

聴覚による物体数推定の系列依存性

Serial dependence in auditory estimation of the number of objects

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, [‡]大阪府立大学
Osaka Metropolitan University, Osaka Prefecture University
sa23126p@st.omu.ac.jp

概要

系列依存性は、直前の情報によって知覚が変化する現象である。本研究は、落下音による物体数の推測課題を用いて、数の系列依存性が聴覚において生じるかどうかを検討した。さらに、系列依存性が、直前の刺激と参加者の応答のどちらから生じるかについても検討した。その結果、聴覚においても数の系列依存性が存在することが確認された。さらに、系列依存性が、参加者の反応に起因することが示唆された。これは、系列依存性が高次の処理段階で生じるという見解に合致する。

キーワード：系列依存性, 聴覚, 数知覚

1. はじめに

視覚情報は眼の動きや遮蔽物などによるノイズを多く含み、常に変化している。しかし、人間は物体に対しての安定した認識を維持することができる。このような能力はどのように実現されているのだろうか。この問題への答えの候補の一つが、系列依存性である。系列依存性は、現在の知覚が過去の知覚に影響される現象である^[1,2]。

視覚における系列依存性の研究は、様々な刺激を用いた課題で行われており、傾き^[2,3]、数^[1,4-7]などにおいて確かめられている。また、このような単純な視覚的特徴だけではなく、顔のアイデンティティ^[8]などの、高次の認知処理を伴う対象についても系列依存性が生じることが明らかになっている。

系列依存性が物体の認識の安定に寄与する機構であるという考え方に基づけば、系列依存性は視覚と同様に聴覚においても生じるはずである。聴覚における系列依存性の研究は、主に時間的な対象に関して行われている。Motala et al.^[9]では、提示された音の間隔を再現する課題で、系列依存性が確かめられている。Li et al.^[10]では、視聴覚で提示された刺激の長さを分類する課題を用いて、各モダリティ内で系列依存性が生じることが確かめられた。しかし、我々が知る限り、数の推測課題で聴覚においても系列依存性が生じることを確かめた研究はない。そこで、本研究では聴覚でも数の系列依存性が生じることを確かめることを目的とする。実験

パラダイムとして、Fornaciai and Park^[6]で用いられた、ドットの数を推測する課題を利用する。この実験では、8-32個のドット配列が画面に短時間提示され、参加者はドットの数进行推定した。その結果、直前の試行のドット数が現試行の回答に影響する系列依存性が見られた。本研究の第1の目的は、刺激を聴覚次元に置き換え、数の情報を含む聴覚刺激を提示することによって、聴覚における数の系列依存性を明らかにすることである。

系列依存性のメカニズムを解明する上で重要な問題の一つは、系列依存性が低次の処理か高次の処理、どちらに起因するのかということであり、未だ結論が出ていない。Pascucci et al.^[11]では、ガボール刺激の傾きを再現する課題の系列依存性は過去の刺激によるものではなく、過去の刺激に対する応答によるものであることが示されている。さらに、Morimoto and Makioka^[12]では、視覚提示された硬貨に対する枚数と総額の判断においても、引き付け方向の系列依存性をもたらしているのは過去の刺激に対する応答であることが示された。さらに、Motala et al.^[9]では、聴覚においても系列依存性が過去の刺激に対する応答から生じることが示唆されている。これらの結果は系列依存性が高次の処理に起因するという見方に合致する。本研究の第2の目的は、聴覚における数の系列依存性を発生させているのが過去の刺激か、過去の刺激に対する応答であるかについて検討することである。

2. 方法

参加者

大阪府立大学・大阪公立大学の学生24名が実験に参加した(平均年齢=19.38, SD=0.95)。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。本実験は大阪公立大学現代システム科学研究科研究倫理委員会の承認を得て行われた。

装置

刺激の提示には液晶ディスプレイ(ASUS VG248)とヘッドホン(Sony MDR-CD900ST)を用いた。実験の制

御には Linux PC(ubuntu 18.04)上の MATLAB (version 2018b, The MathWorks Inc., Natick, MA, USA) と Psychtoolbox-3 toolkit^[13,14]を用いた。刺激の録音には、PCM レコーダー(TASCAM DR-07 MK II)を用いた。

刺激

刺激として、複数の鉄球(直径 8mm)を木製フローリング材の床に落下させた際の落下音を録音したものをを用いた。個数は3から23の奇数個、11通りとし、落下タイミングがなるべくランダムとなるよう録音した。刺激の長さは1~1.5秒で、各条件を16個ずつ、176個作成した。

