵的二择图形。ERP 在对称性图形中再次出现持续负电位, 但是这次 ERP 成分在刺激后 200ms 即分离, 比之前的研究实质上要早(Norcia et al., 2002)。二者的结果在一项使用棋盘刺激图片的研究中都得到进一步支持(Oka et al., 2007)。

## 5. 有关对称性加工的认知模型

最近几年来, 许多对称性加工认知模型都得到发展。而大体上, 可以区分四类对称性加工模型。对

称性加工的表征模型定义了在对称性知觉下各个刺激成分的结构与关系。过程模型专门解释为了实现对称性表征, 视觉源刺激是如何被操作执行的。最后, 有两类既包括加工过程又包括神经结构的混合模型。第一个空间滤波模型通过空间机制引发在视觉皮层执行的空间滤波操作。第二个是人工神经网络模型。模型的功能单元通过抑制性连接或兴奋性连接与其他单元交互。这些连接的权重会在 ANN 学习检测对称性的阶段进行调整。

### 5.1. 表征模型

对称性(和其他组织规则)知觉最有影响力的表征模型是转换方法(the Transformational Approach, TA)和全息方法(the Holographic Approach, HA)。在视觉研究中, Garner (1974)和 Palmer (1983)提出并完善了 TA 方法。它认为对称性是一系列包括平移、镜射和旋转的几何转换。虽然 TA 起初用于描述 3D 结构, 泛化到 2D 模式依旧没问题。TA 将其优雅归于其数学根基即把对称形成成分一系列几何操作。通过这一点, TA 提供了涵括人类视觉系统对其敏感的几何关系的通用框架。

与 TA 的运动不变性不同, van der Helm 和 Leeuwenberg (1999, 2004)提出的与之竞争的全息方法 HA 假定增长不变性。在这条规则下, 每个子结构应该显示相同的规律性。基于数学分析结果, HA 提出三种规则: 重复、对称和交替。最后的规则——交替引起莫阿效应的产生, 而实验显示视觉系统对这种模式敏感(Glass, 1969)。

TA 和 HA 主要在对规则结构的表述上有所区别。HA 将对称视为点结构而 TA 将对称视为块结构。此外, HA 还就规则的适用性做了量化预测。例如, 它预测了富噪对称的适配性的优雅降级, 而这被关于对称性检测的所有文献所支持(van der Helm, 2000)。

### 5.2. 过程模型

对比表征模型, 过程模型并不是对对称或其他规律的刺激部分的静态关系的描述, 而是表述从视觉输入提取对称信息的动力学机制。

在 Jenkins (1983)的成分过程模型中, 对称匹配对由虚线连接, 这些线方向保持一致并且中点共线。Jenkins 推测视觉系统对于这些一级结构敏感并把这些作为对称性检测的锚点。他的检测模型由三部分组成, 具体包括检测虚线的同向性, 把最显著的点对整合成显著特征, 估计特征的对称性。

Wagemans (1993)指出一级结构对于对称性检测的理解仍不充分。特别是, 使用仿射变换时, 即使保持方向同向和中点共线对斜对称的对称性检测依然会减慢。这就导致他们提出了将对称点对连成相关四边形的更高级结构的重要性。他们认为对称性检测利用通过接连虚线的自助过程来形成这些更高级结构。

### 5.3. 空间滤波模型

90 年代对称性检测的模型中出现了不同的空间滤波模型。这些模型拟合了视觉系统对空间频率和视觉输入的定位内容敏感的事实(Graham, 1989; de Valois, 1977; de Valois et al., 1985)。空间滤波模型阐述了对空间频率、方向定位、空间相位敏感的作用机制。

Dakin 和 Watt (1994)提出了两阶段模型。在滤波阶段, 输入的图象进入负责特殊空间频率的定向滤波器转换成只有黑斑和白斑的三进制图象。在第二阶段, 应用斑点校准过程来衡量色斑重心对齐假定的对称轴的程度。

Kovesi (1997, 1999)和 Osorio (1996)提出了更复杂的两阶段模型。他们意识到如果图形分解成频率成分, 考虑到局部对称轴的位置其相位信息是有用的。特别的是, 图形边缘、线条和对称轴这三类刺激特征都具备相位一致性。图形边缘由急剧亮度变化定义, 所以相应的空间谐波可由  $0^\circ$  或  $180^\circ$  相位的正弦波

