

外乱を含む同期タッピング課題における認知が運動に与える影響

武藤 ゆみ子^{*1} 三宅 美博^{*1} エルンスト・ペップル^{*2}

Analysis of the cognitive influence on motor control in synchronization with random stimuli

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

Abstract – In this study, to evaluate the human's adaptation mechanism to complex periodical environments, we analyze the synchronization tapping behavior against the periodical auditory stimuli with white noise disturbance. Slope values of regression line, which was approximated by the relation between SE and ITI, was significant different between below and above the threshold for conscious detection of the perturbations. This result suggests that the two processes, an embodied automatic process and a controlled process, are properly used depending on the cognitive awareness.

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

1. はじめに

外的なイベントの変化に順応し、協調して行動する能力は、人間が日常生活を送る上で非常に重要である。特に、このような協調動作は外的イベントに合わせてタイミングを制御することにより達成される。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なくてはならない。また、対話においても上手な相槌や話のタイミング制御は会話を円滑にする上で重要である。このような協調的な動作においてタイミング制御は非常に重要である^[1]。

また、タイミングを合わせる際、外的イベントの種類に応じて、「合わせやすい」または「合わせにくい」と感じることがある。例えば、ダンスの際、テンポ変化のない音にステップを合わせることは、複雑なテンポに合わせるよりも簡単である。時間間隔の変化がない刺激へ適応する動作では、刺激の持つ時間構造にそれほど注意する必要がないからである^{[2][3]}。これに対し、複雑なリズムへの適応動作では、当然、刺激を意識して知覚することが必要となる^{[4][5][6][7]}。このようなことから、人間は、対象となる環境がもつ時間構造の特性により、注意を必要とするような意識的な制御的過程と、注意をしなくても遂行できるような身体化された自動的過程の2種類の制御過程を使い分けていると推察される。

このような観点から、我々は、この2つの過程における制御機構を明らかにし、ユーザーの挙動の時間変化に対しリアルタイムで適応するインターフェースの設計に応用することを目標としている。

これまでタイミング制御機構の解析では、感覚運動連

関における同期タッピング課題という実験系が用いられてきた^[8]。この実験系では、被験者は音刺激に合わせて指でボタンをタッピングするということが課題として与えられる。そして、ここではタップタイミングが音刺激タイミングに数十ミリ秒先行する現象(負の非同期現象)が観察されることが知られている^{[9][10][11][12]}。

人間は、連続的な一定の時間間隔の音刺激に動作を容易に同期することができる。しかし、他と異なった周期をもつ刺激が混在している場合、タッピング応答に影響を及ぼす。最近の研究では、その刺激周期を周期的に変動させた場合、刺激とタップの位相差およびタップ周期は刺激の周期変動に対し適応的に変化することが報告されている^{[4][5][6]}。また、Reppは周期の変動の大きさが被験者に認知される場合とされない場合で応答が異なることを示した^[4]。

このような観点から、本研究は複雑な時間構造を持つ環境への人間の適応特性を評価するため、一定の音刺激間隔に様々な大きさを变化させられる外乱を加えることのできる実験系を新たに開発した。そして、外乱の存在に気づくことの出来る閾値を求め、その閾値の前後で被験者の応答がどのように変化するかを調べ、身体化された自動的過程と意識的な制御的過程の違いが明らかにする。

2. 実験手法

2.1 被験者

被験者は2人の著者を含む23~47歳(平均31歳)までの健康で右利きの男女12人(男性8人、女性4人)のボランティアであった。このうちの10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ことが明らかにされているため^{[12][13]}、本実験では特別な音楽訓練を受けたことがない被験者に実験に参加頂いた。

*1: 東京工業大学大学院 総合理工学研究科

*2: ミュンヘン大学 ヒューマンサイエンスセンター

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

*2: Ludwig-Maximilians University, Munich, Germany

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された。音量は被験者全員同じ値であった。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 プログラムにより行われた。時間解像度は 1 ミリ秒以下であった。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への影響は有意に観察されなかった。

2.3 音刺激間隔 (ISI: Inter-Stimulus-Interval)

本研究では、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、本実験の 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[式(1)]に従う正規乱数で与えられた。

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

平均 μ を固定し、標準偏差 σ の大きさを変化させることにより外乱を与え、外乱の大きさにより変化する人間の挙動の変化を観察した。式(1)で示される確率密度関数において、平均からの距離が 1σ の範囲内には全体の約 68.26%が含まれ、 2σ 内では約 95.46%、 3σ 内では 99.73%が含まれることが知られており、本実験の刺激は 3σ 内に全て含まれていた。

