

「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・ベッペル ミュンヘン大学・医学的心理学研究所

概要

人間同士の協調作業では、相手と「間(ま)」を合わせる事が重要である。しかし、この「間」が揃うことは、物理的な同調とは異なることが既に示唆されている。したがって人工物による人間の協調支援においては、物理時間の共有に加えて、心理的時間としての「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。今年度は、その第一段階として、同期タッピング課題を用いて人間のタイミング制御における「間」の創出機構に関して調べた。その結果、予測的タイミング制御によって特徴づけられる「間」の創出は、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示された。

1 はじめに

人間同士の協調作業では、相手と「間(ま)」を合わせる事が重要である。しかし、この「間」が揃うことは、物理的な同調とは異なることに注意しなければならない。特に、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は、主観的な同調は音の発生に数 10ms 先行してタップ動作する状態であることが知られている [1]。このことは、主観的「いま」は、未来を含む予測的領域に創出されることを示唆する。したがって、人工物による人間の協調作業支援では、物理時間の共有に加えて、未来を含む創出的時間としての「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」という心を含む創出的コミュニケーションの領域において統合的に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を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している。そして、今年度は、その第一段階として人間のタイミング制御における「間」の創出機構に関する心理学的な解析を進めた。この結果に基づいて「間」を計測するための指標が得られ、それによって共創過程の解析と共創型インタフェースの設計論の構築が可能になるものと期待している。

2 研究方針

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 (Synchronization Tapping Task) 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。同期タッピング課題において、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。この被験者自身には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。しかも、主観的「いま」は物理時間としての未来を含む領域に創出されることを示唆している。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。

一方、時間間隔の知覚については、いくつかの認知モデルが提案されている。このうち時間情報の処理系と、時間とは関係のない心的な処理活動の処理系の、どちらにどの程度の注意配分がなされるかによって判断時間が左右されると考えるのが“注意の配分モデル”である。ワーキングメモリの中

中央実行系はこの注意の配分に関わっているとされる。さらに、カーネマンの“注意の容量モデル”では、配分可能な注意資源には限界容量が存在し、知覚情報処理における処理の限界を規定していると考えられている [2]。心的活動の遂行には注意資源が不可欠であり、複数作業の同時遂行は注意資源がそれぞれの作業に適切に分配されることで可能になり、配分される注意資源の量は与えられた心的処理の負荷の大きさによって定量化できるのである。

このような背景から、本研究では、同期タッピング課題において被験者の注意が予測的タイミング制御に及ぼす影響を調べた。これによって「間」の創出機構を、注意に依存する部分と依存しない部分に分離し、その相互関係を明らかにできると期待されるからである。被験者の注意の制御には二重課題法を用いた。これは対象とする課題（一次課題）を遂行中に他の課題（二次課題）を課すことによって、一次課題の遂行に必要なシステムの処理能力を減少させる実験手続きである。具体的には、二次課題として文章の黙読課題を用いた。文章を読む際には、ワーキングメモリが関与する一時的な情報の保持が重要な役割を果たしているといわれており、被験者の注意資源を奪うための二次課題として文章の読みは適している。

3 実験方法

3.1 タスクと被験者

実験条件として被験者に与えられた課題は、周期的なパルス音刺激の開始時刻に同期させてボタンを押すことである。ボタン押しは右手人差し指で行なう。用いた刺激間隔(Inter Stimulus-onset Interval, ISI)は、450, 600, 900, 1200, 1500, 1800, 2400, 3600, 4800, 6000ms の 10 種類である。各刺激音の持続時間は 100ms, 周波数は 500Hz, 音圧は音刺激を明瞭に聞き取ることのできる適切な大きさに設定し、すべての試行と被験者を通して共通である。被験者は健康な 20 代男子大学院生 6 名に協力をお願いした。いずれの被験者も聴力に異常はなく右利きであった。