手続き

回答に不確実性を持たせるため、正答の数を実際よりも幅広く、1~25個と教示した。

刺激が呈示された後、回答を求める「How many?」の文字が表示され、参加者は落下した物体の数を推測してテンキーで回答した。入力された数字は画面に表示され、参加者はエンターキーを押すまで回答を訂正することができた。エンターキーを押すと次の試行へと進んだ。刺激の持続時間は1000msから1500msの間で変化していたが、刺激の開始からプロンプトまでの時間は1500msに固定されていた。試行間間隔は1400msであった。以上を1試行として、1回の実験につき176試行を行った。図1は試行の手順である。全試行で異なる刺激が再生され、1回の実験の間、同じ刺激は提示されなかった。刺激の順番は実験全体を通してランダムとし、同じ条件の連続呈示は妨げなかった。刺激セットはすべての参加者に同一のものをを用いた。参加者の負担を軽減するため、22試行ごとに休憩を設けた。休憩時は、参加者が任意の時間の休憩をとることができた。

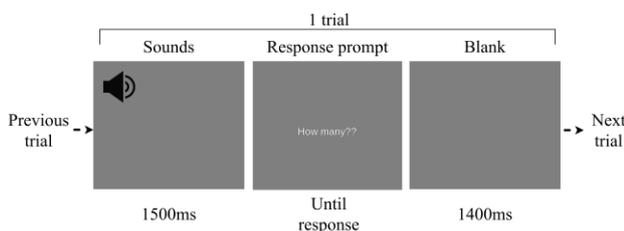


図1 課題の1試行の流れ

3. 結果

分析を行う前に、タイプミスを除くため、事前に教示した回答範囲から外れた回答を除外した。

分析手法は、Fornaciai and Park^[6]と Morimoto and Makioka^[12]に倣った。すべての t 検定で FDR 補正^[15]を

行い、実験全体での有意水準を5%に設定した。

推定精度

図2は、全参加者の回答の平均を実際の物体数ごとにプロットしたものである。X軸は呈示された落下音の実際の物体数、Y軸は推定された物体数の平均を表す。エラーバーは95%信頼区間を示す。

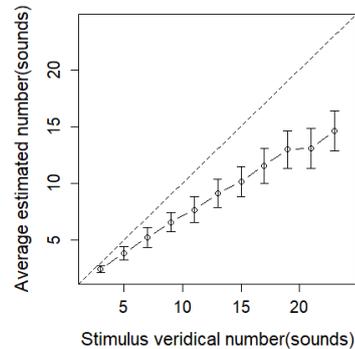


図2 実際の物体数に対する平均推定数の値

参加者の推定値と実際の物体数の相違を調べるため、それぞれの物体数に対して、実際の物体数と等しいことを帰無仮説とする1標本 t 検定を行ったところ、全ての条件において有意に実際の物体数より小さいことが明らかになった($t(23) = -132.78 \sim -3.76, p = .000 \sim .001$)。図2に示されるように、全体として、実際の物体数よりも少ない値が推定された。

さらに、推定精度の指標として変動係数(CoV; 推定物体数の標準偏差を正しい物体数で割ったもの)を計算した。物体数ごとに算出した各参加者のCoVの平均は0.213であった。この値は、画面上のドットの数推測する課題を用いた Fornaciai and Park^[6]で得られた0.217という変動係数の値と同様であった。

単回帰分析

系列依存性の指標とするために、現在の試行における推定誤差を目的変数、各試行位置での刺激と反応を説明変数とした単回帰分析を参加者ごとに行った。回帰係数が正のときは物体数の過大評価、負のときは物体数の過小評価が生じていることを意味する。そのため、回帰係数の大きさが系列依存性の強さに対応する。図3A, 3BともにY軸は参加者ごとの回帰係数の平均を表す。図3Aは、前後の試行の物体数による系列依存性の効果を示している。エラーバーは95%信頼区間で、図中の有意水準はFDR補正後の p 値である(n.s.=有意ではない, $*p < 0.05$, $**p < 0.01$, $***p < 0.001$)。それぞれの相対的な試行位置について、系列依存性の強さが0であることを帰無仮説とする1標本 t 検定を行った。有意な正の効果は引きつけ方向の系列依存性を

示し、有意な負の効果は反発方向の系列依存性を示している。先行する試行については、直前試行(n-1)($t(23) = 4.55, p = .001$), 5試行前(n-5) ($t(23) = 2.91, p = .024$), 7試行前(n-7) ($t(23) = -2.66, p = .036$)の効果がありであった。n-1では正の効果があり、n-5, n-7では負の効果が見られた。また、対照条件として、現在の試行(n)と直後の試行(n+1)についても系列依存性を評価した。n試行では有意な負の効果が見られた($t(23) = 9.31, p = .000$)。この効果は、物体数の増加に従って、課題の難易度が上がっていることによる。n+1の試行では、有意な効果は認められなかった。これらの結果から、直前試行の物体数によって系列依存性が生じることが示された。