計算機における ISI の生成方法として、まず最も乱数生成精度が高いとされるメルセンヌ・ツイスター法^[14]により一様乱数を 2 対発生させ、得られた一様乱数をボックス・ミュラー変換法により正規乱数に変換する方法を用いた。

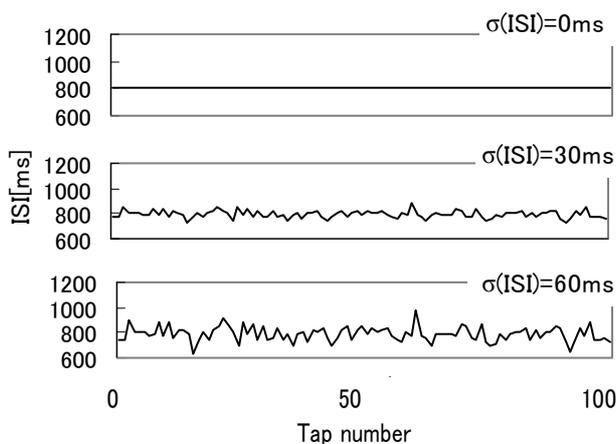


Fig.1. Examples of Inter-Stimulus-Interval

2.4 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。本実験はトレーニングセッションとテストセッションにより構成されており、最初に被験者は約 3 分間のト

レーニングセッションに参加した。トレーニングセッションにおける ISI は 800ms(ノイズ無し)で連続的に 110 回提示され、タッピングが行われた。テストセッションは、ISI の標準偏差 $\sigma(\text{ISI})$ が 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80ms のノイズの異なる 9 試行で構成されており、ノイズのない条件($\sigma(\text{ISI})=0$)から徐々にノイズが大きいく条件が提示された。1 試行につきタップ数は連続的に 110 回であり、最初の 10 回を除く 100 回がその後の解析で用いられた。

第 4 試行($\sigma(\text{ISI})=30\text{ms}$)が終了した後、我々は被験者が何試行目、すなわち、どのノイズの大きいくで刺激変化に気づいたかどうか尋ねた。必要以上に刺激変化に注意を向けることを避けるため、先行研究^[4]が ISI の大きいくに対し 5%の変化が気づくことができる閾値であるという報告を参照し、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($\sigma(\text{ISI})=30\text{ms}$)後に質問を提示した。

3. 解析結果

3.1 被験者による主観的回答

被験者が ISI の変化にはじめて気づいたと回答した結果から得た“認知の閾値”を図 2 に示した。“認知の閾値”が $\sigma(\text{ISI})=20\text{ms}$ であると答えた被験者が 8 人、 $\sigma(\text{ISI})=30\text{ms}$ であると答えた被験者は 4 人であった。

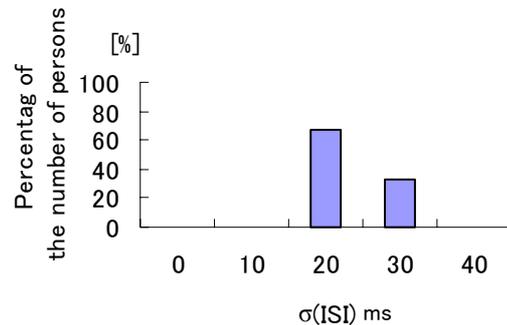


図 2. 認知の閾値

Fig.2 The threshold value of cognitive awareness

3.2 解析特徴量

本解析では、先行研究^{[15][16][17]}に即し SE(位相)と ITI(周期)に着目し解析を行った。

- SE (Synchronization Error) : 位相差
タップタイミングと音刺激提示タイミングの差
- ITI (Inter-Tap-Interval) : 周期
タッピング周期

3.3 SE (位相差)、ITI (周期) 解析結果

ノイズがない条件($\sigma(\text{ISI})=0$)では、全被験者の SE は平均-72 ms、標準偏差 40ms(N=12)を持ち、「負の非同期現象」が観察された。

