

# 空間的・時間的に呈示される数の推定における系列依存性

## Serial dependence in estimation of spatial and temporal numerosity

橋本 拓磨, 森本 優洸聖, 牧岡省吾  
Takuma Hashimoto, Yukihiro Morimoto, Shogo Makioka

大阪公立大学  
Osaka Metropolitan University  
sa23126p@st.omu.ac.jp

### 概要

系列依存性は、ある時点の知覚が直前の知覚に類似する現象である。本研究は、空間的に表現された数（ドット配列）と時間的に表現された数（点滅刺激）の間で数の系列依存性が生じるかを検討した。その結果、ドット配列と点滅刺激の間で双方向に数の系列依存性が確認された。これは、大小判断課題において点滅刺激からドット配列への系列依存性を明らかにした先行研究と一致する結果であるだけでなく、数推定課題において双方向に効果が生じることを示すものである。

キーワード：系列依存性 (serial dependence), 視覚, 数

### 1. はじめに

系列依存性は、ある時点の知覚が直前の知覚に類似する現象である。これは様々な刺激によって生じることが知られているが、本研究では数知覚が直前に提示された数刺激に影響される、数の系列依存性を扱う。

系列依存性がどのような処理段階において生じるのかについては、さまざまな議論が行われてきた。近年の研究では、系列依存性は特定の処理段階よりも幅広い処理段階で生じているものと考えられている[1][2][3]。

数の系列依存性が生じるメカニズムや処理段階を検討するための重要な手がかりの一つが、モダリティや刺激特徴を越えて数の系列依存性が生じるかという問題である。ここでの刺激特徴とは、数のような高次の特徴ではなく、共通の高次特徴を異なる方法で表現する低次の特徴を指す。数は空間的・時間的といった2つの方法で表現できる。数の系列依存性を対象とした多くの研究で刺激として用いられているドット配列は、画面に複数のドットが表示されることによって空間的に数を表現する。対して、点滅刺激では画面に表示されたドットが点滅することで時間的に数を表現する。同様に、短い音を断続的に呈示することによって、時間的に数を表現することができる。これら2つの方法は異なる低次特徴によって数という共通の高次特徴を表現しているといえる。

モダリティ間・刺激特徴間の系列依存性を検討することにより、数の系列依存性が生じる処理段階を推定

することができる。数の系列依存性が生じる可能性がある処理段階のうち、比較的高次の処理段階としては抽象的な数表現の段階が想定される。抽象的な数表現は頭頂間溝 (IPS) に存在することが広く知られており、呈示された刺激のモダリティにかかわらず活性化する[4]。数の系列依存性がモダリティを越えて生じれば、抽象的な数表現の段階が数の系列依存性の発生に関与することが推定される。数の系列依存性が生じる可能性のあるほかの処理段階として、モダリティごとの処理の段階も想定される。これはさらに数以前の低次特徴に対する処理と数の処理に分類でき、異なる刺激特徴間の数の系列依存性を検討することで、数の系列依存性がどちらの段階で生じるかを推定することができる。視覚については、抽象的な数表現以前の視覚処理で数に対応する表現が存在し、刺激特徴に抛らず、高次特徴である数に対応することが示唆されている[5]。刺激特徴間で数の系列依存性が観察されれば、モダリティ内の数の系列依存性は数以前の低次特徴に対してではなく、数そのものに対して生じることが示される。一方、ここで挙げた処理段階はあくまで大まかな区別であり、また、数の系列依存性がその他の処理段階に依存する可能性を排除できるものではないことに注意が必要である。

刺激特徴間とモダリティ間の数の系列依存性の先行研究 [6] では、異なる低次特徴間 (点滅→ドット配列) あるいはモダリティ間 (聴覚→視覚) で、数の系列依存性が生じるかが検討された。点滅と断続的な音のどちらかを誘導刺激として提示した後、参照刺激とテスト刺激のドット数の多寡を判断する強制2肢選択課題を行った。その結果、低次特徴が異なるが同じモダリティの誘導刺激 (点滅) の数は参照刺激とテスト刺激 (どちらもドット配列) の PSE を変化させたが、異なるモダリティの誘導刺激 (断続的な音) の数は上と同じ参照刺激とテスト刺激の PSE に影響しなかった。この結果は、抽象的な数表現ではなく、それ以前に行われるモダリティごとの数処理で系列依存性が生じていることを示

