

# “数知覚”に関する最近の研究動向

久方瑠美<sup>1</sup>

## Visual perception of numerosity: A review of the last 10 years

Rumi Hisakata<sup>1</sup>

**Abstract** : 私たちは空間中にもものが「いくつあるのか」を瞬時に把握することができる。この“数知覚”に関する研究は、近年多くの成果をあげてきた。本論文では、最近の数知覚に関連する心理実験および生理学研究を概観し、その研究動向と今後の課題について考察する。

**Keywords** : 数知覚, 密度知覚, 順応

### はじめに

われわれは日常生活のなかで、電車に乗るためにどの列にどれくらいの人々が並んでいるのかその人数の過多を瞬時に見分けられるし、店の中にどれくらいの人々がひしめいているのかを一瞥して推測することができる。このように人は空間の中にもものが「どのくらいあるのか」を瞬時に、“数える”という行為なしに、大まかに把握する能力をもつ。短時間呈示された刺激に対して正しく知覚できる数は4つまでと言われており、5つ以上は具体的な数値としてはあまり正しく知覚できない。4つ以下の即座に正確に認知できる数を subitizing range (瞬間認

知可能範囲) と呼び、それ以上の大まかな数知覚とは区別して考えられている (Anobile, Cicchini, & Burr, 2015a; Kaufman, Lord, Reese, & Volkmann, 1949)。本論文は、subitizing range より多い数知覚について最近の研究動向をまとめ、今後の研究課題について議論したいと思う。

### 数知覚への順応とその批判

大きな数への知覚について、最近の議論の発端は Burr and Ross (2008a) が発表した数順応だろう。彼らは、数の多いドット群に順応した後はテストパターンのドット群の数が少なく見えることを発見した (図1)。

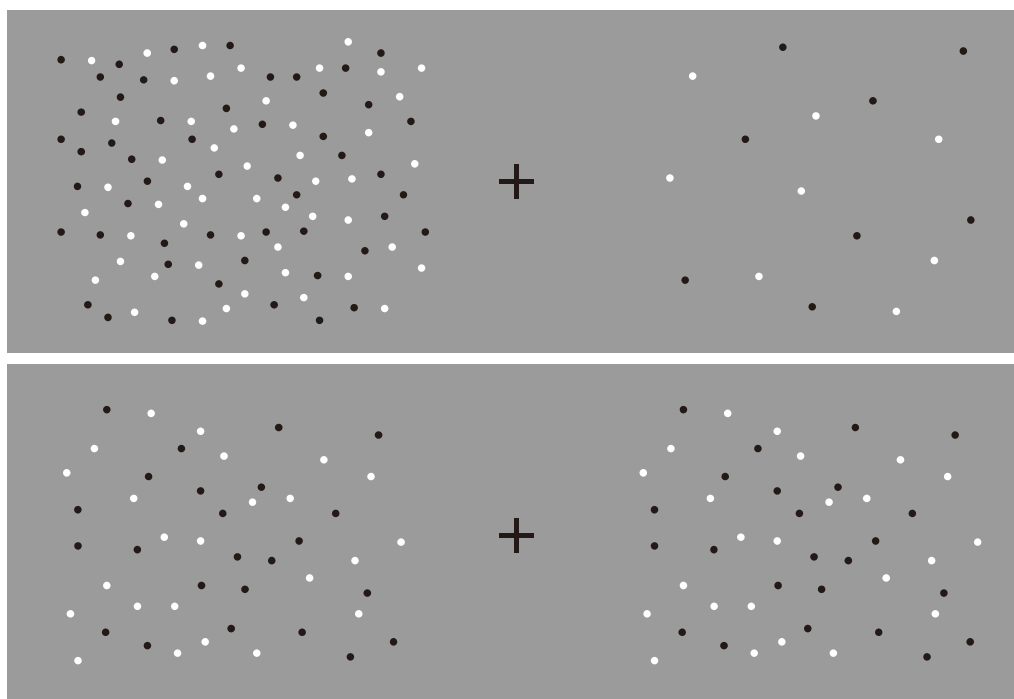


図1 : 数順応の例。上の図を数分観察した後に、下の左右のドット群の数を比べると、左の方が少なく見える。実際の数値は左右で等しい。

受稿日2016年1月29日 受理日2016年2月9日

1 専修大学人間科学部心理学科 (Department of Psychology, Senshu University)

