

複雑な環境変動における認知を伴うタイミング機構

—環境の複雑性を考慮したインタフェース設計のための基礎的研究—

武藤 ゆみ子*・三宅 美博*・エルンスト ペッペル**

Timing Mechanism with Cognition in a Complex Environment
— Fundamental Research for Interface Design Considering the Complexity of Environment

Yumiko MUTO*, Yoshihiro MIYAKE* and Ernst PÖPPEL**

In this study, in order to evaluate the timing control mechanism in a dynamical complex environment, we propose a new experimental method which is able to control the complexity of the temporal structure of the environment and analyzes the response characteristics. The results show significant differences for the detection between below and above the threshold, against the complexity of the temporal structure. It is therefore suggested that the timing control mechanism is affected by cognition.

Key Words: timing control, sensori-motor synchronization, complexity, cognition, finger tapping

1. はじめに

人間は、動的に変動する環境に適応する能力をもち、その環境変動が未知な場合でも柔軟に対応することができる。このような高度なタイミング制御機構は、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うえでも重要な役割を担っているものと考えられる。そこで本研究では、このような複雑な時間構造をもつ動的環境への人間の適応行動に注目し、そのタイミング機構を明らかにし、新たなインタフェース技術として活用するための知見を得ることを目標としている。

これまでわれわれの研究グループでは、コミュニケーションや協調プロセスにおけるタイミング共有の重要性に注目し研究を進めてきた^{1)~3)}。また、母子コミュニケーションにおいては、ことばの獲得以前に幼児の動作が母親の発話タイミングに同調することが報告されており⁴⁾、タイミング共有はコミュニケーションの基盤にあるものと考えられている。さらに、言語機能が未熟な0-2歳頃までは、感覚や運動を通して環境に適応しようとするのが知られており、その後の身体の運動能力の発達が、自己を取り巻く環境を媒介として、外界の認知能力の獲得に寄与していることも示されている^{5)~7)}。

このことは、運動の多様化によって知覚される環境の時間構造が複雑化し、それに適応する形式で認知機能が発達することを示唆している。したがって人間は複雑な環境変動の中で身体を介して環境と相互作用し、タイミング制御のために必要な情報をリアルタイムに創出していることが予想される。そして複雑な環境への適応を可能とする新たなインタフェースの開発には、このようなしくみの解明が不可欠である。

これまで、このような人間の環境適応のしくみは固定された、あるいは単調なルールに従って変化する環境を対象として解析されてきた。しかし、実環境のもつ複雑性に対して明示的なルールを常に仮定できるわけではなく、これらの研究から得られた知見をインタフェース技術に活用することには多くの問題が残されていた。また、近年の人間同士の自然なコミュニケーションの支援を目的とする知能メディア技術の開発^{8),9)}、ユーザーの状況に適応的な音声対話^{10)~12)}など、環境の動的変化に対する追従や環境の不確定性に対する応答処理がインタフェースの設計において考慮されつつある。しかし、これらの研究はいずれも、個体間で交換される情報を多様化させ、コミュニケーションチャンネルを拡張させることを目的としており、タイミング制御のような時間情報やダイナミクスの支援を主眼としたものではなかった。

一方、日常生活においてタイミングを合わせるとき、その環境変動は合わせやすいものばかりではない。たとえば、音楽に合わせてダンスを踊るとき、単調で一定なりズム音にステップを合わせることは、容易に自動的にこなすことができる。しかし、難易度の高い複雑なりズム音に合わせる場合、われわれは音を意識して合わせようとする。このような経験的な事実から、環境がもつ時間構造の複雑性に依存して、タ

* 東京工業大学大学院知能システム科学専攻 横浜市緑区

** ミュンヘン大学医学部の心理学研究所 ドイツ

* Department of Computational Intelligence and Systems Science, Tokyo Institute of Technology, Midori-ku, Yokohama

** Institute of Medical Psychology, University of Munich, Germany

(Received March 13, 2007)

(Revised October 1, 2007)

イミング機構には、身体化された自動的プロセスと意識を伴う認知的プロセスの両方が必要になると考えられる。本研究では、このような作業仮説に基づき、複雑な時間構造をもつ環境変動におけるタイミング制御機構を認知と関連づけて解析する。

以下、第2章において環境変動の複雑さを制御する実験方法を説明し、第3章でその結果を示す。第4章でタイミング機構に関して考察し、最後に第5章でインタフェースへの活用について触れ、本研究をまとめる。

2. 実験方法

2.1 実験方針

本研究における実験方針の詳細を以下に示す。

- (1) タイミング制御の実験手法として、感覚入力としての周期的な音刺激に合わせて、運動応答として指でボタンを押す“同期タッピング課題”^{13)~17)}を用いる。
- (2) 環境変動の複雑さを制御するため、音刺激の提示周期 ISI (Interstimulus-onset interval) をガウス分布に従う確率変数で与える。試行ごとに ISI の標準偏差の値を変えることにより、周期ゆらぎの大きさが異なる条件を用意する。
- (3) 被験者が初めて刺激提示周期の変化を認知した際の周期ゆらぎの大きさを、被験者の認知の指標とする。
- (4) 周期ゆらぎの大きさに応じた感覚入力と運動応答の相関解析を行なう。この結果と認知の指標から、複雑な環境変動におけるタイミング機構を認知と関連付けて明らかにする。