唆する。しかし、これは誘導刺激の数を認識することが課題遂行に必要とされない強制2肢選択課題において聴覚→視覚の一方の効果だけを確認した研究であるため、数の系列依存性の一般的な性質を示しているとは限らない。系列依存性が幅広い処理段階で生じるという見方を踏まえれば、抽象的な数を扱う段階においてモダリティ間の系列依存性が生じうると考えられる。異なる課題を用いた場合にモダリティ間の系列依存性が観測される可能性は残されている。

これらの背景を踏まえ、我々は強制2肢選択課題とは異なる性質を持つ、数推定課題を用いた場合の数の系列依存性の性質とその処理過程を検討している。推定課題では記号的な数を用いた回答を求めため、強制2肢選択課題と比べて抽象的な数表現に基づく処理が要求される課題であると考えられる。我々はまず、視覚的な点滅と断続的な音を刺激として用いて、モダリティ間の効果が生じるかを検討した。その結果、視覚から聴覚の方向で系列依存性が見られたが、その逆は生じなかった[7]。モダリティを越えて効果が生じたことは、抽象的な数表現の段階での系列依存性を示唆する。しかし、効果が片方向でのみ見られたことが、モダリティ間の数の系列依存性が持つ性質を反映したものなのか、用いられた課題や刺激に依存する結果なのかは明らかでない。この実験で用いられた聴覚刺激同士で系列依存性が生じることは既に確認されている[8]。次に我々は、視覚的な点滅刺激同士で推定課題における数の系列依存性が生じるか検討したが、効果が生じなかった[9]。これらの結果を踏まえると、我々が用いた視覚的な点滅刺激は系列依存性効果を生じさせるが、受け手にはなりにくい性質を持っており、これによってモダリティ間の数の系列依存性が片方向でのみ生じた可能性がある。これを検証するため、本研究ではドット配列と点滅刺激との間に系列依存性が生じるか、さらにそれが双方向なのかを検討する。ドット配列は数の系列依存性を生じさせることが多くの研究で示されており、点滅刺激との間での系列依存性を検証することで、視覚的な点滅刺激における系列依存性の性質を明らかにすることができる。我々が用いた点滅刺激が系列依存性を生じさせるが、系列依存性の受け手にはなりにくい性質を持っていれば、点滅刺激からドット配列への方向でのみ系列依存性効果が見られると考えられる。

## 2. 方法

### 参加者

大阪公立大学の学生 38 名が参加した（平均年齢＝18.42, SD＝0.83）。すべての参加者は、正常または矯正された視力を持ち、書面による同意を得て実験に参加した。参加者にはコースクレジットまたは謝礼 1500 円が支払われた。

参加者数は検定力分析を用いて事前に決定した。効果量が未知であるため  $\text{cohen's } d = 0.5$  を仮定し、検出力 0.85 を確保できる人数である 38 名とした。

### 装置

刺激の提示には 24 インチの液晶ディスプレイ (ASUS VG248) を用いた。実験の制御には Linux PC (Ubuntu 16.4) 上の MATLAB と Psychtoolbox-3 toolkit[10][11] を用いた。参加者の応答は USB 接続されたキーボードで収集された。

### 刺激

視覚的な点滅刺激とドット配列を用いた。点滅数、ドット数は両刺激で共通の 8 条件 (8, 9, 11, 12, 14, 16, 18, 21) とした。さらにドット配列には、ドット 1 つの直径 (0.64 deg ~ 1.27 deg, 0.22 deg ごと 4 段階) と、ドットを表示する範囲の直径 (11.74 deg ~ 23.23 deg, 3.87 deg ごと 4 段階) のバリエーションを設定した。ただし、数以外の条件は分析に用いなかった。

