

周期的変動を含む聴覚刺激に対する内部モデルの獲得

東京工業大学 大学院 総合理工学研究科 知能システム科学専攻 ○吉田 祥平, 横山 正典, 三宅美博

An acquisition of an internal model to periodical frequency shifts

○Shohei YOSHIDA, Masanori YOKOYAMA and Yoshihiro MIYAKE,
Tokyo Institute of Technology

Abstract: In this study, we investigated an acquisition to an internal model in dynamical complex environment, we analyze the synchronization tapping behavior against the periodical auditory stimuli with simple perturbation pattern. Previous researches provide lag 1 cross-correlation between ISI and ITI. But this research provides lag 0 cross-correlation not only on awareness condition but also on no awareness condition for periodic fluctuation. This result suggested that the timing control mechanism works predictively without the awareness.

1 はじめに

人間は動的に変動する複雑な環境の中で生活するために、環境に対して柔軟に適応する能力を持っている。このような適応能力の中でも時間的側面に深く関与しているのがタイミングを合わせる能力である。このタイミングを合わせる能力は、他者との共同作業やコミュニケーションを円滑に達成する上でも重要な要素のひとつであると考えられる^{1, 2)}。また環境に対してタイミングを合わせて行動する際には、神経伝達や神経情報処理、さらには動作による時間遅れが存在する。それらを考慮すると、環境に対して受動的に行動を選択するだけでなく、予測的に行動を選択することが必要である。

このような背景からタイミング予測に関して様々な研究がなされており^{3, 4)}、その1つの手法として心理物理実験である同期タッピング課題が用いられてきた。同期タッピング課題とは、被験者が周期的に提示されるリズム刺激に対してタップ動作を同期させる課題であり、リズム刺激を用いた研究の有効なアプローチとして正当性も支持されている⁵⁾。

この同期タッピング課題を用いて注意や意図、気付きがタイミング予測に影響を与えることが示唆されてきた⁶⁾。その中でも気付きは、周期変動に対する弁別閾値以上の変動を与えたとき、弁別閾値以下の場合に比べて刺激周期と応答周期のズレが強く修正されることから重要視されており³⁾、その弁別閾値も調べられている⁷⁾。

さらに気付きが同期タッピング課題中の適応過程に及ぼす影響を調査するために、Thautらは刺激周期の変動を余弦波状にすることによって、周期的な変動に対する連続的な適応過程を観察した⁸⁾。その結果、周期変動に気付くとされている領域だけでなく、周期変動に気付かないとされている領域においても、応答に周期性が見られ、さらに刺激音の周期と応答の周期の相互相関関数がラグ1で大きな値を取ることから、それ以前の刺激音の

周期と応答の周期の比較をすることによって生じる誤差補正の結果として、応答は直前の音刺激にワンステップ遅れて追従することを示した。しかし、同様の課題を用いて脳活動を計測した研究では、運動学習による内部モデルの獲得に深く関わりとされている小脳の活動量が増加することが報告されている⁹⁾。また運動学習によって獲得される内部モデルによって、タイミング予測が上達することを示唆する知見もある¹⁰⁾。このことから被験者の応答は運動学習に影響を受けると考えられるが、先行研究はいずれも短期間の実験であり、運動学習の影響は調べられていない。

そのため本研究では、運動学習によって周期的変動を含む聴覚刺激に対する被験者の応答が変化するという作業仮説を立て、学習前と学習後の応答を比較することで作業仮説を実証することを目的とする。また弁別閾値以下と弁別閾値以上の周期変動を含む刺激を用いることで、気付きの有無による応答の違いがあるかを観察する。

2 実験方法

2.1 被験者

被験者は20代(平均23歳)の健康で右利きの男女5人(男性3人, 女性2人)であり、被験者全員が事前に予備的な試行を行い、正常な聴力を持ち、滞りなくタップを行えることを確認した。また優れた音楽能力が同期課題の遂行に影響を及ぼすことが明らかにされているため¹¹⁾、特別な音楽訓練を受けたことがない方を対象とした。

2.2 実験課題

2.2.1 同期課題

同期課題としてイヤホンを通じて両耳に提示される聴覚刺激に可能な限りタイミングを合わせてタップする同期タッピング課題を用いた。実験中のタップはすべて右手人差し指で行い、視覚による影響を排除するために瞑

目し、提示した刺激音以外の聴覚刺激を出来る限り排除するために遮音性の高いイヤーマフを使用した。また実験中にタップを行う右手人差し指以外の手足など身体の一部を動かしてリズムを取ることは禁止した。

2.2.2 弁別課題

弁別課題は Stephan らの方法⁹⁾と同様に同期課題の試行後に毎回「なにか変化に気づきましたか？」と質問し、被験者に回答させた。質問はディスプレイに表示され、被験者はマウスの左右クリックを用いて気づきの有無を回答した。被験者が何か変化に気付いたと回答した場合のみ、どのような事に気付いたのかを口頭で実験者に答えさせた。