SE の時間発展を図 3、ITI の時間発展を図 4 に示した。

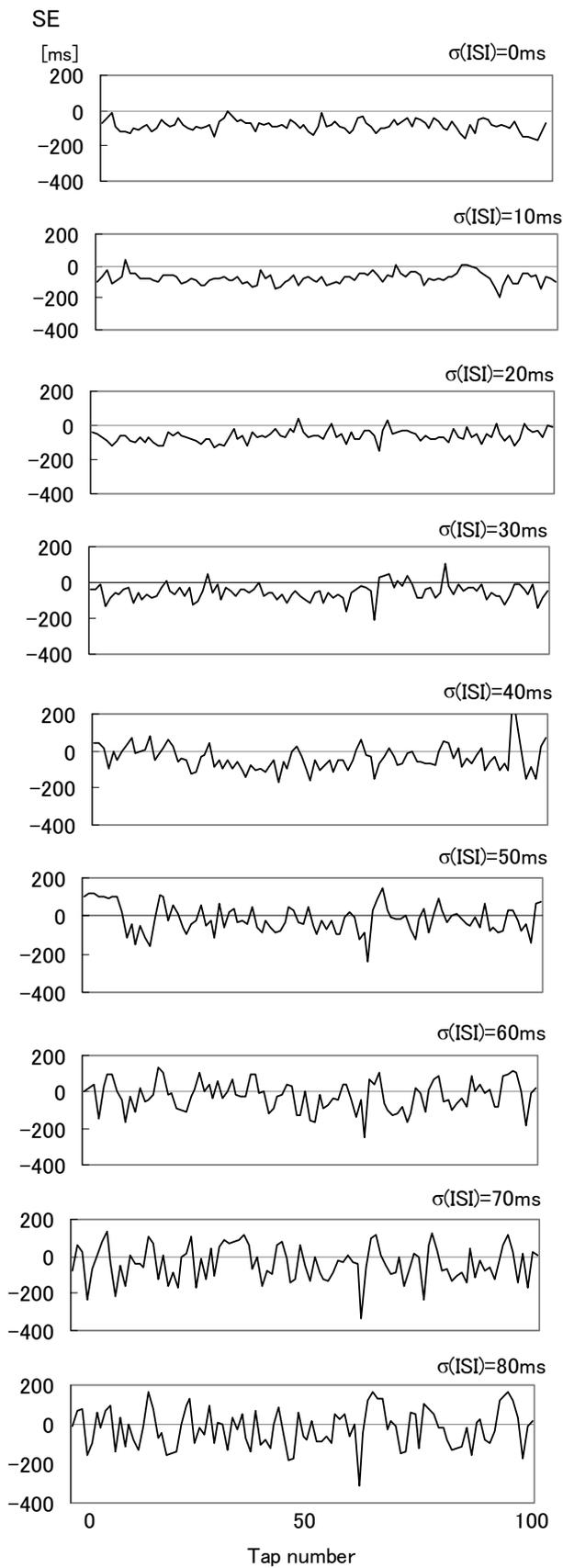


図 3. SE の時間発展例
Fig.3 Examples of time series of SE

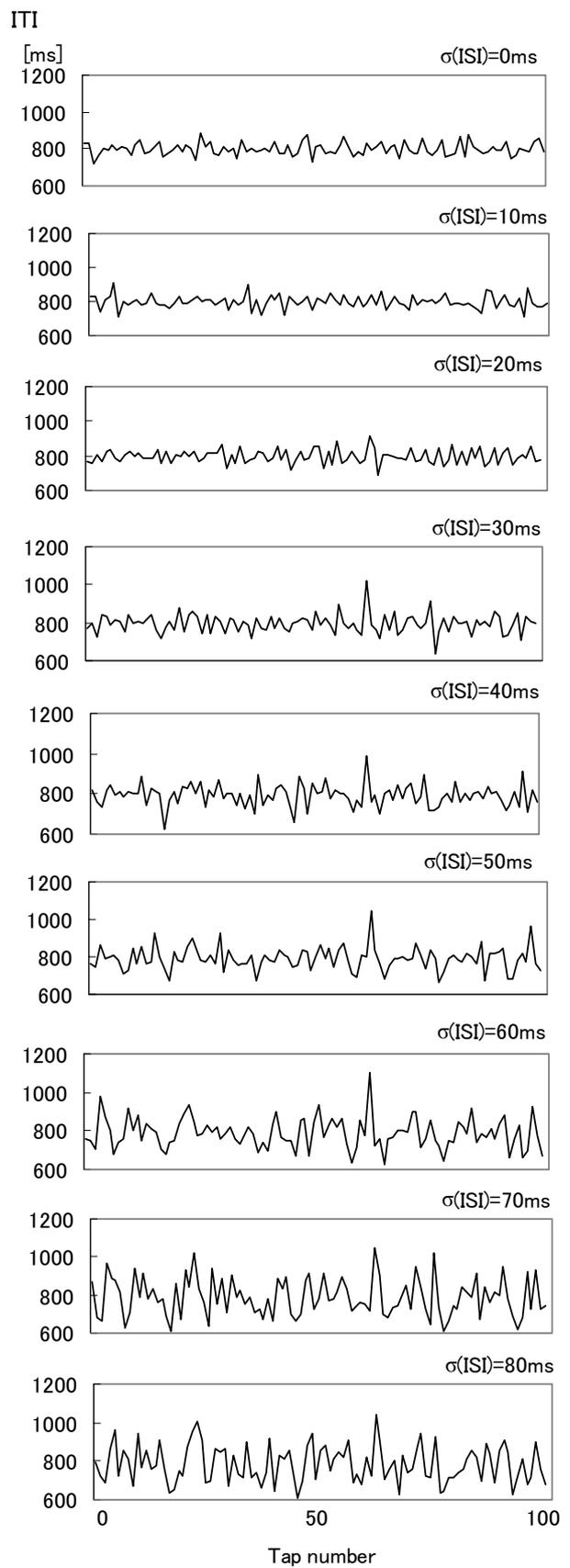


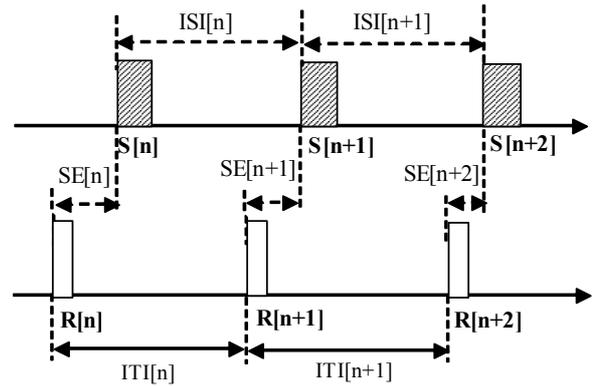
図 4. ITI の時間発展例
Fig.4 Examples of time series of ITI

ノイズ ($\sigma(\text{ISI})$) の値が大きくなるに従い、時間発展が示す振幅が相似していることから SE と ITI の相関関係がわかる。

先行研究より SE の平均・標準偏差は時間構造を持たない統計量であると明らかにされている^{[18][19]}。さらに、本実験で用いた ISI は互いに独立な正規乱数であるため、特徴を抽出するためには、各々の ISI に対応する SE と ITI の関係に注目することが必要である。従って、本研究では SE[n] 及び ITI[n] に着目して解析を行った。

3.4 SE(位相)と ITI(周期)の関係

図 5 のように定義される SE[n] と ITI[n] の関係を考察するために、x 軸に SE[n]、y 軸に ITI[n] を表す散布図を描いた(図 6)。この図から、SE[n] と ITI[n] に強い相関関係があることが推測される。



S[n]: 音刺激, R[n]: タップ

$$\text{ISI}[n] = \text{S}[n+1] - \text{S}[n], \text{ITI}[n] = \text{R}[n+1] - \text{R}[n], \text{SE}[n] = \text{R}[n] - \text{S}[n]$$

図 5. SE と ITI の関係

Fig.5. Relation between SE[n] and ITI[n]

