

複雑な外的イベントとの同期における2種類のタイミング制御機構 -自動的な機構と認知的に制御された機構-

武藤 ゆみ子*、三宅 美博*、エルンスト・ペッペル†

*東京工業大学 総合理工学研究科、†ミュンヘン大学 医学的心理学研究所

Two timing systems for sensorimotor synchronization with complicated external events -The automatic timing system and the cognitively controlled timing system-

Yumiko Muto^{*1}, Yoshihiro Miyake^{*1} and Ernst Pöppel^{*2}

* Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

† Department of Medical Psychology, University of Munich, Germany

Abstract – In this study, to evaluate the human's adaptation mechanism to complicated external events, we analyzed the synchronization tapping behavior against the periodical auditory stimuli with white noise disturbance. We controlled standard deviations of ISI (Inter-Stimulus-Interval) as an index of complication, and compared subjects' reactions to simple (isochronous) rhythmic stimuli with those to complicated (random) stimuli. Consequently, we found significant differences between below and above the threshold for conscious detection of the perturbations. This result suggested that the two systems, an automatic timing system and a controlled timing system, are properly used depending on the conscious awareness.

Keywords: sensorimotor synchronization, tapping, timing control, conscious awareness

1. はじめに

人間は日常生活の中で外的イベントの変化に順応し、協調して行動することができる。例えば、音楽に合わせてダンスをする際、人間はそのリズムにステップを合わせるために、タイミングを制御することができる。また、対話においても上手な相槌や話のタイミング制御することで、会話を円滑にすすめることができる。このようなことから、協調的な動作におけるタイミング制御は人間にとって重要な能力の1つであると考えられる^[1]。

一方、このようなタイミングを合わせる行為を行う際、外的イベントの持つ時間構造の違いによって、しばしば「合わせやすい」または「合わせにくい」と感じることもある。例えば、ダンスの際、テンポ変化のない単調な音にステップを合わせることは、複雑なリズムに合わせるよりも簡単であると感じる。これは、時間間隔の変化がない刺激への適応動作では、刺激の持つ時間構造に対し意識を払う必要がないからであると考えられている^{[2][3]}。これに対し、複雑なリズムへの適応動作では、未知の環境へ対応しなければならないので、タイミングを正しく予測できず「合わせにくい」と感じることが多い。そのため、人間は刺激を意識的に注意して知覚することで、このような複雑なリズムへも適応を可能としている。

しかし、これまで人間のタイミング制御機構の研究では、比較的単純な環境への適応行為が対象とさ

れている。その一例として、一定間隔で提示される音刺激に合わせて指でボタンをタップする“同期タッピング課題”が挙げられる^{[4][5][6][7]}。これは単純な周期的な刺激に対し反復的応答が要される課題であり、その誤差修正機構（位相修正機構・周期修正機構）が刺激と応答の位相状態を維持するために重要な役割を果していることが報告されている^{[8][9][10][11]}。また、これらの誤差修正機構を調査するための実験として、音刺激提示タイミングとタップタイミングで表される位相差やタップ周期を制御する方法も用いられており、最近では誤差修正機構が刺激変化の認知と関連していることも報告されている^{[12][13][14]}。

そこで本研究では、このような誤差修正機構の観点から、複雑な時間構造を持つ外的イベントへの適応特性の評価を行う。そのため、外的イベントが単調である場合だけでなく複雑である場合も設定し、その際の人間の適応行為の計測を行う。実験では、同期タッピング課題を用い、提示刺激間隔に外乱を加え、その大きさを“複雑さ”の指標として制御し、人間が外乱を認知する閾値の推定を行う。そして、その推定された閾値の前後で被験者の刺激とのずれがどのように変化するかを、位相差とタップ周期の関係に着目して解析をすすめる。

2. 実験方法

2.1. 被験者

被験者は、著者を含む 21 から 47 歳(平均 29.8) までの健康で右利きの男女 17 人(男性 10 人、女性 7 人)のボランティアであった。12 人がタッピング実験の被験者としての経験が複数回あった。また、優れた音楽能力が同期課題の遂行に影響を及ぼすと考えられるため^[15]、特別な音楽訓練を受けたことがない被験者を募った。