3.2 特徴量の定義

実験を通して取得されたデータは、音刺激の開始時刻およびタッピングの開始時刻であった。そして、刺激と行為の時間的關係を反映する指標として、音刺激開始時刻とタッピング開始時刻の時間差(Synchronization Error, SE)を主に解析の対象とした。SE の符号が正の場合は、被験者のタッピングの開始時刻が音刺激の開始に対して遅れていることを表す。このとき被験者の行なうタッピングは、Negative Asynchrony 現象が生じているタッピングと、音に反動的なタッピングの大きく 2 種類に分けられる。本研究では前者を予測的タッピング、後者を反動的タッピングと呼ぶ。図 1 に、これらの特徴量の關係を模式的に示した。

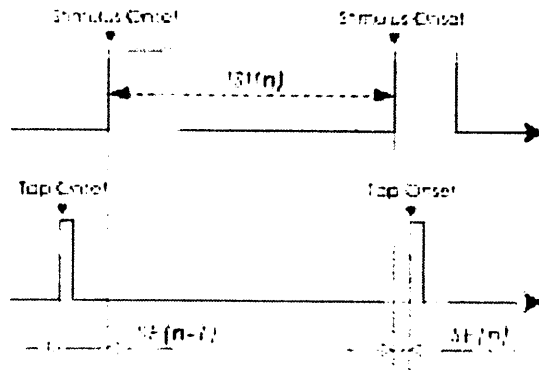


図 1：特徴量の定義

3.3 手続き

実験条件として被験者に与えられた課題は、周期的なパルス音刺激に合わせてボタンを押すことであった。この課題を以下の二つの条件下で行なった。

①N 条件：統制条件。各試行は 110 個の音刺激からなり、その間 ISI は一定であった。10 種類の ISI に対応して計 10 試行が行なわれた。最も短い試行で 66sec 最も長い試行で 660sec(=11min)であった。試行の間、被験者はできるだけ正確に音刺激の開始と同時に手元のボタンを押すことを要求された。

②R 条件：N 条件と同様のタッピングを、文章の黙読と並行して行なわせた。被験者の注意が文章の意味理解に向いていたことを確認するために、各試行においてボタン押しの終了後、文章の内容に関する簡単なテストを行った。文章は小学校から中学校の国語教科書程度の平易な日本語で書かれた小説あるいはエッセイを用いた。

4 結果

4.1 SE (同期誤差) の分布

被験者 A の各 ISI における SE の分布を図 2 に示す。N 条件の分布を見ると、450~1800ms 程度の小さい ISI では、SE の分布は中心が負の方向にずれ小さな広がりをもつことがわかる。これは予測的タッピング、すなわち Negative Asynchrony 現象が生じているタッピングに対応する分布である。しかし、ISI の増加に伴い分布のばらつきは大きくなり、さらに大きな ISI (4800, 6000ms) では、分布は正の側に鋭いピークとなって表れている。この正のピークは、反応的タッピング、すなわち音を聴いてから反射的にボタンを押すタッピングに対応している。2400~3600ms 程度の中間的な ISI では、大きな負の SE をもつ予測的タッピングと反応的タッピングが混在しているようすが見て取れる。R 条件でもほぼ同じ特徴をもつ分布が見られるが、N 条件では反応的タッピングが ISI=3600ms 付近から顕著であるのに対し、R 条件では 2400ms 付近から見られ始めるという点で異なっている。

4.2 反応的タッピングの分離と生起率

我々の目的は、被験者の予測的なタイミング制御に関する知見を得ることであるから、単なる反射運動である反応的タッピングは解析の対象としない。そのためには 2 種類のタッピング方略を分離する必要がある。ここで図 2 における ISI が 6000ms のタッピングの SE 分布に注目すると、ほとんどのタップが反応的になっており、さらに音に先行するタップの SE が充分小さいため、両者の分離が比較的容易にできることがわかる。そこで ISI が 6000ms のタッピングにおいて反応的と考えられるタップだけを選び出し、各被験者の SE の平均値に基づいて SE の被験者間平均値を算出したところ、N 条件で 0.151 sec (被験者間標準偏差 = 0.0157), R 条件では 0.261sec (被験者間標準偏差 = 0.0793) となった。そこで、全ての被験者・ISI について一律に SE = 0.1sec を基準値 (α) として定め、これより大きな SE 値を反応的タッピングとして分離した。そして、これ以外を予測的タッピングとして分類した。