标识。线条是包含  $90^\circ$  或  $270^\circ$  相位的空间谐波的亮度最大值或最小值。虽然对称轴没有亮度变化, 但是它的空间谐波由  $90^\circ$  和  $270^\circ$  相位叠加而成。为了从输入图象提取对称性信息, 他们使用正交滤波器(两个滤波器, 一个正弦相位, 一个余弦相位)来实现对称与非对称的测量。在第一滤波阶段后, 信号被平方化。Osorio 分别累计了完美对称滤波器和奇异对称滤波器的能量。当从完美对称滤波器加总的能量达到最大而从奇异对称滤波器中加总的能量接近为零时一些实点会作为在对称轴上而进行标记。Kovesi 事先决定好每个空间尺度的输出间的绝对偏差通过加权平均来加总两个滤波器的输出。值得一提的是, 这些模型计算的只是局部对称。信息没有在更大范围进行整合来得到全局对称轴, 做到这一点的是 Dakin 和 Watt。

对对称轴的全局计算是通过 Gurnsey (1998) 的三阶段模型实现的。第一阶段中图象通过高斯函数得到平滑图象。然后执行全局差分操作, 计算图形中每列对称位置像素的亮度平方差。在第三阶段, 差分操作的结果通过垂直滤波器明确地检测出对称轴。

#### 5.4. 人工神经网络模型

对称性检测的人工神经网络模型(Artificial Neural Network, ANN)是一连串与认知科学平行发展相对没有交流的计算机视觉研究领域的研究成果。其中一个原因是, ANN 模型只是作为有效的对称性检测器而非人类对称性知觉的模型。即便如此, ANN 模型仍是模拟在视觉皮层发现的诸如侧抑制的功能单位之间的交互作用的卓有成效的工具。而且, 也有人试图就对称性知觉设计一个生理上可信的 ANN 模型。

例如, Latimer, Joung 和 Stevens (1994) 的 ANN 模型能模拟在不同对称轴方向的对称性检测中人类的各向异性, 但是他们的模型局限在只适合  $6 \times 6$  像素的二进制图象。Fukushima 和 Kikuchi (2006) 提出了一个多层 ANN 模型来模拟外侧膝状体 LGN 和 V1 的早期视觉加工的功能。首先, 视觉源输入经过一层对向心和离心对比敏感的模块, 与 LGN 神经元和视网膜神经节细胞的功能相类似。得到的输出会投射到由边缘检测器组成的类似 V1 简单细胞的一层。接下来的一层是模糊边缘提取层, 类似于 V1 的神经巨细胞。最后, 通过收集位于假定对称轴的对侧的单元活动来提取局部对称信息。

### 6. 讨论与结论

对称性知觉是一个快速并对对称性敏感的认知过程。对称性加工自动化进行并参与客体知觉形成, 而且易受高级认知活动的影响。对称显著性随对称轴方向变动, 显著性由高到低排列的顺序是垂直对称—水平对称—斜对称。对称轴数量越多, 知觉对称性越显著。当对称轴是凹的时, 对称性加工效率更高。视觉系统对对称性信息的提取有一定局限, 但具有规模不变性。对称性加工在神经结构基础上受到包括 V3A, V7 和 LOC 等视觉皮层的广泛神经网络的支持。

最近出现的很多对称性知觉的模型, 事实上没有一个能够对这一复杂的过程给出全面的描述。除了没有实现对称性知觉的所有特性外, 多数模型最致命的一点是它们的解释特异性。许多模型只适合特定类型的刺激, 比如点刺激、图形轮廓或密集图形。当然, 无法找到对称性知觉的一般模型也说明多重加工过程都参与其中。比如, 人类对称性视觉加工既对接近对称轴的图形区域敏感也对轮廓模式敏感, 即便二者明显有不同的空间属性。值得一提的是关于中心对称, 还没有同等成熟的模型出现。即便如此, 许多空间滤波和神经网络模型都默认对称性知觉的两级架构。第一级作为一种预处理过程由一个或多个滤波操作构成。第二级是从预处理的输出中提取对称特征数量的对称操作。这种对称操作有许多形式, 例如全局差分算子、斑点校准测量、滤波输出的成对比较。对称性检测的过程并不发生在早期视觉皮层中, 但这些皮层可以执行很多预处理过程。外显的对称性检测涉及更大视野的信息整合, 因而可能在一些具有很大感受野的神经元的诸如 LOC 一类的神经结构得到进一步执行。