2.2. 実験装置

音刺激 (500Hz,100ms) はヘッドフォンを通し両耳に提示した。音量は全被験者で一定であった。刺激制御とデータの記録は、シングルタスク OS (IBM DOS2000) 上での C 言語で組まれたプログラムにより行われた。時間精度は 1/1024 秒であった。実験には異なる 2 台の実験装置が用いられたが、この違いによるデータの有意差は観察されなかった。

2.3. パラメーター定義

k 番目の音刺激提示タイミングを $S(k)$ 、その刺激に対する人間のタップタイミングを $R(k)$ と表し、本実験で用いられるパラメーターを式(1)-(3)のように定義する。

- ISI(Inter-stimulus-Interval: 刺激提示間隔)

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

- SE (Synchronization Error: 位相差)

$$SE(k) = R(k) - S(k) \quad (2)$$

- ITI (Inter-Tap-Interval: 周期)

$$ITI(k) = R(k+1) - R(k) \quad (3)$$

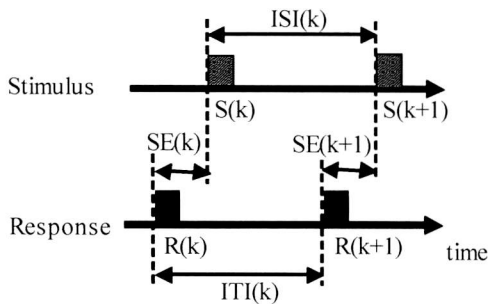


Fig.1 Relationship between SE and ITI

2.4. 外乱を含む同期タッピング課題

本研究では、外乱を含む同期タッピング課題を導入した。この実験系における刺激提示間隔 ISI に関して詳細を以下に述べる。

通常の同期課題で用いられる一定の時間間隔に外乱 (ホワイトノイズ) を加え、それを提示刺激間隔 (ISI) として用いた。具体的には、ISI は分布関数が平均 μ と標準偏差 σ で表されるガウス分布(4)に従う正規乱数で与えられた。この方法を用いることにより、 μ を固定し、 σ の大きさを変化させ、外乱の大きさを制御することが可能となる。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

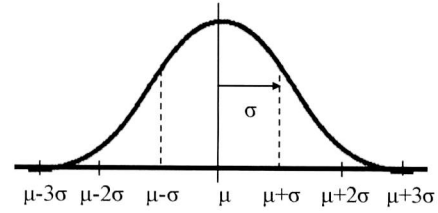


Fig.2 Normal distribution $N(\mu, \sigma^2)$

計算機における ISI の生成方法として、乱数生成精度が高いとされるメルセンヌ・ツイスター法^[16]を用いて(0,1]の一樣乱数を 2 対発生させ、得られた一樣乱数をボックス・ミュラー変換法により正規乱数に変換するという方法を用いた。

2.5. 実験

被験者は、ヘッドフォンから提示される音刺激に合わせて右人差し指でタッピング運動を行うように指示された。実験前に、タッピング装置に慣れるために約 3 分間の練習が行われた。ISI の平均値 μ は 800ms の固定値で与えられ、ISI の標準偏差 σ_{ISI} は 10ms 刻みで 0 から 80ms までの 9 種類用意された。実験順序は、外乱のない条件 ($\sigma_{ISI} = 0$) から徐々に外乱が大きいく条件を提示した。1 試行につきタップ数は 110 回であり、最初の 10 回を除く 100 回を解析に用いた。なお、本研究で用いた $ISI=800ms$ の値は、ISI と SE の標準偏差の比が最小であり、最も課題遂行が容易であると示唆されている値であった^[16]。

認知閾値の検出のため、被験者が何試行目、すなわち、どの外乱の大きさに刺激変化に気づいたかを尋ねた。必要以上に刺激変化に注意を向けることを避けるため、被験者は事前に質問を提示することを知らされていなかった。また、先行研究^[12]による知見 (ISI の大きさに対し 5% の変化が気づくことができる閾値である) に基づき、確実に被験者が刺激変化に気づくと考えられる第 4 試行 ($\sigma_{ISI}=30ms$) 後に質問を提示した。

3. 解析結果

3.1. 認知閾値

被験者が ISI の変化にはじめて気づいたと回答した外乱の大きさを “認知閾値” とし、Fig.3 に示した。全ての被験者が $\sigma_{ISI} = 20ms$ 、 $30ms$ が閾値であると答えた。以上の結果から、検出された認知閾値は $\sigma_{ISI} = 20-30ms$ であった。