2.2 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 12 人 (男性 8 人, 女性 4 人) であり、無償で実験への協力を依頼した。いずれの被験者も同期タッピング課題を遂行する上での聴覚障害および運動障害はなかった。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。また音楽能力が同期タッピング課題の遂行に影響を及ぼすと考えられるため¹⁸⁾、特別な音楽訓練を受けたことがない被験者を募った。

2.3 実験装置

本研究で使用された実験システムは、シングルタスク OS (IBM, DOS2000) を搭載した PC 上に実装された。実験用プログラムは C 言語で記述されていた。音刺激 (500 Hz, 100 ms) は、PC にパラレルポートを介して接続した外部音源から、ヘッドフォンを介して被験者の両耳に提示された。また音量は全被験者が十分聞き取れる範囲内で一定とした。時間分解能は 1/1024 秒であった。

2.4 実験課題

本研究では、周期的な音刺激に合わせて指でボタンを押す同期タッピング課題を用いた。被験者はヘッドフォンを介して提示された音刺激に対し、右手人差し指を用いて可能な限り同時にボタンを押すように教示された。

これまでの同期タッピング課題では、一般的に刺激音はメ

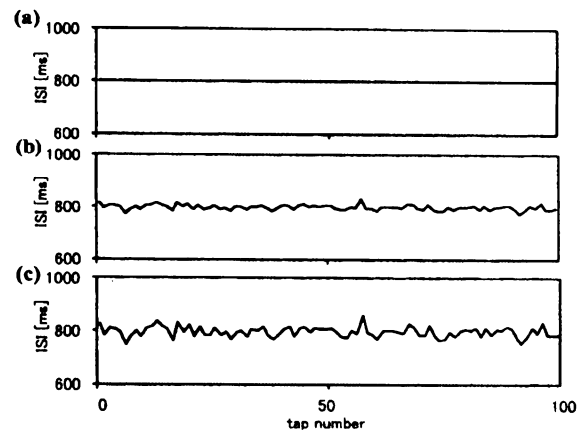


Fig. 1 Examples of time series of ISI [ms]
(a) $\sigma_{ISI} = 0$ ms, (b) $\sigma_{ISI} = 10$ ms, (c) $\sigma_{ISI} = 20$ ms

トロノームのような一定周期で提示されていた。しかし本研究では、この同期タッピング課題における音刺激提示周期 $ISI(n)$ ($n=1, 2, \dots$) をガウス分布 $N(800, \sigma_{ISI}^2)$ に従う確率変数とした。従来研究において、ISI が 800 ms の等間隔で与えられるとき最も同期タッピング課題の遂行が容易であると示唆されていることから、実験では分布の平均値を 800 ms に設定した¹⁹⁾。n 番目の音刺激提示開始時刻を $S(n)$ とするとき、 $ISI(n)$ を用い $S(n)$ を (1) 式のように定義する。このとき、 $ISI(n)$ は $N(800, \sigma_{ISI}^2)$ に基づく正規乱数である。

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

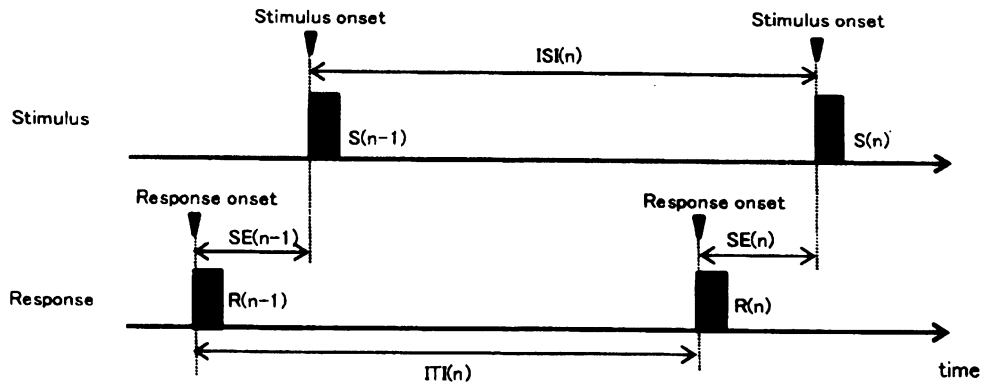
また、ISI の標準偏差 σ_{ISI}^2 は、以降で説明する刺激の複雑さを制御するパラメータとして考えられるものである。本研究ではこの σ_{ISI} を“周期ゆらぎ”と呼び、実験では $\sigma_{ISI} = 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80$ ms の 9 種類を用意した。

なお、本研究で用いた正規乱数はメルセンヌ・ツイスター法²⁰⁾を用いて (0, 1] の独立な一様乱数を 2 対発生させ、これにボックス・ミュラー法を適用して生成した。

2.5 実験手順

実験では、9 種類の $\sigma_{ISI} = 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80$ ms に対応して、被験者には各 110 回刺激が提示された。具体的には、周期ゆらぎを含まない $\sigma_{ISI} = 0$ ms の条件から徐々に σ_{ISI} が大きい条件を順番に提示した。実際に実験に用いた 9 種類の刺激のうち $\sigma_{ISI} = 0, 10, 20$ ms における ISI の時間発展例を Fig. 1 に示す。なお、被験者が行なった 110 回のタップのうち最初の 10 回は解析に使用されなかった。各条件の間には 3-5 分程度の休息をはさみ、実験開始前には実験装置や音刺激に慣れることを目的として 3 分程度の練習が行なわれた。