### 手続き

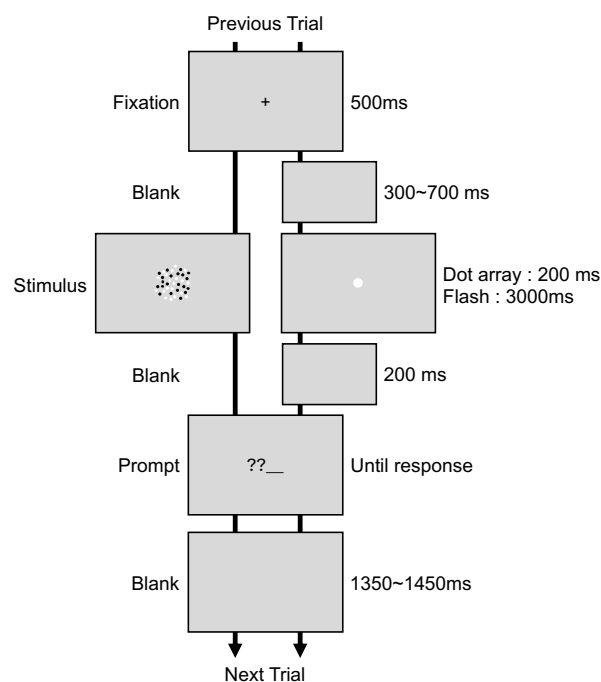


図 1 1 試行の手続き

図1に示すように、参加者は刺激が呈示されたあと刺激の点滅数あるいはドット数を回答するよう求められた。点滅刺激とドット配列は交互に呈示された。回答方法はテンキーで、入力された数字は画面に表示され、エンターキーで回答を確定するまで回答を訂正することができた。点滅条件では、刺激の見やすさのために刺激の前後に空隙を設けた。以上を1試行として、合計512試行を行った。刺激条件の順序はランダムに決定されたが、すべての条件が均等な回数呈示された。64試行に一回、30秒以上の任意の時間の休憩が与えられた。回答に不確実性を持たせるために、正答の数値の範囲は実際よりも幅広い6~28個と教示した。

### 統計分析

タイプミスを除くため、事前に教示した回答範囲(6~28)から外れた回答を分析から除外した。

系列依存性効果は参加者ごとに単回帰分析を行い評価した。ある試行における推定誤差を目的変数、それ以前の試行の点滅数を説明変数とし、刺激種ごとの分析で得られた回帰係数を系列依存性効果の指標とした。連続する試行間における刺激の点滅数およびドット数に規則性はないため、系列依存性が生じない場合には回帰係数は0と等しくなるが、系列依存性が生じた場合には正の回帰係数が得られる。回帰分析に用いる推定誤差は、異なる刺激に対する誤差を同等に扱うために刺激種ごとに標準化した。

系列依存性の有無は、回帰係数が0と等しいことを帰無仮説とする1標本 $t$ 検定を行うことで評価した。結果はFDR補正[12]し、有意水準は実験全体で5%に設定した。本文中および図中に示される $p$ 値および有意水準はFDR補正後の値であり(n.s.=優位ではない、\* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ , \*\*\* $p < 0.001$ )、図中のエラーバーは全て95%信頼区間である。

## 3. 結果

点滅刺激とドット配列は交互に呈示されたため、刺激種ごとに奇数試行前の刺激による効果を分析することで刺激種間の系列依存性を検討した。分析の結果、ドット配列から点滅刺激( $t(38) = 5.35, p < 0.001, d = 0.87$ )、点滅刺激からドット配列( $t(38) = 4.86, p < 0.001, d = 0.79$ )の双方向で、1試行前の刺激からの有意な系列依存性効果が確認された(図2)。7試行前までの効果を検討したが、他に有意な効果は確認されなかった。