2.3 実験手順

被験者は4つのブロックで構成される実験を2日間行った。ブロック1ではトレーニング前の本実験を行った。本実験は周期変動なし1種類(2試行)と周期変動あり2種類(各1試行)の計4試行がランダムな順序で提示されるセッションを3回繰り返す。ブロック2ではトレーニングを行った。トレーニングは各周期変動率に対して15試行を3つのセッションに分けて行った。また提示する刺激周期変動率の順序はランダムに決定した。ブロック3ではトレーニング後の本実験を行った。その際の手順は、トレーニング前の本実験と同様である。ブロック4では周期変動に対する気づきの弁別実験を行った。弁別実験では、本実験の手順に加えて試行後に毎回弁別課題を行う。ここで1試行は60回の音刺激で構成され、試行間では30秒間、セッション間では数分間の休憩を与えた。

2.4 変数の定義

n 回目の音刺激の提示時刻を $S(n)$ 、その刺激に対するボタン押し動作(以後、タップと記す)の提示時刻を $R(n)$ として、刺激音の周期である ISI (Inter Stimulus-onset Interval)、連続するタップの時間間隔である ITI (Inter Tap-onset Interval)、刺激時刻に対するタップ時刻の時間差である SE (Synchronization Error) を以下の (1) - (3) 式のように定義する。

$$ISI(n) = S(n+1) - S(n) \quad (1)$$

$$ITI(n) = R(n+1) - R(n) \quad (2)$$

$$SE(n) = R(n) - S(n) \quad (3)$$

2.5 実験装置と刺激音

本研究で制作した同期タッピングシステムは MacBookPro(CPU:2.8GHz)、イヤホン、イヤーマフ、USBマウスを用いて構築した。またプログラムは MATLAB2008b および Psychtoolbox を用いて作成し、タップのサンプリング時間精度は 1ms 以下であった。

また Thaut らの研究との比較をするために、刺激音と刺激周期 ISI は Thaut らが用いた値に倣った。刺激音は周波数 2000Hz、持続時間 30ms の矩形波とし、刺激周期 ISI は以下の式 (4) に示す。これらはすべての試行、被験者を通じて共通である。

$$ISI(n) = D(1 - A \cos(\frac{\pi}{2}n)) \quad (4)$$

D は基準となる ISI の大きさであり、 A は周期変動の割合である。このように設定したとき、ISI は $D(1+A)$ 、 D 、 $D(1-A)$ 、 D の4つの刺激周期を1周期とする非常に単純なパターン、すなわち周期的な変動を持つ。本研究は刺激周期 $D=600$ ms における周期変動率 $A=0, 3, 7\%$ の3種類を用いて実験を行った。なお実験に用いた基準となる ISI の大きさである 600ms は、同期タッピング課題の遂行が容易であるとされる範囲内にある^{4, 8)}。

ISI の時間発展例を Fig.1 に示す。ここで、周期変動による被験者の気づきの閾値は、変動量の絶対量よりも相対量に大きな影響を受けることが明らかにされており⁸⁾、その閾値は $A=5\sim 7\%$ であるとされている⁷⁾。

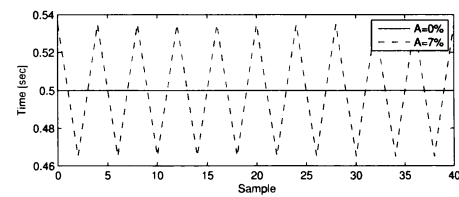


Fig. 1 Example of time series of ISI

3 結果

3.1 弁別課題

被験者毎の周期変動への気づきを Table.1 に示す。ここで表中の確率は被験者が口頭で周期に変動があると回答した割合である。被験者 D 以外はおおむね先行研究と同様に周期変動率 $A=3\%$ では周期変動に気付かず、 $A=7\%$ では周期変動に気付いた。このことから被験者 D は他の被験者よりも周期変動に敏感であり、弁別課題の結果の傾向が異なるため、以降の解析からは除外した。よって、以降の全被験者とは被験者 D を除く 4 名とする。

3.2 SE の分布

2 日間で 4 回行われた本実験における SE の平均値を Table.2 に示す。ここで表中の値は全被験者が本実験で行った試行の平均値であり、SE の平均値が負の値を取るとき、被験者の応答が音刺激に先行していることを表す。このことから、すべての条件において被験者の応答が音刺激に先行していることが分かる。

