

時間順序による時間知覚の非対称性を説明するベイズモデル

澤井 賢一^{1,a)} 佐藤 好幸²

概要 : 3つの短音で示された隣接する2つの時間間隔は、長さの差が小さい時はその差が小さくなるように、差が大きい時はその差が大きくなるように知覚される。この知覚の傾向は、2つの時間間隔のどちらに対してもみられるが、その度合いは2番目の間隔の方が大きい。本発表では、この時間順序によって生じる知覚の非対称性を、ベイズモデルを用いて説明する。

1. はじめに

本稿では、3つの短音が続けて鳴らされる状況を考える。1つ目と2つ目、および2つ目と3つ目の短音の間の時間間隔をそれぞれ T_1 , T_2 とする。それぞれの間隔は大体0.5秒以下程度を想定している。このような短い時間範囲の知覚メカニズムを理解することは、音声や音楽の知覚、運動制御などの理解の基礎として重要である [1]。このとき、 T_1 と T_2 の差が小さく、 T_2 の方が長いときに、 T_2 は実際よりも短い長さに知覚される。この現象は時間縮小錯覚 [2] と呼ばれている。また、 T_1 と T_2 の差が大きい場合には、先ほどとは逆に T_2 が実際よりも長く知覚されることも示されている。さらに、 T_2 が T_1 の知覚に与える影響も調べられてきた [3]。これらの先行研究をまとめると以下のようになる：

- (a) T_1 と T_2 は、2つの差が小さいときにはその差がより小さくなるように、差が大きいときにはその差が拡大されるように知覚される；
- (b) これらの錯覚は、 T_1 の知覚に対する錯覚量よりも T_2 の知覚に対する錯覚量の方が大きい [4]。

これらの一連の現象のうち、 T_2 の知覚に対する上記 (a) の性質は、提示される短音列の中で隣り合う音が同じ音源から発生したものかどうかを脳が無意識化で判断していると仮定し、知覚の様子をベイズ推定と見立てることで説明できる [5]。この同一源性判断を脳が行っているという仮説は、異なる音高の区切り音を用いると時間間隔知覚の様子が変わること [6]、および音高の情報が同一源性の知覚的判断に強く影響すること [7] から導かれる。

しかしこのモデルでは、錯覚の度合いが T_1 よりも T_2 の

方が大きいという、上記 (b) に示した時間順序による非対称性は再現できなかった。そこで本稿では、上記モデル [5] を拡張することで、この非対称性が説明できることを示す。

2. 時間間隔知覚のベイズモデル

脳は、感覚器で観測された刺激をもとに外界で起きたことを知覚する。しかし、感覚器による観測やその後の神経情報伝達は多くの不確実性を含むため、脳が受け取る情報には必ず誤差が含まれる。そのため、観測によって得られた情報をそのまま外界で起きたこととみなすと、観測のタイミングによって知覚結果が異なるなどの問題が生じ得る。そこで、脳は観測しようとしている現象の統計的な性質を用いて観測された情報を修正していると考えられる。この一連の様子は、ベイズ推定を用いて数学的に表現できる。

本稿で考えている状況をベイズ推定を用いて定式化すると、以下のようになる。まず、3つの区切り音の真の時刻を順にそれぞれ t_1 , t_2 , t_3 とし、それらに対して聴覚末梢によって観測された時刻をそれぞれ s_1 , s_2 , s_3 とする。観測情報 s_1, s_2, s_3 が得られた下での真の時間間隔 $T_1 (= t_2 - t_1)$, $T_2 (= t_3 - t_2)$ の情報は、確率分布 $P(T_1, T_2 | s_1, s_2, s_3)$ として表される。これは事後分布と呼ばれる。事後分布はベイズの定理を用いて

$$P(T_1, T_2 | s_1, s_2, s_3) \propto P(s_1, s_2, s_3 | T_1, T_2) P(T_1, T_2) \quad (1)$$

と書ける。この式 (1) の右辺の第1項は尤度関数と呼ばれ、観測の際に生じる誤差を表す。また、第2項は事前分布と呼ばれ、脳がこの時間パターンに対して持っている統計的な性質を表している。

尤度関数のモデルとしては、各 s_i ($i = 1, 2, 3$) に対して、中心 t_i 、分散 $\sigma_o(t_i)^2$ の正規分布を仮定する。この $\sigma_o(t_i)$ を時刻によらず一定と仮定したものが、従来の時間間隔知覚のモデル [5] であった。本稿ではこれに対し、たとえば次式