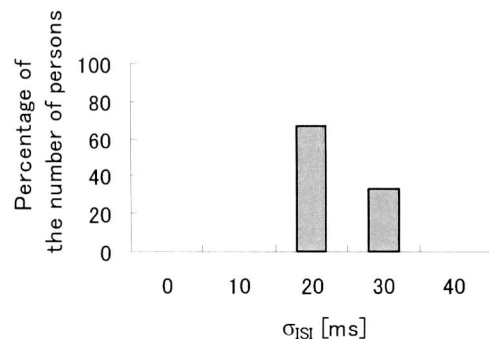


Fig.3 Threshold value of conscious awareness

3.2. 応答解析結果

本研究では、SE（位相差）が次のタップタイミングを決定するためのフィードバック的役割を果たしているという知見をもとに、刺激変化の認知による

SE(位相差)と ITI(周期)の関係の変化に注目し解析を行った。SE と ITI の関係を示す散布図例を Fig.4 に示した。

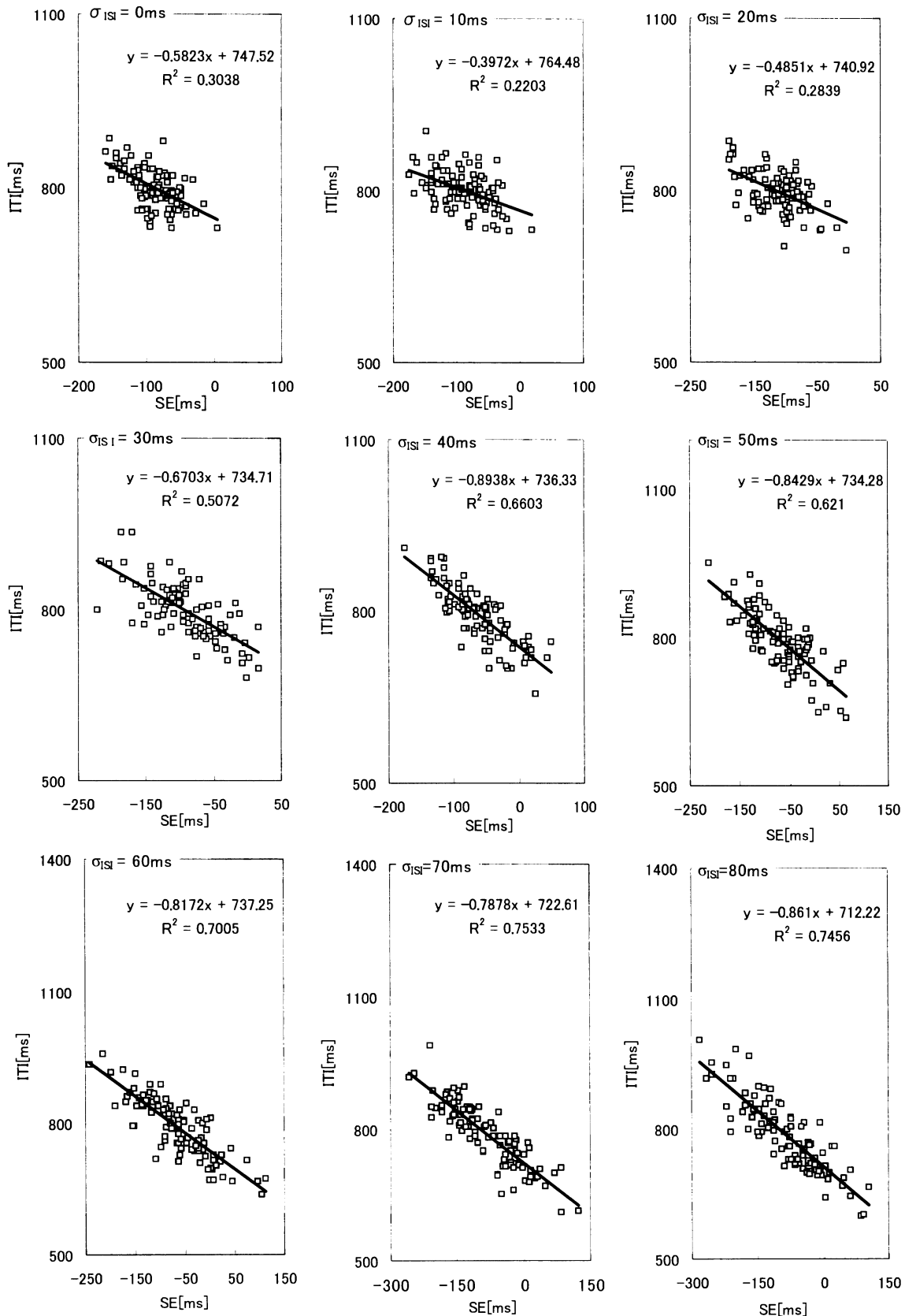


Fig.4 Scatter plots which indicate the relationship between SEs and ITIs for one subject

