

「間(ま)」を合わせる共創型インタフェースに関する研究

研究代表者 三宅美博 東京工業大学・大学院総合理工学研究科
海外研究協力者 エルンスト・ペップル ミュンヘン大学・医学的心理学研究所

概要

「間(ま)」を合わせることは人間同士の協調作業において不可欠である。しかし、この「間」が合うことは物理的な同調とは異なることが知られている。したがって人間と機械の協調においても、従来の物理的リアルタイム性に基づく協調に加えて、認知的同時性としての「間」の共有も考慮されなければならない。本研究の目標は、人間と人工物が互いに「間」を合わせタイミング調整できる共創型インタフェースを構成することにある。昨年度は第一段階として、同期タッピング課題におけるタイミング制御をモデル系として、「間」の指標となる非同期量の時間発展を心理学的に調べた。その結果、能動的注意からの影響を受ける明在的機構と、その影響を受けない自動的機構が協同的に関わる過程であることが示された。今年度は、この成果を踏まえて同過程の時系列解析を行ない、前者が固有周期型のダイナミクスを示すこと、後者が $1/f^n$ 型のフラクタル的なダイナミクスを示すことを明らかにした。これは「間(ま)」の共創過程のモデル化へ向けての重要な情報となる。

1 はじめに

「間(ま)」を合わせることは人間同士の協調作業において不可欠である。これは人間と人工物の協調でも同様であろう。しかし、この「間」が合うことは物理的な同調とは異なっており、既に、ペップル (Poppel) らは周期的音刺激に合わせて同期タッピングする実験において、人間の認知的な同調感覚は音刺激に数十ミリ秒先行してタップする状態に対応することを示した[1]。このことは認知的な「いま」は未来としての予測的領域に創出されており、物理的な現在とは異なることを意味している。したがって、人間と人工物の協調においても、従来の物理的リアルタイム性に基づく協調に加えて、認知的同時性としての「間」の共有も考慮されなければならない。

ここに、人間と人工物のインタラクションを「共創」という認知的領域を含む創出的コミュニケーションにおいて捉えなおす必然性がある。このような背景から、本研究課題では人間と人工物が互いに「間」を合わせ予測的にタイミング調整できる共創型インタフェースを構成することを目標とする。昨年度(平成 14 年度)は第一段階として、同期タッピング課題をモデル系として、「間」の指標となる非同期量の時間発展を心理学的に調べた。その結果、能動的注意からの影響を受ける明在的機構と、その影響を受けない自動的機構が協同的に関わる二重化された過程であることが明らかになった[2]。今年度(平成 15 年度)は、この成果を踏まえて同過程の時系列解析を行ない、それらのダイナミクスに関する情報を得た。これは「間」の共創のモデル化とそれに基づくインタフェース設計へ向けての重要な情報となる。

2 研究方針

人間のタイミング制御機構を調べるための最も簡単な実験系として、同期タッピング課題がある。これは周期的に繰り返される音や光などの刺激に、被験者の指などの運動を同期させる実験課題である。この課題において、タイミング制御が生じていることを示す最も顕著な例は、各タッピング動作の開始時刻が対応する刺激の開始時刻に対して数 10ms 先行するという現象である。この被験者自身にも意識されない先押し現象は、指を動かすための運動命令が少なくとも音より先に発生し予測的な運動制御が行なわれていることを意味している。このようなタッピングの先行による負の

時間ずれは「Negative Asynchrony (負の非同期)」と呼ばれており、同期タッピング課題において必ず観測される現象である。本研究では、このような予測的タイミング制御として現れる創出的現象を「間」と対応させる。

昨年度は第一段階として、「間」の指標となる非同期量の時間発展を心理学的に調べた。その結果、能動的注意からの影響を受ける明在的機構と、その影響を受けない自動的機構が、協同的に関わる二重化された過程であることを明らかにした。しかし、そこで用いられたデータ処理は統計手法であり、同現象のダイナミクスとしての側面を充分には明らかにできていなかったのである。そこで本研究では、同期タッピング課題の解析において、周波数特性にまで立ち戻り、その時系列解析を行う。これによって「間」の創出における二重化された過程のダイナミクスを明らかにし、そのモデル化に向けての基盤づくりを進めるものである。