¹ 東京大学 大学院法学政治学研究科

² 東京大学 大学院総合文化研究科

^{a)} 301ken1@gmail.com

のように、1 つ目の音を基準として分散の大きさが時刻に関して単調増加することを仮定する:

$$\sigma_o(t) = w(t - t_1) + c, \quad (2)$$

ただし、 w と c は定数である。これは、Weber 則と呼ばれる心理物理学的知見を導入することに相当する。この点について以下に補足する。

時間知覚に限らない一般の知覚において、刺激の大きさと観測誤差が比例することが知られており、Weber 則と呼ばれている。時間知覚における Weber 則を説明する方法の一つに、一定の速さでパルスが発生する内的な時計の存在を脳内に仮定するモデルがある [8]。このモデルでは、含まれるパルスの数によって脳が時間間隔の長さを測定するが、パルスの間隔には一定の誤差があると考えられる。それにより、パルスの数は時間間隔の長さに比例するため、誤差の大きさも時間間隔の長さに比例する。内的な時計の仮定は、時間知覚のさまざまな側面を理解するために広く用いられている考え方で、その存在を示唆する実験も多い [9]。さらに、小さな刺激では大きさと誤差の比例関係が成り立たないことから、時間間隔 T に対する観測誤差 σ を

$$\sigma = w'T + c' \quad (3)$$

とすることで、Weber 則の一般化も提案されている [8]。ただし、 w' はもとの Weber 則における比例定数、 c' は内的な時計とは無関係なノイズを表す項である。本稿の提案モデルである式 (2) は、この式を時刻を変数として書き直したものである。

事前分布のモデルでは、隣り合う区切り音が同じ音源から発生したかどうかを表す変数 C を導入する。今は 3 つの短音の列を考えているため、この変数は次の 4 通りの値をとる:

- $C = 1$: すべての音が異なる音源から生じた;
- $C = 2$: はじめの 2 つの音は同じ音源から、3 つ目は別の音源から生じた;
- $C = 3$: うしろの 2 つの音は同じ音源から、1 つ目は別の音源から生じた;
- $C = 4$: すべての音が同一の音源から生じた。

この変数 C を用いると、事前分布は

$$\begin{aligned} P(T_1, T_2) &= \sum_{C=1}^4 P(T_1, T_2, C) \\ &= \sum_{C=1}^4 P(C) P(T_1, T_2 | C) \end{aligned} \quad (4)$$

と書ける。各 $i = 1, 2, 3, 4$ に対する $P(T_1, T_2 | C = i)$ は、同一音源から生じる音は時間間隔が等間隔であることと、時間間隔が短いこと [10] を仮定して定式化する。

3. 数値実験によるモデルの検証

ここでは、時間変化する観測誤差を導入したモデルによ

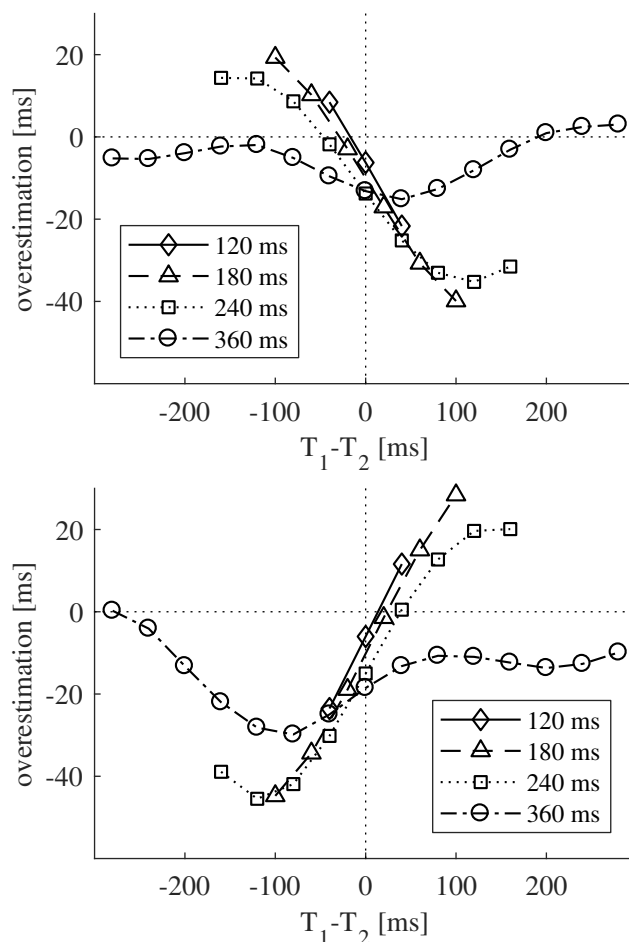


図 1 時間変化する観測誤差を導入したモデルによる T_1 (上) と T_2 (下) に対する知覚のシミュレーション結果。それぞれの横軸は $T_1 - T_2$ で、たとえば 0 より左側では T_1 よりも T_2 の方が長いことを表す。またそれぞれの縦軸は、実際の時間間隔に対する推定値の過大評価量で、0 より上側の点は実際の長さよりも長く推定したことを表す。モデルに時間的な非対称性を導入したことで、 T_1 よりも T_2 に対する錯覚量が大きくなっている。