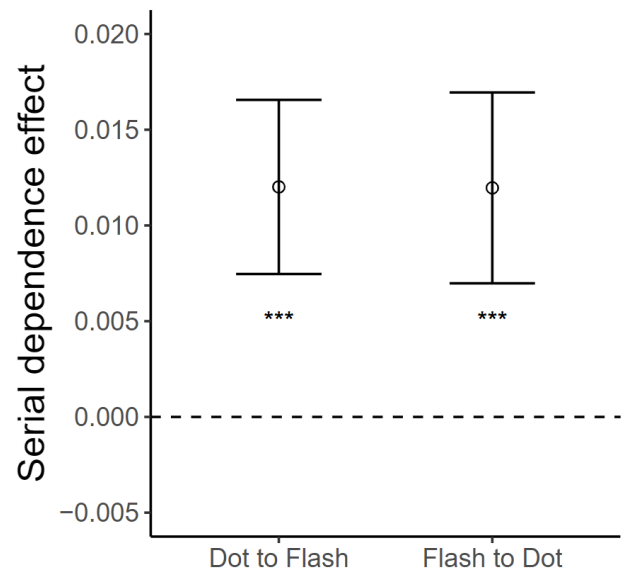


図2 刺激種間の系列依存性効果

偶数試行前の刺激による効果の分析によって、同じ刺激種の試行からの効果についても検討した。点滅刺激同士の場合には2試行前の刺激からの有意な系列依存性効果がみられたが( $t(38) = 2.63, p = 0.037, d = 0.43$ )、ドット配列の間では有意な効果は見られなかった( $t(38) = -1.29, p = 0.370, d = -0.21$ ) (図3)。

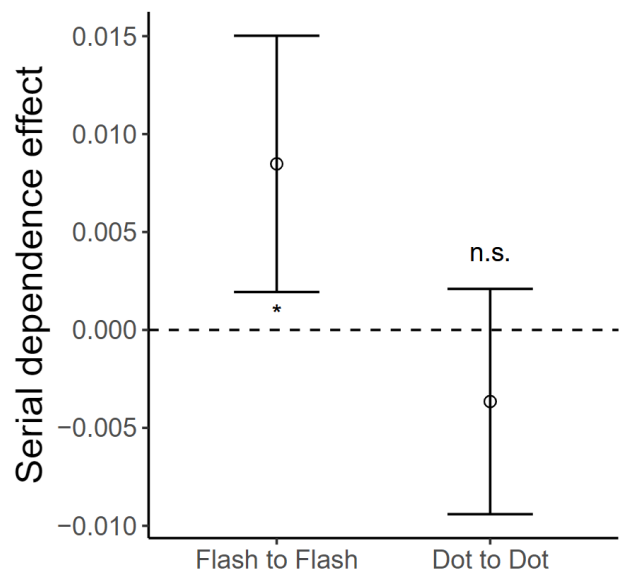


図3 同刺激種の系列依存性効果

## 4. 考察

本研究では、刺激特徴間およびモダリティ間の数の系列依存性の検討を背景として、ドット配列と点滅刺激の間の数の系列依存性を検証した。その結果、ドット

配列から点滅刺激、点滅刺激からドット配列の双方向で1試行前の刺激による系列依存性効果が確認された。刺激特徴間とモダリティ間の数の系列依存性の先行研究 [6] では、点滅刺激からドット配列への方向のみの効果が検証された。本研究の結果はこれに一致するだけでなく、ドット配列から点滅刺激への系列依存性も生じることを明らかにした。このことは、数の系列依存性が数以前の低次の視覚特徴にではなく、数そのものの表現に対して生じているという先行研究の見解に一致するものである。