## 参考文献 (References)

- Barlow, H. B., & Reeves, B. C. (1979). The Versatility and Absolute Efficiency of Detecting Mirror Symmetry in Random Dot Displays. *Vision Research*, *19*, 783-793. [http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989\(79\)90154-8](http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989(79)90154-8)
- Bertamini, M. (2010). Sensitivity to Reflection and Translation Is Modulated by Objectness. *Perception*, *39*, 27. <http://dx.doi.org/10.1068/p6393>
- Carmody, D. P., Nodine, C. F., & Locher, P. J. (1977). Global Detection of Symmetry. *Perceptual and Motor Skills*, *45*, 1267-1273. <http://dx.doi.org/10.2466/pms.1977.45.3f.1267>
- Cattaneo, Z., Bona, S., Bauer, C., Silvanto, J., Herbert, A. M., Vecchi, T., & Merabet, L. B. (2014). Symmetry Detection in Visual Impairment: Behavioral Evidence and Neural Correlates. *Symmetry*, *6*, 427-443. <http://dx.doi.org/10.3390/sym6020427>
- Chan, W. Y., & Chua, F. K. (2003). Grouping with and without Attention. *Psychonomic Bulletin & Review*, *10*, 932-938. <http://dx.doi.org/10.3758/BF03196554>
- Dakin, S. C., & Watt, R. J. (1994). Detection of Bilateral Symmetry Using Spatial Filters. *Spatial Vision*, *8*, 393-413. <http://dx.doi.org/10.1163/156856894X00071>
- De Valois, K. K. (1977). Spatial Frequency Adaptation Can Enhance Contrast Sensitivity. *Vision Research*, *17*, 1057-1065. [http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989\(77\)90010-4](http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989(77)90010-4)
- De Valois, R. L., Albrecht, D. G., & Thorell, L. G. (1985). Periodicity of Striate-Cortex-Cell Receptive Fields. *JOSA A*, *2*, 1115-1123. <http://dx.doi.org/10.1364/JOSAA.2.001115>
- Driver, J., Baylis, G. C., & Rafal, R. D. (1992). Preserved Figure-Ground Segregation and Symmetry Perception in Visual Neglect. *Nature*, *360*, 73-75. <http://dx.doi.org/10.1038/360073a0>
- Fukushima, K., & Kikuchi, M. (2006). Symmetry Axis Extraction by a Neural Network. *Neurocomputing*, *69*, 1827-1836. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neucom.2005.11.010>
- Garner, W. R. (1974). *The Processing of Information and Structure*. Psychology Press.
- Glass, L. (1969). Moire Effect from Random Dots. *Nature*, *223*, 578-580. <http://dx.doi.org/10.1038/223578a0>
- Graham, N. (1989). *Visual Pattern Analyzers Oxford Psychology Series No. 16*. New York: Oxford University Press. <http://dx.doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195051544.001.0001>
- Gurnsey, R., Herbert, A. M., & Kenemy, J. (1998). Bilateral Symmetry Embedded in Noise Is Detected Accurately Only at Fixation. *Vision Research*, *38*, 3795-3803. [http://dx.doi.org/10.1016/S0042-6989\(98\)00106-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0042-6989(98)00106-0)
- Höfel, L., & Jacobsen, T. (2007). Electrophysiological Indices of Processing Aesthetics: Spontaneous or Intentional Processes? *International Journal of Psychophysiology*, *65*, 20-31. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2007.02.007>
- Jenkins, B. (1983). Component Processes in the Perception of Bilaterally Symmetric Dot Textures. *Perception & Psychophysics*, *34*, 433-440. <http://dx.doi.org/10.3758/BF03203058>
- Julesz, B. (1960). Binocular Depth Perception of Computer-Generated Patterns. *Bell System Technical Journal*, *39*, 1125-1162. <http://dx.doi.org/10.1002/j.1538-7305.1960.tb03954.x>
- Julesz, B. (1966). Binocular Disappearance of Monocular Symmetry. *Science*, *153*, 657-658. <http://dx.doi.org/10.1126/science.153.3736.657>
- Julesz, B., & Chang, J. J. (1979). Symmetry Perception and Spatial-Frequency Channels. *Perception*, *8*, 711-718. <http://dx.doi.org/10.1068/p080711>
- Kastner, S., & Pinsk, M. A. (2004). Visual Attention as a Multilevel Selection Process. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *4*, 483-500. <http://dx.doi.org/10.3758/CABN.4.4.483>
- Koning, A., & Wagemans, J. (2009). Detection of Symmetry and Repetition in One and Two Objects: Structures versus Strategies. *Experimental Psychology*, *56*, 5-17. <http://dx.doi.org/10.1027/1618-3169.56.1.5>
- Kootstra, G., & Schomaker, L. R. (2009). Prediction of Human Eye Fixations Using Symmetry. *31st Annual Conference of the Cognitive Science Society (CogSci09)*, Amsterdam, 29 July-1 Aug 2009, 56-61.
- Kovesi, P. (1997). Symmetry and Asymmetry from Local Phase. *10th Australian Joint Conference on Artificial Intelligence*, *190*, 2-4.
- Kovesi, P. (1999). Image Features from Phase Congruency. *Videre: Journal of Computer Vision Research*, *1*, 1-26.
- Lamy, D., Segal, H., & Ruderman, L. (2006). Grouping Does Not Require Attention. *Perception & Psychophysics*, *68*, 17-31. <http://dx.doi.org/10.3758/BF03193652>
- Latimer, C., Joung, W., & Stevens, C. (1994). Modelling Symmetry Detection with Back-Propagation Networks. *Spatial Vision*, *8*, 415-431. <http://dx.doi.org/10.1163/156856894X00080>