る、 T_1 と T_2 に対する知覚のシミュレーション結果を示す。知覚結果を表す推定値には、それぞれの周辺化事後分布の期待値を用いた。観測誤差 $\sigma_o(t_i)$ は式 (2) で $w = 0.05$ 、 $c = 20\text{ms}$ としたものを、それ以外のモデルパラメータは先行研究 [5] と同じものを用いた。各時間パターンごとに、観測誤差を加えた時間パターンから推定値を計算することを 20,000 回繰り返す、その平均をとった。その結果、 T_2 に対する推定結果と実際の値との差が、 T_1 のものよりも大きくなった。すなわち、実験的に知られている時間的な非対称性 [4] を再現できた (図 1)。

ここで、今回のモデルが、隣接する 2 つの時間間隔の知覚における時間的な非対称性を再現する仕組みを説明する。ベイズモデルの枠組みでは、観測における不確かさが大きいと事前分布の影響が強まり、錯覚が起きやすくなる。今回用いた観測誤差は t_1 を基準に時間の経過とともに増大するため、 T_1 よりも T_2 の方が観測の不確かさが相対的に大きくなる。そのため T_2 の方が事前分布の影響をより強

く受け、結果として錯覚の度合いが大きくなる。

4. おわりに

本発表では、音の発生時刻に対する感覚器の観測誤差が時間的に変化すると仮定することで、隣接する時間間隔の知覚における時間的非対称性を説明した。

一般に、現在から時間的に遠い出来事ほど知覚は不確かさを増すことが知られている [11]。この理由には、記憶と関連した認知的処理の影響によって誤差が拡大していくことなどが考えられている。本発表で導入した仮定は、一見この事実に反するものである。しかし、今回扱った時間尺度はとても小さく、認知処理上は時間軸上の一点としてひとまとめに扱われるため、上記の場合とは処理が異なる可能性がある。もし今回のモデルで導入した仮定が正しい場合、この仮定を実現するための神経機構を検討することで、今回の時間尺度における時間知覚の仕組みがより詳細に理解できると期待される。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 17K17668, 16K16071 の助成を受けた。

参考文献

- [1] Buhusi, C. V. and Meck, W. H.: What Makes Us Tick? Functional and Neural Mechanisms of Interval Timing, *Nature Reviews: Neuroscience*, Vol. 6, No. 10, pp. 755–765 (2005).
- [2] Nakajima, Y., ten Hoopen, G. and van der Wilk, R.: A new illusion of time perception, *Music perception*, Vol. 8, No. 4, pp. 431–448 (1991).
- [3] Nakajima, Y., Hasuo, E., Yamashita, M. and Haraguchi, Y.: Overestimation of the second time interval replaces time-shrinking when the difference between two adjacent time intervals increases, *Frontiers in Human Neuroscience*, Vol. 8, p. 281 (2014).
- [4] Miyauchi, R. and Nakajima, Y.: Bilateral Assimilation of Two Neighboring Empty Time Intervals, *Music Perception*, Vol. 22, No. 3, pp. 411–424 (2005).
- [5] Sawai, K., Sato, Y. and Aihara, K.: Auditory time-interval perception as causal inference on sound sources, *Frontiers in Psychology*, Vol. 3, p. 524 (2012).
- [6] Remijn, G., van der Meulen, G., ten Hoopen, G., Nakajima, Y., Komori, Y. and Sasaki, T.: On the robustness of time-shrinking, *Journal of the Acoustical Society of Japan*, Vol. 20, No. 5, pp. 365–373 (1999).
- [7] Deutsch, D.: Two-channel listening to musical scales, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 57, No. 5, pp. 1156–1160 (1975).
- [8] Killeen, P. R. and Weiss, N. A.: Optimal timing and the Weber function, *Psychological Review*, Vol. 94, No. 4, p. 455 (1987).
- [9] Grondin, S.: Timing and time perception: A review of recent behavioral and neuroscience findings, *Attention, Perception, & Psychophysics*, Vol. 72, No. 3, pp. 561–582 (2010).
- [10] Akerboom, S., ten Hoopen, G., Olierook, P. and van der

Schaaf, T.: Auditory Spatial Alternation Transforms Auditory Time, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 9, No. 6, pp. 882–897 (1983).

- [11] Raviv, O., Ahissar, M. and Loewenstein, Y.: How Recent History Affects Perception: The Normative Approach and Its Heuristic Approximation, *PLoS Computational Biology*, Vol. 8, No. 10, p. e1002731 (2012).