刺激特徴を越えた系列依存性が双方向に見られたことは、我々が用いた点滅刺激が系列依存性の受け手にならないという仮説に反する結果である。このことから、Hashimoto et al. [7] においてモダリティ間の系列依存性が片方向にのみ生じたことは、使用された刺激特有の問題によるものではなく、数の系列依存性の何らかの性質の表れである可能性が示唆される。一連の研究で用いた刺激には、視覚/聴覚・空間的/時間的といった差異がある。依存する処理過程や、一時的に情報を保持する必要の有無などに差があると考えられるため、系列依存性のメカニズムとの関連をさらに検討する必要がある。

本研究では、偶数試行前の刺激からの効果についても分析することで、同じ刺激種からの効果も検証した。その結果、点滅刺激同士の2試行前の刺激からの効果が見られた。これは、点滅刺激同士の数の系列依存性が確認されなかった橋本ほか [9] の結果と矛盾しており、さらなる検討が必要である。また、ドット配列同士の有意な効果は確認されなかったが、2試行前との時間間隔が長いことによって効果が生じなかったと考えられる。そのため、ドット配列同士の数の系列依存性が生じないことを示す結果ではなく、先行研究と必ずしも矛盾するものではない。

## 5. 結論

本研究では、ドット配列と点滅刺激の間で数の系列依存性が生じるかを検証した。その結果、ドット配列と点滅刺激の間で双方向に数の系列依存性が生じることが確認された。これは大小判断課題において点滅刺激からドット配列への系列依存性を明らかにした先行研究の見解と合致するものである。

## 文献

- [1] Manassi, M., Murai, Y., & Whitney, D. (2023). Serial dependence in visual perception; A meta-analysis and review. *Journal of Vision*, 23, 18, 1-29.  
<https://doi.org/10.1167/jov.23.18>.
- [2] Pascucci, D., Tanrikulu, Ö. D., Ozkirlı, A., Houborg, C., Ceylan, G., Zerr, P., Rafiei, M., & Kristjánsson, Á. (2023). Serial dependence in visual perception: A review. *Journal of Vision*, 23(1), 9.  
<https://doi.org/10.1167/jov.23.1.9>
- [3] 村井祐基 (2023). 事前情報による知覚の適応的変容—視覚の系列依存性とその個人差から考える—, *基礎心理学研究*, 42-1, 89-94.  
<https://doi.org/10.14947/psychono.42.14>.
- [4] Eger, E., Sterzer P., Russ, O. M., Giraud, A., & Kleinschmidt, A. A Supramodal Number Representation in Human Intraparietal Cortex, *Neuron*, 37, 4, 719-726.  
[https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(03\)00036-9](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(03)00036-9).
- [5] Fornaciai, M., Brannon, E M., Woldorff, M G., Park, J. (2017). Numerosity processing in early visual cortex, *NeuroImage*, 157, 429-438.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.05.069>.
- [6] Fornaciai, M., & Park, J. (2019). Serial dependence generalizes across different stimulus formats, but not different sensory modalities, *Vision Research*, 160, 108-115.  
<https://doi.org/10.1016/j.visres.2019.04.011>
- [7] Hashimoto, T., Morimoto, Y., & Makioka, S. (2024, July 24-27). Cross-modal serial dependence between visual and auditory stimuli in numerical estimation task, *CogSci 2024*.
- [8] 橋本拓磨・森本優洸聖・牧岡省吾 (2023). 聴覚における物体数推定の系列依存性, *日本認知科学会第40回大会発表論文集*, 523-526.
- [9] 橋本拓磨・森本優洸聖・牧岡省吾 (2024, June 1-2). 点滅刺激の数推定課題における系列依存性, *日本認知心理学会第22回大会発表論文集*, 50.
- [10] Brainard, D. H. (1997). The Psychophysics Toolbox. *Spatial Vision*, 10, 433-436.  
<https://doi.org/10.1163/156856897X00357>
- [11] Pelli, D. G. (1997). The VideoToolbox software for visual psychophysics: Transforming numbers into movies. *Spatial Vision*, 10, 437-442.  
<https://doi.org/10.1163/156856897X00366>
- [12] Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995). Controlling the False Discovery Rate: A Practical and Powerful Approach to Multiple Testing. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 57(1), 289-300.