- Mach, E. (1886). *Beiträge zur Analyse der Empfindungen [Contributions to the Analysis of Sensations]*. Jena: Gustav Fisher.
- Machilsen, B., Pauwels, M., & Wagemans, J. (2009). The Role of Vertical Mirror Symmetry in Visual Shape Detection. *Journal of Vision*, 9, 11. <http://dx.doi.org/10.1167/9.12.11>
- Mack, A., Tang, B., Tuma, R., Kahn, S., & Rock, I. (1992). Perceptual Organization and Attention. *Cognitive Psychology*, 24, 475-501. [http://dx.doi.org/10.1016/0010-0285\(92\)90016-U](http://dx.doi.org/10.1016/0010-0285(92)90016-U)
- Moore, C. M., & Egeth, H. (1997). Perception without Attention: Evidence of Grouping under Conditions of Inattention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23, 339-352. <http://dx.doi.org/10.1037/0096-1523.23.2.339>
- Norcia, A. M., Candy, T. R., Pettet, M. W., Vildavski, V. Y., & Tyler, C. W. (2002). Temporal Dynamics of the Human Response to Symmetry. *Journal of Vision*, 2, 1. <http://dx.doi.org/10.1167/2.2.1>
- Nucci, M., & Wagemans, J. (2007). Goodness of Regularity in Dot Patterns: Global Symmetry, Local Symmetry, and Their Interactions. *Perception*, 36, 1305-1319. <http://dx.doi.org/10.1068/p5794>
- Oka, S., Victor, J. D., Conte, M. M., & Yanagida, T. (2007). VEPs Elicited by Local Correlations and Global Symmetry: Characteristics and Interactions. *Vision Research*, 47, 2212-2222. <http://dx.doi.org/10.1016/j.visres.2007.03.020>
- Olivers, C. N., & Van Der Helm, P. A. (1998). Symmetry and Selective Attention: A Dissociation between Effortless Perception and Serial Search. *Perception & Psychophysics*, 60, 1101-1116. <http://dx.doi.org/10.3758/BF03206161>
- Osorio, D. (1996). Symmetry Detection by Categorization of Spatial Phase, a Model. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 263, 105-110. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.1996.0017>
- Palmer, S. E. (1983). *Human and Machine Vision* (pp. 269-339). New York: Academic Press.
- Pashler, H. (1990). Coordinate Frame for Symmetry Detection and Object Recognition. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16, 150-163. <http://dx.doi.org/10.1037/0096-1523.16.1.150>
- Rainville, S. J. (1999). Spatial-Scale Contribution to the Detection of Mirror Symmetry in Fractal Noise. *Journal of the Optical Society of America A*, 16, 2112-2123. <http://dx.doi.org/10.1364/JOSAA.16.002112>
- Sasaki, Y., Vanduffel, W., Knutsen, T., Tyler, C., & Tootell, R. (2005). Symmetry Activates Extrastriate Visual Cortex in Human and Nonhuman Primates. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102, 3159-3163. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0500319102>
- Sirovich, L., & Meytlis, M. (2009). Symmetry, Probability, and Recognition in Face Space. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106, 6895-6899. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0812680106>
- Treder, M. S., & Meulenbroek, R. G. (2010). Integration of Structure-from-Motion and Symmetry during Surface Perception. *Journal of Vision*, 10, 5. <http://dx.doi.org/10.1167/10.4.5>