また、被験者の認知状態を計測するため、被験者に何試行目、すなわちどの周期ゆらぎ σ_{ISI} の時点で刺激提示周期の変化に気づいたか質問した。被験者が刺激提示周期の変化に過剰に注意を向けることを避けるため、質問内容について事前には知らされていない。第 4 試行 ($\sigma_{ISI} = 30$ ms) 終了



ISI : Interstimulus-onset Interval SE : Synchronization Error ITI : Intertap-onset Interval

Fig. 2 Time scheme and definition of temporal variables

後、被験者は、その第4試行および一つ前の第3試行において、刺激提示周期の変化を認知できたのかを尋ねられた。その後の第5試行以降に関しては、各試行終了後に各試行について質問が提示された。

なお、本実験で、第4試行以降で質問を開始した理由として、人間の認知特性に関する以下のような背景が挙げられる。

一般に、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と考えられている²¹⁾。また、ISIは正規分布に基づく、これらのことから、各試行に関しISIが 800 ± 40 msを超える割合を求め、それに基づき質問の開始を決定した。第1試行($\sigma_{ISI}=0$ ms)では0%、第2試行($\sigma_{ISI}=10$ ms)では、ISIは $800 \pm 30(3\sigma)$ ms内に分布しているため0%である。そして、第3試行($\sigma_{ISI}=20$ ms)では約5%、第4試行($\sigma_{ISI}=30$ ms)では約20%、第5試行($\sigma_{ISI}=40$ ms)では約32%である。そこで、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($\sigma_{ISI}=30$ ms)後が質問を行なう上で妥当であると予想し、実験を行なった。

2.6 解析特徴量

本研究では、記録されたn番目のボタン押し時刻を $R(n)$ として、ボタン押し時刻 $R(n)$ と音刺激提示開始時刻 $S(n)$ の同期誤差をSE(Synchronization error)、タップ周期ITI(Intertap-onset interval)を(2)(3)式のように計算し、解析に用いた(Fig. 2)(Table 1)。

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

$$ITI(n) = R(n) - R(n-1) \quad (3)$$

このときSEは通常負の値を示すといわれている。このような指でボタンを押すタイミングが音刺激より数十ミリ秒先行する予測的現象は“負の非同期現象”(Negative Asynchrony)と呼ばれ、この現象についてこれまで多くの研究がなされてきた^{22), 23)}。そのような先行研究に基づき、本研究では、この同期誤差SEとタップ周期ITIに関して相関解析を行なった。

Table 1 Definition and description of variables

Variable	Type	Description
S	Event	Occurrence of stimulus onset
R	Event	Occurrence of motor response onset
ISI	Interval	Interstimulus-onset interval
ITI	Interval	Intertap-onset interval
SE	Interval	Synchronization error

3. 結 果

3.1 認知状態の計測

被験者が刺激提示周期ISIの変化に初めて気づいたと回答した周期ゆらぎ σ_{ISI} の値をFig. 3に示した。12人中7人が $\sigma_{ISI}=20$ ms、残りの5人は $\sigma_{ISI}=30$ msで初めて刺激変化に気づいたと答えた。以上の結果から、 $\sigma_{ISI}=0-10$ msの条件では被験者は刺激提示周期の変化を認知していなかったが、 $\sigma_{ISI}=40-80$ msの条件では刺激提示周期の変化を認知していたことが明らかになった。