Fig.4 から SE と ITI の強い相関関係が推測されるため、相関係数(Pearson product-moment correlation coefficient) を求めた。被験者間で平均された相関係数の値と σ_{ISI} の大きさを Fig.5 に示す。 σ_{ISI} の値が大きくなるに従い、相関係数の値が 1 に近づいていることがわかる。また、認知閾値($\sigma_{ISI} = 20-30ms$)を境に、認知閾値前($\sigma_{ISI}=0-10ms$)と認知閾値後($\sigma_{ISI}=40ms$ 以降)の相関係数の値に変化が見られた。

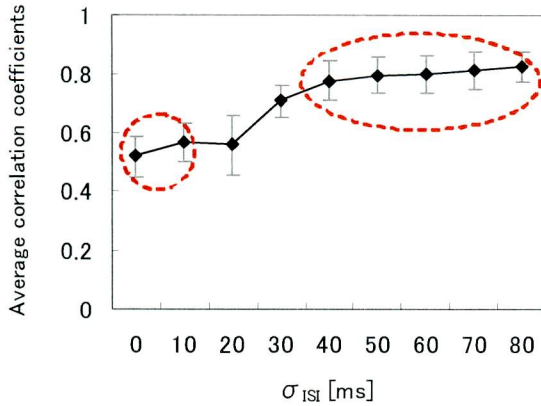


Fig.5 Average correlation coefficients.

さらに詳細に SE と ITI の関係の変化を調べるため、単回帰分析を行い SE と ITI から回帰式；

$$ITI(k) = -\alpha SE(k) + \gamma \quad (5)$$

※ α 、 γ は定数

を推定した。

被験者間で平均された回帰直線の傾きの値(回帰係数 α)と σ_{ISI} の大きさを Fig.6 に示す。認知閾値($\sigma_{ISI} = 20-30ms$)を境に、認知閾値前($\sigma_{ISI}=0-10ms$)と認知閾値後($\sigma_{ISI}=40ms$ 以降)における α の値に変化が見られた。

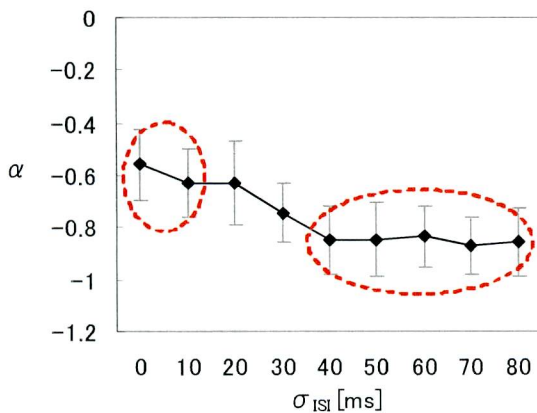


Fig.6 Average slopes (α) of regression lines which approximates the relationship between SE and ITI.

本研究の目的は、認知閾値前後の違いを明らかにすることである。そこで、遷移過程である認知の閾値($\sigma_{ISI}=20-30ms$)を除いた上での結果を述べる。

回帰係数 α に関して、認知閾値を除き、外乱を含まない条件($\sigma_{ISI}=0ms$)と全条件を比較した。共分散分析の平行性の検定結果($p < 0.01$, $F(8,88)=16.965$)、さらに傾きの多重比較検定(Fisher's PLSD post hoc comparison test)により、外乱を含まない条件($\sigma_{ISI}=0ms$)と $\sigma_{ISI}=10ms$ には有意差がなかった($p=0.124$)。しかしながら、外乱を含まない条件($\sigma_{ISI}=0ms$)と $\sigma_{ISI}=40-80ms$ の条件に有意差($p < 0.01$)が検出された。さらに、 $\sigma_{ISI}=40-80ms$ 間には有意差がなかった。