順応に用いたドット数は400でテストのドット数は可変だったが、テストドット数が12以上では順応効果は一定で、テストドット数が subitizing range に近づくとつれ順応の効果が減少していった。これはこの順応効果が subitizing range 以上の大きな数の知覚で起こることを示している。これはほかの視覚系のメカニズムで説明できるだろうか？例えば非常に関係のあると思われる現象は、密度順応効果 (density aftereffect) である (Durgin, 1995; Durgin & Proffitt, 1996)。密度順応効果とは、高密度のテクスチャに順応するとテストのテクスチャが粗く (低密度に) 見え、低密度のテクスチャに順応するとテストのテクスチャが細かく (高密度に) 見える現象であり、要素の“数”という観点からみると Burr が発見した数順応はドットの密度順応の現象と一致する。Burr らは数順応 (numerosity aftereffect) がテクスチャの密度順応ではないことを確かめるために、順応刺激とテスト刺激のドットサイズを操作した。元の実験では順応刺激・テスト刺激ともにドットサイズは  $6 \times 6$  ピクセルのドットだったが、コントロール実験では順応刺激のドットサイズは  $8 \times 8$  ピクセル (64ピクセル)、テスト刺激では  $3 \times 3$  ピクセル (9ピクセル) だった。この操作により順応刺激の刺激表示面積はテスト刺激の7倍になる。もし刺激密度が重要であれば、順応刺激サイズを7倍にした実験では順応効果がより大きくなるはずである。結果はそうはならず、ピクセルサイズが順応とテストで等しいものと順応効果量は等しかった。また、要素の方位や形を変形させることによって、順応刺激とテスト刺激の周波数次元での構成を乖離させたとしても順応の効果は減少しなかった。これらの結果から Burr らは、順応刺激の総面積や空間周波数等の低次元で定義されるようなテクスチャ密度が重要なのではなく、要素の数が順応を引き起こしていると主張した。

しかし、この主張にはすぐに批判がなされた。Durgin (2008) は、Burr らが発表した数知覚はテクスチャの密度処理をベースにしており、概念として切り分けられないと主張している。Burr らはコントロール実験において、順応刺激とテスト刺激の空間周波数次元での違いが数順応効果に影響しないことを示しているが、これは「密度順応効果が周波数次元での操作に影響されない」と示した Durgin and Huk (1997) の結果と同等である。つまり密度知覚も空間周波数や要素の方位など低次の変化には影響されないのだ。Durgin (2008) ではさらに、より直感的に密度と数を乖離させるデモを見せている。Durgin は要素の数は同じでも刺激が広がる

全体サイズが異なる刺激を用意した (図2)。すなわち、同じ数が刺激中に含まれていても、それが広がる表示面積が広がれば密度は低くなる。ここでは必然的に密度が「単位面積あたりに含まれる刺激の数」という風に定義されている。図2のデモでも明らかのように、表示される数が一致しているにもかかわらず、知覚される密度 (数) は、高密度順応後には低密度 (少ない数) に、低密度順応後には高密度 (多い数) になる。Durgin はこの事実から、数と密度が異なる状況は刺激を全体としてみた場合のみであり、局所的な数の概念は密度と等しくなるとした。さらに Durgin は、刺激表示面積に占める黒 (あるいは白) の面積の割合が数知覚について重要な手がかりとなるとする研究を指摘している (Allik & Tuulmets, 1991)。これらの事実から、残念ながら Burr らが主張した数という概念に対する順応現象はテクスチャに対する順応ですべて説明できると主張した。これに対して Burr and Ross (2008b) は、Durgin and Huk (1997) において Durgin 自身が、分離した個々のドットによるテクスチャは“雲状の”あるいは“岩のような”複雑で連続的なテクスチャに対しては順応を及ぼさないことを示した研究をあげ、ドット群の順応は低次のテクスチャ処理ではなくむしろ数順応によって引き起こされているのだと反論した。