3 実験方法

これまで同期タッピング課題として行われてきたものと同様、被験者に周期的な音パルスで聴覚刺激（以下これを BEAT と記す）を入力し、その応答としての指運動（以下これを TAP と記す）を計測する。被験者には、BEAT に可能な限りタイミングを合わせて TAP する、という課題が与えられている。実験条件としての可変項は、BEAT 周期を示す ISI (Inter Stimulus-onset Interval) であり、本稿ではミリ秒を単位として表記される。ISI の設定は 450~6000ms の範囲内で、ISI={450,600,900,1200,1800,2400,3600,4800,6000} の 9 通りを試行 1 セットとした。また、測定量は SE (Synchronization Error) である。これは BEAT タイミングに対する TAP タイミングの時間差について、遅れ方向を正として表したものであり、同様にミリ秒を単位として表記される。課題を遂行する被験者は、ポランティアの大学院生 (20~30 代男女) 9 人に依頼した。被験者はいずれもリズムパルスを聴き取るにあたって障害を覚えず、かつ右利きで、応答の押し下げ動作は利き手人指し指にて行った。

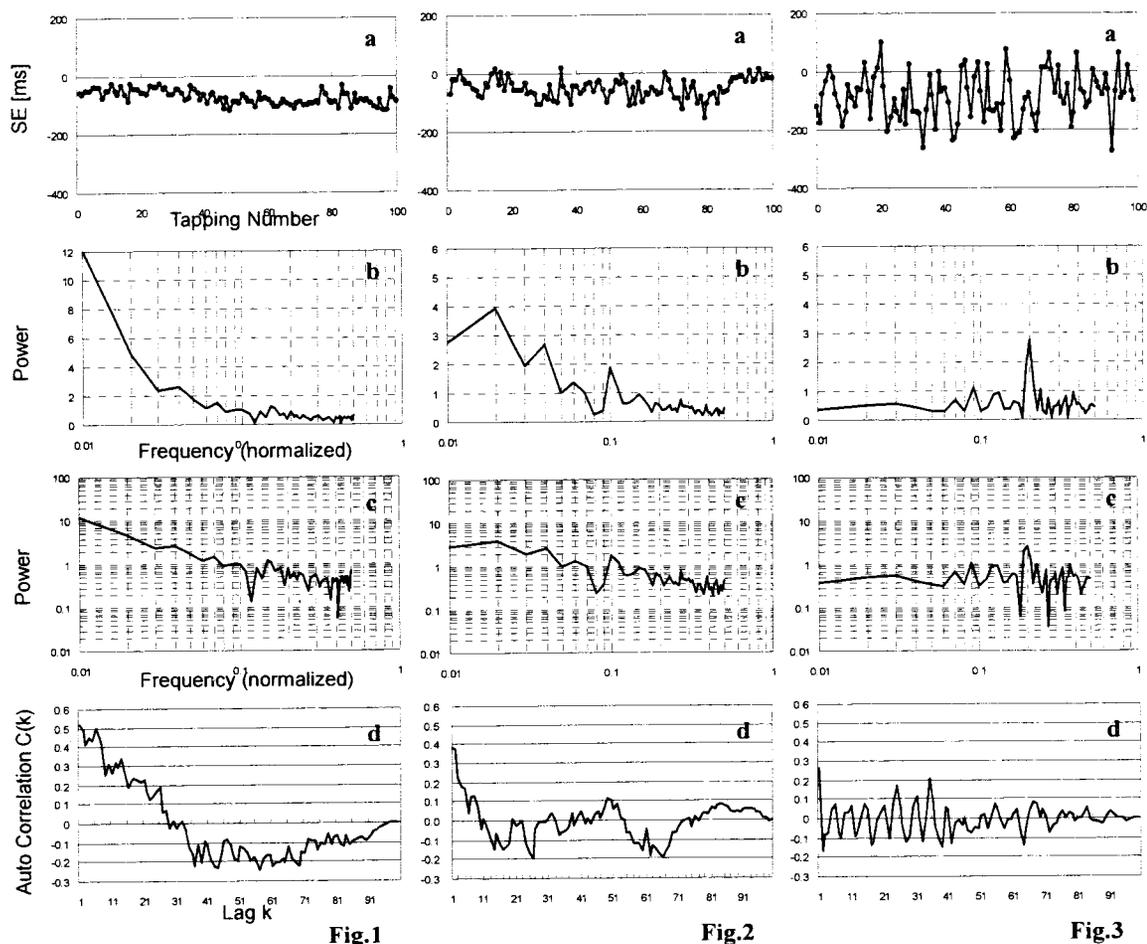
実際の BEAT 生成は、PC (Canon INNOVA NOTE) 内蔵のタイマーチップにより供給されるリアルタイムクロックと、シングルタスク OS (IBM PC-DOS2000) 上のプログラムにより時間分解能 1/1024sec で行った。TAP の記録も同精度で、パラレルポート経由の同 PC に行わせている。聴覚刺激は、500Hz のものを各 100ms 間ずつ持続させた。1 回の試行は 120BEAT から成り立っており、そのうち最初の 15BEAT および最後の 5BEAT を除いた 100BEAT を、実計測値として採用した。以上で得られた SE に対して、以下の手順に従って、周波数解析を行う。まず SE データ列を、平均 0、分散 1 に正規化し、そこから自己相関係数を導出する。この導出された自己相関係数 $C(k)$ に対し、離散フーリエ変換 (DFT) を適用してパワースペクトルを得る。