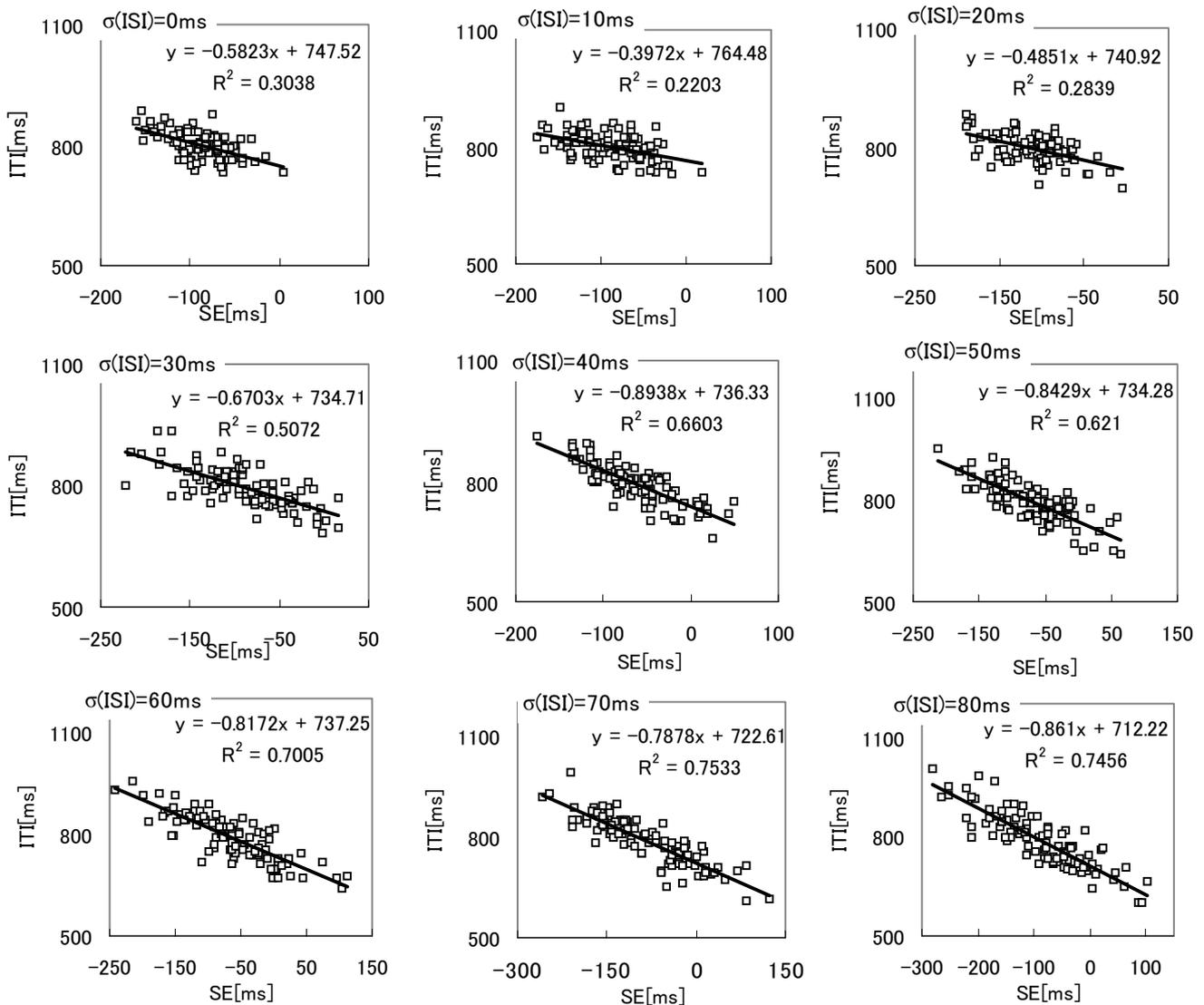


図 6. SE と ITI の関係を示す散布図

Fig.6. Scatter plots which indicate the relation between SE and ITI for one subject

3.5 SE[n]と ITI[n]における回帰直線の傾きの変化

単回帰分析により SE[n]と ITI[n]の回帰直線を求めた。その際、全ての条件下に関し SE[n]と ITI[n]の線形性が確認された($P<0.01$)。

被験者間で平均された SE[n]と ITI[n]の回帰直線の傾きの値を図7に示す。ノイズ ($\sigma(\text{ISI})$) の値が大きくなるに従って、回帰直線の傾きが-1 の方向に近づいていることがわかる。さらに、 $\sigma(\text{ISI})=40\text{ms}$ 以降で、傾きの値が一定値に収束しているように見られ、被験者が刺激変化を認知したと回答した閾値 $\sigma(\text{ISI})=20\text{-}30\text{ms}$ を境に傾きの大きさの変化が確認できる。