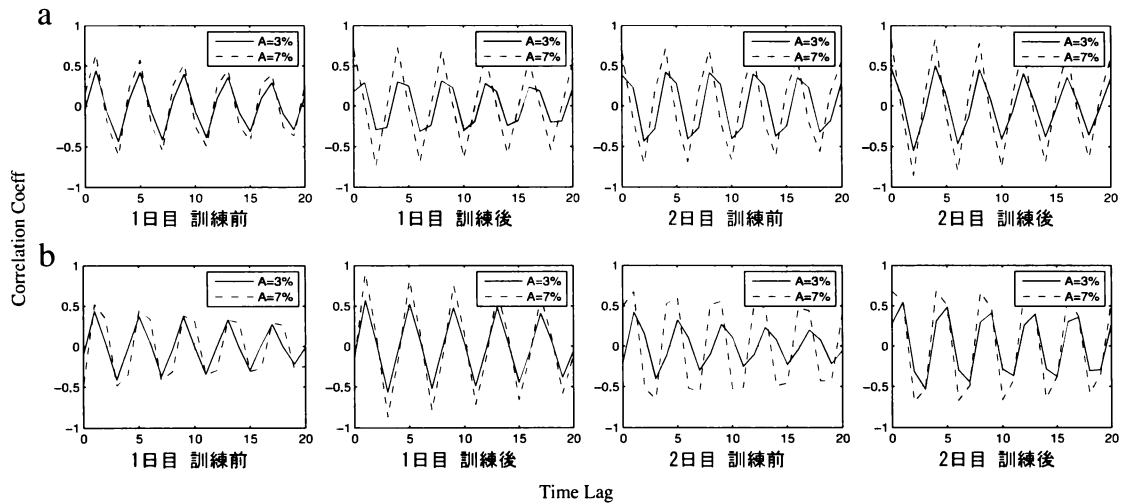


Fig. 2 Example of cross-correlogram ISI vs ITI (a: Sbj.A, b: Sbj.B)

Table 1 Recognition of perturbation rates

A [%]	1 日目			2 日目		
	0	3	7	0	3	7
Sbj.A	0%	0%	66%	0%	0%	66%
Sbj.B	0%	0%	100%	0%	33%	100%
Sbj.C	0%	0%	100%	0%	0%	100%
Sbj.D	0%	66%	100%	0%	100%	100%
Sbj.E	0%	33%	66%	0%	33%	100%

Table 2 Mean of synchronization error

A [%]		0	3	7
1 日目	訓練前	-54.6ms	-52.6ms	-51.6ms
	訓練後	-76.6ms	-79.6ms	-75.7ms
2 日目	訓練前	-73.6ms	-66.2ms	-64.4ms
	訓練後	-78.0ms	-75.0ms	-71.3ms

3.3 ISI と ITI の相互相関

被験者 A と B の各条件における ISI と ITI の相互相関を Fig.2 に示す。ここでラグ N で相関関数が最大値を取るとき、ITI のデータを N 個分ずらした状態で ISI との相関が最も高くなることを示す。つまり N の値が正であれば、ITI が ISI に N 個分だけ遅れて追従していることを表す。また本研究では 4 回の音刺激を 1 周期とする周期的な周期変動に対する応答の特徴を調べた。このことから特にラグ 0 からラグ 3 までの間で相互総関数が最大値を取ったタイムラグを Table.3 に示す。

Fig.2a の被験者 A の結果では、A=7% において 1 日目の訓練前では相関関数がラグ 1 で最大値を取っていたが、

Table 3 Time lag (Sbj.A & Sbj.B)

A [%]	被験者 A		被験者 B		
	3	7	3	7	
1 日目	訓練前	ラグ 1	ラグ 1	ラグ 1	ラグ 1
	訓練後	ラグ 1	ラグ 0	ラグ 1	ラグ 1
2 日目	訓練前	ラグ 0	ラグ 0	ラグ 1	ラグ 1
	訓練後	ラグ 0	ラグ 0	ラグ 1	ラグ 0

1 日目の訓練後から相関関数がラグ 0 で最大値を取った。また A=3% は 2 日目の訓練前に相互相関関数がラグ 0 で最大値を取った。

Fig.2b の被験者 B の結果では、A=7% において 2 日目の訓練前では相関関数がラグ 1 で最大値を取っていたが、2 日目の訓練後で相関関数がラグ 0 で最大値を取った。しかし A=3% では 2 日目の訓練後においても相関関数がラグ 0 で最大値を取ることはなかった。

被験者 C および E についても、訓練を進めるにつれ、ラグ 0 での相関関数が上昇し、ラグ 1 での相関関数が小さくなる傾向は変わらなかった。

4 考察

本研究では、周期変動を含む聴覚刺激に対する同期タッピング課題を 2 日間に渡って行い、運動学習による応答の変化の有無を調べ、さらに変動量を調整することで気付きの有無によって応答が変化するかを調べた。