彼らの議論は「密度とはどのように定義されるべきなのか」という問題に終始する。面密度なのか、要素密度という高次の次元で語られるべき密度なのか。しかし、Durgin (2008) の批判は妥当に思われ、既存の現象で説明可能であるという点において Burr and Ross (2008a) の報告した現象の新規性は薄れる。

これを受けて Ross and Burr (2010) では、「要素の数」を判断させる数判断タスクと「要素の密度」を判断させる密度判断タスクの2種類を参加者に課し、その結果を比較した。数知覚と密度知覚が独立であるかどうかを調べるため、刺激表示面積・刺激要素の密度・刺激要素の数がそれぞれ独立に操作された。すなわち、「面積一定条件 (密度・数は可変)」「密度一定条件 (面積・数は可変)」「数一定条件 (面積・密度は可変)」という3条件であった。それぞれの条件において、数判断タスクと密度判断タスクを独立の試行で行ったところ、それぞれの条件において数判断と密度判断のウェーバー比 (判断の精度) が変わらなかった。つまり、面一定条件・密度一定条件では密度が数判断に対して有効な手がかりとして働かないにもかかわらず、数判断は密度判断と同様な正確さで行われていた。さらに、もし数知覚が密度処

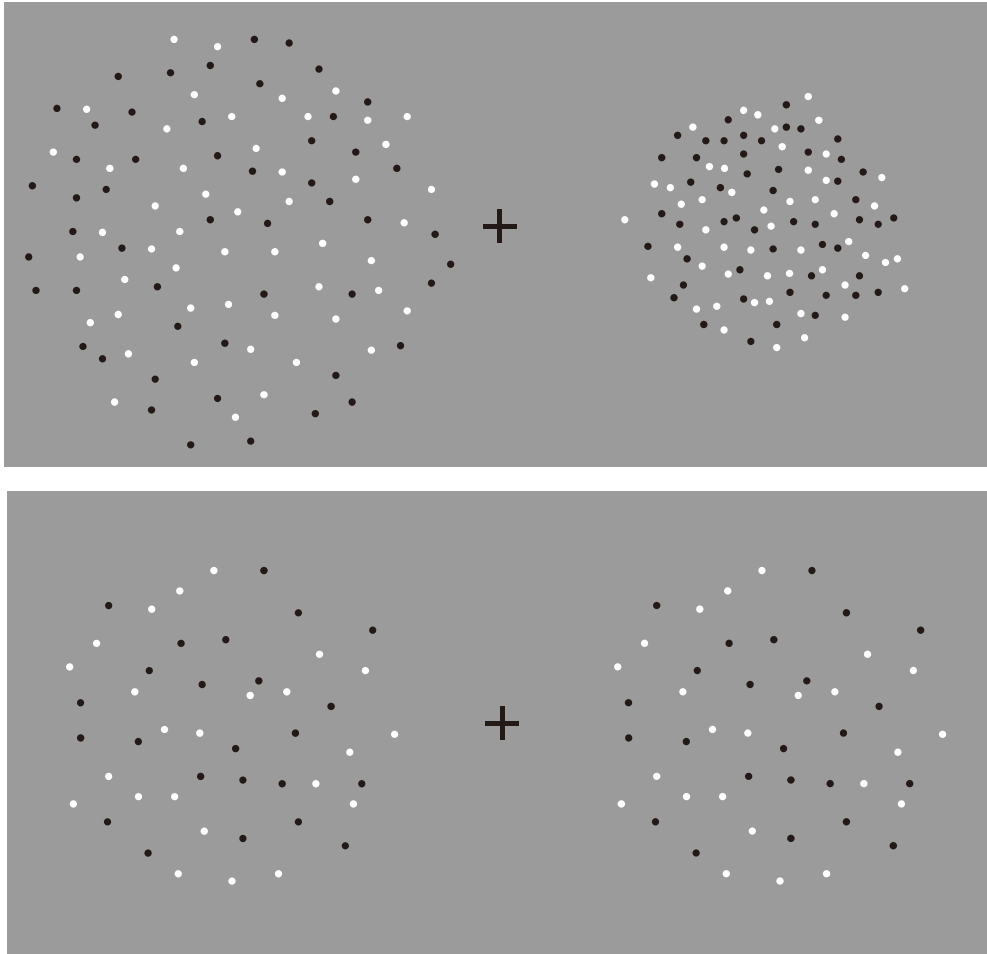


図2：密度と数が別々に操作される場合の順応の例。上図が順応刺激，下図がテスト刺激。上の図では、左と右の要素数は同一だが刺激呈示サイズが異なるため密度が異なる。この刺激に順応した後下図を観察すると、やはり左側は密度が低く粗に見え、右側が密に見える。従ってこの場合は要素の数ではなく、刺激の密度に順応していると言える。