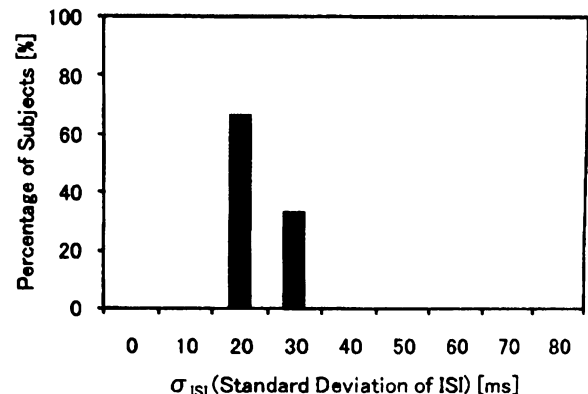


Fig. 3 Threshold value of the cognitive awareness

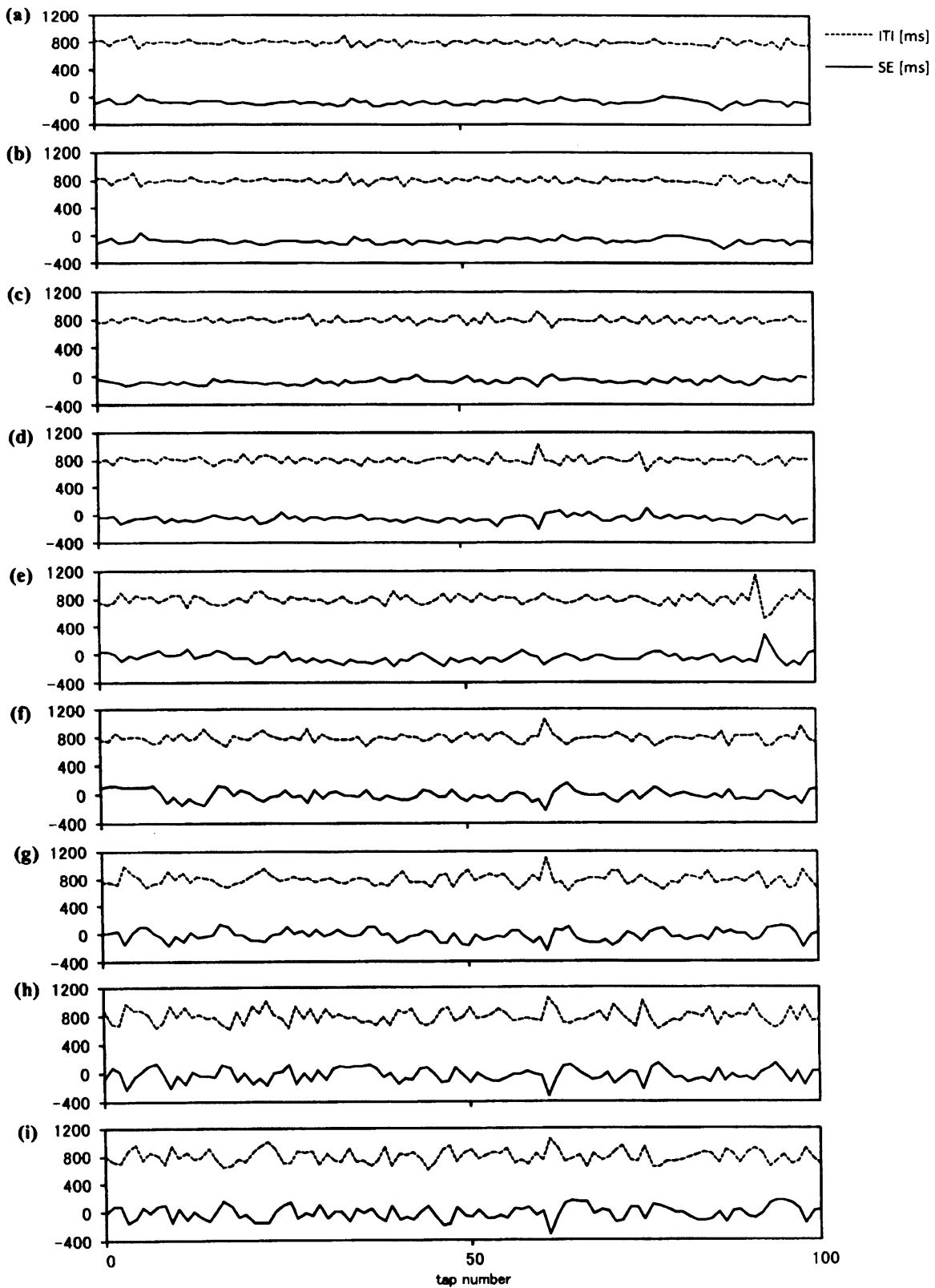


Fig. 4 Examples of time series of SE [ms] and ITI [ms] in each condition
 (a) $\sigma_{ISI} = 0$ ms, (b) $\sigma_{ISI} = 10$ ms, (c) $\sigma_{ISI} = 20$ ms, (d) $\sigma_{ISI} = 30$ ms, (e) $\sigma_{ISI} = 40$ ms,
 (f) $\sigma_{ISI} = 50$ ms, (g) $\sigma_{ISI} = 60$ ms, (h) $\sigma_{ISI} = 70$ ms, (i) $\sigma_{ISI} = 80$ ms