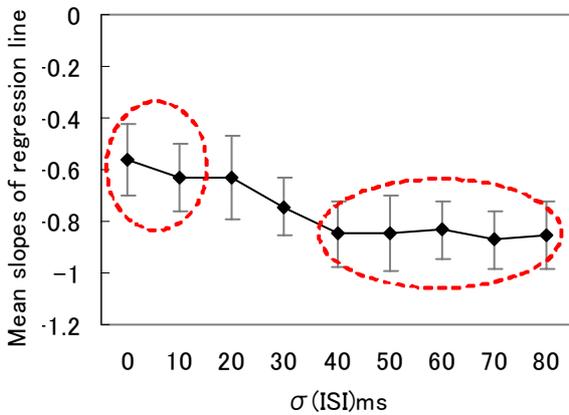


図7. SE[n]と ITI[n]の関係を示す回帰直線の傾きの平均値

Fig.7. Mean slope of a regression line which was approximated by the relation between SE[n] and ITI[n]

3.6 気づきの閾値と SE[n], ITI[n]の傾き変化

3.1の結果から、認知の閾値は $\sigma(\text{ISI})=20\text{-}30\text{ms}$ であった。提示刺激の性質より $\sigma(\text{ISI})=10\text{ms}$ の場合は、全ての ISI が平均 $\mu=800\text{ms}$ から $\pm 30\text{ms}$ 内に分布している。しかし、 $\sigma(\text{ISI})=20\text{ms}$ の場合、5%の ISI は平均 $\mu=800\text{ms}$ から $\pm(40\text{-}60\text{ms})$ 内に分布しており、さらに $\sigma(\text{ISI})=30\text{ms}$ の場合、約 20-30%の ISI が $\pm(40\text{-}90\text{ms})$ 内に分布している。以上のことから、 $\sigma(\text{ISI})=20\text{-}30\text{ms}$ は個々の被験者の認知の閾値により、変化に気づき応答した部分と変化に気づかないで応答した部分が混在していると考えられる。従って、まず、認知の閾値である $\sigma(\text{ISI})=20\text{-}30\text{ms}$ を除いて SE と ITI が示す回帰直線の傾きの変化を明らかにする。

図6に示した SE と ITI の回帰直線の傾き変化に気づきの閾値を考慮して図7に再び示した。分散分析(ANOVA: a one-way repeated-measures analysis of variance)による結果 ($P<0.01$, $F(8,88)=16.965$)、さらに多重比較検定(Fisher's PLSD post hoc comparison test)により、ノイズがない条件 ($\sigma(\text{ISI})=0\text{ms}$)と $\sigma(\text{ISI})=10\text{ms}$ には有意差がなかった。 ($P=0.124$)しかしながら、ノイズがない条件($\sigma(\text{ISI})=0\text{ms}$)と $\sigma(\text{ISI})=40\text{-}80\text{ms}$ の条件には有意な差($P<0.001$)が見られた。さらに、 $\sigma(\text{ISI})=40\text{-}80\text{ms}$ では有意差が見られなかった。

以上から、認知の閾値である $\sigma(\text{ISI})=20\text{-}30\text{ms}$ の前後で SE と ITI の傾きの大きさに差が存在し、閾値を挟んで2種類の機構が存在することが明らかになった。

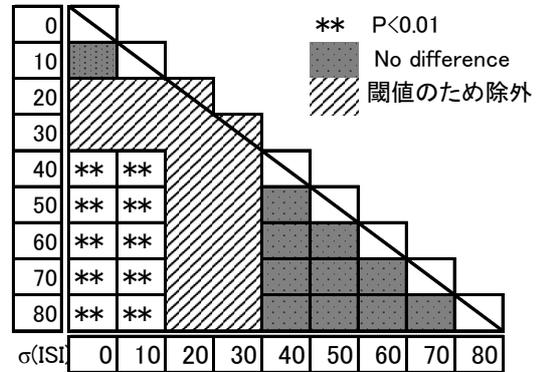


図8.多重比較結果(Fisher's PLSD post hoc comparison test)

Fig.8. The result of pairwise comparisons

4. 考察

本研究で得られた結果をまとめる。

1. 外乱を含む同期タッピング課題という新しい実験を導入し、刺激変化に対する認知が運動に影響することを示した。
2. SE と ITI のダイナミクスに注目して解析を行い、SE[n]と ITI[n]の関係が示す回帰直線の傾きが、ISI の変化の認知の閾値前後で異なることが明らかになった。

本研究で導入された実験系の利点は、ISI が正規乱数で与えられるために ISI の独立性が確保されていること、また、常に ISI の平均は同じ値をとり、ISI の振幅だけを変化させることができることにある。通常、等間隔でない刺激を提示する場合、ISI の複雑性により得られた応答が複雑となり解析が非常に困難であることが知られている。本実験系を導入することにより、複雑な外部イベントに合わせる際のタイミング制御が今後さらに明らかにできる可能性がある。