4 結果

4.1 周波数解析

同一被験者において得られた ISI=450,900,2400 のデータに対して、それぞれ自己相関係数とパワースペクトルを求めた結果を示す (Fig.1,2,3)。ここで挙げる 3 試行はパワースペクトル上へ非同期量変移の動的特性がよく現れた典型例である。

サンプル A の SE 列 (Fig.1a) の場合には、パワースペクトルの片対数プロット上で低周波側のパワーが強く現れている (Fig.1b)。両対数プロット化した場合にはおおよそ直線分布と見なすことができ (Fig.1c)、周波数に対するパワーが反比例の関係を示していることがわかる。この反比例関係は、特定周波数によらずいかなる周波数に対しても、試行時間長の限界を除けばより低い周波数のほうが全体構造への寄与が大きいことを示している。そのように隣接 SE 間より長時間変動の影響が現れた結果として、 $C(20)$ 程度まで強い自己相関が見られる (Fig.1d)。一方、サンプル C の SE 列 (Fig.3a) と対応するパワースペクトルには、ISI の 5 倍にあたる周波数でピークが顕著に現れている (Fig.3b)。対応して、自己相関係数にもおおよそ $C(41)$ まで 5 周期のピークが見られる (Fig.3d)。この周期成分が存在することは、SE 変動に ISI と強く相関をもった周期性が存在することに対応する。



ここでまず例示した2試行は、互いの特性を含んでいない典型であった。サンプルAの自己相関では周期的なピークは見られておらず (Fig.1d), 一方サンプルCのパワースペクトルは反比例関係を示さない (Fig.3c). しかし、実際はサンプルBの周波数解析結果 (Fig.2) に見られるように、周波数-パワーにおいて反比例関係を示しつつ (Fig.2c)、特定周波数に強いピークが現れる (Fig.2b) 試行も多く、2つの動的特性の出現傾向について知見を得ることが重要である。そこで、どちらか一方のスペクトルパターンのみが表出したケースに注目し、非同期量変移に現れる動的特性の評価指標として用いることができるように定義する。