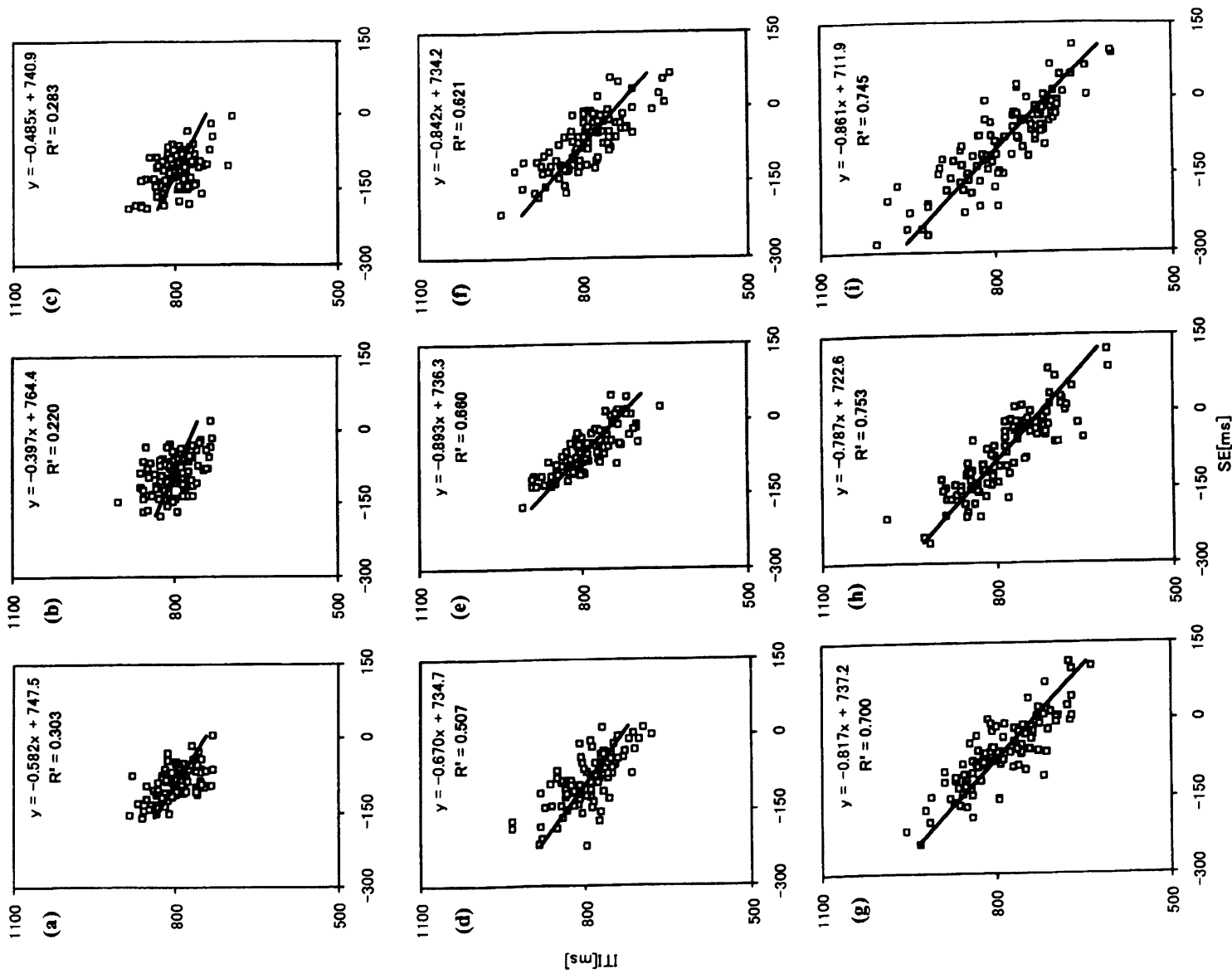


Fig. 5 Scatter plots which indicate the relationship between SEs and ITIs for one subject

(a) $\sigma_{TISI} = 0$ ms, (b) $\sigma_{TISI} = 10$ ms, (c) $\sigma_{TISI} = 20$ ms, (d) $\sigma_{TISI} = 30$ ms, (e) $\sigma_{TISI} = 40$ ms, (f) $\sigma_{TISI} = 50$ ms, (g) $\sigma_{TISI} = 60$ ms, (h) $\sigma_{TISI} = 70$ ms, (i) $\sigma_{TISI} = 80$ ms

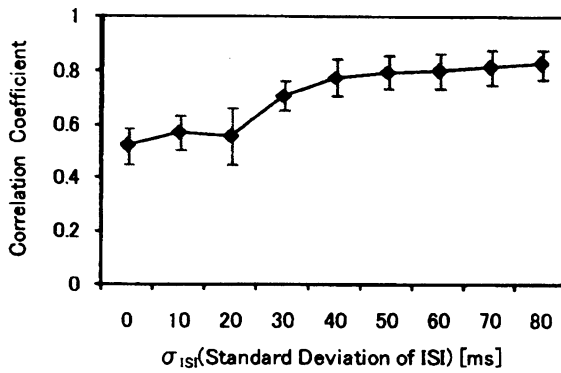


Fig. 6 Average correlation coefficients

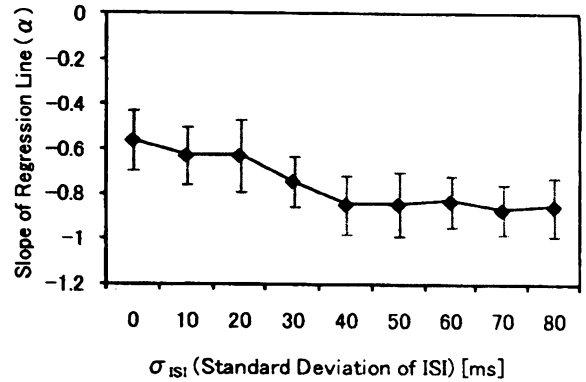


Fig. 8 Average slopes (α) of regression lines

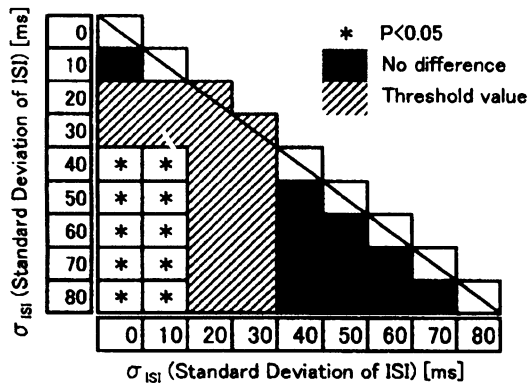


Fig. 7 Pairwise comparison (correlation coefficient)

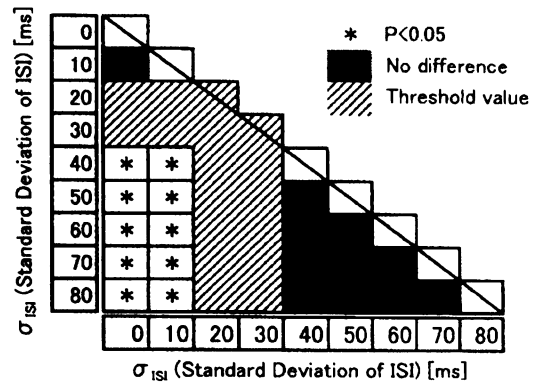


Fig. 9 Pairwise comparison (slope α)

3.2 SE と ITI の相関解析

本研究では、あるタップにおける同期誤差 SE がつぎのタップに及ぼす影響を調べるため、各周期ゆらぎの条件のもとで SE と ITI の相関解析を行なった。以下、3.2.1 節では SE と ITI の相関係数についての結果を示し、さらに 3.2.2 節では SE と ITI から推定される回帰直線の傾き (α) の結果を示す。