SE[n]と ITI[n]の関係を示す回帰直線の傾きは、位相情報が周期の応答にどれほど強くフィードバックしているかを示している。ノイズのない通常の同期課題では、位相情報から周期を修正する機構が存在しており、その際の SE[n]と ITI[n]の回帰直線の傾きの値は-0.6 から-0.7 程度であると知られている^[4]。しかし、本研究では、刺激間隔変化に対する認知の閾値を境に、さらに大きな値の傾きを持つ修正機構が存在していることを示した。これは、刺激変化の認知により位相情報から応答である周期への影響が強くなったためと考えられる。以上より、この認知の閾値後の修正機構では、注意資源を必要とする

ような意識的な制御の機構が関与していると考えられる。また、気づきの閾値以下の修正機構は、制御的機構に比べそれほど注意資源を必要としない自動的機構が関与していると考えられる。制御的過程とは特定の目的を達成するために注意を焦点化する意図的な行為であると考えられると、それは意識的に気づくことに関連し、注意資源を必要とすると考えられる。以上のことから、今後注意を制御した実験を行うことにより、さらに明確な違いが得られる可能性がある。

5. まとめ

本研究では、外乱を含んだ同期タッピング課題を用いることにより、認知がどのように運動に運動を与えるかを調べた。結果より、タイミング制御において身体的な自動的機構と意識的な制御の機構が存在し、認知により使い分けられ、運動に反映させていることがわかった。

また、認知の加齢研究において、若いときに自動化した過程は、高齢になっても影響を受けず、新しい自動的過程の習得に関しても、知覚学習課題以外において高齢者は課題を自動化できると報告されている^[20]。(記憶に依存した課題の場合は十分練習すれば自動化できる)。今後、外乱を用いた同期タッピング課題を用いることにより、高齢者における、認知が運動に与える影響を明らかにし、認知と運動に関する加齢研究に関連した知見が得られる可能性があると考えられている。

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 anti-cipation in synchronous tapping: *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, **Vol. 64**, pp.415-426 (2004).
- [4] Repp, B.H.: Processes underlying adaptation to tempo changes in sensorimotor synchronization: *Human movement science*, **Vol. 20**, pp.277-312 (2001).
- [5] 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)
- [6] 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)
- [7] Thaut, M.H, Tian, B, Azimi-Sadjadi, M.R.: Rhythmic finger tapping to cosine-wave modulated metronome sequences: Evidence of subliminal entrainment: *Human Movement Science*, **Vol. 17** (1998)
- [8] Fraisse, P.: Sensorimotor synchronizations to rhythms; *Anticipation et comportement*, pp. 233-257
- [9] Dunlap, K.: Reactions on rhythmic stimuli, with attempt to synchronize; *Psychological Review*, **Vol. 17**, pp. 399-416
- [10] Aschersleben, G., & Printz, W.: Synchronization actions with events; The role of sensory information; *Perception and Psychophysics*, **Vol. 57**, pp. 305-317
- [11] Aschersleben, G., & Printz, W.: Delayed auditory feedback in synchronization; *Journal of Motor Behavior*, **Vol.29**, pp. 35-6.
- [12] Aschersleben, G.: (*Afferent information and the synchronization of events: Frankfurt, Germany, Peter Lang* (1994)
- [13] Franek, M. M., Mates, J., Radil, T., Beck, K., Poeppel, E.: Finger tapping in musicians and nonmusicians: *International Journal of psychophysiology*, **Vol. 11**, pp.187-192 (1991)
- [14] 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)
- [15] 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)
- [16] Repp, B.H.: Compensation for subliminal timing perturbations in perceptual-motor synchronization: *Psychological Research*, **Vol.63**, pp.600-621
- [17] 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)
- [18] Kadota, H., Kudo, K., Ohtsuki, T.: Time-series pattern changes related to movement rate in synchronized human tapping: *Neuroscience letters*, **Vol. 370**, pp.97-101 (2004)
- [19] Ding, M., Chen, Y., Kelso, J.A.S: Statistical analysis of timing error: *Brain and cognition*, **Vol.48**, pp.98-106 (2002)
- [20] Park, D.C., Schwarz, N.: *Cognitive aging: A primer: Psychology press, A member of the Taylor & Francis group* (2000)