理に依存しているならば、数判断タスクにおいて、密度一定条件の方が、密度が可変になる面積一定条件の方よりもウェーバー比が大きい（精度が悪い）はずである。しかし実際は、密度手がかりがより使えない密度一定条件の方がウェーバー比が小さい（判断精度がよい）という結果になった。さらに Ross らは、個々に独立した要素のドットのような刺激ではなく、隙間のないランダムドットテクスチャを用いて数判断と密度判断への輝度の影響を検討した。その結果、数判断ではテクスチャの平均輝度が低いほど数が多く判断され輝度の上昇に伴って数判断も大きくなることが明らかになった。それに対し密度判断はテクスチャの平均輝度の影響をほとんど受けなかった。これらの結果から Ross and Burr (2010) では、やはり数知覚は視覚処理の初期で行われ、テクスチャや密度処理とは独立に存在すると主張した。

Dakin, Tibber and Greenwood (2011) は、やはり密度と数処理は複雑に絡み合っているもので、その推定にはやはり共通のメカニズムが存在すると主張する。これ

までの研究は刺激呈示サイズが知覚される数の精度には影響しないという結果であったが (Allik & Tuulmets, 1991; Ross & Burr, 2010; Tokita & Ishiguchi, 2010), 彼らはこれらの研究で用いられた要素の数が30以下であり、多数の数知覚という点においては少なすぎるとした。Dakin らは128という大きい要素の数を含むドット群において、数推定と密度推定が刺激呈示サイズの影響を受けてどのように変化するかを検討した。その結果、密度推定においては刺激呈示サイズが大きくなると実際より高密度に知覚され、数推定においては刺激呈示サイズが大きくなると実際より大きい数に知覚された。この知覚バイアスの強さは密度推定よりも数推定の方が弱いものの、刺激サイズの変化が同様の傾向をもたらす点が重要であると Dakin らは主張する。彼らはこの結果を説明するために、初期の複数の高周波数 - 低周波数チャネルのペアの出力比が密度と数の推定を規定するというモデルを提案している。