3.2.1 相関係数

各周期ゆらぎの条件下における SE と ITI の時系列データを Fig. 4 に示し、SE と ITI の関係を示す散布図の一例を Fig. 5 に示した。これらの結果から、SE と ITI の間に強い負の相関関係が推測される。さらに、被験者間で平均化された相関係数 (Pearson product moment correlation coefficient) と σ_{ISI} の関係を Fig. 6 に示す。環境の複雑さを表わす周期ゆらぎ 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、この相関係数の変化と認知の関係を明らかにするため、被験者が刺激提示周期の変化に気づいたと回答した $\sigma_{ISI}=20-30$ ms の区間を除いて、その上下で相関関数の比較を行なった。被験者間で平均された相関係数に関し、一元配置分散分析 ($F(8,88)=10.609, p<0.01$) および多重比較検定 (Fisher's PLSD post hoc comparison test) を用いた結果から、被験者が刺激提示周期の変化を認知しなかった $\sigma_{ISI}=0-10$ ms と被験者が刺激提示周期の変化を認知した $\sigma_{ISI}=40-80$ ms の間

で、相関係数に有意差があることが明らかになった ($p<0.05$)。さらに、周期ゆらぎ σ_{ISI} ごとの違いを対比較としてまとめ Fig. 7 に示す。 $\sigma_{ISI}=20-30$ ms を除外し、その他すべての条件について比較したところ、 $\sigma_{ISI}=0$ ms と $\sigma_{ISI}=10$ ms の間、 $\sigma_{ISI}=40$ ms から $\sigma_{ISI}=80$ ms の間には、有意水準 5% で差が得られなかった。しかしながら、 $\sigma_{ISI}=0-10$ ms と $\sigma_{ISI}=10-80$ ms の条件には有意差が観察された ($p<0.05$)。

3.2.2 回帰係数

さらに、単回帰分析により回帰係数 α を求めた。被験者間で平均された回帰直線の傾きの値 (回帰係数 α) と周期ゆらぎ σ_{ISI} の大きさの関係を Fig. 8 に示す。環境の複雑さを表わす周期ゆらぎ σ_{ISI} の値が大きくなるに従い、 α の値が -1 に近づいていることがわかる。

また、この回帰係数 α の変化と認知の関係を明らかにするため、 $\sigma_{ISI}=20-30$ ms の区間を除いて、その上下で比較を行なった。被験者間で平均された α の値に関し、一元配置分散分析を用いた結果 ($F(8,88)=16.965, p<0.01$)、および多重比較検定 (Fisher's PLSD post hoc comparison test) から、被験者が刺激提示周期の変化を認知しなかった $\sigma_{ISI}=0-10$ ms と被験者が刺激提示周期の変化を認知した $\sigma_{ISI}=40-80$ ms の間で、回帰係数 α の値に有意差があることが明らかになった ($p<0.05$)。

さらに、周期ゆらぎ σ_{ISI} ごとの違いを対比較としてまとめ

Fig. 9 に示す。 $\sigma_{ISI}=20-30$ ms を除外し、その他すべての条件について比較したところ、 $\sigma_{ISI}=0$ ms と $\sigma_{ISI}=10$ ms の間、 $\sigma_{ISI}=40$ ms から $\sigma_{ISI}=80$ ms の間には、有意水準 5% で差が得られなかった。しかしながら、 $\sigma_{ISI}=0-10$ ms と $\sigma_{ISI}=40-80$ ms の条件には有意差が観察された ($p<0.05$)。

以上の結果から、SE と ITI の相関係数および回帰係数 α の値に関して、認知を伴わない領域 $\sigma_{ISI}=0-10$ ms と認知を伴う $\sigma_{ISI}=40-80$ ms 領域の 2 種類に分類できることが明らかになった。

4. 考 察

本研究では、刺激提示周期にランダムなゆらぎを付加した同期タッピング課題を用いる新たな実験を行なった。この手法の特徴は、これまで用いられてきた単純な時間構造の刺激を用いる手法とは異なり、被験者にとっての環境の時間構造の複雑性を実験者が制御できる点にある。本論文では環境変動の複雑な時間構造への適応メカニズムの解析を行なった。その結果、タイミング機構が環境変動の複雑性に依存して、認知を伴う領域とそれを伴わない領域に二分されることが明らかになった。

これまで、同期タッピング課題を用いた先行研究において、位相修正機構 ((4) 式) と周期修正機構 ((5) 式) の 2 種類の誤差修正機構^(7), 24)~29)と、それらに対応した具体的な制御モデル^(24), 25)が提案されてきた。ここで、 $T(n)$ は位相差 $SE(n)=0$ のときの周期の値を示し "timekeeper period" と定義されている。また、 α, β は定数で与えられる。

・位相修正機構：

$$ITI(n) = -\alpha SE(n) + T(n) \quad (4)$$

・周期修正機構：

$$T(n) = T(n-1) - \beta [T(n-1) - ISI(n-1)] \quad (5)$$

これらの先行研究では、位相修正は感覚フィードバック機構に対応する $\alpha SE(n)$ とフィードフォワード機構に対応する $T(n)$ の線形結合で表現できると考えられている。したがって、本研究が採用した解析方法は、感覚フィードバック機構に関する、SE と ITI の相関解析に対応するものである。特に、ここでの α は、本結果 (3.2.2 節) で求めた回帰係数 α と等価であり、先行研究より同期タッピングにおける感覚フィードバックの役割を果たすことが示されている。また、 $T(n)$ は、内部的に保持・更新されるフィードフォワード機構であるといわれている。