以上の結果から、認知閾値前後において、SE と ITI から推測される回帰係数 α が異なる値を示すことが明らかになった。

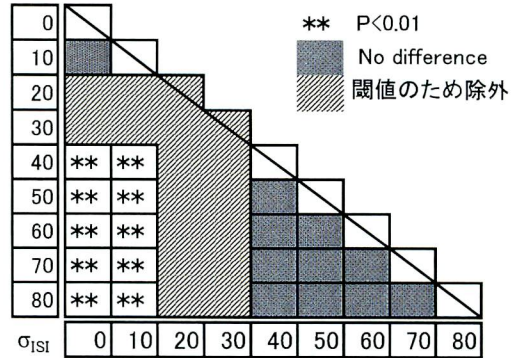


Fig.7 Pairwise Comparison

4. 考察

本研究では、複雑な時間構造を持つ外的イベントへの適応特性を観察するため、外的イベントが単調である場合と複雑である場合の応答特性の比較を行った。その結果、以下の2つの知見が得られた。

- ・ 認知閾値は $\sigma_{ISI} = 20-30ms$ であった。
- ・ 認知閾値前後で、SE と ITI から推定される回帰係数 α に変化が見られた。

これらの知見を、すでに明らかにされている誤差修正機構に関する報告をもとに、認知閾値前の“単調な外的イベント”及び、認知閾値後の“複雑な外的イベント”の、それぞれに関するタイミング制御機構の観点から考察をすすめる。

4.1. 認知閾値前

-単調な外的イベントに対するタイミング制御機構-

従来、単調な外的イベントとの同期タッピングにおいて、位相修正機構(式6)と周期修正機構(式7)の2種類の誤差修正機構の存在が知られている^{[8][9][10][18][19][20][21]}。

- ・ 位相修正機構；

$$ITI(k) = -\alpha SE(k) + t(k) \quad (6)$$

- ・ 周期修正機構；

$$t(k) = t(k-1) - \beta[t(k-1) - ISI(k-1)] \quad (7)$$

※ α 、 β は定数

$t(k)$ は、式(6)における位相差 $SE(k)=0$ のときの周期の値であり、“timekeeper period”と定義されている。

一般に、位相修正機構における傾き α の値は-0.6程度であると知られている^{[12][18][19][20]}。この知見における α の値と、本研究の結果から得られた認知閾値前の α の値はほぼ一致していると考えられる。このことから、認知閾値前の外的イベントを“単調な外的イベント”であると捉え、応答が行われていたことが示唆される。

また、ISI が 800ms の同期タッピング課題において、SE が -20~50ms であることが知られている^{[22][23]}。この負の SE は無意識的な行為によるもので、そのタッピング運動では、注意資源が必要とされないことが知られている^[21]。また、この ISI では、人間が音を“まとまり”として捉え、“リズム”として容易に合わせるができる。従って、意識的に音に注意を向けなくとも、聴覚フィードバックにより課題遂行が可能である。また、タッピング運動が連続的なリズム運動であることから、自動的行動において重要な役割を果している小脳との関連^{[24][25]}や、生体の基本的な運動パターンの指令が行われる CPG(central pattern generator)と呼ばれる神経振動子結合系との関連も示唆されている。

これらの知見から、人間は単調な外的イベントにタイミングを合わせる際、身体的な自動的タイミング機構を用いていたことが示唆される。

4.2. 認知閾値後

—複雑な外的イベントに対するタイミング制御機構—

認知閾値後の複雑な外的イベントへの応答において、結果からさらに負の大きな α の値が検出された。このことから、位相修正機構自体の変化は見られないが、位相修正機構におけるフィードバックのゲインが単調な外的イベントに対する場合よりも大きくなったと考えられる。これは、音からの聴覚フィードバック基本構造は変化していないが、刺激の変化が、被験者のタップタイミングと音刺激提示タイミングのズレの認知を促し、そのズレの大きさに応じたタップタイミングを被験者が意識的に制御していた可能性が考えられる。つまり、刺激提示タイミングが複雑で予測困難であるため、聴覚フィードバックだけではタイミングを合わせるには不十分であるので、個々の音刺激に注意を向けることによって複雑な外的イベントに対するタイミング制御が行われたことが示唆される (Fig.8)。