これについて最近、Anobile, Cicchini and Burr

(2014) は刺激に含まれる全体の要素数が、数知覚・密度知覚の知覚精度においてどのように影響するのかを調べた。数知覚におけるウェーバー比がどのような数の推定でも一定になることは以前から知られていたが (Ross, 2003; Whalen, Gallistel, & Gelman, 1999), Anobile らはより詳細に広範囲の数について数知覚と密度知覚のウェーバー比を比較した。その結果、小さい刺激呈示面積 (54deg<sup>2</sup>) では約15まで、大きい刺激面積 (150deg<sup>2</sup>) では約30までの数推定においてウェーバー比が一定だが、それ以上数が大きくなるとウェーバー比は要素数の平方根の2乗に比例して減少することがわかった。ウェーバー比が変化する境界密度はおおよそ0.3 dot/deg<sup>2</sup> だった。しかし、課題を「刺激の密度判断」にすると、ウェーバー比は境界密度以下の少ない数でも要素数の平方根に比例して減少するような振る舞いを見せた。この Anobile らの結果は、数推定のためのメカニズム (一定のウェーバー比を持つ) と密度推定のためのメカニズム (平方根ルールを持つ) の2つのメカニズムが存在していることを示している。彼らは要素数が多すぎてもはや「個々の要素の集合」として認められない状態になると、テクスチャ処理メカニズムが関与するようになるとした。この現象は、crowding と呼ばれる要素認識が周囲の刺激によって阻害される現象にとってもよく似ている (Anobile et al., 2014; 2015a)。もし crowding 現象にもかかわるようなテクスチャ処理が関与するのであれば、数処理—テクスチャ処理が切り替わるドット数は偏心度によって変移すると考えられる。この仮説は Anobile, Turi, Cicchini and Burr (2015b) によって確かめられ、偏心度が大きい周辺視 (15deg) での観察では境界点のドット数は約25だったのに対し、中心視では境界点は約100だった。周辺視では視覚系の解像度はより悪くなるので少ない要素数でもテクスチャ処理に切り替わり、中心視では解像度の高さから数が大きくても個々の要素を個別に認識できる処理が働くと考えられる。この考え方は、より大きな数で刺激呈示サイズの影響を検討した Dakin et al. (2011) の結果も説明でき、包括的な数知覚処理の仮説と言えるだろう。

Anobile らの一連の研究で示されたように、数あるいは密度の知覚には複数の視覚処理が関与していると考えられる。Anobile, Cicchini and Burr (2015a) は、subitizing range から数知覚処理—テクスチャ処理は含まれる要素の数によって切り替わるとした。また、それらの処理の切り替わりには、要素を認識するための視覚系の解像度、また認識の解像度に関係する注意の影響などが

考慮されると考えられる (Vetter, Butterworth, & Bahrami, 2008)。

## 数知覚にかかわる生理学的研究

ここで数処理に関する生理学的研究をいくつか紹介したい。数知覚にかかわる最近の発見では、まず Harvey, Klein, Petridou and Dumoulin (2013) の fMRI 研究があげられる。彼らは7Tの高解像度 fMRI を用いて数に対する topographic mapping が頭頂葉 (parietal cortex) に存在することを発見した。人間の頭頂間溝 (intraparietal sulcus; IPS) が視覚的な“数”に対して、V1が方位に対して持つようなコラム構造を持つことが明らかにされた。数に選択性を持つ細胞群の活動は、刺激のサイズや要素の形には影響を受けず、抽象的な数に対して反応していた。特にこの選択性は右半球の頭頂間溝に顕著であった。右半球は左視野を処理しており、この結果は「左側にあるものは少なく、右側にあるものは多い」という数直線状の数認知に関係しているかもしれない (Dehaene, Izard, Spelke, & Pica, 2008)。実際に彼らの研究では、1~7という比較的少ない数を実験に使用していたが、彼らの研究ではこの数直線知覚と左右の頭頂間溝の topographic mapping には定量的な関係性を見いだせなかった。

頭頂間溝における数選択性についてももう1つ興味深い生理学的な発見がある。Dormal and Pesenti (2009) は、fMRI を用いた研究で両頭頂間溝は数選択性を持ち、右の後頭頭頂 (occipitoparietal lobe) のネットワークが“長さ”に対して反応することを示した。特に右頭頂間溝と中心前回 (occipitoparietal) の一部が数と長さ両方に対して反応した。これは近年発見された、数 (密度) 順応が物体間の長さ知覚に影響を及ぼすという心理行動実験の結果と関係するかもしれない (Hisakata, Nishida, & Johnston, 2015)。Hisakata et al. (2015) は、高密度 (多くの数を持つテクスチャ) に順応した後、2つの物体間の距離を観察すると、物体間の距離が実際よりも短く知覚されることを発見した。数と長さを共通に処理する生理基盤が順応を起し、一見全く隔たりのある「数」に対する順応が「物体間の長さ」に知覚に影響を与えた可能性がある。