4.2 1/fⁿ型ダイナミクス

まずは、周波数-パワーに反比例対応の見られる、Fig.1cのようなスペクトルの指標を定める。スペクトルの両対数プロットにおいて、縦軸を $\text{Log}(\text{Power})$ にとって最小二乗法で直線近似を行った結果 $y = \alpha x + \beta$ から、“傾き α ” を定義する。プロットで傾き α の反比例関係が見られる試行群について ISI を問わず比較したところ、 $1/f$ ($\alpha = -1.0$) まで至ってはいないが最も強く反比例しているケースで $\alpha = -0.81$, おおよそ $\alpha = -0.37$ を中心に分布する。この「スペクトルにおいて現れる周波数とパワーとの反比例関係」、言い換えれば SE 変動に全体を通してある程度存在する規則性は、ISI が長くなるにつれ弱いものとなっている。この様な非同期量変移に現れる動的特性を、本研究では $-\alpha = n$ と置き換え『1/fⁿ型ダイナミクス (1/fⁿ-Dynamics)』と呼ぶ。各 ISI に対して全試行の α 平均を求めたところ、ISI の増加にともなって傾きが緩和される傾向が表れた。Log(ISI)をとった場合、傾き α

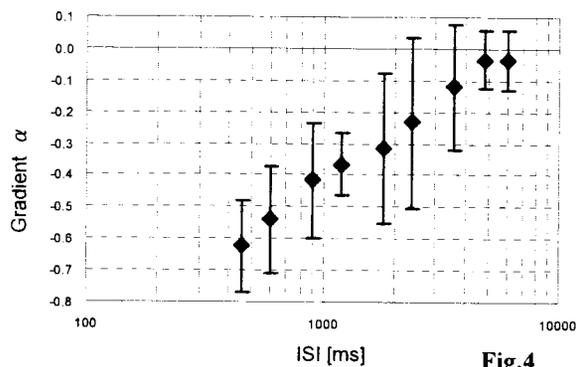


Fig.4

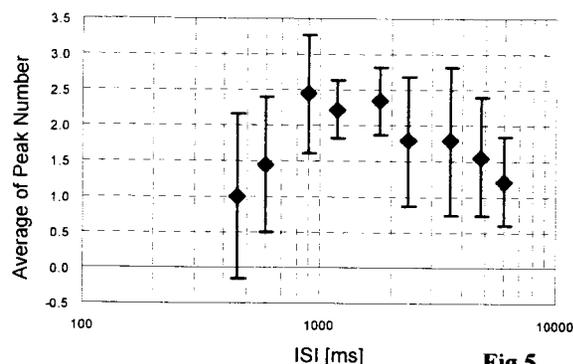


Fig.5

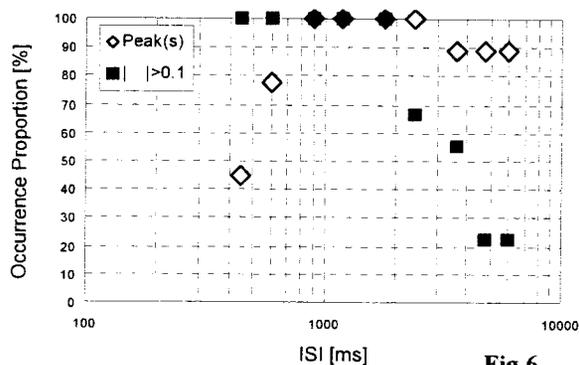


Fig.6

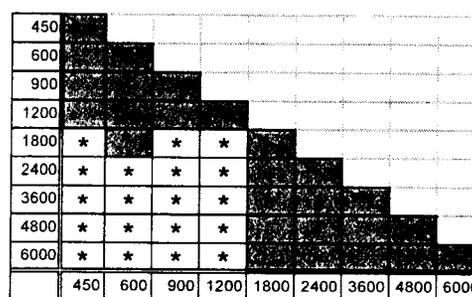


Fig.7

の変化はほぼ直線状に分布することが分かる (Fig.4). また ISI=4800 以上では, 安定してホワイトノイズ的になっている.