このことは、複雑な外的イベントに対するタイミング制御機構においても、自動的な機構が活用されているが、認知の介入を原因とする、意識的な制御機構がさらに実現されていた可能性を示唆している。つまり、複雑な外的イベントとタイミングを合わせようとする状況では、人間はそもそも持っている自動的な機構を活用しながら、刺激の認知に起因する意識的な機構を介入させることで柔軟に対応していることを示唆している。

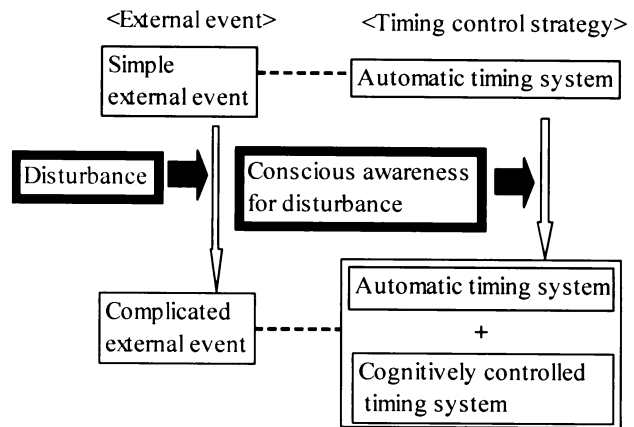


Fig.8 Two timing systems for sensorimotor synchronization

5. 統括・展望

本研究では、複雑な外的イベントへの人間の適応特性を評価するため、音刺激の提示間隔に外乱を含ませ、指タッピング運動を同期させる実験を行った。複雑さの指標として外乱の大きさを制御し、認知の閾値の推定、及び、外乱の大きさによる応答の変化を観察した。その結果、外的イベントが単純である場合には、自動的タイミング制御機構が用いられていることがわかった。しかし、外的イベントが複雑な場合には、その制御機構の基本構造は単調である場合と同じだが、認知の介入により、意識的な制御機構が存在し、その意識的な機構と自動的機構を組み合わせることで同期を達成する制御方法が用いられている可能性が示された。

これまで感覚運動連関の同期に関する研究は、単調な外的イベントに注目され解析が行われていた。しかしながら、実際に我々人間が直面する環境は、次のイベントが未知で予測ができないといった非常に複雑な時間構造を持っている。しかし、人間は毎日の活動のなかでそのような環境への適応を実現している。本研究で得られた知見は、このようなこれまで考慮されてこなかった複雑な時間構造を持つ環境への適応特性を評価するものであり、今後さらに実験系を発展させることで、このような知見を様々な分野に応用してゆくことが可能となるだろう。

今後は、推定された認知の閾値の前後での解析をより詳細に行うことを予定している。特に、連続した2つの音刺激を提示した際、その2音の前後関係を正確に知るには 30~40[ms]が必要であることが知られている^{[26][27]}。この時間認知の閾値は視覚・聴覚・触覚において同じ値を示し、脳損傷によりこの閾値が広がることから、脳の高次機能と関連していることが報告されている^{[28][29]}。この知見から、認知の閾値も脳の高次機能と関連している可能性が予想される。したがって、この認知の閾値に関して解析を進めることで、認知の閾値前後の変化がどのように行われているのか、さらに解明されることが期待される。