図 3 に N・R 条件それぞれについて算出した、各 ISI 中に占める予測的タッピングの割合の被験者間平均値を示した。以下、この割合のことを予測的タッピングの生起率 (Occurrence Proportion) と呼ぶ。まず、N 条件に関しては、個人差があるものの被験者 D 以外では 2400ms 程度の ISI まで 100% 近い水準が保たれている。しかし、ISI が増加するにつれて予測的タッピングの生起率も減少し、6000ms では 60% 程度を反応的タッピングが占めるようになる。一方、R 条件においても、個人差はあるが 1200~1800ms 付近の ISI までは 100% 近い値を保っていることがわかる。ISI が増加すると反応的タッピングが増加する点も同様であるが、R 条件では予測的タップ生起率の減少が急速である。

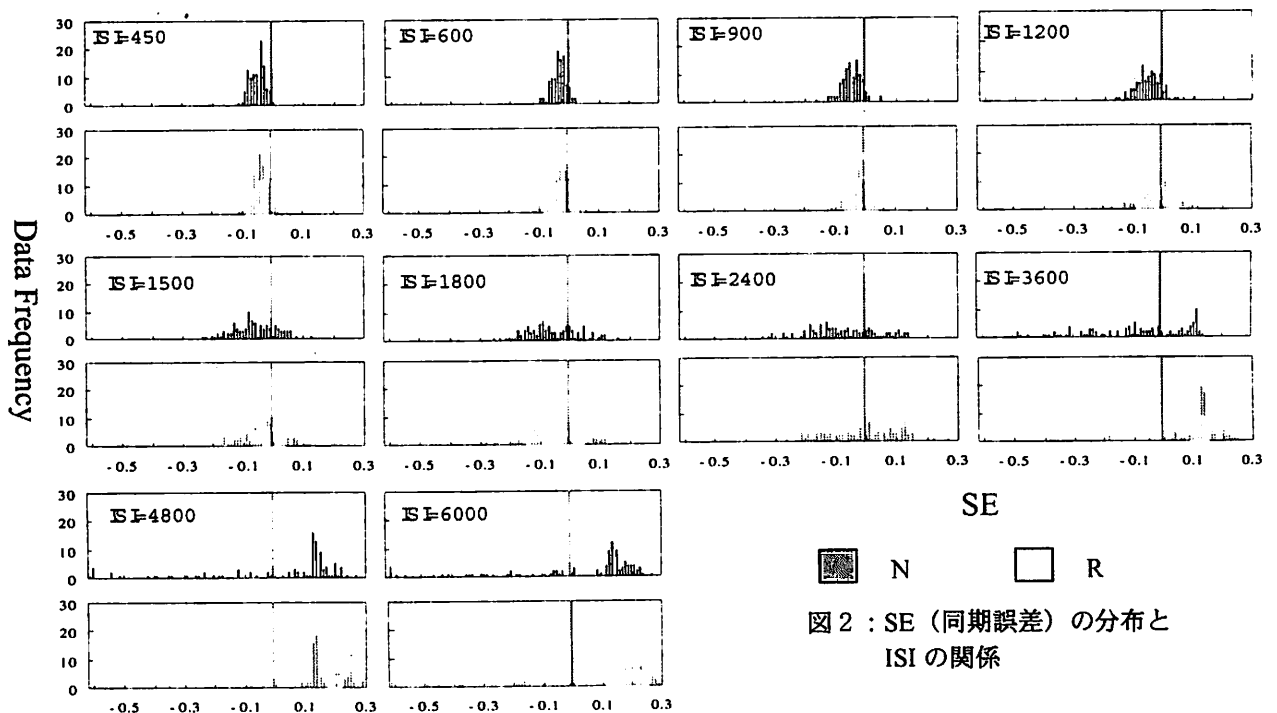


図 2 : SE (同期誤差) の分布と ISI の関係

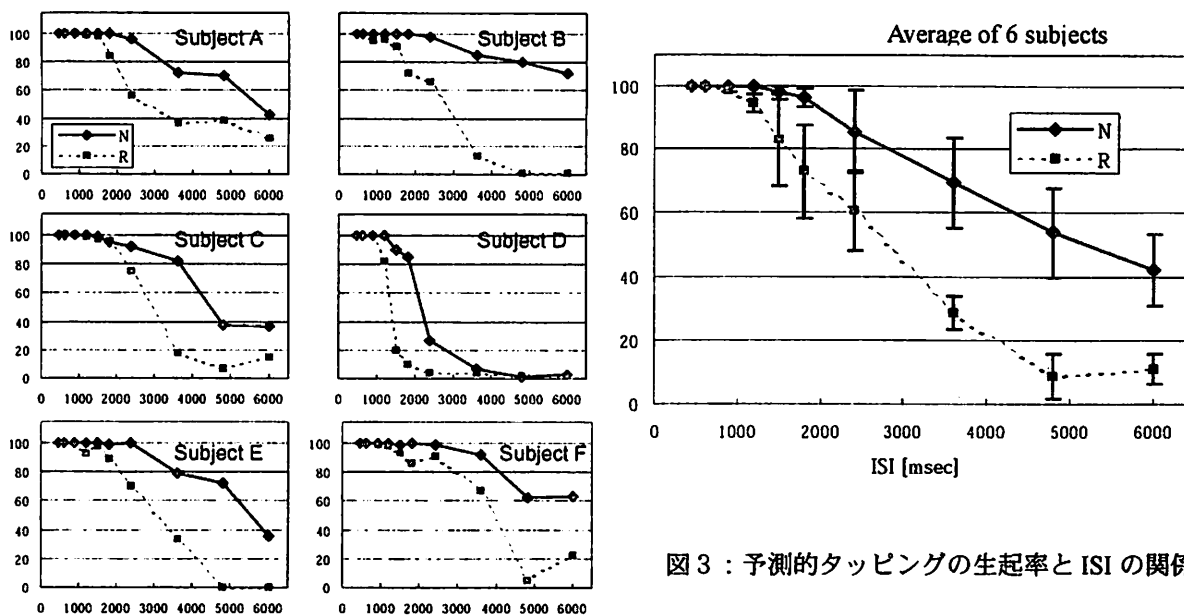


図3：予測的タッピングの生起率とISIの関係

表1には、N・R条件間で行なった、予測的タッピング生起率の被験者間平均に関するt検定の結果を示した。N条件とR条件で予測的タッピングの生起率に差が見られなかったISIの範囲は、本の黙読課題（二次課題）による注意の阻害の影響を受けなかったタッピングに対応している。一方、N・R条件間で差が見られたISIの範囲では、タッピング課題の遂行に注意が影響を与えていたと考えられる。このように6sec以下の音刺激周期に対する同期タッピングは、被験者の注意に影響を受けるものとそうでないものに分類されることが明らかとなった。注意の影響を受けないタッピングが行なわれる上限は、個人差があるもののISIで1200～1800msの範囲であった。

また、注意の影響を受けるISIにおいては、二次課題としての黙読課題の影響で反応的タッピングの生起率は増加したものの、すべてが反応的になったわけではなかった。このことは、この範囲のISIにおいてタッピング課題と黙読課題は、注意資源の消費において互いに競合しその処理効率が決定されるトレードオフの関係にあったことを示している。これは、当初に仮定した“注意の容量仮説”に適合する結果である。