今回の解析結果は、このフィードバックのゲイン α が、刺激提示周期の変化に対する認知の有無により値が変化することを明らかにしたものである。このことから、以下に述べる 2 種類の感覚フィードバック機構の存在が示される。

第 1 のフィードバック機構は、 $\sigma_{ISI}=0-10$ ms の領域で観察されたタイミング制御である。先行研究により位相修正機構における傾き α の値は -0.6 程度となることが知られてお

り^(21), 26)~28)、本結果における認知を伴わない領域 ($\sigma_{ISI}=0-10$ ms) における α の値とはほぼ一致している。さらに、この領域では、回帰係数 α の値に有意な変化が見られなかった。以上のことから、認知を伴わない領域におけるタイミング機構は、従来から報告されてきた機構と対応するものと考えられる。また先行研究により、このような条件ではタイミング制御に注意資源が必須ではないことが知られており⁽²⁾、また、自動的制御において重要な役割を果たしている小脳が関与することも示されている^(30)~33)。これらの知見から、 $\sigma_{ISI}=0-10$ ms ではタイミング制御が認知を伴わない身体化された自動的プロセスを中心として構成されていることが予想される。

第 2 のフィードバック機構は、認知を伴う $\sigma_{ISI}=40-80$ ms の領域におけるタイミング制御である。本実験の結果から、SE と ITI の回帰係数 α の値が、 $\sigma_{ISI}=0-10$ ms の領域に比べ有意に大きな負の値を示していた。このことから、タイミング機構自体の変化は見られないが、そのフィードバックのゲインが相対的に大きくなっていることがわかる。これは、周期ゆらぎが大きくなったため、感覚入力認知を介するフィードバック制御が強化されていることを示唆している。したがって、複雑な周期変動が提示されている $\sigma_{ISI}=40-80$ ms では、自動的プロセスに加えて認知的プロセスが強く働いているものと予想される。

以上から、環境変動が単調な場合では、感覚フィードバックにおける身体化された自動的プロセスが主として働いているのに対し、複雑な環境変動におけるタイミング制御では、それに加えて感覚入力認知を必要とする認知的プロセスが重要になることが示唆された。また、このような身体的プロセスと認知的プロセスの 2 種類の共存は、環境の動的変化に追従し、未知の環境へ適応するうえで重要な役割を果たしていると考えられる。

5. おわりに

本研究では、環境変動の複雑性に注目し、そのような環境における人間のタイミング制御機構を、認知機構との関連から明らかにすることを目標とした。具体的には、環境の時間構造の認知とそれに基づく適応メカニズムの関係を検討するため、環境変動の複雑性を制御できる新たな実験パラダイムを提案し、それに対する人間の応答特性の解析を行なった。その結果、環境の複雑性に起因する認知の有無によって、人間が異なるタイミング制御戦略を用いていることが明らかになった。さらに、単調な環境では身体化された自動的プロセスを中心としてタイミング制御を行なっているが、複雑な環境では自動的プロセスだけでは対応ができず、認知的プロセスを併用する戦略を用いていることが示唆された。これは、人間が自動的プロセスと認知的プロセスの 2 種類の戦略を用い、動的で複雑な環境への適応を実現していることを意味している。さらに、この 2 種類のタイミング制御は、異なる神経基盤で行なわれている可能性も考えられる。このことについては今後さらに調べていく予定である。

昨今、コンピュータ技術の発展に伴い、コミュニケーションを支援する人工物が多数提案されてきている。しかしこれらは、複雑な環境を前提としたものではないため、実世界に適応させる上で多くの問題を残している。この原因の一つとして、人間もつタイミング機構が人工物において十分に考慮されていないことが挙げられる。タイミング同調などの認知的時間の共有は、人間の発達過程においてことばの獲得以前に行なわれていることが知られており、コミュニケーションの根底にあると考えられている。また最近では人間の対話において、一方の話者が話し終わってからつぎの話者が話し始めるまでの時間間隔(“交替潜時”)の長さが話者の印象を形成する要因のひとつになっていることも報告されている³⁴⁾。したがってコミュニケーション支援を目的とした人工物では、タイミングといった時間的側面をさらに考慮することにより、ロボットなど人工物との自然な会話の実現や、人工物への印象の変化などが期待される。