- Tyler, C. W., Baseler, H. A., Kontsevich, L. L., Likova, L. T., Wade, A. R., & Wandell, B. A. (2005). Predominantly Extra-Retinitopic Cortical Response to Pattern Symmetry. *Neuroimage*, 24, 306-314. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.09.018>
- Van der Helm, P. A. (2000). Simplicity versus Likelihood in Visual Perception: From Surprisals to Precisals. *Psychological Bulletin*, 126, 770-800. <http://dx.doi.org/10.1037/0033-2909.126.5.770>
- van der Helm, P. A., & Leeuwenberg, E. L. (1999). A Better Approach to Goodness: Reply to Wagemans (1999). *Psychological Review*, 106, 622-630. <http://dx.doi.org/10.1037/0033-295X.106.3.622>
- van der Helm, P. A., & Leeuwenberg, E. L. (2004). Holographic Goodness Is Not That Bad: Reply to Olivers, Chater, and Watson (2004). *Psychological Review*, 111, 261-273. <http://dx.doi.org/10.1037/0033-295X.111.1.261>
- van der Helm, P. A., & Treder, M. S. (2009). Detection of (Anti)symmetry and (Anti)repetition: Perceptual Mechanisms versus Cognitive Strategies. *Vision Research*, 49, 2754-2763. <http://dx.doi.org/10.1016/j.visres.2009.08.015>
- van der Zwan, R., Leo, E., Joung, W., Latimer, C., & Wenderoth, P. (1998). Evidence That both Area V1 and Extrastriate Visual Cortex Contribute to Symmetry Perception. *Current Biology*, 8, 889-892. [http://dx.doi.org/10.1016/S0960-9822\(07\)00353-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-9822(07)00353-3)
- Wagemans, J., Van Gool, L., Swinnen, V., & Van Horebeek, J. (1993). Higher-Order Structure in Regularity Detection. *Vision Research*, 33, 1067-1088. [http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989\(93\)90241-N](http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989(93)90241-N)
- Wenderoth, P. (2000). Monocular Symmetry Is neither Necessary nor Sufficient for the Dichoptic Perception of Bilateral Symmetry. *Vision Research*, 40, 2097-2100. [http://dx.doi.org/10.1016/S0042-6989\(00\)00073-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0042-6989(00)00073-0)
- Wenderoth, P., & Welsh, S. (1998a). Effects of Pattern Orientation and Number of Symmetry Axes on the Detection of Mirror Symmetry in Dot and Solid Patterns. *Perception*, 27, 965-976. <http://dx.doi.org/10.1068/p270965>
- Wenderoth, P., & Welsh, S. (1998b). The Effects of Cuing on the Detection of Bilateral Symmetry. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A*, 51, 883-903. <http://dx.doi.org/10.1080/713755791>



- Wilkinson, D. T., & Halligan, P. W. (2002). The Effects of Stimulus Symmetry on Landmark Judgments in Left and Right Visual Fields. *Neuropsychologia*, 40, 1045-1058. [http://dx.doi.org/10.1016/S0028-3932\(01\)00142-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0028-3932(01)00142-7)
- Wolfe, J. M., & Friedman-Hill, S. R. (1992). On the Role of Symmetry in Visual Search. *Psychological Science*, 3, 194-198. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-9280.1992.tb00026.x>