4.3 固有周期型ダイナミクス

一方, 特定周波数に強くピークの現れる, Fig.3b のようなスペクトルについてはどうであろうか. 本研究では, このようなパワースペクトル上で特定周波数へ強く依存した非同期量変移の動的特性を『固有周期型ダイナミクス (Periodic-Dynamics)』と呼ぶことにする. このとき隣接する周波数間でのパワー差が, あるしきい値以上の場合を顕著なピークとし, その数をカウントし指標とする. ISI ごとの顕著な有意ピーク出現数平均は, ISI=900~1800 付近を頂点とし, それより短い ISI 領域および長い ISI 領域では下落している (Fig.5).

4.4 2つのダイナミクスの分布

ここまで2つの特性ごとに対 ISI 分布を見てきたが, ここからそれぞれのダイナミクスが互いにどのような関係にあるか検討する. Fig.6 は, おおのこの ISI において $1/f^\alpha$ 型ダイナミクスを含む (ホワイトノイズではない) 試行の生起率 (■), および固有周期型ダイナミクスを含む試行の生起率 (◇) を図示したものである.

それら事象の生起率がともに 100%である ISI=900 を筆頭に ISI=1800 程度まで, 一方のダイナミクスが欠けても 10%程度である. すなわち $1/f^\alpha$ 型と固有周期型の両ダイナミクスをともに含有するケースが, ほとんどを占めている (Fig.6). Fig.2 に例示した試行サンプル B はこれに該当し, パワースペクトルは ISI の 10 倍で強いパワーを示す周波数成分を含んでいる (Fig.2b) が, それを除いた周波数成分は $\alpha = -0.626$ の顕著な反比例関係をも呈している (Fig.2c).

では, より短い ISI 領域および長い ISI 領域において, 2つのダイナミクスはどのように現れるの

であろうか。まず短 ISI (450,600ms) 側においては、有意ピークの現れる試行がそれぞれ 44.4%, 77.8% にとどまる一方で、 $1/f^{\alpha}$ 型ダイナミクスはまったく失われていない (Fig.6)。つまり、SE の時系列変動が $1/f^{\alpha}$ 型ダイナミクスのみによって達成されているケースは、増大しているということである。対する長 ISI 領域においては、ホワイトノイズ化するケースが現れている一方で、ピークは殆ど失われていない (Fig.6)。つまり、SE の時系列変動が固有周期型ダイナミクスのみによって達成されているケースは、増大しているということである。

4.5 定性的挙動と2つのダイナミクスとの対応

2つのダイナミクスが失われる傾向 (Fig.12) から、ISI=900~1800 を挟んで長短 ISI 領域でそれぞれ一方のダイナミクスが主に失われることが示された。では実際のタッピング挙動に、変化としての明確な境界を生じているであろうか？SE の自己相関係数 $C(k)$ に対して複数被験者の個別試行間で平均をとり、その波形について $p < 0.05$ で F-検定を行った結果 (Fig.7) によれば、“*”で示した ISI 間では有意差が認められる。つまり ISI=1200, 1800 間を境界として、現象面での線引きが可能ではある。しかしここで確認された ISI 境界、および前節までで示してきた、重なりを伴う支配的ダイナミクスの交代領域が ISI=900~1800 であるとする結果は、昨年度の成果において二重課題法による注意資源の干渉実験で Negative Asynchrony の生起に高次脳機能が関与する境界が ISI=1800 程度であるとする結果[2]と、それぞれ ISI の重なりを示している。

5 考察

本研究では、「間」の創出機構を明らかにするために、同期タッピング実験における負の非同期現象 (Negative Asynchrony) の時間発展を解析した。特に、時系列データとしての非同期量に含まれている情報を調べる手法として、タッピングの時間遅れ (SE) 変動に対して周波数解析を適用した。自己相関係数およびパワースペクトルの導出を行った結果として、非同期量変動が異なった2つのダイナミクスを包含していることを明らかにした。

- ・“ $1/f^{\alpha}$ 型”ダイナミクス：周波数-パワーが反比例の関係を示していた。これは SE の時系列変動が特定周波数に非依存であり、かつ試行時間長が許す限りにおいて、より低い周波数ほど変動パターンへの寄与が大きいという、ある種の自己相似性を持つとも言える。ISI 伸長につれて反比例関係の傾きは失われ、ホワイトノイズ化する。
- ・“固有周期型”ダイナミクス：顕著なスペクトルピークが 1 本以上現れ、それ以外の周波数領域はホワイトノイズを呈していた。つまり SE の時系列変動は ISI に強く依存しているということである。ピーク本数は ISI=900~1800 を最高とし、両 ISI 側へ向けて低下する。