4.3 SEの平均値およびSE/ISIの平均値

あるISIを境界としてタイミングの制御機構が異なることは、SEをISI間で比較することによっても明らかになる。予測的タッピングだけを取り出し、SEの値およびSEを各ISIで割った値の平均値を被験者ごとに算出して、図4a, bに被験者6人についての平均値を示した。これらのデータの特徴は、予測的タッピングだけに限定すれば、N・R条件によらず、SEあるいはSE/ISIが一定となるようなISIの範囲が存在することである。SEの平均値は、450～1800msの範囲でほぼ一定の値をとり、それ以上では負が大きくなるのがわかる。一方SE/ISIの平均値は、1800msより大きいISIにおいてほぼ一定の値をとっている。

これらの結果は、各被験者の予測的タイミング制御のメカニズムが、1800ms付近を境に異なっていることを示唆している。450～1800ms程度の比較的短いISIでのタッピングでは、被験者のタイミング制御においてISIの大きさに関する情報は重要ではないといえる。一方、1800～3600ms程度のISIで

表1：予測的タッピングの生起率の検定 (* p<0.05, # 0.05≤p<0.1)

ISI [ms]	N - R
450	
600	
900	
1200	*
1500	
1800	#
2400	#
3600	*
4800	*
6000	*

は、Negative Asynchrony の大きさが ISI でスケールされて表されるといえる。このことは、1800ms より大きい時間間隔の予測においても、ある規則性を持った予測機構が存在することを示唆している。少なくとも 1800~3600ms でのタッピングが、それ以下の 450~1800ms 程度の ISI でのタッピングと、タイミング制御機構において異なっていることは明白である。

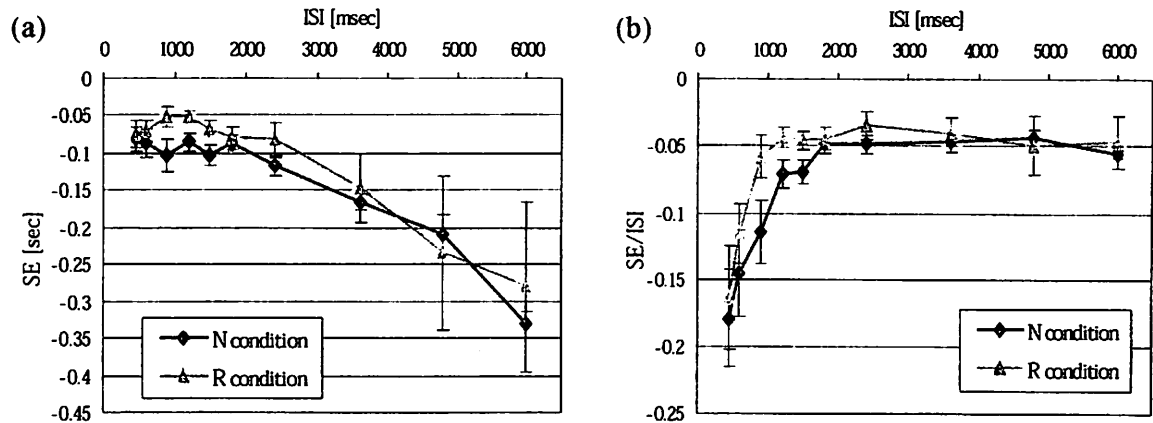


図4： SE および SE/ISI と ISI の関係

4. 4 SE と ITI の自己相関係数

短い ISI と長い ISI で異なるタイミング制御機構が存在することを示す結果は、タッピングの時系列データの解析からも得られている。図 5 a は、N 条件において連続する 100 個の SE 値について、ラグ 1 の自己相関係数を求めて ISI ごとにプロットしたものである。6 人の被験者の平均値と、その標準誤差が示されている。その結果 450~1500ms 程度までの ISI で 0.3 を越える強い正の相関をとっており、この範囲の ISI におけるタッピングは、SE に関してフィードフォワード的に運動を生成していたことを示唆している。図 4 a において 1800ms 以下の ISI で SE の大きさが ISI に依存しなかったのは、このようなフィードフォワード的なタイミング制御によるものではないかと考えられる。