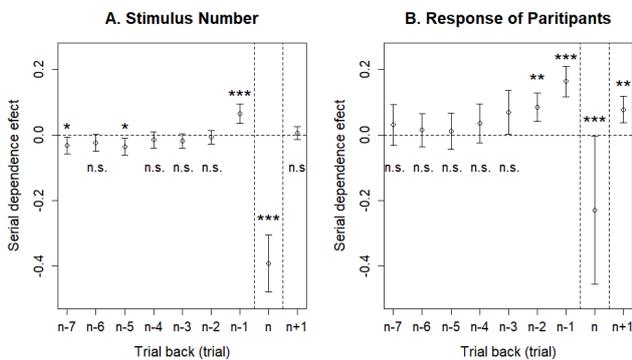


図3 物体数および回答による系列依存性効果

また、前の試行での参加者の反応が、現在の試行での誤差に与える影響についても検討した。図3Bは、前の試行での参加者の反応による系列依存性を示したものである。その結果、1試行前の回答($t(23) = 7.33, p = .000$), 2試行前の回答($t(23) = 4.00, p = .003$), 1試行後の回答($t(23) = 3.92, p = .003$)の効果があり、n-1, n-2試行の参加者の反応が系列依存性を発生させることが示された。また、n+1試行での回答の効果は、現在の試行に対する回答が次の試行への系列依存性を生じさせているためであると考えられる。

以上の分析により、聴覚においても以前の刺激に対する回答による系列依存性が存在することが確認された。図3を比較すると、前の試行での物体数よりも、前の反応がより強く影響していることがわかる。これは、系列依存性が先行刺激の知覚に起因するのではなく、先行刺激への反応を生成する過程において現れることを示唆しているのかもしれない。

そこで、前の試行の刺激における物体数と参加者の反応の効果をより明確に比較するために、重回帰分析を実施した。

重回帰分析

現在の試行の推定誤差を目的変数、単回帰分析で有

意であった要因を説明変数として、重回帰分析を実施した。各参加者について回帰係数を計算し、平均して以下の重回帰式を得た。

$$\begin{aligned} \text{Error} &= \text{intercept} + [n-1N : x1] + [n-5N : x2] + [n-7N : x3] + [nN : x4] \\ &\quad + [n-1R : x5] + [n-2R : x6] + [n+1R : x7] \\ &= -0.723 - 0.117 \times x1 - 0.021 \times x2 - 0.018 \times x3 + 0.300 \times x4 \\ &\quad + 0.023 \times x5 + 0.094 \times x6 - 0.390 \times x7 \end{aligned}$$

とを帰無仮説とする1標本t検定を行った。1試行前の物体数($t(23) = 5.75, p = .000$), 5試行前の物体数($t(23) = -2.47, p = .030$), 現在の試行の物体数($t(23) = -9.04, p = .000$)において、回帰係数は有意な負の値を取った。1試行前の回答($t(23) = 10.78, p = .000$), 1試行後の回答($t(23) = 12.57, p = .000$)において、回帰係数は有意な正の値を取った。

1試行前の物体数の回帰係数は、単回帰分析では有意な正の値を取っていたが、重回帰分析では有意な負の値を取った。これは、単回帰分析で確認された引き付け方向の系列依存性が、1試行前の物体数ではなく、それに対する応答によって生じており、物体数そのものは反発のバイアスをもたらしていたことを示唆する。この結果は、Morimoto and Makioka^[12]と同様であった。

多重共線性の問題がないことを確かめるため、各参加者の分散拡大係数(VIF)を算出した。いずれの参加者および説明変数においても、VIFは臨界値とされる10を下回った(最大値:6.46)。さらにリッジ回帰を行った結果、すべての説明変数の符号は変化しなかったことから、リッジ回帰の結果は重回帰分析の結果とおおむね同様であると考えられる。これらの結果から、多重共線性による問題は生じていないと考えられる。

本実験では、落下音による物体数の知覚が、直前の試行の物体数に引き付けられる方向に影響されることが示され、Fornaciai and Park^[6]の結果が聴覚刺激において再現された。これは、聴覚においても数の系列依存性が発生することを示している。さらに、重回帰分析により、直前の試行の回答が引き寄せ方向の系列依存性を、直前の試行の物体数は反発方向の系列依存性をもたらすことが示された。これは、Morimoto and Makioka^[12]の結果と同様であり、系列依存性が、刺激に対する知覚ではなく反応の段階で生じていることを示唆している。

4. 考察

視覚における先行研究では、傾き^[2,3]や数^[1,4,7]、顔のアイデンティティ^[8]などの様々な刺激において系列依存性が生じることが確認されている。このことから、視覚