そして2つのダイナミクスの出現・消失が、それぞれ別個の ISI 応答特性をもつことも見いだされた。それらの対応関係は以下に示す通りである。

- ・900~1800ms 範囲の ISI では、ほぼ全ての試行が2つのダイナミクスを含んでいる。
- ・より短 ISI 領域においては、全試行が $1/f^{\alpha}$ 型ダイナミクスを示す一方、固有周期型ダイナミクスは最大で約半分の試行から失われている。
- ・より長 ISI 領域では、 $1/f^{\alpha}$ 型ダイナミクス生起率が下がるが、固有周期型ダイナミクス生起率は徐々に減少する。

これらの結果は、短 ISI 領域・長 ISI 領域で異なるタイミング制御機構からなる、とする昨年度の研究において得られた実験的知見を強く支持するものである。さらに昨年度、被験者の注意という観点から、同期タッピング課題におけるタイミング制御機構に2つのタイプが存在することを明らかにしたが、それらが異なるダイナミクスによって実現されていることも示唆している。ひとつは注意の影響を受ける予測的タッピングであり、もう一つはその影響を受けない自動的なタッピング

機構であるが、前者の能動的注意からの影響を受けるタッピング機構は固有周期型の定常的ダイナミクスに基づき、後者の注意の影響を受けない自動的機構はフラクタル的な非定常ダイナミクスに基づいている可能性がある。

6 おわりに

われわれは、人間がコミュニケーションを介して協調関係をリアルタイムに創り上げる共創的活きを理想として、人間と人工物のインタラクションに関する新たな設計原理を提案したいと考えている。そして、本研究課題では、このような共創的コミュニケーションに不可欠と考えられる「間」の創出機構について、同期タッピング課題を用いて解析を進めている。

昨年度、被験者の注意という観点から、同期タッピング課題におけるタイミング制御機構に2つのタイプが存在することを明らかにしたが、ひとつは注意の影響を受ける予測的タッピングであり、もう一つはその影響を受けない自動的なタッピング機構であった。今年度は、同実験における非同期量の変動に関する時系列解析を進め、2つの異なる動的特性が含まれることを明らかにした。能動的注意からの影響を受ける明在的機構は固有周期型の定常的ダイナミクスに、その影響を受けない自動的機構はフラクタル的な非定常ダイナミクスに対応する可能性がある。

これらは、昨年度までの統計的解析手法から求め得ないものであり、*Negative Asynchrony* を時系列データとして解析するという本手法の有用性を示していると言えるだろう。しかし、本研究はまだ課題を残している。それは2つのダイナミクス間にどのような関係が存在するのか、存在するならどのように時間発展するのか、について知見を得ていない点である。そこで現状では、このような二重化されたダイナミクスのインタラクションに注目し「間」の創出過程の解析を進めている。

すでに、われわれは、共創的コミュニケーションの基本的構造として、意識状態の創出に関わる明在性と身体の潜在的活きに関わる暗在性という情報処理の「二重性」の重要性を主張してきた[3-6]。本研究において明らかにされつつある二重化されたタイミング機構は、それと対応するものであり、共創システムの設計原理の確立へ向けた研究がさらに深化されるものと期待される。次年度以降、これらの研究成果を踏まえて、「間」の共創プロセスに関する数理モデルを提案し、共創型インタフェースの設計論の確立へ進めればと考えている。