図 5 b は、N 条件において連続する 100 個の ITI (Inter Tap-onset Interval, 連続する 2 つのタッピング間の時間差) 値について、ラグ 1 の自己相関係数を求めて ISI ごとにプロットしたものである。その結果、600ms という短い ISI では相関が 0 に近くなるが、1800ms 以上の ISI では -0.3 よりも小さい強い負の相関をとっていることがわかる。これは 1800ms を越える範囲では、ITI についてのフィードバック処理が強くなり、それによってタイミングを調整していることを強く予想させる。図 4 b において、1800ms 以上の ISI で SE/ISI の値が一定であったことは、このような刺激の周期に関する情報をフィードバック処理する機構に起因するものと考えられる。

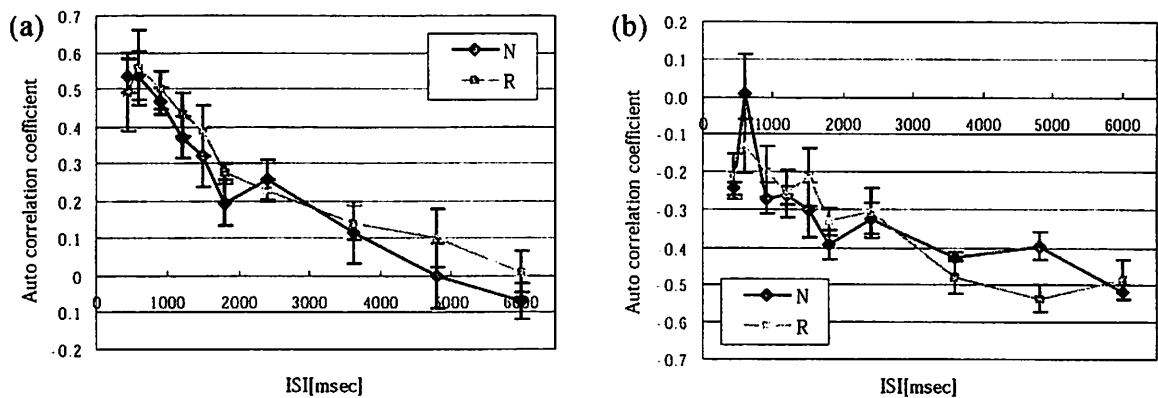


図5： SE および ITI の自己相関係数(lag=1)

5 考察

本研究では、「間」の創出機構を明らかにするために、予測的なタイミング制御に対する注意からの影響を調べた。具体的には同期タッピング課題と心理的負荷を要求する課題の干渉作用を解析した。その結果得られた知見はつぎのようなものであった。

450~1800ms程度のISIでは、二次課題の遂行による注意資源の減少が、Negative Asynchronyの生起率に影響を与えなかった。当初に仮定した注意の容量モデルによれば、同期タッピング課題と二次課題の同時遂行は、両者が必要とする注意資源が限界容量の範囲内である場合に可能であった。ここで、黙読課題の正答率が90%程度であったという事実を考慮すれば、黙読課題に必要とされる注意資源が限界容量に近かったことを示している。それにも関わらずタッピング課題が影響を受けなかったという結果は、この範囲のISIでは注意資源に依存しない自動的なタイミング制御機構が働いていたことを意味している。さらに、自己相関係数の解析より、この範囲のISIではタッピングがフィードフォワード的に制御されている可能性も示唆された。

1800ms程度以上のISIでは、同期タッピング課題は二次課題の遂行による注意資源の減少の影響を大きく受けていた。ただし、黙読課題の影響で反応的タッピングの生起率は増加したものの、全てのタッピングが反応的になったわけではなかった。このことは、この範囲のISIにおいてタッピング課題と黙読課題は、注意資源の消費において互いに競合しその処理効率が決定されるトレードオフの関係にあったことを示している。さらに、ITIの自己相関係数の解析より、この範囲のISIではITIについてのフィードバック的な処理が行なわれ、タイミング制御している可能性も示唆された。したがって、1800ms以上のISIでSE/ISIの値が一定であったことは、このような刺激の周期に関する情報の保持とそれに基づくフィードバック処理機構の存在を示唆するものである。