における系列依存性は、視覚によって外界の情報を推定する際の普遍的な性質の表れであると考えられる。聴覚における先行研究では、音の間隔^[9]や音の長さ^[10]といった時間的な対象について、系列依存性が確認されている。本研究では、聴覚においても数の系列依存性が発生することが示された。この結果は、系列依存性が生じるメカニズムは、視覚だけではなく、聴覚のような異なるモダリティと共通であるということを示唆している。

本研究における直前の刺激の数に起因する系列依存性は、単回帰分析では引きつけ方向に有意な効果が観測されたが、重回帰分析においては、反発方向に有意な効果が見られた。一方、直前の刺激に対する反応の効果は、単回帰分析でも重回帰分析でも引きつけ方向に有意であった。これらの結果は、単回帰分析における直前の刺激の引きつけ方向の効果が、実際には直前の刺激に対する反応に起因し、刺激そのものは反発方向の効果をもたらしていたことを示唆する。以上の結果は、Morimoto and Makioka^[12]の、視覚的に提示された硬貨の枚数または総額を答える実験の結果と共通している。これは、刺激の個数に対する系列依存性が、刺激のモダリティに関わらず、主に直前の試行における反応に起因していることを示唆する。さらに、この結果は、刺激に対する反応を行わない試行を設けることで聴覚の系列依存性が直前の刺激に対する反応に起因することを示した Motala et al.^[9]の結果とも一致する。これは、聴覚における系列依存性が刺激の種類にかかわらず主に直前の試行における反応に起因していることを示唆する。これらの結果は、系列依存性が高次の認知過程に起因するという見解に合致する。

本研究では、数字の入力による遅延再生課題を用いた。本研究の結果は、二肢選択課題など、他の反応方法でも再現されるのだろうか。視覚における系列依存性が様々な実験条件で確かめられていること、聴覚の系列依存性が視覚と類似していることが示されたことから、聴覚においても数の系列依存性が生じるという結果は、他の方法においても再現されると予想される。実際に、刺激音の長さを分類する課題において系列依存性が生じることが確かめられている^[10]。同様に、反応に起因する系列依存性についても、二肢選択課題や分類課題などにおいて生じるかどうかの検証が求められている。

文献

1. Corbett, J. E., Fischer, J., & Whitney, D. (2011). Facilitating Stable Representations: Serial Dependence in Vision. *PLOS ONE*, 6(1), e16701. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0016701>
2. Fischer, J., & Whitney, D. (2014). Serial dependence in visual perception. *Nature Neuroscience*, 17(5), Article 5. <https://doi.org/10.1038/nn.3689>
3. Cicchini, G. M., Mikellidou, K., & Burr, D. C. (2018). The functional role of serial dependence. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 285(1890), 20181722. <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.1722>
4. Fornaciai, M., & Park, J. (2018). Serial dependence in numerosity perception. *Journal of Vision*, 18(9), 15. <https://doi.org/10.1167/18.9.15>
5. 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>
6. Fornaciai, M., & Park, J. (2020). Attractive serial dependence between memorized stimuli. *Cognition*, 200, 104250. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2020.104250>
7. Togoli, I., Fedele, M., Fornaciai, M., & Bueti, D. (2021). Serial dependence in time and numerosity perception is dimension-specific. *Journal of Vision*, 21(5), 6. <https://doi.org/10.1167/jov.21.5.6>
8. Liberman, A., Fischer, J., & Whitney, D. (2014). Serial Dependence in the Perception of Faces. *Current Biology*, 24(21), 2569–2574. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2014.09.025>
9. Motala, A., Zhang, H., & Alais, D. (2020). Auditory Rate Perception Displays a Positive Serial Dependence. *i-Perception*, 11(6), 2041669520982311. <https://doi.org/10.1177/2041669520982311>
10. Li, B., Wang, B., & Zaidel, A. (2023). Modality-specific sensory and decisional carryover effects in duration perception. *BMC Biology*, 21(1), 48. <https://doi.org/10.1186/s12915-023-01547-9>
11. Pascucci, D., Mancuso, G., Santandrea, E., Libera, C. D., Plomp, G., & Chelazzi, L. (2019). Laws of concatenated perception: Vision goes for novelty, decisions for perseverance. *PLOS Biology*, 17(3), e3000144. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000144>
12. Morimoto, Y., & Makioka, S. (2022). Serial dependence in estimates of the monetary value of coins. *Scientific Reports*, 12(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24236-z>
13. Brainard, D. H. (1997). The Psychophysics Toolbox. *Spatial Vision*, 10, 433–436. <https://doi.org/10.1163/156856897X00357>
14. Kleiner, M., Brainard, D., Pelli, D., Ingling, A., Murray, R., & Broussard, C. (2007). What's new in psychtoolbox-3. *Perception*, 36(14), 1–16.
15. 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.