参考文献

- [1] Mates, J., Radil, T., Mueller, U. & Pöppel, E., *Temporal Integration in Sensorimotor Synchronization*, *Journal of Cognitive Neuroscience* **6**, 332-340 (1994)
- [2] 三宅美博, 大西洋平, エルンスト・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, **38**, **12**, 2002.
- [3] 三宅美博, 場と共創 (分担: “コミュニケーションと共生成” 第4章 pp.339-397), NTT出版, 東京 (2000)
- [4] 三宅美博, 宮川透, 田村寧健, “共創出コミュニケーションとしての人間-機械系,” 計測自動制御学会論文集, vol.37, N0.11, pp.1087-1096 (2001)
- [5] 武藤剛, 三宅美博, “歩行介助を目的とする人間-ロボット協調系における共創出過程の解析,” 計測自動制御学会論文集, **38**, **3**, 316-323, 2002.
- [6] 高梨豪也, 三宅美博, “共創出型介助ロボット“Walk-Mate”の歩行障害への適用,” 計測自動制御学会論文集, **39**, **1**, 74-81, 2003.

研究成果

研究発表

- Miyake, Y.: "Co-creation in human-computer interaction", C Stephanidis & J Jacko, Human-Computer Interaction, Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 513-517, 2003.
- Miyake, Y.: "Co-creation system", Cognitive Processing, 3, 131-136, 2003.
- Miyake, Y.: "Subjective present and two modes of thinking", Acta Neurobiologiae Experimentalis, 63, 3, 236, 2003.
- Miyake, Y., Onishi, Y. & Poeppel, E.: "Two types of anticipation in synchronous tapping", Acta Neurobiologiae Experimentalis, 64, in press.
- 小松知章, 三宅美博: "同期タッピング課題における予測的挙動の時系列データ解析", 計測自動制御学会論文集, 39, 10, 952-960, 2003.
- 小松知章, 三宅美博: "同期タッピング課題における非同期量の時間発展", 計測自動制御学会論文集, under review.
- Miyake, Y., Onishi, Y. & Poeppel, E.: "Two types of anticipation in sensory-motor coupling", Proc. of SICE Annual Conference 2003 (SICE2003), Fukui, Japan, 3221-3226, 2003.
- Miyake, Y.: "Two types of anticipation in sensory-motor coupling", Proc. of Int. Symp. on Time, Cognition and Thinking, Strzekecino, Poland, 40-41, 2003.
- Komatsu, T. & Miyake, Y.: "Two dynamics of anticipatory behavior in synchronization tapping", Proc. of SICE Annual Conference 2003 (SICE2003), Fukui, Japan, 3207-3210, 2003.
- Takano, K. & Miyake, Y.: "Two types of time perception in synchronization tapping task", Proc. of SICE Annual Conference 2003 (SICE2003), Fukui, Japan, 3211-3216, 2003.
- Miyake, Y.: "Co-creation in man-machine interaction", Proc. of 12th IEEE Int. Workshop on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN2003), Silicon Valley, U. S. A., 2003.
- Muto, T. & Miyake, Y.: "Co-emergence process on the humans' cooperation for walk-support", Proc. of 2003 IEEE Int. Symp. on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA2003), Kobe, Japan, 324-329, 2003.
- Muto, T. & Miyake, Y.: "Co-emergence process on the humans' cooperative walk", Proc. of SICE Annual Conference 2003 (SICE2003), Fukui, Japan, 3116-3121, 2003.
- 三宅美博, 大西洋平, エルンスト・ペッペル: "二重化されたタイミング予測機構と「共創」", 第15回自律分散システム・シンポジウム資料, pp.133-138, 2003.
- 三宅美博: "共創システムのめざすもの", 2003年精密工学会春季大会学術講演会予稿集, pp. A60, 2003.
- 三宅美博: "人と人工物の共創システム", 東京大学人工物工学センター第6回人工物工学コロキウムー共創工学の展開ー資料, pp.19-29, 2003.
- 三宅美博: "「間(ま)」と共創的コミュニケーション", 第47回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp. 477-478, 2003.
- 三宅美博: "共創を支援するシステムについて", ロボティクス・メカトロニクス講演会'03講演論文集(ROBOMECC2003), pp.2A1-3F-C8 pp.1-2, 2003.
- Miyake, Y.: "Two types of anticipation in sensory-motor coupling (invited lecture)", 2nd Slovenia-Japan Seminar, Maribor, Slovenia, 2003.