1 日目の訓練前の本実験から、すべての被験者で A=3% でも 7% でも相関関数がラグ 1 で最大値を取り、周期変動に対して 1 ステップ遅れて追従して応答していることを確認した。これは同じ刺激を用いて短期間の実験を行っ

た Thaut らの結果⁸⁾と一致し、実験が正しく行えていることを確認した。

被験者 A は、 $A=7\%$ において1日目の訓練後から相関関数がラグ0で最大値を取った。相関関数がラグ0で最大値を取ることは、周期変動に対して予測的に応答していることを示唆する。この結果は、Stephan らの結果と相関関数が最大値を取るラグが0であるという点では一致するが、Stephan らの結果ではSEが正の値、つまり刺激音に対してリアクティブに応答しているためにラグ0で最大値を取ったと考えられるため、完全に周期変動に対して予測的に応答したとは言えない。しかし本研究では、SEはすべての条件で負の値を取っているため、周期変動に対する弁別閾値以上の領域において、周期変動に対して予測的に応答できることを示唆し、運動学習によって応答に変化があるという作業仮説を実証する事例を得た。また $A=3\%$ において、2日目の訓練前から相関関数がラグ0で最大値を取った。このことから周期変動に気付かないとされる弁別閾値以下の領域においても、周期変動に対して予測的に応答できることを示唆し、弁別閾値以上と弁別閾値以下の両方で、運動学習によって応答が変化し、周期変動に対して予測的に応答するようになることが示唆された。しかし両条件間では、脳の活動部位に違いがあることが報告されており⁹⁾、タイミング予測を行うメカニズムが異なると考えられる。また被験者が周期変動に気付いている場合、運動指令は周期変動を含んだものになるため、周期変動に気付いていない場合と異なることが考えられ、運動指令の影響であるとも考えることもできる。このような原因からラグ0で最大値を取るまでの試行回数に差がみられたと考えることも出来るが、本研究では両条件を用いているため、弁別閾値以上の条件での応答の残留効果によって、弁別閾値以下でも相互相関関数がラグ0で最大値を取った可能性がある。この問題を解決するために、弁別閾値以下の条件のみを用いて検証していく予定である。

5 まとめ

本研究では、周期変動を含む聴覚刺激に対する同期タッピング課題を2日間に渡って行い、弁別閾値以上だけでなく弁別閾値以下の条件でも、運動学習によって応答が変化し、周期変動に対して予測的に応答するようになることが示唆した。しかし両条件を用いているため、弁別閾値以上の条件での応答の残留効果によって、弁別閾値以下でも相互相関関数がラグ0で最大値を取った可能性がある。この問題を解決するために、弁別閾値以下の条件のみを用いて検証していく予定である。

参考文献

- [1] 渡辺: コミュニケーションにおける身体性; ヒューマンインタフェース学会誌, **Vol.1**, No.2, pp.14-18 (1999).
- [2] 高杉, 山本, 他: コミュニケーションロボットとの対話を用いた発話と身振りのタイミング機構の分析; 計測自動制御学会論文集, **Vol.45**, No.4, pp.215-223 (2009).
- [3] Thaut, M., Miller, R., Schauer, L.: Multiple synchronization strategies in rhythmic sensorimotor tasks: phase vs period correction; *Biological Cybernetics*, **Vol.71**, pp.241-250 (1998).
- [4] 三宅, 大西, ペッペル: 同期タッピングにおける2種類のタイミング予測; 計測自動制御学会論文集, **Vol.38**, No.12, 1114-1122 (2002).
- [5] Lehrdahl, F., Jackendoff, R.: A generative theory of tonal music; MIT press, (1982).
- [6] Repp, B., Keller, P.: Adaptation to tempo changes in sensorimotor synchronization: Effects of intention, attention, and awareness; *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **Vol.57A**, No.3, pp.499-521 (2004).
- [7] Killeen, P., Weiss, N.: Optimal timing and the Weber function; *Psychological Review*, **Vol.94**, pp.455-468 (1987).
- [8] Thaut, M., Tian, B., Azimi-Sadjadi, M.: Rhythmic finger tapping to cosine-wave modulated metronome sequences: Evidence of subliminal entrainment; *Human movement science*, **Vol.17**, pp.839-863 (1998).
- [9] Stephan, K., Thaut, M., et al.: Conscious and subconscious sensorimotor synchronization—prefrontal cortex and the influence of Awareness; *Neuroimage*, **Vol.15**, pp.345-352 (2002).
- [10] 小池, 洪, 佐藤: 複数の加速度環境でのボールキャッチングタスクにおけるタイミング予測; 電子情報通信学会技術研究報告. NC, ニューロコンピューティング, **Vol.105**, No.341, pp.27-32 (2005).
- [11] Franek, M. M., Mates, J., et al.: Finger tapping in musicians and nonmusicians; *Internal Journal of psychophysiology*, **Vol.11**, pp.187-192 (1991).