サルの神経生理学的研究でも、数にかかわる神経活動が発見されている。Nieder, Freedman and Miller (2002) および Nieder, Diester and Tudusciuc (2006) の研究でも、やはり頭頂間溝と外側前頭前皮質 (lateral



prefrontal cortex; LPFC) において数に選択性をもつ細胞が発見された。

頭頂間溝は、視覚的な空間ワーキングメモリや、眼球運動や到達運動等の感覚—運動協調、さらに視覚的機能と関係の深い領野である (e.g. Andersen, 1989; Colby & Goldberg, 1999; Todd & Marois, 2005)。数処理に関する生理学的研究の成果は、V1等の初期視覚処理ではない高次の処理が、数と空間の知覚に関与していることを示している。

### 今後の展望

心理実験と生理学研究の検討から、数知覚は要素の認識を必要とする比較的高次の視覚処理レベルに寄っていることが示唆される。数知覚において、テクスチャ処理がかかわると考えられる空間密度処理よりも高次のメカニズムが関与しているならば、多感覚間における数順応の存在や、注意の強い効果などが現れると考えられる。Arrighi, Togoli and Burr (2014) では、視聴覚間の数順応があることを発見した。彼らは視覚刺激として白い円のフラッシュ数を、聴覚刺激は音刺激の数をを用いてそれぞれのイベント数に順応させた時に、各視聴覚刺激の知覚イベント数を測定した。その結果、同モダリティ間の順応効果と同程度、視聴覚刺激間でも順応効果があることが明らかになった。

subitizing range に収まる数知覚においては、注意を向けることが知覚におおきく影響することはこれまでに明らかになってきている (Olivers & Watson, 2008; Vetter et al., 2008; Xu & Liu, 2008)。しかし、subitizing range 以上テクスチャ処理未満の数知覚において、刺激の空間的な配置と注意の影響は明らかになっていない。また生理学研究の発見から、物体間距離や到達運動等の空間知覚と運動協調において視覚空間上の要素数や要素の散らばりがどのように影響するのかが今後行動実験で検討されるべきであろう。これらは今後検討される課題となると考えられる。

### 参考文献

Allik, J., & Tuulmets, T. (1991). Occupancy model of perceived numerosity. *Perception & Psychophysics*, 49 (4), 303-314. <http://doi.org/10.3758/BF03205986>

Andersen, R. A. (1989). Visual and eye movement functions of the posterior parietal cortex. *Annual Review of Neuroscience*, 12 (1), 377-403. <http://doi.org/10.1146/annurev.ne.12.030189.002113>

Anobile, G., Cicchini, G. M., & Burr, D. C. (2014). Separate

Mechanisms for Perception of Numerosity and Density. *Psychological Science*, 25 (1), 265-270. <http://doi.org/10.1177/0956797613501520>

Anobile, G., Cicchini, G. M., & Burr, D. C. (2015a). Number As a Primary Perceptual Attribute: A Review. *Perception*, 1-27. <http://doi.org/10.1177/0301006615602599>

Anobile, G., Turi, M., Cicchini, G. M., & Burr, D. C. (2015b). Mechanisms for perception of numerosity or texture-density are governed by crowding-like effects. *Journal of Vision*, 15 (5), 4-12. <http://doi.org/10.1167/15.5.4>

Arrighi, R., Togoli, I., & Burr, D. C. (2014). A generalized sense of number. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, 281 (1797), 20141791-20141791. <http://doi.org/10.1098/rspb.2014.1791>

Burr, D., & Ross, J. (2008a). A Visual Sense of Number. *Current Biology*, 18 (6), 425-428. <http://doi.org/10.1016/j.cub.2008.02.052>

Burr, D., & Ross, J. (2008b). Response: Visual number. *Current Biology*. <http://doi.org/10.1016/j.cub.2008.07.052>

Colby, C. L., & Goldberg, M. E. (1999). SPACE AND ATTENTION IN PARIETAL CORTEX. *Annual Review of Neuroscience*, 22 (1), 319-349. <http://doi.org/10.1146/annurev.neuro.22.1.319>

Dakin, S. C., Tibber, M. S., & Greenwood, J. A. (2011). A common visual metric for approximate number and density. Presented at the Proceedings of the ... <http://doi.org/10.1073/pnas.1113195108/-/DCSupplemental>