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」の創出について、タイミング予測機構との関係から心理学的解析を進めた。その結果、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初めて明らかにしたのである。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。したがって「間」の創出とは、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示された。今後は、この二重化された機構のインタラクションに基づく「間」の創出過程の解析を進めることになる。

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[3,4]。本研究において明らかにされた二重化されたタイミング予測機構において、注意の影響を受ける予測機構を明在性に、注意の影響を受けない自動的な予測機構を暗在性に対応させることが可能であれば、それらの相互関係の解析を進めることによって、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計測手法の確立を行い、そのモデルの構築と共創型インタフェースの設計論の確立へ進みたいと考えている。

参考文献

- [1] Mates, J., Radil, T., Mueler, U. & Poppel, E. Temporal Integration in Sensorimotor Synchronization, *Journal of Cognitive Neuroscience* 6, 332-340 (1994)
- [2] Kahnemann, D. Attention and efforts (Prentice-Hall, Engelwood Cliffs, 1973)
- [3] 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, NO.11, pp.1087-1096 (2001)

[4] 三宅美博, 場と共創 (分担: "コミュニカビリティと共生成" 第4章 pp.339-397), NTT 出版, 東京 (2000)

研究成果

研究発表

- 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.
- 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.
- 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, 2003.
- Miyake, Y., Onishi, Y. & Pöppel, E.: "Dual Anticipation Timing Mechanism in Synchronous Tapping", Proc. of 2002 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 2002), Hammamet, Tunisia, MP2J1 pp.1-8, 2002.
- Miyake, Y.: "Two Modes of Anticipation in Sensori-Motor Synchronization", Proc. of SICE Annual Conference 2002 (SICE2002), Osaka, Japan, 2925-2930, 2002.
- Takano, K. & Miyake, Y.: "Identification of Temporal Sequence in Synchronization Task", Proc. of SICE Annual Conference 2002 (SICE2002), Osaka, Japan, 2974-2977, 2002.
- Muto, T. & Miyake, Y.: "Analysis of the Co-emergence Process on the Human-Human Cooperation", Proc. of 2002 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 2002), Hammamet, Tunisia, MP1J2 pp.1-6, 2002.
- Muto, T. & Miyake, Y.: "Analysis of the Co-emergence Process on the Human-Human Cooperation", Proc. of 2002 IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN2002), Berlin, Germany, 65-70, 2002.
- Muto, T. & Miyake, Y.: "Analysis of Two Kind of Control Dynamics on Cooperative Walk", Proc. of SICE Annual Conference 2002 (SICE2002), Osaka, Japan, 2080-2083, 2002.
- Shimogama, M. & Miyake, Y.: "A Machine embedded in Sensory-Motor Coupling of Human -- Emergence of Subjective Time ", --Proc. of SICE Annual Conference 2002 (SICE2002), Osaka, Japan, 2084-2087, 2002.
- Li, K. & Miyake, Y.: "Dynamics of the Duality Model in Two Agents System", Proc. of SICE Annual Conference 2002 (SICE2002), Osaka, Japan, 2931-2936, 2002.
- 三宅美博: "共創システム", 情報処理学会・知能と複雑系研究会資料, Vol. 130-8, pp. 43-48, 2002.
- Miyake, Y.: "Co-creation System", SICE 第27回システム工学部会研究会資料, pp.17-20, 2002.
- Miyake, Y.: "'Walk-Mate' as a Co-creative Interface", Demonstration Booklet of The First International Workshop on Man-Machine Symbiotic Systems (MMS-WS2002), Kyoto, Japan, p.2, 2002.
- Miyake, Y.: "Co-creation Technology (Invited Lecture)", 5th Parmenides Workshop on Thinking and Consciousness, Elba, Italy, 2002.
- 三宅美博: "共創インタフェースと「間」(招待講演)", 人体科学会・第12回大会, 2002.