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, **40-6**, 670/678 (2004)
- 2) 三宅, 大西, ベッセル: 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, **38-12**, 1114/1122 (2002)
- 3) 今, 三宅: 協調タッピングにおける相互同調過程の解析とモデル化, ヒューマンインタフェース学会論文誌, **7-4**, 61/70 (2005)
- 4) W.S. Condon and L.W. Sander: Neonate movement is synchronized with adult speech, *Science*, **83**, 99/101(1974)
- 5) J. ビアジェ, 滝沢武久訳: 思考の誕生論理操作の発達, 朝日出版社 (1980)
- 6) J. ビアジェ, 芳賀純訳: 発生的心理学子どもの発達の条件, 誠信書房 (1975)
- 7) J. ビアジェ, 大伴茂訳: 模倣の心理学, 黎明書房 (1968)
- 8) 角, 保呂, 三木, 西田: 体験共有コミュニケーションを促すガイドシステム, 人工知能学会第19回全国大会, **2A3-6** (2005)
- 9) 齊藤, 久保田, 角, 西田: 会話量子を用いたミーティングのコンテンツ化支援, 人工知能学会第19回全国大会, **3D3-12** (2005)
- 10) 木田, 河原: 複数特徴の重み付き統合による雑音に頑健な発話区間検出, 電子情報通信学会論文誌, **J89-DII-8**, 1820/1828 (2006)
- 11) 秋田, 河原: 話し言葉音声認識のための汎用的な統計的発音変動モデル, 電子情報通信学会論文誌, **J88-DII-9**, 1780/1789 (2005)
- 12) 北原, 後藤, 駒谷, 尾形, 奥乃: 多重奏を対象とした音源同定: 混合音テンプレートを用いた音の重なりに頑健な特徴量への重みづけおよび音楽的文脈の利用, 電子情報通信学会論文誌, **J89-D-12**, 2721/2733 (2006)
- 13) K. Dunlap: Reactions to rhythmic stimuli, with attempt to synchronize, *Psychological Review*, **17**, 399/416 (1910)
- 14) G. Aschersleben and W. Prinz: Synchronization actions with events, The role of sensory information, *Perception and Psychophysics*, **57**, 305/317 (1995)
- 15) G. Aschersleben and W. Prinz: Delayed auditory feedback in synchronization, *Journal of Motor Behavior*, **29**, 35/46 (1997)
- 16) G. Aschersleben: Afferent information and the synchronization of events, Frankfurt, Germany, Peter Lang (1994)
- 17) D. Vorberg and A. Wing: Modeling variability and dependence in timing (H. Heuer and S.W. Keele Eds), *Handbook of perception and action*, **2**, 181/262. Academic Press, London (1996)
- 18) M.M. Franek, J. Mates, T. Radil, K. Beck and E. Pöppel: Finger tapping in musicians and nonmusicians, *International Journal of psychophysiology*, **11**, 187/192 (1991)
- 19) H. Woodrow: The effect of rate of sequence upon the accuracy of discrete motor responses, *Journal of Experimental Psychology*, **15-4**, 357/359 (1932)
- 20) M. Matsumoto and T. Nishimura: Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator, *ACM Trans. on Modeling and Computer Simulation*, **8-1**, 3/30 (1998)
- 21) B.H. Repp: Processes underlying adaptation to tempo changes in sensorimotor synchronization, *Human movement science*, **20**, 277/312 (2001)
- 22) P. Fraisse: Sensorimotor synchronizations of rhythms. In J. Requin(Ed.), *Anticipation et comportement*, 233/257. Centre National. Paris (1996)
- 23) J. Mates, T. Radil, U. Muller and E. Pöppel: Temporal Integration in Sensorimotor Synchronization, *Journal of cognitive neuroscience*, **6-4**, 332/340 (1994)
- 24) J. Mates: A model of synchronization of motor acts to a stimulus sequence. I. Timing and error corrections, *Biological Cybernetics*, **70**, 463/473 (1994a)
- 25) J. Mates: A model of synchronization of motor acts to a stimulus sequence. II. Stability analysis, error estimation and simulations, *Biological Cybernetics*, **70**, 475/484 (1994b)
- 26) B.H. Repp: Compensation for subliminal timing perturbations in perceptual-motor synchronization, *Psychological Research*, **63**, 600/621 (2000)
- 27) B.H. Repp: Phase correction, phase resetting, and phase shifts after subliminal timing perturbations in sensorimotor synchronization: *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **27**, 600/621 (2001)
- 28) A. Semjen, H.-H. Schulze and D. Vorberg: Timing precision in continuation and synchronization tapping, *Psychological Research*, **63**, 137/147 (2000)
- 29) J. Pressing and G. Jolley-Rogers: Spectral properties of human cognition and skill., *Biological Cybernetics*, **76**, 339/347 (1997)
- 30) M. Molinari, M. Leggio, V. Filippini, M. Gioia, A. Cerasa and M. Thaut: Sensorimotor transduction of time information is preserved in subjects with cerebellar damage, *Brain Research Bulletin*, **67**, 448/458 (2005)
- 31) P.A. Lewis and R.C. Miall: Overview: An image of human neural timing. In: *Functional and neural mechanisms of interval timing*, Ed: Warren H Meck, CRC Press (2003)
- 32) P.D. Nixon and R.E. Passingham: The cerebellum and cognition: cerebellar lesions impair sequence learning but not conditional visuomotor learning in monkeys, *Neuropsychologia*, **38**, 1054/1072 (2000)
- 33) 金, 中村: 音刺激と finger tapping の同期化機構の小脳モデル, 電子情報通信学会論文誌, **101-737**, 175/182 (2002)
- 34) 長岡, Draguna, 小森, 中村: 音声対話における交替潜時が対人認知に及ぼす影響, ヒューマンインタフェースシンポジウム予稿集, 171/174 (2002)

[著者紹介]

武藤 ゆみ子



2004年11月～2005年12月ドイツミュンヘン大学医学的心理学研究所付属 GRP 研究所にて研究員(感覚運動連関における時間の階層性の研究に従事)。2006年9月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博士前期課程修了、同年10月同専攻博士後期課程入学、現在に至る。

三宅 美博 (正会員)



1989年東京大学大学院薬学系研究科博士課程修了(薬学博士)。金沢工業大学情報工学科助手、講師、助教授を経て、96年より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助教授、99年よりミュンヘン大学客員教授併任。主として生命的自律性の研究に従事、生物物理学会、IEEEなどの会員。

エルンスト ベッペル



1968年インスブルグ大学にて心理学博士取得。76年よりミュンヘン大学院医学的心理学研究所教授、77年より同研究所所長、主として意識と時間に関する研究に従事。