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 (5880), 1217-1220. <http://doi.org/10.1126/science.1156540>

Dormal, V., & Pesenti, M. (2009). Common and specific contributions of the intraparietal sulci to numerosity and length processing. *Human Brain Mapping*, 30 (8), 2466-2476. <http://doi.org/10.1002/hbm.20677>

Durgin, F. H. (1995). Texture density adaptation and the perceived numerosity and distribution of texture. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21 (1), 149-169. <http://doi.org/10.1037/0096-1523.21.1.149>

Durgin, F. H. (2008). Texture density adaptation and visual number revisited. *Current Biology*, 18 (18), R855-6-author reply R857-8. <http://doi.org/10.1016/j.cub.2008.07.053>

Durgin, F. H., & Huk, A. C. (1997). Texture density aftereffects in the perception of artificial and natural textures. *Vision Research*, 37 (23), 3273-3282. [http://doi.org/10.1016/S0042-6989\(97\)00126-0](http://doi.org/10.1016/S0042-6989(97)00126-0)

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. <http://doi.org/10.1163/156856896x00204>

- Harvey, B. M., Klein, B. P., Petridou, N., & Dumoulin, S. O. (2013). Topographic representation of numerosity in the human parietal cortex. *Science*, 341 (6150), 1123–1126. <http://doi.org/10.1126/science.1239052>
- Hisakata, R., Nishida, S., & Johnston, A. (2015). Adaptation to texture reveals a local metric underlying perceived size and distance. *Journal of Vision*, 15 (12), 771–771. <http://doi.org/10.1167/15.12.771>
- Kaufman, E. L., Lord, M. W., Reese, T. W., & Volkman, J. (1949). The Discrimination of Visual Number. *The American Journal of Psychology*, 62 (4), 498. <http://doi.org/10.2307/1418556>
- Nieder, A., Diester, I., & Tudusciuc, O. (2006). Temporal and spatial enumeration processes in the primate parietal cortex. *Science*. <http://doi.org/10.1126/science.1126286>
- Nieder, A., Freedman, D. J., & Miller, E. K. (2002). Representation of the Quantity of Visual Items in the Primate Prefrontal Cortex. *Science*, 297 (5587), 1708–1711. <http://doi.org/10.1126/science.1072493>
- Olivers, C. N. L., & Watson, D. G. (2008). Subitizing requires attention. *Visual Cognition*, 16 (4), 439–462. <http://doi.org/10.1080/13506280701825861>
- Ross, J. (2003). Visual discrimination of number without counting. *Perception*, 32 (7), 867–870. <http://doi.org/10.1068/p5029>
- Ross, J., & Burr, D. C. (2010). Vision senses number directly. *Journal of Vision*, 10 (2), 10.1–8. <http://doi.org/10.1167/10.2.10>
- Todd, J. J., & Marois, R. (2005). Posterior parietal cortex activity predicts individual differences in visual short-term memory capacity. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, 5 (2), 144–155.
- Tokita, M., & Ishiguchi, A. (2010). How might the discrepancy in the effects of perceptual variables on numerosity judgment be reconciled? *Attention, Perception, & Psychophysics*, 72 (7), 1839–1853. <http://doi.org/10.3758/APP.72.7.1839>
- Vetter, P., Butterworth, B., & Bahrami, B. (2008). Modulating Attentional Load Affects Numerosity Estimation: Evidence against a Pre-Attentive Subitizing Mechanism. *PLoS ONE*, 3 (9), e3269–6. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0003269>
- Whalen, J., Gallistel, C. R., & Gelman, R. (1999). Nonverbal Counting in Humans: The Psychophysics of Number Representation. *Psychological Science*, 10 (2), 130–137. <http://doi.org/10.1111/1467-9280.00120>
- Xu, X., & Liu, C. (2008). Can subitizing survive the attentional blink? An ERP study. *Neuroscience Letters*, 440 (2), 140–144. <http://doi.org/10.1016/j.neulet.2008.05.063>