参考文献

- [1] 三宅, 辰巳, 杉原: 交互発話における発話長と発話間隔の時間的階層性; 計測自動制御学会論文集, **Vol. 40**, No.6, pp.670-678 (2004).
- [2] 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, pp.1114-1122 (2002).
- [3] Miyake, Y., Onishi, Y & Poeppel, E.: Two types of anticipation in synchronous tapping; *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, **Vol. 64**, pp.415-426 (2004)
- [4] Dunlap, K.: Reactions on rhythmic stimuli, with attempt to synchronize; *Psychological Review*, **Vol. 17**, pp. 399-416
- [5] Aschersleben, G., & Prinz, W.: Synchronization actions with events; The role of sensory information; *Perception and Psychophysics*, **Vol. 57**, pp. 305-317 (1995)
- [6] Aschersleben, G., & Prinz, W.: Delayed auditory feedback in synchronization; *Journal of Motor Behavior*, **Vol.29**, pp. 35-6.
- [7] Aschersleben, G.: (Afferent information and the synchronization of events: Frankfurt, Germany, Peter Lang (1994)
- [8] Vorberg, D., Wing, A.: Modeling variability and dependence in timing. (Heuer, H., Keele, S.W., Eds): *Handbook of perception and action 2*, Academic Press, London, pp. 181-262 (1996)
- [9] Mates, J.: A model of synchronization of motor acts to stimulus sequence, I. Timing and error corrections.: *Biological Cybernetics*, **Vol.70**, pp.463-473 (1994a)
- [10] Mates, J.: A model of synchronization of motor acts to stimulus sequence, II. Stability analysis, error estimation and simulations: *Biological Cybernetics*, **Vol.70**, pp.475-484 (1994b)
- [11] Hary, D., & Moore, G. P.: Synchronizing human movement with an external clock source.: *Biological Cybernetics*, **Vol. 56**, pp.305-311 (1987)
- [12] Repp, B.H.: Processes underlying adaptation to tempo changes in sensorimotor synchronization: *Human movement science*, **Vol. 20**, pp.277-312 (2001).
- [13] Repp, B.H.: Comments on "Rapid motor adaptations to subliminal frequency shifts during syncopated rhythmic sensorimotor synchronization" by Thaut, M.H and Gary, P.K. (*Human Movement Science* 22 [2003] 321-338): *Human movement science*, **Vol. 23**, pp.61-77 (2004)
- [14] Thaut, M.H, Miller, R.A, Schauer, L.M.: Multiple synchronization strategies in rhythmic sensorimotor tasks: Phase vs period correction: *Biological Cybernetics*, **Vol.79**, pp.241-250 (1998)
- [15] Franek, M. M., Mates, J., Radil, T., Beck, K., Pöppel, E.: Finger tapping in musicians and nonmusicians: *International Journal of psychophysiology*, **Vol. 11**, pp.187-192 (1991)
- [16] Matsumoto, M., Nishimura, T.: Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator: *ACM Trans. on Modeling and Computer Simulation*, **Vol.8-1**, pp.3-30 (1998)
- [17] Woodrow, H.: The effect of rate of sequence upon the accuracy of discrete motor responses: *Journal of Experimental Psychology*, **Vol. 15-4**, pp.357-359 (1932)
- [18] Repp, B.H.: Compensation for subliminal timing perturbations in perceptual-motor synchronization: *Psychological Research*, **Vol.63**, pp.600-621 (2000)
- [19] Repp, B.H.: Phase correction, phase resetting, and phase shifts after subliminal timing perturbations in sensorimotor synchronization. : *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **Vol.27**, pp.600-621(2001)
- [20] Semjen, A., Schulze, H.-H., & Vorberg, D.: Timing precision in continuation and synchronization tapping: *Psychological Research*, **Vol.63**, 137-147. (2000)
- [21] Pressing, J., & Jolley-Rogers, G.: Spectral properties of human cognition and skill.: *Biological Cybernetics*, **Vol.76**, pp.339-347 (1997)
- [22] Fraise, P.: Sensorimotor synchronizations to rhythms; *Anticipation et comportement*, pp. 233-257
- [23] Mates, J., Radil, T., Muller, U., Pöppel, E.: Temporal Integration in Sensorimotor Synchronization: *Journal of cognitive neuroscience*, **Vol.6-4**, pp.332-340 (1994)
- [24] Lewis PA, Miall RC. Overview: An image of human neural timing. In: *Functional and neural mechanisms of interval timing*. Ed: Warren H Meck. CRC Press (2003)
- [25] Nixon, P.D. & Passingham, R.E.: The cerebellum and cognition: cerebellar lesions impair sequence learning but not conditional visuomotor learning in monkeys; *Neuropsychologia*, **Vol.38**, pp.1054-1072(2000)
- [26] Kanabus, M., Szelag, E., Rojek, E., Poeppel, E.: Temporal order judgement for auditory and visual stimuli: *Acta neurobiological experiment*, **Vol.62**, pp.263-270 (2002)
- [27] Hirsh, I. J., Sherrick, C. E., Perceived order in different sense modalities: *Journal of experimental psychology*, **Vol.62**, pp.423-432 (1961)
- [28] ペッペル: 意識の中の時間: 岩波書店(1995)
- [29] Poeppel, E.: A hierarchical model of temporal perception: *Trends in cognitive sciences*, **Vol.1-2**, 56/61 (1997)